

L'archéologie africaine et ses techniques procédés de datation

Z. Iskander

Lorsqu'il découvre un artefact, l'archéologue commence généralement son investigation au niveau purement archéologique; il enregistre la couche dans laquelle l'échantillon a été trouvé, déchiffre éventuellement le texte qui l'accompagnait, en décrit la forme, évalue ses dimensions, etc. Les données ainsi obtenues seront alors étudiées sur le plan de la stratigraphie, de la philologie et de la typologie; il en résultera des informations archéologiques importantes quant à l'ancienneté, aux origines, etc. Toutefois, dans la plupart des cas, il se trouve dans l'incapacité d'obtenir les données qui apporteraient une réponse à ses questions ou l'aideraient à établir les conclusions souhaitables. Aussi doit-il faire appel à d'autres disciplines pour compléter sa recherche scientifique. Une telle investigation est censée lui fournir les informations requises sur la matière de l'objet, son origine, la technique de sa fabrication, son âge, l'usage auquel il était destiné, etc. Il convient, cependant, de souligner que ces recherches ne sont guère qu'un angle nouveau sous lequel l'archéologue envisage l'étude de tel problème particulier; les données scientifiques doivent former un tout avec les considérations d'ordre stylistique, philologique et stratigraphique¹.

L'étude des couches géologiques sous-jacentes, à l'exclusion des fouilles, la conservation des monuments et des vestiges découverts sont d'autres

1. HALL E.T., 1970, pp. 135-141.

domaines dans lesquels les techniques scientifiques peuvent également venir en aide à l'archéologie.

Les techniques scientifiques utilisées par l'archéologie ont le mérite d'être universelles. Elles s'appliquent en Afrique exactement comme en Europe, en Asie ou en Amérique, tout en recourant parfois à des méthodes spécifiques. C'est là un vaste sujet. Aussi, traiterons-nous les points suivants dans leur ensemble sans entrer dans de trop nombreux détails de laboratoire :

- Techniques analytiques employées en archéométrie.
- Objectifs de la recherche et de l'analyse archéométriques.
- Techniques de datation.
- Techniques utilisées par la recherche archéologique.
- Techniques de conservation.

Techniques analytiques en archéométrie

Les techniques d'analyse se sont tellement développées qu'il est parfois difficile d'élire celle qu'il conviendra d'utiliser sur tel échantillon pour obtenir le renseignement recherché. Les paragraphes qui suivent considèrent tous les aspects du problème.

Choix de la méthode d'analyse

Les échantillons archéologiques sont doublement précieux. En effet, la quantité d'échantillons disponibles est généralement si restreinte qu'elle suffit à peine aux besoins d'une analyse complète, et il se peut qu'on ne puisse en assurer le remplacement si on l'utilise en totalité. D'autre part, il convient de conserver l'échantillon au moins en partie aux fins de références ou d'expositions futures. C'est donc avec le plus grand soin qu'on procédera aux analyses archéométriques afin d'en obtenir les informations les plus importantes. Les critères qui dictent le choix de telle ou telle technique peuvent être résumés comme suit² :

Importance de l'échantillonnage disponible

Lorsque la collection d'échantillons disponible est suffisamment importante, on procédera de préférence à l'analyse chimique en milieu aqueux pour déterminer le pourcentage des principaux constituants. L'analyse atomique peut être utilisée pour établir le taux des métaux alcalins tels le sodium, le potassium et le lithium. Pour les éléments et les composés impondérables (traces) les analyses par fluorescence ou diffraction des rayons X sont préférables bien que leurs résultats comportent une marge d'erreur de 10 à 20 %.

Si l'on ne dispose que d'une quantité minimale d'échantillons et qu'il soit nécessaire d'analyser plusieurs éléments, il conviendra de recourir à la

2. HALL E.T., *op. cit.*

spectrophotométrie ou à la diffraction des rayons X. Lorsqu'il est impossible à l'archéologue de fournir un spécimen, si petit soit-il, la substance à analyser sera traitée par la spectrométrie ou la fluorescence, si son volume et sa forme en permettent l'utilisation.

Variété des substances analysables

La variété des vestiges archéologiques est considérable. Certains, tels les aliments, les onguents, les résines, les huiles, les cires, etc., sont plus ou moins organiques. D'autres — les métaux, les pigments, les céramiques, le verre, le plâtre, etc. — sont inorganiques. Les substances organiques sont généralement soumises au traitement par le feu, à la saponification, à la dissolution, aux radiations infrarouges, aux analyses thermiques et chromatographiques; elles sont soumises aux analyses normales en milieu aqueux, à la spectrométrie, à la fluorescence et à la diffraction de rayons X ou encore à l'activation au moyen de neutrons, selon le type d'information recherché.

Type d'information recherché

Afin d'économiser le temps et les frais, on procédera à l'analyse conformément à un programme établi avec l'archéologue en vue d'obtenir les réponses à des questions spécifiques. Ainsi, le bronze et le cuivre anciens ont même apparence. Seul l'étain permet de les différencier: on traite généralement une fraction de l'échantillon avec une solution d'acide nitrique concentré; le précipité d'acide métastannique blanchâtre qui en résulte est ensuite dilué avec de l'eau distillée. Ce test simple est à la portée de tout archéologue. De même, les minerais de plomb servaient jadis en Egypte à la vitrification des céramiques. Aussi, le plomb suffit-il à déterminer approximativement la date de fabrication de l'objet vitrifié.

Présentation des résultats

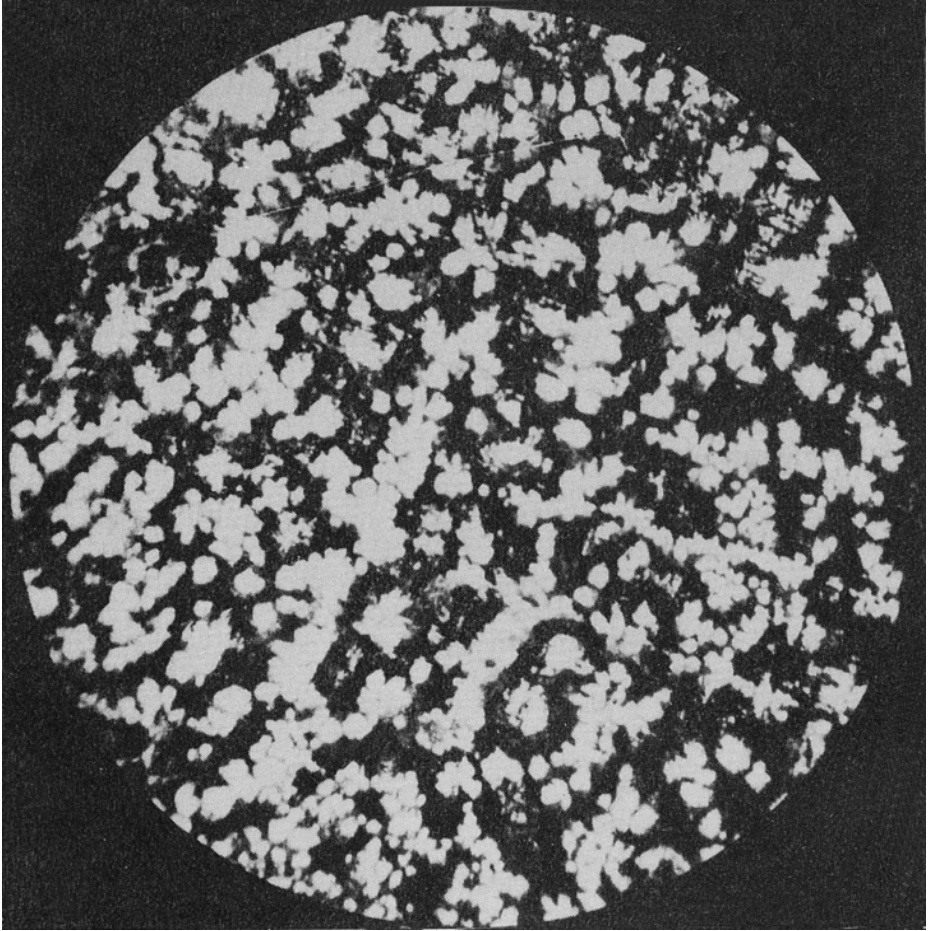
Les archéologues appelés à étudier les résultats des examens scientifiques et à les utiliser dans leurs commentaires et leurs conclusions sont eux-mêmes rarement des scientifiques. Il convient donc de leur présenter ces résultats sous une forme aisément compréhensible. Ainsi l'évaluation en sous-multiples du gramme de tel ou tel élément d'un spécimen de 100 grammes devrait-elle faire place à la présentation de tous les résultats conformément à une notion universellement assimilable: celle de pourcentages. Cette substitution aurait le mérite de faciliter la comparaison entre résultats de plusieurs laboratoires.

Méthodes d'examen et d'analyse

Dans le cadre de ces considérations, nous allons indiquer ci-après les plus importants procédés d'analyse utilisés en archéométrie.

Examen microscopique

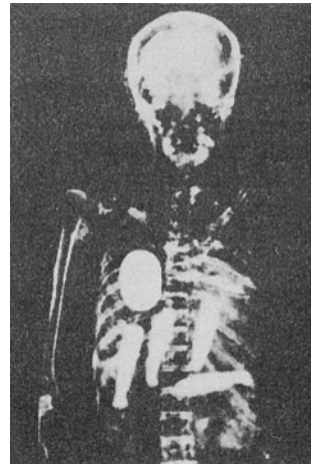
Un examen à l'aide d'un simple loupe (10 x ou 20 x) est souvent fort utile pour concevoir une première impression d'un artefact ou d'un échantillon ancien. Une loupe binoculaire dotée d'un grossissement de 7 x, 10 x, ou 20 x, et d'un champ étendu entre objectif et plan focal est encore préférable. Ce



1

1. *Microphotographie d'une section d'un grappin de cuivre provenant du bateau de Chéops à Gizeh.*

2. *Reproduction d'une radiographie de la poitrine (face) de la momie de la reine Nedjemet (XXI^e dynastie), Musée du Caire.*



2

dispositif permet l'examen de cavités profondes dans lesquelles une loupe ordinaire ne pourrait entrer.

Des données plus précises s'obtiennent à l'aide d'un microscope composé comportant une lentille de 100, 200, 400 ou 1250 x et baignant dans l'huile. L'examen au microscope peut être pratiqué aux fins suivantes :

— *identification* : dans la plupart des cas, il est possible d'identifier un échantillon donné (à l'état pur ou composé d'éléments hétérogènes) en étudiant au microscope la texture ou les particularités cristallines de ses composants ;

— *analyse qualitative* : les techniques actuelles permettent la précipitation, la dissolution, l'observation de l'évolution gazeuse et d'autres procédés applicables à un fragment infime de l'échantillon³. A titre d'exemple, si l'on humidifie le fragment d'un échantillon placé sur une plaquette de verre, il s'ensuivra ou non une dissolution. A la solution éventuelle, on ajoute une goutte de nitrate d'argent ; s'il apparaît un précipité blanchâtre insoluble dans l'acide nitrique, on peut en déduire la présence d'un anion de chlorure ;

— *analyse quantitative* : les méthodes microscopiques prennent toute leur valeur dans les analyses quantitatives de combinaisons hétérogènes complexes difficiles à opérer par les procédés chimiques ordinaires⁴. Elles permettent de déterminer le nombre et la taille des différents composants. Pour peu que soit connue la densité de chacun d'entre eux, leurs pourcentages volumétriques peuvent être alors convertis en pourcentages pondéraux⁵.

Radiographie

La radiographie est très utile dans l'examen des œuvres d'art ; elle permet de déceler la présence de corps étrangers à l'intérieur d'une momie encore enveloppée de ses bandelettes, ou celle d'incrustations décoratives sous les couches de baumes, etc. De tels renseignements aident à déterminer la technique à suivre lors de l'enlèvement des bandelettes ; ils sont précieux pour la conservation des artefacts métalliques, et servent au cours des études scientifiques et archéologiques. Ainsi, au Musée du Caire, la radiographie des momies royales a révélé que, même parmi celles dont on avait enlevé les bandelettes, certaines contenaient encore des bijoux que d'épaisses couches de résine avaient dissimulés jusque-là aux regards des chercheurs⁶.

Détermination du poids spécifique

Dans l'Antiquité, l'or contenait généralement de l'argent ou du cuivre. Les objets d'or sont si précieux que, la plupart du temps, aucune parcelle, si minime soit-elle, ne saurait être distraite en vue d'une analyse. Aussi Caley a-t-il pensé à utiliser à leur égard la détermination du poids spécifique ; le procédé ne comporte aucun risque de détérioration et permet de découvrir le taux d'or fin utilisé dans les artefacts d'or⁷. Il est fort simple et a pour

3. EWING G., 1954, p. 411.

4. CHAMOT E.M. et MASON C.W., 1938, p. 431.

5. KOLTHOFF I.M., SANDELL E.B., MEEHAN E.J. et BRUCKENSTEIN S., 1969.

6. HALPERN J.W., HARRIS J.E. et BARNES C, Juillet 1971, p. 18.

7. CALEY E.R., 1949, pp. 73-82.

base le principe d'Archimède: le poids d'un objet étant à l'air libre de W grammes et dans l'eau de X g, son poids spécifique sera égal à:

$$\frac{W}{W-X}$$

Le poids spécifique de l'or (19,3) étant à peu près double de celui de l'argent (10,5) ou du cuivre (8,9), la présence de faibles éléments de cuivre ou d'argent est aisément décelable. En supposant le platine absent, le composant de l'alliage (argent ou cuivre) connu et l'impossibilité d'une contraction au cours de l'alliage, la marge d'erreur prévisible dans le calcul du taux de l'or fin est de l'ordre de 1%.

Analyse chimique normale en milieu aqueux

Cette technique est indispensable, en archéologie, à l'étude de la substance d'un artefact de même qu'au choix du meilleur mode de conservation. Elle est utilisée pour l'analyse qualitative et quantitative des mortiers, plâtres, vestiges corrodés d'artefacts métalliques, débris de nourriture, cosmétiques, déchets de baumes et produits analogues, etc.

La description des techniques utilisées au cours de telles analyses n'a pas sa place dans ce chapitre. Elles sont familières à tous les chimistes experts en archéologie. On en trouvera l'exposé détaillé dans les manuels de chimie analytique tels que ceux de Kolthoff et ses co-auteurs⁸ pour les matières inorganiques et dans les travaux d'Iskander⁹ et Stross¹⁰ pour les matières organiques et inorganiques. « Des objets en fer découverts à Niani (Guinée) datant du XIII^e au XV^e siècle ont été soumis à une analyse chimique qui a révélé qu'ils contenaient du cuivre, du phosphore, du nickel, du tungstène, du titane et du molybdène, impuretés probablement présentes dans les minerais utilisés. »¹¹

Spectrophotométrie

Cette technique a été utilisée pour l'analyse de vestiges anciens tels que les bronzes, la céramique, le mortier, les colorants, etc.

Divers facteurs rendent la spectrophotométrie particulièrement avantageuse par rapport à d'autres méthodes d'analyses de ces vestiges. Elle présente une sensibilité suffisante. Parallèlement, elle permet d'évaluer des proportions élevées (jusqu'à 20%) de la plupart des éléments. En outre, tous les éléments présents dans l'échantillon peuvent être décelés en enregistrant les raies spectrales sur une plaque photographique au cours d'une même émission. Il en résulte un document auquel il est possible de se référer ultérieurement. Une nouvelle variante de la spectrophotométrie est offerte par le Laser Milliprobe spectrometer¹². « L'analyse spectrographique de tous les

8. KOLTHOFF I.M., SANDELL E.B., MEEHAN E.J. et BRUCKENSTEIN S., 1969.

9. FARAG N. et ISKANDER Z., 1971, pp. 111-115; ISKANDER Z., pp. 59-71, *le Monastère de Phoebammon dans la Thebaïde*, vol. III, édité par BACHATLY, Le Caire, Société d'archéologie copte, 1961; ISKANDER Z. et SHAHEEN A.E., 1964, pp. 197-208; ZAKI A. et ISKANDER Z., 1942, pp. 295-313.

10. STROSS F.H. et O'DONNALL, 1972, pp. 1-16.

11. MUZUR A. et NOSEK E., 1974, p. 96.

12. HALL E.T., 1970, pp. 135-141.

« bronzes » nigériens naturalistes d'Ife a montré que ces objets ne sont pas en bronze mais en laiton. »¹³

Analyse par absorption atomique

Cette méthode convient parfaitement aux échantillons de matière inorganique (métaux, ciments, alliages, verre, glaçure, sels, etc.). En archéométrie, elle présente les avantages suivants : un degré élevé d'exactitude (environ 1 % d'erreur) peut être atteint en utilisant des échantillons de 5 à 10 mg ; il est possible de situer sur un même spécimen des éléments majeurs et mineurs ou simplement des traces ; enfin, cette technique est d'un usage courant. Les comparaisons entre les résultats de différents laboratoires en sont facilitées et les causes éventuelles d'erreurs expérimentales sont plus aisément contrôlables¹⁴.

Fluorescence des rayons X

L'excitation d'un spécimen au moyen des rayons X est une méthode d'analyse fort utile. Le principe est le suivant : le bombardement d'un atome par des rayons à haute fréquence permet d'arracher un électron à une orbite interne, le vide créé sera comblé par un électron en provenance d'une orbite externe. La variation d'énergie entre les niveaux supérieur et inférieur provient de rayons secondaires ou fluorescents, caractéristiques des éléments composant le spécimen¹⁵.

La force de pénétration des rayons X étant limitée, cette technique n'est utilisable que pour la surface des objets ; elle n'est donc applicable qu'à l'analyse de vestiges inorganiques tels le verre, la faïence et la poterie vitrifiée, l'obsidienne et la plupart des pierres. Toutefois, les objets métalliques anciens ont souffert de l'usure du temps ; or le métal vil qu'ils contiennent tend à affleurer. Aussi, l'analyse de leur seule surface par ce procédé risque-t-elle d'offrir des résultats très différents de ceux que révélerait une analyse de l'objet dans son entier¹⁶.

Analyse par activation de neutrons

Cette technique consiste en l'irradiation par neutrons lents (ou thermiques) d'un groupe d'échantillons et de produits chimiques standard placé dans un réacteur nucléaire. Certains des isotopes qui en résulteront auront une existence suffisante pour émettre des rayons gamma. Dès lors que chaque radio-isotope émet des rayons gamma dont la longueur d'onde est caractéristique de chacun d'eux, l'analyse de cette longueur d'onde permet d'identifier les éléments composant le spécimen et de déterminer la concentration de ceux-ci, qu'il s'agisse des éléments majeurs ou de simples traces.

Beaucoup plus grande que celle des rayons X, la force de pénétration des neutrons et des rayons gamma permet donc, sur un échantillon donné, de s'attaquer à une épaisseur plus importante. Il en résulte que l'affleurement du cuivre en surface peut être ignoré dans les métaux¹⁷.

13. WILLETT F., 1964, pp. 81-83.

14. WERNER A.E.A., 1970, pp. 179-185.

15. KOLTHOFF I.M., SANDEL E.B., MEEHAN E.J. et BRUCKENSTEIN S., 1969.

16. HALL E.T., 1970, pp. 135-141.

17. HALL E.T., 1970, pp. 135-141.

Au cours de telles analyses, il convient de veiller, lorsque l'échantillon examiné doit réintégrer le musée, à ce que la radioactivité résiduelle retombe à un niveau inoffensif dans un laps de temps raisonnable. A titre d'exemple, l'isotope de l'argent radioactif possède une survie de 225 jours; l'irradiation trop forte d'un objet d'argent empêcherait le retour de celui-ci au musée d'origine avant des centaines d'années¹⁸. De tels cas exigent que l'argent soit prélevé sur un spécimen donné par frottement à l'aide d'un petit disque de quartz rugueux. Ce quartz subit alors l'irradiation à l'intérieur du réacteur et l'analyse recherche l'argent, l'or, le cuivre, l'antimoine et l'arsenic habituels. Cette technique a été récemment appliquée, dans le cadre de l'archéologie africaine, à l'étude des perles de verre soumises à deux activations par neutron. Le premier bombardement a peu duré et l'on a aussitôt opéré la recherche des isotopes de courte période dans les perles; le second, intense et continu, pendant huit heures. Les perles ont été mises de côté, quelques jours, puis soumises à la recherche des isotopes de période moyenne; puis stockées à nouveau et testées pour les isotopes de longue période¹⁹.

Sayre et Meyers ont publié une étude des nombreuses applications de cette technique en archéologie²⁰.

Objectifs de l'analyse archéométrique

Les principaux buts de la recherche scientifique et de l'analyse sont, en archéométrie, les suivants:

L'identification rigoureuse des objets

Il est indispensable que l'identification des vestiges archéologiques soit effectuée scrupuleusement; il importe que l'archéologue puisse en donner une description exacte dans les publications archéologiques et les guides de musées. L'identification précise de la substance des artefacts n'est pas moins importante, car de la nature véritable des substances examinées dépend généralement la portée des observations correspondantes. Les erreurs sont, malheureusement, loin de faire défaut dans la documentation archéologique antérieure; elles ont créé beaucoup de confusion. Le cuivre est parfois confondu avec le bronze, bien que la découverte et l'utilisation du bronze impliquent l'apparition d'une certaine révolution culturelle. Le bronze est, de son côté, parfois pris pour du laiton, ce qui peut fausser l'évaluation de l'ancienneté d'un objet; les premières productions de laiton remontent, en effet, à peu près au milieu du 1^{er} siècle avant notre ère tandis que le bronze était connu et utilisé presque vingt siècles auparavant²¹.

18. HALL E.T., 1970, pp. 135-141.

19. DAVISON C.C., 1973, pp. 73-74.

20. SAYRE E.V. et MEYERS P., déc. 1971, pp. 115-150.

21. CALEY E.R., 1948, pp. 1-8.

La plupart des erreurs d'identification provenant d'appréciations visuelles défectueuses, il convient de souligner que, pour éviter tout risque d'interprétation erronée, l'identification des vestiges archéologiques doit être établie à l'aide d'analyses chimiques ou fondées sur la diffraction des rayons X.

Traduction de mots anciens inconnus

Il arrive qu'une identification exacte permette de traduire des noms inconnus. Ainsi, à Saqqara, en Egypte, on a découvert dans la sépulture du roi Hor-Aha (I^{re} dynastie, environ – 3100), deux récipients de céramique. Sur chacun d'eux figuraient des hiéroglyphes correspondant au mot « seret » dont on ignorait le sens. L'analyse chimique a révélé que ces deux pots contenaient du fromage; on en déduisit que *seret* signifiait fromage²². Autre exemple: on a trouvé sur certaines statues de pierre des hiéroglyphes formant le mot « bekhen ». La pierre ayant été, en certains cas, reconnue pour du « grey-wacke » (schiste), mots qu'on retrouvait dans des textes relatifs au Ouadi-el-Hammamat²³ on en a conclu que *bekhen* était très probablement le schiste de Ouadi-el-Hammamat.

Détection de l'origine des vestiges archéologiques

La présence, en un site archéologique donné, de nombreux spécimens d'une substance d'origine étrangère paraît une indication manifeste de l'importation de cette matière par des voies artisanales ou commerciales. Lorsqu'il est possible de localiser les sources, le cheminement ne tarde pas à être reconstitué. On sait, par exemple, que l'on ne trouve pas d'obsidienne en Egypte; elle y était pourtant utilisée dès l'époque prédynastique (avant 3100 avant notre ère).

L'obsidienne de certains objets de cette époque a été examinée et comparée avec celle que produisent les pays voisins. Leurs caractéristiques s'apparentaient de très près à celles de l'obsidienne d'Ethiopie. Il était donc évident qu'ils avaient été importés de cette région et que des relations commerciales existaient de longue date entre les deux pays²⁴.

Dans la céramique, l'identification des « traces » grâce à l'activation par les neutrons ou à la fluorescence des rayons X permet l'étude des routes commerciales tant locales qu'internationales²⁵. Des impuretés à l'état de traces dans le minerai de cuivre ou dans des artefacts de même métal peuvent aider à relier l'artefact au minerai ayant servi à sa fabrication²⁶.

La découverte de nickel dans un artefact de fer ancien permet de savoir si ce fer provient d'un météorite ou s'il a été manufacturé — le fer de météorite contenant toujours 4 à 20 % de nickel.

22. ZAKI A. et ISKANDER Z., 1942, pp. 295-313.

23. LUCAS A., p. 416, pp. 419-420.

24. LUCAS A., 1962, p. 416, pp. 419-420.

25. PERLMAN I. et ISARO F., 1969, pp. 21-52.

26. FIELDS P.R., MILSTED J., HENRICKSEN E. et RAMETTE R.W., 1971, pp. 131-143.

Recourant à une émission spectroscopique, l'auteur a examiné le fameux poignard de Toutankhamon. Il a constaté que le fer de la lame contenait un pourcentage de nickel appréciable; le fer utilisé provenait donc d'un météorite.

Recherche de l'utilisation antérieure des objets examinés

Il est parfois difficile de retrouver à quel usage était destiné tel ou tel objet. Dans ce domaine, l'analyse chimique peut se révéler d'un grand secours. Ainsi, on a découvert en 1956 au Fayoum (Egypte), dans la tombe de Nefertah (env. -1800), une grande jarre d'albâtre contenant quelque 2,5 kg d'une étrange substance. L'analyse chimique révéla qu'il s'agissait d'un composé contenant principalement, en parties à peu près égales, 48,25 % de galène (sulfide de plomb naturel) et 51,6 % de résine. Cette composition n'ayant jamais été rencontrée auparavant, on se perdit en conjectures sur sa présence dans la tombe. Cependant, l'examen des prescriptions médicales du papyrus Ebers permit de retrouver, sous le n° 402, « un nouveau (remède) pour faire disparaître les taches blanches apparues sur les deux yeux: du kohl noir (galène) et du khet'wa (résine) finement pulvérisés seraient mis dans les deux yeux ». Ce texte et la composition chimique de la substance découverte dans la jarre révélaient que Nefertah souffrait probablement d'un leucome à l'un de ses yeux, peut-être aux deux. C'est pourquoi on l'avait dotée d'une quantité suffisante de ce médicament pour lui assurer la guérison²⁷.

Recherche des anciens procédés de fabrication

L'examen métallographique d'objets métalliques permet de retrouver les travaux et les industries chimiques des anciens. Les exemples suivants en offrent un aperçu:

Manufacture du bleu d'Egypte

Des spécimens de ce pigment bleu ont été soumis à des examens chimiques, microscopiques et à la diffraction des rayons X. On a été jusqu'à reproduire, expérimentalement, une « fritte »²⁸ bleue analogue. Ces différentes études révèlent qu'on obtenait ce bleu, dans l'antiquité, en chauffant à 840°C un mélange de sable ou quartz pulvérisé, de calcaire également pulvérisé, de malachite, et une coulée de sel ordinaire ou sel de soude²⁹.

Examen au microscope d'objets métalliques

L'examen métallographique d'objets métalliques permet d'indiquer s'ils ont été coulés ou martelés ou s'ils relèvent des deux techniques. L'examen d'un grappin de cuivre appartenant au bateau de Chéops, découvert en 1954

27. FARAG N. et ISKANDER Z., 1971, pp. 111-115.

28. Fritte: expression vieillie désignant le mélange de sable et de soude auquel on fait subir une demi-fusion, dans la fabrication du verre, de la céramique, etc (N.d.T.)

29. A. LUCAS, 1962, p. 416, pp. 419-420.

derrière la grande pyramide de Gizeh a fait ressortir les dendrites présentées par le métal; celui-ci avait donc été martelé³⁰.

Examen des déchets d'embaumement

L'examen des déchets d'embaumement découverts à Saqqara, Louxor et Mataria (Egypte) a montré qu'ils contenaient une faible proportion de savons d'acides gras solides résultant de la saponification des graisses corporelles sous l'action de la soude pendant la momification. On en a conclu que les substances avaient servi à remplir momentanément les cavités du corps avant sa déshydratation en une masse de natrum³¹ sur le lit de momification³².

Creusets de vitrification (ou de «frittage»)

Les recherches entreprises à Ouadi el-Natrum dans les ruines d'une verrerie montrent que le verre a été manufacturé en Egypte pendant la période romaine. On peut distinguer deux étapes. Au cours de la première, on obtient la vitrification dans un creuset spécial, le creuset de frittage³³ en portant un mélange de silice pure (quartz), de bicarbonate de calcium, de natrum ou de cendre végétale, ou des deux, à une température inférieure à 1100°C. L'argile de ce creuset était riche en sable et en paille hachée menu. Au four, cette argile permettait la cuisson d'une poterie extrêmement poreuse — qualité recherchée par le verrier de l'Antiquité — car elle lui permettait de libérer le bloc de frittage en brisant le creuset qui, partant, ne servait qu'une fois.

Au cours de la seconde étape, les verriers ont obtenu un verre de bonne qualité et de couleurs variées. Les «frittes» étaient pulvérisées jusqu'à ce qu'on ait atteint une poudre homogène; on les fractionnait en petites coulées. Certaines doses d'oxydes colorants, d'opacifiants ou de décolorants étaient ajoutées à chacune d'elles et la cuisson en était poussée jusqu'à complète fusion en vue d'obtenir la qualité de verre requise³⁴.

Tests d'authenticité

Pendant de nombreuses années, l'établissement de l'authenticité a dépendu des seuls critères historique et esthétique. Plus récemment, les immenses progrès de la recherche scientifique ont permis de juger avec plus d'assurance de l'authenticité d'un objet donné. Les techniques les plus sûres sont:

L'examen aux rayons ultra-violet

Ce procédé est particulièrement utile pour l'appréciation des ivoires et des marbres. Sous la lumière ultra-violette, les différentes qualités de marbre émettent des fluorescences différentes, et la surface des marbres anciens projette une couleur caractéristique bien éloignée de celle de calcites de même ordre mais plus récentes. De même, bien qu'elles ne soient plus

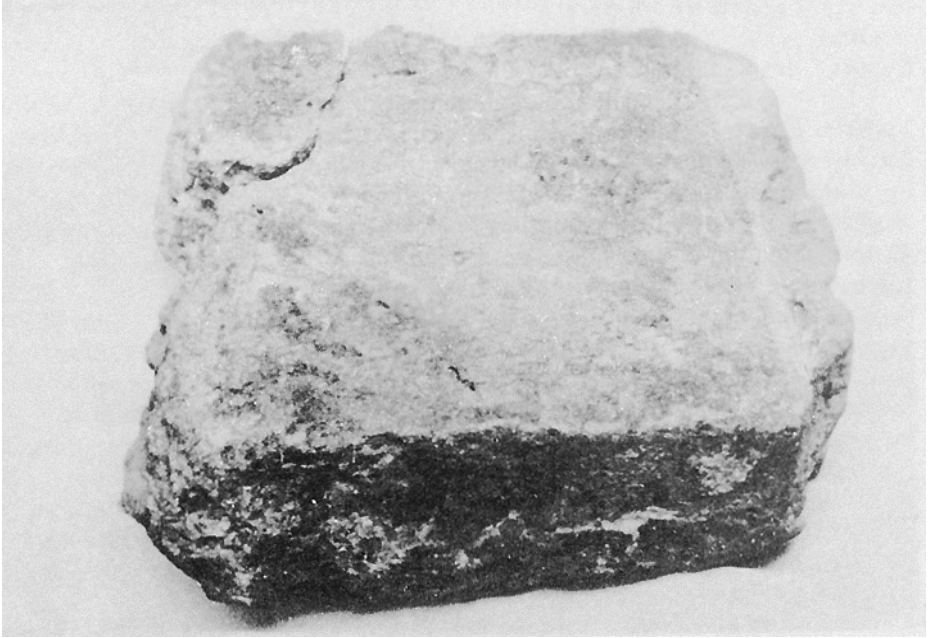
30. ISKANDER Z., 1960, pp. 29-61, 1^{re} partie.

31. Natrum: carbonate de sodium cristallisé.

32. ISKANDER Z. et SHAHEEN A.E., 1964, pp. 197-208.

33. Frittage: vitrification préparatoire destinée à éliminer les éléments volatils (N.d.T.).

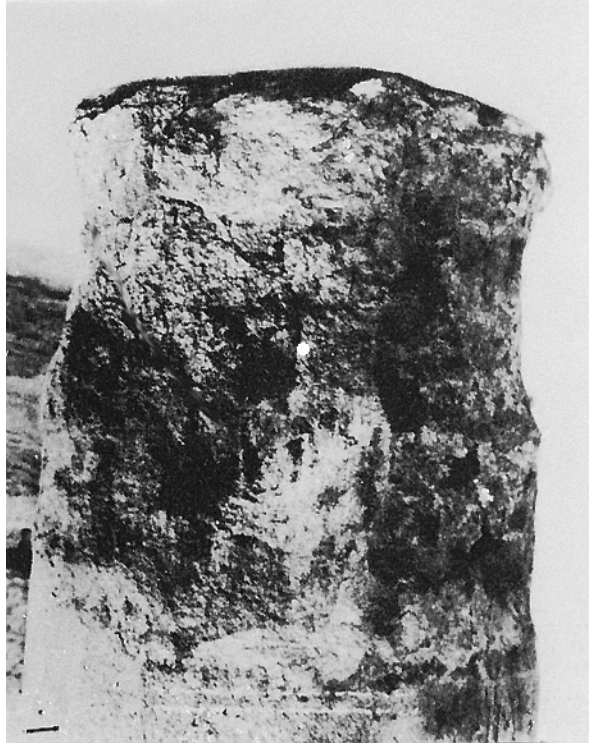
34. SALEH S.A., GEORGE A.W. et HELMI F.M., 1972, pp. 143-170.



1

1. Bloc de vitrification, montrant la surface supérieure plane, les parois latérales et une partie du creuset adhérent encore à la paroi de droite.

2. Base de l'une des colonnes de grès du temple de Bouhen. On notera l'effritement, dû à l'efflorescence, de la couche superficielle.



2

visibles à la lumière habituelle, les retouches ou réparations apportées à des objets d'ivoire ou de marbre, voire à des peintures, deviennent frappantes sous les radiations ultra-violettes. Rayons X et infra-rouges ne sont pas moins utiles pour repérer les faux³⁵.

L'examen de l'usure superficielle

En général, les métaux anciens se corrodent lentement; avec le temps, l'usure donne naissance à une pellicule homogène. Dans le cas d'objets métalliques falsifiés, un enduit artificiel passé à la surface est censé leur donner un cachet ancien. Il «tient» généralement fort mal et cède à des solvants tels que l'eau, l'alcool, l'acétone ou la pyridine. En outre, cette addition factice ne comporte le plus souvent qu'une seule couche et se distingue aisément de la pellicule naturelle qui, sur les objets de cuivre et de bronze, se dédouble généralement en un premier film interne et rouge d'oxyde de cuivre et un second, externe et vert, de carbonate, sulfate ou chlorate de ce même métal. Il est difficile de reproduire cette dissolution de telle sorte qu'elle puisse abuser le chimiste averti d'un musée archéologique.

Analyse de la substance de l'objet

L'analyse du grain de la faïence égyptienne antique illustre fort bien les mérites de cette technique. Alors que le grain de la faïence ancienne authentique est, en Egypte, composé de quartz vitrifié, celui des imitations modernes est généralement constitué d'argile, de kaolin ou de porcelaine. L'identification est donc rapide et sûre. Autre exemple: des procédés d'affinage adéquats ayant fait défaut aux techniques métallurgiques de l'Antiquité, les métaux anciens contiennent certaines impuretés — arsenic, nickel, manganèse, etc. Il suffit, par conséquent, de prélever sur l'artefact suspect un discret échantillon et de le soumettre à la fluorescence des rayons X ou à l'activation des neutrons: l'absence de ces impuretés à l'état de traces dévoilera très probablement la supercherie.

Identification, en peinture, des pigments et colorants

Les techniques microchimiques permettent d'identifier avec une certaine précision les pigments utilisés dans un tableau. Lorsque le pigment figure parmi les colorants de récente création, l'âge du tableau est contestable. A titre d'exemple, l'examen par Young d'un portrait de profil attribué à un peintre du XV^e siècle, a fait ressortir que sa pigmentation bleue était due à de l'outremer synthétique, dont la découverte et l'utilisation en tant que pigment ne dataient que du XIX^e siècle; quant à la blanche, elle provenait de l'oxyde de titane, inconnu avant 1920 dans le monde de la peinture. Ce portrait était donc un faux³⁶.

Examen de la patine et du poli superficiels

La plupart des pierres acquièrent, avec le temps, une patine superficielle: le vernis du désert. Ce phénomène est dû à l'affleurement progressif des

35. CALEY E.R., 1948, pp. 1-8.

36. YOUNG W.J., 1958, pp. 18-19.

sels de fer et de manganèse qui s'oxydent à la surface en constituant une sorte de patine ou d'épiderme. Formant corps avec la pierre, cette patine se confond avec la surface. Il est malaisé de l'éliminer, que ce soit par lavage avec un solvant neutre ou par raclage. Il n'en est que plus facile de distinguer une surface authentiquement ancienne d'une autre récemment taillée, même dotée d'une patine artificielle.

En dehors de la patine naturelle, les vestiges de sculpture et de polissage anciens offrent un autre moyen de juger de l'authenticité. Ces traces apparaissent encore, sous la patine superficielle de la pierre ou du métal, comme des lignes aux intersections irrégulières. Les peuples de l'Antiquité n'ayant disposé ni de rapes pour la sculpture ni de limes fines ou de toile émeri pour le ponçage, on les distingue sans peine des traits parallèles et réguliers, indices d'un polissage récent.

Epreuve de la thermoluminescence de la céramique

Tout autant que le sol dans lequel elle est enterrée, la céramique contient un pourcentage extrêmement faible d'éléments radioactifs. Ces éléments émettent des radiations dont, au cours des millénaires, les électrons s'accumulent dans la substance de la céramique. En portant celle-ci à une température supérieure à 500°C, les électrons accumulés donnent une thermoluminescence qui varie selon l'âge de la céramique. La thermoluminescence permet donc aux conservateurs de musées de juger en connaissance de cause de l'authenticité d'une poterie donnée. L'échantillon nécessaire peut être prélevé au moyen d'un forage discret; la poudre qui en résulte est chauffée, dans l'obscurité, à plus de 500°C. S'il se produit une thermoluminescence, l'antiquité de la céramique est démontrée; dans le cas contraire, il s'agit d'un faux³⁷.

Techniques de datation

Différentes techniques scientifiques permettent d'effectuer la datation des objets anciens. Voici les principales:

Datation approximative par l'analyse archéométrique

L'analyse de spécimens appartenant à un même groupe d'échantillons (mortiers, verre, faïence, métaux, pigments) mais remontant à des époques différentes donne des résultats qui peuvent être utilisés comme indice et suggérer approximativement l'âge, encore inconnu, d'autres spécimens. Les exemples suivants en apportent confirmation.

Datation au moyen de perles de verre en Afrique de l'Ouest

Les perles *akori* dichroïques, qui paraissent bleues à la lumière réfléchie et vertes sous la lumière transmise, ont été soumises à une analyse par fluorescence des rayons X. Celle-ci permet de les classer en deux groupes, A et B. Les spécimens du groupe A sont plus pauvres en plomb (-0,05 %) et

37. AITKEN M.J., 1970, pp. 77-88.

en arsenic (-0,05 %) que ceux du groupe B dans lequel le pourcentage de plomb est d'environ 27 % et celui d'arsenic de 2 %. La différence relative au manganèse est plus faible (groupe A: $0,3 \pm 0,1\%$, groupe B: env. 0,05 %). Autres éléments détectés: fer, cobalt, zinc, rubidium, strontium, étain, antimoine et barium, pour lesquels aucune différence notable n'a été relevée. On trouve, en Afrique de l'Ouest, les perles du groupe A sur des sites insulaires relativement anciens (430-1290 de notre ère), tandis que celles du groupe B apparaissent uniquement dans un cadre plus récent. La découverte de ces perles dans une tombe ou une strate donnée permet donc d'en augurer l'âge avec plus ou moins de précision³⁸.

Datation des peintures rupestres par analyse de leurs liants albuminoïdes

Il est possible d'évaluer l'âge des peintures en recensant le nombre des acides aminés de leurs liants albuminoïdes après hydrolyse. Ce procédé a permis de déterminer l'âge de 133 peintures rupestres de l'Afrique du Sud-Ouest avec une marge d'erreur de 20 %. La « Dame Blanche » (the « White Lady ») de Brandberg paraît dater de 1200 à 1800 ans. Les peintures du Limpopo se situent entre 100 et 800. Les échantillons de Drakenberg s'étalent entre 60 et 800. Le nombre d'amino-acides identiques décroît avec l'âge de la peinture de 10 (dans des coagulants de 5 à 10 ans d'âge) à 1 (dans des substances vieilles de douze à dix-huit siècles)³⁹.

Datation par analyse des mortiers

L'analyse des différents mortiers utilisés en Egypte montre que le mortier de chaux n'apparaît pas avant Ptolémée I^{er} (323-285 avant notre ère)⁴⁰. Tout monument dont le matériau (pierres ou briques) a été assemblé à l'aide de ce mortier est donc postérieur à 323 avant notre ère.

Datation au radiocarbone

Principe

Lorsque les rayons cosmiques frappent les atomes de l'air dans les hautes couches de l'atmosphère, ils les désintègrent en fragments minuscules au nombre desquels se trouve le neutron. Les neutrons produits bombardent l'atome dont l'atmosphère est le plus riche, l'azote de masse 14, et le convertissent en carbone de poids atomique 14. Ce carbone 14 nouvellement formé est radioactif; il se combine avec l'oxygène de l'air pour former du $^{14}\text{CO}_2$ et se mélange avec le dioxyde de carbone ordinaire qui contient principalement des atomes de carbone de masse 12 (99 %) et 13 (1 %). Ce carbone 14 pénètre dans les végétaux avec les éléments de carbone ordinaires $^{12}\text{CO}_2$ et $^{13}\text{CO}_2$ formant leurs tissus, suivant le processus de la photosynthèse. Dès lors que les animaux se nourrissent de plantes, « tout l'ensemble du monde animal et végétal doit être légèrement radioactif par suite de la présence d'une propor-

38. DAVISON C.C., GIAUQUE R.D. et CLARK J.D., 1971, pp. 645-649.

39. DENNINGER E., 1971, pp. 80-84.

40. LUCAS A., 1962, pp. 416 et 419-420.

tion infime de C 14 (approximativement 1 atome de C 14 pour un million de millions d'atomes de carbone ordinaire). Le dioxyde de carbone atmosphérique entre également dans la composition des océans sous forme de carbonate. Il est donc vraisemblable que l'eau de mer est, elle aussi, légèrement radioactive ainsi que tous les coquillages et dépôts qu'elle contient.»⁴¹

A la mort, la matière organique ancienne est censée avoir possédé la même radioactivité que la matière organique vivant présentement. Mais, après la mort, survient l'isolation — autrement dit, tout apport ou échange de radiocarbone est interrompu et le C 14 commence à se dégrader ou plutôt, suivant l'expression du professeur Libby, «l'horloge au radiocarbone se met en marche»⁴². Si après l'avoir mesurée, on compare la radioactivité du spécimen de jadis avec celle d'un échantillon-témoin moderne, il sera possible, en tenant compte de la longévité du C 14⁴³ de calculer l'âge du spécimen ancien en résolvant l'équation relative au déclin de la radioactivité.

Matières propices à la datation radioactive

Cette technique est applicable à des matières organiques (bois, charbon, os, cuir, tissus, végétaux, aliments, coquillages, etc.), mais avant tout aux plantes annuelles telles que les roseaux, les céréales, l'herbe ou le lin. Lorsqu'ils ont été recueillis, les échantillons ne doivent être soumis à aucun traitement chimique mais aussitôt isolés dans des bocaux de verre ou des sacs de nylon afin d'éviter tout contact éventuel avec d'autres matières organiques. Le processus s'effectue en cinq temps: épuration de l'échantillon, combustion, épuration des gaz de dioxyde de carbone obtenus, enfin, dénombrement des particules émises

Résultats et perspectives

Une étude comparée portant sur des échantillons témoins et des datations effectuées au carbone radioactif⁴⁴ a permis de vérifier la précision de cette méthode. La méthode historique la plus ancienne et la plus connue étant la chronologie égyptienne, il a été décidé, à un niveau international, de mesurer le carbone radioactif d'une longue série d'échantillons égyptiens, minutieusement datés, appartenant à l'époque s'étendant de la 1^{re} à la XXX^e dynastie, (environ - 3100 à - 378/341). Différents laboratoires en ont encore pris la datation en utilisant les périodes de radioactivité du carbone correspondant à 5568 ans, ou, pour plus de précision, à 5730 ± 40 ans. Les résultats obtenus ont indiqué que la datation opérée à l'aide de la période radioactive 5730 correspond à la chronologie historique jusqu'au règne du roi Senousret (ou Sésostris), environ - 1800, mais la datation des échantillons antérieurs a suscité de nombreuses controverses. Cependant, l'application de la méthode de correction Stuvier-Suess aux échantillons antérieurs à - 1800 permet d'obtenir des résultats correspondant à la chronologie archéologique à 50 ou 100 ans

41. AITKEN M.J., 1961, x plus 181 p.

42. LIBBY W.F., 1970, pp. 1-10.

43. La longévité ou période du C 14 (durée de la désintégration de la moitié du corps radioactif) est évaluée à 5568 ans ou, pour être plus précis, 5730 ± 40 ans.

44. BERGER R.; 1970, pp. 23-36; EDWARDS I.E.S.; 1970, pp. 11-19; MICHAEL H.N. et RALPH E.K., 1970, pp. 109-120; RALPH E.K., MICHAEL H.N. et HAN M.G., 1973, pp. 1-20

près⁴⁵. A titre d'exemple, le laboratoire de recherche du British Museum a procédé à la datation de roseaux provenant du Mastaba (sépulture) de Qaa, I^{re} dynastie, à Saqqara. La date obtenue au carbone 14 est -2450 ± 65 après correction, ce qui coïncide avec la date historique, 2900 avant notre ère⁴⁶. On estime actuellement que la diminution du champ magnétique terrestre⁴⁷ et les variations d'intensité du vent solaire, qui font obliquer les rayons cosmiques, sont les causes principales des déviations constatées⁴⁸. En outre, la durée de la période du radiocarbone ne paraît pas fermement établie. On est à la recherche d'autres causes et de nombreux laboratoires travaillent dans cette voie.

La réponse connue, il sera possible d'apporter plus de précision à la datation de vestiges de l'Antiquité antérieurs à 1800 avant notre ère. En attendant, les évaluations conventionnelles au radiocarbone des vestiges organiques devront être soumises à la correction indiquée.

Datation au potassium-argon

La limitation de la datation au carbone 14 aux environs de $-70\ 000$ ans crée un grand vide dans la chronologie de l'évolution biologique et géologique jusqu'à près de -10 millions d'années, alors qu'il devient possible d'appliquer certaines méthodes géologiques radioactives, telles le taux de transformation de l'Uranium 235 en plomb 207, soit 710 millions d'années, ou encore le Rubidium 87 en Strontium 87, soit 13 900 millions d'années. Jusqu'à un certain point, ce vide peut être comblé grâce à l'application de la datation au potassium-argon⁴⁹. En fait, cette méthode est surtout utilisée pour la datation des âges géologiques reculés, en utilisant des éléments importants d'une substance de texture relativement fine (mais non inférieure à 100 microns) et ne contenant que peu d'argon atmosphérique. Il est possible de l'appliquer à des âges relativement plus récents, ce qui permettrait le contrôle des résultats obtenus grâce au C 14⁵⁰.

Principe de base

Tel que nous le trouvons dans la nature, le potassium contient 93,2% de potassium 39, 6,8% de potassium 41 et 0,0118% de potassium 40. Au moment de la formation de la terre, le taux de potassium 40 était d'environ 0,2% mais il s'est en grande partie dégradé en donnant deux dérivés : le calcium 40 et l'argon 40. La très longue période du potassium 40 (1330 millions d'années) lui permet de subsister encore à un taux très faible, de l'ordre de 0,0118%. Sur 100 atomes de potassium 40 qui se dégradent, 89 se transforment en calcium 40 par disparition des radiations bêta et deviennent

45. BEERGER R., 1970, pp. 23-36; MICHAEL H.N. et RALPH E.K.; 1970, pp. 109-120; RALPH E.K., MICHAEL H.N. et HAN M.G., 1973, pp. 1-20; STUVOER M. et SUESS H.E., 1966, pp. 534-540.

46. EDWARDS I.E.S., 1970, pp. 11-18.

47. BUCHA V., 1970, pp. 47-55.

48. LEWIN S.Z., 1968, pp. 41-50.

49. AITKEN M.J., 1961.

50. GENTNER W. et LIPPOLT H.J., 1963, pp. 72-84.

de l'argon 40 par suite de la capture des particules bêta. L'argon est un corps gazeux emprisonné dans le grain du minéral⁵¹.

La datation au potassium-argon est la plus utilisée pour les raisons suivantes :

— Le potassium présent dans l'écorce terrestre représente en poids 2,8%. C'est donc l'un de ses éléments les plus abondants. En outre, il est présent dans presque tous les corps composés.

— La longue survie du potassium permet la formation d'argon 40 dans certains minéraux au cours des périodes intéressantes du point de vue géologique. En calculant la concentration de l'argon 40 radioactif et la somme de potassium contenu dans un minéral, il est possible de déterminer l'âge de celui-ci à l'aide d'une certaine équation relative à la dégradation de la radioactivité⁵².

Problèmes à résoudre par la datation au potassium-argon

La datation au radiocarbone a récemment été utilisée pour calculer la constante de premier ordre *in situ* pour la racémisation de l'acide aspartique dans les os anciens. Une fois la réaction de racémisation étalonnée pour un site, cette réaction peut être utilisée pour dater d'autres os du gisement. Les âges calculés grâce à cette méthode correspondent bien à ceux que l'on obtient par la datation au radiocarbone. Ces résultats prouvent que la réaction de racémisation est un instrument chronologique important pour la datation des os qui sont soit trop anciens soit trop petits pour pouvoir être datés au radiocarbone. Pour donner un exemple de l'application de cette technique à la datation des fossiles humains, un morceau de l'homme de Rhodésie provenant de Broken Hill (Zambie) a été analysé et on lui a attribué provisoirement un âge d'environ 110 000 années⁵³. La datation au potassium-argon des périodes du Pliocène et du Pléistocène doit permettre l'établissement d'une chronologie absolue situant les origines de l'homme, l'âge des fossiles dont l'existence coïncide en divers points du globe, l'origine des « *tektites* », etc. La datation au potassium-argon a servi pour déterminer, à Olduvai, l'âge des couches de basalte et de celles du tuf qui les recouvraient dans l'espoir de préciser l'âge exact des restes du Zinjanthrope découverts au fond de la première couche de tuf, dans le « *Bed I* ». Curtis et Evernden ont conclu que ces basaltes d'Olduvai datent d'au moins quatre millions d'années; néanmoins, ils seraient impropres à une datation précise par suite d'altérations chimiques visibles dans la partie mince de tous les basaltes datés à Olduvai, à l'exception de ceux que l'on peut associer avec l'industrie, plus ancienne, des « *pebble-tools* » (galets aménagés). L'opinion de Gentner et de Lippolt sur les différents résultats obtenus est la suivante: « Dès lors qu'il n'existe pas d'autres incompatibilités entre les datations respectives des basaltes et du tuf qui les recouvre, il n'est pas impossible que l'âge du Zinjanthrope soit de l'ordre de 2 millions d'années. »⁵⁴

51. GENTNER W. et LIPPOLT H.J., 1963, pp. 72-84; HAMILTON, 1965, pp. 47-79.

52. GENTNER W. et LIPPOLT H.J., 1963, pp. 72-84

53. BADA J.L.; SCHROEDER R.A.; PROTSCH R. et BERGER R., 1974, p. 121.

54. Cf. note 1.

Datation archéo-magnétique

Pour donner une idée simplifiée de cette technique, il convient d'aborder les points suivants :

Paléomagnétisme

Il s'agit de l'étude du magnétisme rémanent dans les vestiges archéologiques. Celle-ci est fondée sur le fait que le champ magnétique terrestre change continuellement de direction et d'intensité. Des observations couvrant les cinquante dernières années indiquent que le champ magnétique se déplace vers l'ouest de $0^{\circ}2$ de longitude par an⁵⁵. Des recherches archéomagnétiques fondées sur le calcul de la magnétisation rémanente dans les terres cuites archéologiques et les roches montrent que par rapport à une intensité actuelle de 1, l'intensité magnétique de la terre a atteint son maximum, aux environs de 400 à 100 avant notre ère, avec 1,6 et son minimum vers -4000 avec 0,6⁵⁶. Ces effets ou variations en direction et en intensité sont appelés « variation séculaire ». De nature régionale, celle-ci constitue la base de la datation magnétique dès lors que les variations du champ magnétique terrestre laissent leur trace dans la céramique sous forme de magnétisme thermo-rémanent (t.r.m.).

Application du t.r.m. à la datation archéologique

Pour dater, à l'aide du magnétisme, de l'argile cuite demeurée *in situ* depuis la cuisson, il convient tout d'abord d'établir le comportement du champ géomagnétique par des mensurations effectuées dans la région choisie par l'emploi de la méthode, sur des structures archéologiques d'âge connu. Les résultats seront portés sur une courbe figurant la variation séculaire dans cette région pendant une longue période. La connaissance de la direction du champ magnétique enregistrée dans une argile cuite d'âge inconnu dans cette même région permettra de déterminer sa date de cuisson par comparaison avec cette courbe de la variation séculaire.

Les spécimens les plus appropriés à la datation magnétique sont des argiles cuites provenant de fours et de foyers restés sur place jusqu'à nos jours. Faute d'un magnétomètre portatif qui faciliterait le calcul *in situ* de la direction du champ géomagnétique, les échantillons doivent être apportés jusqu'à un laboratoire possédant un magnétomètre. Il est essentiel que sur chaque échantillon figure son orientation originale, afin qu'elle serve de référence quant à la direction de son propre magnétisme rémanent. Dans la pratique, l'opération consiste à enduire l'objet de plâtre de Paris, en prenant soin que la surface supérieure de ce moule soit horizontale et qu'elle indique le nord géographique avant que l'échantillon ne soit détaché. Ainsi est-il possible de déterminer simultanément l'ancienne déclinaison (D) et l'ancien angle d'inclinaison (I)⁵⁷. En vue de remédier aux anomalies, il convient de

55. AITKEN M.J., 1961; COOK R.M., 1963, pp. 59-71.

56. BUCHA V., 1970, pp. 47-55; BUCHA V., 1971, pp. 57-117

57. AITKEN M.J., 1970, pp. 77-88.

se munir d'au moins une demi-douzaine d'échantillons prélevés de préférence en divers endroits de la structure archéologique, tout en tenant compte d'une certaine symétrie⁵⁸.

Des résultats archéomagnétiques relatifs à la déclinaison et à l'inclinaison ont été obtenus pour l'Angleterre, la France, le Japon, l'Islande et la Russie. A ma connaissance, la méthode n'a pas encore été tentée en Afrique. On espère qu'elle le sera sous peu, d'autant qu'elle a beaucoup progressé au cours des toutes dernières années.

Datation par thermoluminescence

La thermoluminescence est l'émission de lumière qui se produit lors du chauffage intense d'une substance donnée. Elle diffère totalement de l'incandescence (obtenue en portant un corps solide au rouge) et résulte d'une libération de l'énergie accumulée sous forme de neutrons emprisonnés dans la matière chauffée.

Origine

Toute céramique ou porcelaine contient de faibles proportions de composants radioactifs (quelques millièmes d'uranium et de thorium et quelques centièmes de potassium). En outre, le sol proche de l'endroit où ont été découvertes les céramiques peut contenir des impuretés; des rayons cosmiques ont pu le pénétrer et émettre des radiations qui bombardent les matières cristallines, tel le quartz dans la poterie. L'ionisation qui en résulte produit des électrons qui peuvent devenir prisonniers de la structure cristalline. Ces « pièges à électrons » sont *métastables* et, lorsque l'on chauffe l'échantillon de céramique, ils disparaissent en libérant l'excès d'énergie sous forme de photons. L'intensité de lumière, la thermoluminescence, dépend directement de l'âge de la poterie. Elle dépend aussi de la nature particulière des générateurs de thermoluminescence présents dans la poterie et les environs immédiats de l'endroit où elle a été découverte⁵⁹. La mensuration des éléments d'uranium et de potassium contenus dans le fragment de poterie et le sol avoisinant permet de calculer l'intensité des radiations qu'il a reçues chaque année. En principe, l'âge est déterminé au moyen de l'équation suivante⁶⁰:

$$\text{Age} = \frac{\text{intensité des radiations accumulées}}{\text{intensité des radiations annuelles}}$$

Précision du résultat et perspective

De nos jours, les résultats sont exacts à $\pm 10\%$ près. Ils sont donc quelque peu inférieurs à ceux que fournit la datation au radiocarbone. La cause en est attribuable à de nombreuses incertitudes relatives aux cir-

58. COOK R.M., 1963, pp. 59-71.

59. AITKEN M.J.; 1970, pp. 77-88; HALL E.T., 1970, pp. 135-141.

60. AITKEN M.J.; 1970, pp. 77-88

constances dans lesquelles l'objet étudié a été enterré, au degré d'humidité du sol avoisinant dont dépend l'intensité relevant des radio-isotopes du fragment de poterie. On peut espérer que les recherches ultérieures permettront de résoudre ces difficultés ; mais différentes raisons d'ordre pratique donnent à penser que l'amélioration des résultats ne dépassera guère $\pm 5\%$ ⁶¹.

Néanmoins, malgré ce manque d'exactitude, cette technique l'emporte sur la datation au radiocarbone du fait que la poterie est plus abondante dans les sites archéologiques que ne le sont les matières organiques ; d'autre part, l'événement qu'il convient de dater est la cuisson de la poterie, alors que la datation au radiocarbone d'un échantillon de bois ou de charbon tend à situer l'abattage d'un arbre et non la date de son utilisation ultérieure.

En Egypte, cette technique trouvera de vastes débouchés. Jusqu'ici les cultures néolithiques et prédynastiques ont été, le plus souvent, datées d'après le type de céramique qui les caractérisait, conformément au *Séquence Dating System*, inventé par Flinders Petrie⁶². Grâce à la thermoluminescence, il sera désormais possible de déterminer l'âge exact de ces cultures.

Techniques utilisées dans la prospection archéologique

Le but essentiel de l'emploi de techniques scientifiques dans la prospection du sol est la recherche de l'information sur des sites archéologiques ensevelis, pour préparer ou pour remplacer les fouilles. Il s'agit d'économiser le maximum de temps, d'effort et de frais. La recherche archéologique au moyen de méthodes scientifiques fait appel aux techniques suivantes :

Photographie aérienne

Elle est surtout employée pour l'identification d'une structure donnée d'après son tracé géométrique. Elle a deux utilisations principales : elle permet une vue plus cavalière, et partant plus claire, des points où les traces ou esquisses en affleurement paraissent s'assembler pour former un dessin plus évocateur⁶³. L'étude des photographies aériennes permet donc de définir les zones qu'il convient d'explorer en vue d'obtenir une idée d'ensemble d'une structure archéologique. Cette méthode a servi en Egypte, à Louxor, pour l'étude des temples de Karnak, la superficie du site étant d'environ 150 hectares. Une autre utilisation permet de révéler l'existence de vestiges archéologiques recouverts par des terres cultivées, grâce aux marques végétales. Véritables empreintes, ces marques résultent elles-mêmes de

61. AITKEN M.J., 1970, pp. 77-88.

62. PETRIE W.M.F., 1901.

63. LININGTON R.E., 1970, pp. 89-108.

la variation de l'humidité dans les sols. La végétation au-dessus d'un mur de pierre enseveli, se distingue faiblement par une ligne plus claire, tandis qu'au-dessus d'un fossé comblé, elle est plus riche et apparaît donc plus foncée. La configuration géométrique de ces marques permet d'identifier les ruines ensevelies et d'en entreprendre l'exploration⁶⁴.

Analyse du sol

On peut généralement situer les vestiges d'anciennes cités habitées et de cimetières en analysant le sol. Le phosphate de calcium étant le constituant principal du squelette et des différents déchets et détritiques laissés par l'homme, son pourcentage sera naturellement plus élevé dans les terrains jadis habités ou dans ceux qui ont jadis servi de cimetières. Aussi les limites de ces secteurs archéologiques seront-elles fixées grâce à l'analyse d'échantillons de sol prélevés à distances régulières afin de déduire leur taux de phosphate.

Analyse du pollen

La pollinisation des plantes en fleurs est généralement due à l'action des oiseaux, des insectes ou du vent. Les fleurs dont la pollinisation est l'effet de l'action du vent produisent de grandes quantités de grains de pollen dont la plupart tombent sur le sol sans avoir été engagés dans le processus de fécondation. En règle générale, ces grains se décomposent, mais s'il arrive qu'ils tombent sur un sol approprié, boue ou tourbière, ils peuvent se fossiliser; il est alors aisé de les examiner au microscope. L'identification et l'énumération des divers types de pollen présents dans un échantillon peut acquérir de l'importance en archéologie par suite des moyens d'information qu'elles offrent sur l'environnement écologique dans lequel ont été situés des vestiges humains et des artefacts; et la connaissance de cet environnement peut, à son tour, indiquer le mode de vie qui prédominait à cette époque.

Cependant l'analyse du pollen ne peut servir de technique de datation que si les échantillons du pollen peuvent être rattachés à une chronologie fondée sur une méthode de datation directe telle que celle du radiocarbone.

Pour de plus amples détails sur cette technique, voir Faegri et Iversen⁶⁵ et Dimbleby⁶⁶.

Etude de la résistivité électrique

C'est la première technique géophysique qui ait été adaptée à l'archéologie. Elle consiste à envoyer une tension électrique dans le sol et à mesurer la résistance au courant électrique. La résistance dépend de la nature du sol, de la quantité d'eau retenue dans ses pores et de son taux de sels solubles.

64. AITKEN M.J., 1961.

65. FAEGRI K. et IVERSEN J., 1950.

66. DIMBLEBY G.W., 1963, pp. 139-149

Des roches dures et compactes telles que le granit et la diorite possèdent une résistivité très élevée par rapport à celle du sol argileux. Aussi l'étude de la résistivité s'appliquera-t-elle principalement à la détection de structures en pierres ensevelies sous une terre boueuse ou de structures creusées dans le roc et remblayées⁶⁷.

Le système normalement adopté dans cette méthode consiste à introduire quatre sondes en métal dans le sol, à faire passer le courant entre les deux sondes extérieures et à mesurer la résistivité entre les deux autres. La valeur de la résistance obtenue est une moyenne approximative pour la matière située au-dessous des sondes intérieures et à une profondeur d'environ 1,5 fois la distance entre elles, tant que cette matière est passablement homogène⁶⁸.

Normalement, presque toutes les applications de l'étude de la résistivité consistent à tracer des lignes de mesure en conservant le schéma de connexion et les mêmes distances afin de déterminer des changements dans les valeurs de résistivité. Souvent, ces lignes sont combinées pour former dans leur ensemble une grille rectangulaire de valeurs, et la localisation de structures enterrées est indiquée par les parties fournissant des valeurs anormales.

Cette technique a été partiellement remplacée par la prospection magnétique, par suite des inconvénients qu'elle présente, notamment la lenteur de l'examen, et le fait que les résultats sont affectés par les effets climatiques à long terme, à quoi s'ajoute que l'interprétation des résultats tend à être difficile, sauf dans les cas les plus simples⁶⁹.

Examen magnétique

C'est actuellement la technique la plus répandue dans la prospection archéologique. Elle consiste à mesurer l'intensité du champ magnétique terrestre en des points situés au-dessus de l'actuelle surface du site à prospector. Les variations de ces mesures peuvent révéler la présence de structures archéologiques. Cette technique permet de détecter des traces souterraines de fer, des constructions en terre cuite, des fours, par exemple, ou des puits remblayés creusés dans le roc, ou encore des structures en pierre enfouies dans un sol argileux.

Les objets de fer enterrés provoquent des variations très importantes; pour le reste, les variations sont beaucoup plus faibles. La technique de l'étude magnétique ne peut être, par conséquent, d'aucune utilité si l'instrument de détection n'est pas suffisamment sensible aux très petites variations; de plus il doit être rapide et facile à manipuler⁷⁰. L'*Archaeological Research Laboratory* de l'Université d'Oxford a réussi à mettre au point un magnétomètre à protons qui répond à toutes ces exigences⁷¹. Il

67. AITKEN M.J., 1961.

68. LININGTON R.E., 1970, pp. 89-108.

69. LININGTON R.E., 1970, pp. 89-108.

70. AITKEN M.J., 1963, pp. 555-568.

71. AITKEN M.J., 1961.

est composé de deux parties : la bouteille de détection et l'enregistreur. La bouteille de détection est portée par un trépied en bois et un opérateur la déplace d'un point à l'autre de la surface à étudier. Un autre opérateur contrôle l'enregistreur et trace, avec les mesures, un plan dont l'interprétation aboutira à montrer la situation et les grandes lignes des éléments archéologiques contenus dans le sol⁷². D'autres types de magnétomètres ont été perfectionnés, notamment le magnétomètre différentiel à protons, le « fluxgate gradiometer »⁷³ le magnétomètre à césium, le magnétomètre à pompage de résonance électronique⁷⁴. Chacun d'eux possède certains avantages ; mais l'appareil le plus utile dans presque tous les cas est cependant le magnétomètre différentiel à protons.

La méthode magnétique a plusieurs avantages sur la résistivité ; elle est plus simple, plus rapide, et ses résultats sont plus faciles à interpréter⁷⁵.

Sondage des pyramides égyptiennes au moyen de rayons cosmiques

Les rayons cosmiques consistent en un courant de particules chargées électriquement, appelés « mésons mu » ou « muons ». Ces rayons atteignent la terre, avec une intensité égale, depuis tous les points du ciel. Chaque mètre carré est pénétré par quelque 10 000 muons par seconde, quelle que soit sa direction. Les rayons cosmiques possèdent une très forte puissance de pénétration, très supérieure à celle des rayons X ; leur vitesse est presque égale à celle de la lumière.

Le sondage des pyramides au moyen de ces rayons repose sur le fait que les muons perdent de l'énergie en traversant la matière. La perte d'énergie (ou absorption de muons) est proportionnelle à la densité et à l'épaisseur de la matière à travers laquelle elle passe. L'intensité ou la quantité des rayons cosmiques qui pénètre peut être évaluée au moyen d'un appareil connu sous le nom de « chambre à étincelles » que l'on installe dans une chambre souterraine à l'intérieur de la pyramide. Des muons ayant traversé un vide (ou une chambre, ou un passage inconnu) seront ralentis à un degré moindre que ceux qui auront passé à travers le roc solide ; les rayons cosmiques ayant franchi un vide seront donc plus intenses, et la chambre à étincelles le fera apparaître. À l'aide de deux chambres à étincelles orientées horizontalement et distantes l'une de l'autre de 30 cm environ dans le sens vertical, il est possible non seulement de détecter n'importe quelle chambre secrète, mais aussi de la localiser à quelques mètres près. On conduira dès lors les fouilles dans cette direction pour atteindre le vide ou la chambre annoncée par les rayons.

Le sondage a débuté dans la Seconde Pyramide, celle du roi Chéphren, de la IV^e dynastie (– 2600). Les renseignements ont été analysés par un ordi-

72. AITKEN M.J., 1961.

73. HALL E.T., 1965, p. 112.

74. SCHOLLAR I., 1970, pp. 103-119.

75. LININGTON R.E., 1970, pp. 89-108.

nateur et les résultats publiés le 30 avril 1969. Ils révèlent deux faits importants : la chambre mortuaire du roi ne se situe pas exactement au centre de la base de la pyramide ; elle est décalée de quelques mètres vers le nord. Cette découverte concorde avec les résultats obtenus grâce à l'étude magnétique et constitue par conséquent la preuve de la validité de cette technique de sondage des pyramides. En outre, le tiers supérieur de cette pyramide ne comporte ni chambres ni couloirs inconnus.

L'expérience a été répétée en utilisant un autre appareil conçu de manière à explorer la pyramide entière. L'analyse des résultats indique que celle-ci ne contient aucun vide inconnu. Ce fait a confirmé les prévisions archéologiques.

Techniques de conservation

Le but de cet exposé n'est plus de décrire les méthodes techniques employées pour la conservation des artefacts composés d'éléments divers tels que céramique, faïence, verre, bois, cuir, papyrus, tissus, métaux, etc. Leur variété est telle qu'elle déborderait le cadre alloué à ce chapitre. Plusieurs livres techniques⁷⁶ et des périodiques, entre autres *Studies in Conservation*, journal de l'*International institute for conservation of historic and artistic works*, à Londres, ont traité le sujet.

En Afrique, toutefois, les problèmes de conservation les plus sérieux ont trait à la grande fragilité des objets et à la détérioration considérable des monuments de pierre.

Extrême fragilité des différentes matières

Par suite de la chaleur et de la sécheresse, excessives dans de nombreux pays africains, les artefacts fabriqués à l'aide de matières organiques (parchemin, papyrus, cuir, bois, ivoire, etc.) sont devenus d'une extrême fragilité. Il importe de les manipuler avec le plus grand soin, afin qu'ils ne courent pas le risque de s'effriter. Il faut commencer par les conserver dans un local clos et humide, enveloppés de tissus humides, ou traités à la vapeur dans un récipient approprié, de telle sorte qu'ils puissent retrouver tout ou partie de leur malléabilité. On peut alors les dérouler ou les déplier sans crainte de les voir se briser.

Lorsqu'ils ont retrouvé leur malléabilité, il conviendrait de conserver ou d'exposer ces artefacts dans des musées équipés avec l'air conditionné ou des entrepôts à une température de $17 \pm 2^\circ\text{C}$ et une humidité relative de 60 à 65 %, afin qu'ils ne redeviennent pas cassants au contact de conditions climatiques plus arides.

Notable détérioration des monuments de pierre

Ce sérieux problème mérite d'être considéré de plus près :

76. ORGAN R.M.; 1968; PLENDERLEITH H.J.; 1962; PAYDDOKE E.; 1963; SAVAGE G., 1967.

Principales causes de détérioration

Les principaux facteurs de la dégradation des monuments de pierre en Afrique sont :

— *la migration des sels*: en présence d'eau ou d'humidité, les sels solubles émigrent, sous l'action d'un phénomène de capillarité, du sol salin vers la pierre des monuments. Sous climat aride, ces sels passent de l'intérieur de la pierre à la surface extérieure sous forme de solutions aqueuses; ils peuvent se cristalliser soit sur la surface même et provoquer sa désintégration, soit sous la surface et la faire éclater. Ces actions prennent plus d'ampleur à la base des murs ou des colonnes, à l'endroit où la pierre entre en contact avec le sol salin, ainsi qu'on peut l'observer sur certaines des colonnes du temple de Bouhen, au Soudan;

— *intempéries*: en Afrique, la pierre est cruellement affectée par les variations excessives de température et d'humidité. Elles aboutissent à la rupture des éléments superficiels de la plupart des pierres.

En de nombreux endroits, particulièrement dans les régions côtières, les deux facteurs de dégradation agissent de concert et provoquent une détérioration importante des monuments, comme on ne peut manquer de l'observer en Libye, dans les temples romains de Leptis Magna et de Sabratha

Traitement des surfaces — son inefficacité

De nombreux essais ont été entrepris pour consolider des surfaces de pierre en les traitant avec des produits organiques de conservation ou des silicates inorganiques. Ces traitements se sont révélés non seulement inopérants mais aussi nuisibles, dès lors qu'ils accéléraient la détérioration et les fractures de la pierre. L'échec de ces essais a été souligné devant le Symposium international sur la conservation des monuments de pierre. Il a été reconnu que le problème du renforcement de la pierre était loin d'être résolu et qu'il convenait de s'en occuper avec diligence

Efforts internationaux pour résoudre le problème

Les difficultés inhérentes au problème et leur gravité ont, en 1967, incité l'ICOM, l'ICOMOS et le Centre international pour la conservation à former un comité de dix spécialistes de la conservation de la pierre pour étudier la question. Des études ont été entreprises et plusieurs rapports présentés. Les activités du Comité se sont poursuivies jusqu'à la fin de 1975 afin de proposer une série de tests standard permettant d'évaluer le degré de détérioration de la pierre et l'efficacité éventuelle des traitements de protection.

Un nouvel espoir

Le Pr. Lewin a mis sur pied un nouveau procédé destiné à consolider les surfaces de marbre et de chaux⁷⁷. Il s'agit du traitement des parties abîmées par une solution fortement concentrée d'hydroxyde de baryum (env. 20%) contenant une certaine quantité d'urée (env. 10%) et de glycérol (env. 15%). Chimiquement parlant, la méthode repose sur le remplacement, dans la pierre détériorée, des ions de calcium par des ions de baryum. Après

77. LEWIN S.Z., 1968, pp. 41-50

traitement, la pierre présente un durcissement manifeste et offre plus de résistance à l'action des facteurs de dégradation. Le carbonate de baryum nouvellement formé fait corps avec la pierre sans constituer un revêtement superficiel aux propriétés distinctes de celles de l'intérieur; aussi cette méthode permet-elle d'espérer que les surfaces traitées ne s'effriteront pas et qu'elles protégeront les couches sous-jacentes contre les attaques des intempéries.

Ce traitement a été utilisé en juillet 1973 pour renforcer le pourtour, en voie de désagrégation, du cou de la statue en roche calcaire du Sphynx à Gizeh. Jusqu'ici le résultat s'est avéré satisfaisant, mais il nous faut surveiller ce cou pendant encore une bonne dizaine d'années avant de pouvoir consacrer définitivement cette technique de protection et de conservation des pierres et roches calcaires.

Palliatifs

Quelle que soit la confiance que nous accordons à la technique de Lewin, le problème de la conservation par traitements chimiques des monuments de pierre n'est pas encore résolu. Certaines mesures, d'ordre mécanique, sont toutefois recommandées pour en assurer la protection contre les facteurs de dégradation. Entre autres les suivantes :

— Aucun produit de protection susceptible de boucher les pores de la pierre ne doit être employé pour traiter les surfaces des monuments en plein air directement exposés aux rayons solaires. La couche extérieure de la surface risquerait de s'écailler.

— Il convient de procéder régulièrement à la désalaison du sol sur lequel sont construits les monuments. L'eau utilisée sera évacuée par un système de drainage adéquat.

— Autant que possible, les monuments de pierre devront être isolés des sols salins afin de stopper la migration des sels solubles du sol vers la pierre. On peut effectuer cette isolation en glissant une feuille de plomb ou en coulant une épaisse couche de bitume sous la statue, le mur, la colonne, etc., qu'il s'agit de protéger.

— Lorsque le monument contient des sels solubles risquant de provoquer de l'efflorescence ou de la cryptoflorescence, il convient d'éliminer ces sels par lavage à l'eau et d'enduire les parties atteintes d'argile sableuse jusqu'à ce que la pierre en soit presque complètement débarrassée.

— Lorsque le monument est de taille modérée, il est possible de le transporter dans un musée ou un abri afin de protéger ses parois des effets délétères de l'action climatique. Une autre solution consiste à la conserver sur son emplacement original et à l'abriter sous une autre construction.

— Lorsque le toit fait défaut, il faut le reconstruire afin de protéger les peintures murales ou les bas-reliefs intérieurs de l'action directe de la lumière solaire et de la pluie; on atténuera par là jusqu'à un certain point les dégâts causés par les grandes variations de température et d'humidité.

Recommandations concernant les restaurations

Un traitement inopportun des artefacts ou des monuments étant susceptible d'entraîner nombre de dommages, voire la détérioration complète de certains

de ces vestiges archéologiques, peut-être convient-il de rappeler certaines règles importantes recommandées au cours de conférences internationales :

a) La patine des monuments anciens ne doit, en aucune façon, être ravalée ou enlevée en vue de révéler la couleur initiale de la pierre. Le nettoyage des façades doit se limiter à l'enlèvement de la poussière de telle sorte que la patine demeure intacte, puisque c'est là le caractère archéologique le plus important du monument.

b) Lors de la restauration de monuments anciens, seules les parties qui s'effondrent doivent être reconstruites à leurs emplacements d'origine. Il faut éviter les remplacements et les additions, à moins qu'ils ne soient nécessaires pour étayer les parties écroulées ou pour protéger les surfaces anciennes des intempéries.

c) Dans tous les cas de reconstruction, du mortier doit être intercalé entre les pierres de façon que leur poids soit également réparti et qu'il n'en résulte ni déformation ni fissures.

d) Le mortier utilisé pour la rénovation des murs doit, en règle générale, être identique au mortier d'origine, à moins que celui-ci ait été du plâtre. L'emploi de ciment n'est pas recommandé dans le cas de constructions en roches sédimentaires telles que calcaire ou grès.

e) Le meilleur mortier pour tous genres de reconstruction est le mortier de chaux, sans sel ; il est facilement malléable, et poreux et, par conséquent, n'empêche pas le léger déplacement des pierres dû aux changements de température. Avec lui, ni tensions ni fissures ne sont à craindre.

f) Quant aux méthodes permettant de distinguer les surfaces des pierres ajoutées, voici celles qui méritent d'être retenues :

— le nouveau parement peut être légèrement en retrait par rapport à l'ouvrage initial ;

— il n'est pas interdit d'utiliser des matériaux différents, mais il faut respecter les dimensions des blocs d'origine ;

— on peut également se servir du même type de matériau, mais alors la forme et les dimensions des blocs peuvent différer de celles des éléments originels ;

— les rangées de pierres et tous les joints peuvent être alignés sur ceux de l'ouvrage original, mais les nouveaux blocs devront être façonnés dans un aggloméré de pierre de tailles irrégulières ;

— des marques d'identification portant la date de la restauration pourront être gravées sur toutes les pierres nouvelles ;

— la surface des pierres neuves pourra différer complètement de celle des anciennes. Il suffit de la traiter avec un outil à pointe, ou de la tailler en profondeur avec un grattoir pour lui donner un certain dessin géométrique fait, de préférence, de lignes parallèles ou sécantes.