

La mesure des températures de cuisson des céramiques par dilatométrie

Résumé

La mesure des températures de cuisson des céramiques par dilatométrie a beaucoup pâti d'un manque de données fondamentales et de concepts, que la présente étude voudrait commencer à combler. Après avoir défini les températures de cuisson apparentes, ce sont leurs relations avec les températures de cuisson effectives qui seront au coeur des réflexions que l'on présente. On montre que les propriétés majeures de ces relations trouvent leur explication dans un certain nombre de caractéristiques des courbes de dilatation/retrait des argiles. Trois types d'argile ont été sélectionnés pour cette étude préliminaire : une argile illitique non calcaire et calcaire, une argile kaolinitique. Ils permettront d'aborder quelques-uns des problèmes fondamentaux que posent la mesure et la comparaison des températures de cuisson des céramiques dont on souligne qu'il s'agit en fait de mesures et de comparaisons des degrés de cuisson des céramiques. Deux groupes d'application, sur les céramiques du Ier siècle de notre ère à La Graufesenque, et du IVe siècle à Thasos, illustrent et complètent l'énoncé des principes exposés précédemment.

La mesure des températures de cuisson des céramiques anciennes peut apporter à la recherche archéologique des éléments d'interprétation importants et souvent irremplaçables. On en donnera quelques rares exemples à l'issue de cet exposé qui sera consacré pour l'essentiel à l'une des méthodes de mesure de ces températures, la dilatométrie. Celle-ci est connue depuis bien longtemps. Elle a même donné lieu à différentes études sur son utilisation dans le cas des céramiques anciennes (TITE M.S., 1969), ainsi qu'à des applications archéologiques variées. Il semble toutefois que les principes sur lesquels se fonde cette méthode ne soient pas toujours bien compris et, surtout, que les données expérimentales qui déterminent ses conditions de validité demeurent assez mal connues. Aussi l'objectif principal de cet exposé sera-t-il de présenter un certain nombre de données expérimentales qui permettront d'esquisser une étude critique de cette méthode de mesure des températures de cuisson (qui est en réalité, on le verra, une méthode de mesure et de comparaison du degré de cuisson des céramiques).

Les principes de base

Lorsqu'on recuit un échantillon de céramique, en augmentant progressivement sa température, cet échantillon se dilate comme le fait n'importe quel solide. Dans le cas d'une céramique, la dilatation se poursuit jusqu'à ce qu'on atteigne une température proche de la température à laquelle cette céramique avait été cuite initialement. Si on poursuit encore la cuisson, la température continuant à augmenter, la cuisson de l'échantillon reprend, ce qui veut dire que des transformations physiques et chimiques - du genre de celles qui s'étaient produites au cours de la cuisson initiale - recommencent à se produire. De ce fait, l'échantillon amorce un retrait qui se poursuit tant que la température de la cuisson continue d'augmenter (mais on verra qu'il existe des exceptions à cette règle). Ainsi la courbe donnant la variation de longueur d'un échantillon de céramique, en fonction de la température de la cuisson à laquelle on le soumet, comporte-t-elle en principe deux parties: une première partie, ascendante, qui correspond à la dilatation normale de la céramique, et une seconde partie, descendante, correspondant à la reprise de la cuisson de l'échantillon. Cette courbe présente donc un maximum. La température à laquelle se produit ce maximum est dite température de cuisson apparente de la céramique ; elle est en général assez peu différente de la température de cuisson effective à laquelle la céramique avait été cuite initialement, qui est celle du palier de température par lequel s'était terminée la cuisson, avant le refroidissement.

Les données expérimentales

On étudiera ici le comportement de quelques types d'argile très répandus, afin de préciser la validité des principes qui viennent d'être rappelés et les conditions d'utilisation des méthodes dilatométriques pour la mesure des températures de cuisson des céramiques.

Toutes les études qui seront présentées ont été faites avec un dilatomètre 402 EP de Netzsche, les montées et les descentes en température étant effectuées à raison de 3°C par minute. On utilisera surtout les variations relatives de longueur des échantillons en fonction de la température, soit $(l-l_0)/l_0$ ou dl/l_0 , en confondant en réalité la longueur l_0 de l'échantillon à 0°C avec sa longueur à la température ambiante, l étant sa longueur à $t^\circ\text{C}$.

Argiles illitiques non calcaires

Pour ce type d'argile, l'exemple que l'on a choisi afin d'en étudier les caractéristiques dilatométriques est une argile blanche provenant du filon Bigorne (Lamego), qui était employée jusqu'à ces dernières années dans l'atelier de poteries grises traditionnelles de Fazamoses (Resende, Portugal) (CORREIA A., 1980 et SEMPERE E., 1982). Elle a un pourcentage de chaux, CaO, de 1,5, ce qui signifie que l'argile ne contient pratiquement pas de calcite.

Courbe de dilatation/retrait de l'argile

La figure 1 représente la courbe de dilatation/retrait de cette argile illitique non calcaire, c'est à dire la courbe $dl/l_0 = f(t^\circ\text{C})$ donnant la

variation relative de longueur $dl/l_0 = (l-l_0)/l_0$ d'un échantillon de cette argile en fonction de la température $t^\circ\text{C}$ à laquelle on le porte (cf. supra 2). Il s'agit donc d'une courbe qui exprime les variations relatives de longueur que subit l'échantillon d'argile au cours de la cuisson qui le transforme en céramique.

La caractéristique principale de cette courbe c'est l'existence d'un sommet S qui marque sa division en deux : une portion AS représente la dilatation continue de l'argile et une portion SB représente sa contraction (ou retrait). La température qui correspond au sommet S est ici de 844°C ; elle peut varier de dix ou vingt degrés quand on passe d'une argile illitique non calcaire à une autre. De même, on observe souvent d'une argile à l'autre diverses perturbations affectant la portion AS ; celles-ci peuvent être dues à un départ d'eau, ou à la destruction de matières organiques, ou à la présence de certains minéraux non argileux... (ici on notera l'effet résultant du quartz que contient l'argile de Fazamoes ; sa transformation de la forme a, de basse température, à la forme b, de haute température, est responsable de la rupture de pente que l'on observe fig.1 entre 550 et 600°C).

Courbe de refroidissement de la céramique

Voyons à présent ce qui se passe lorsqu'on arrête la cuisson au-delà de 844°C , à 900°C par exemple, et qu'on laisse refroidir l'échantillon de céramique que l'on vient de fabriquer, avant de le recuire à une température largement supérieure à 900°C (fig. 2).

Les portions AS et SB de la courbe de dilatation/retrait de l'argile de Fazamoes sont identiques, à l'échelle près, sur les figures 2 et 1. La seule différence étant que pour la figure 2 la cuisson

de l'argile est interrompue à 900°C , et qu'elle est immédiatement suivie du refroidissement, lequel commence donc sans que la température de 900°C soit maintenue en palier durant un certain temps (palier de 0 heure comme indiqué fig. 2).

La courbe du refroidissement BC montre l'évolution - au cours du refroidissement - de la longueur de la céramique qui vient d'être fabriquée à partir de l'échantillon d'argile dont on a suivi la cuisson de A à B (cette céramique a donc une température de cuisson effective de 900°C). La courbe de refroidissement débute par un arrondi qui s'étend sur quelques dizaines de degrés. Il correspond au fait que les transformations physiques et chimiques qui s'étaient produites en fin de cuisson, avant le point B, se poursuivent un certain temps, s'agissant de transformations lentes qui ne sont pas complètement achevées en B. Ensuite la courbe de refroidissement devient linéaire et se poursuit sans autre accident que le faible décrochement que l'on observe entre 600 et 550°C . Il correspond à la transformation réversible du quartz β en quartz α .

On notera, bien que ce ne soit pas essentiel pour notre propos, que ce décrochement est incomparablement plus faible que celui qui s'était produit aux mêmes températures, entre A et S, au cours de la montée. C'est le phénomène de l'évanouissement du quartz. Il n'est pas dû au fait que la majeure partie du quartz aurait disparu, s'étant combiné avec les autres constituants de l'argile, ce qui ne se produit qu'à des températures bien plus élevées que 900°C . Mais, comme les grains de quartz diminuent de volume au cours du refroidissement - plus que ne le fait la matrice qui les entoure - il arrive qu'un grand nombre d'entre eux se désoli-

darisent de cette matrice devenue trop rigide et s'en décollent. Ils ne sont plus capables alors de contraindre la matrice à les suivre lors du retrait important qui caractérise le passage de la forme β à la forme α du quartz.

Courbe de recuisson de la céramique

Ainsi vient-on de fabriquer un échantillon de céramique en cuisant à 900°C, sans palier, un bâtonnet de l'argile de Fazamoes, et en le refroidissant jusqu'au voisinage de la température ambiante. Examinons maintenant ce qui se produit lorsqu'on soumet cet échantillon de céramique à une recuisson poursuivie jusqu'à une température très largement supérieure à 900°C (fig. 2).

On constate que la courbe de recuisson CMD reproduit sensiblement jusqu'à près de 900°C le tracé de la courbe de refroidissement, les phénomènes de dilatation de la plupart des solides étant sensiblement les mêmes à la montée en température comme à la descente. Toutefois la courbe de recuisson commence à s'écarter de la courbe de refroidissement lorsqu'on se rapproche de la température de cuisson initiale qui était de 900°C, en s'incurvant progressivement vers le bas. Elle amorce de la sorte un retrait qui devient de plus en plus marqué et qui prédomine sur la dilatation de l'échantillon de céramique au-delà du point M. Ce retrait correspond à la reprise de la cuisson de la céramique, c'est-à-dire à la réactivation des transformations physiques et chimiques qui s'étaient produites au voisinage de 900°C lors de la cuisson initiale. Le maximum M de la courbe de recuisson définit la température de cuisson apparente de la céramique qui a été élaborée au cours des phases précédentes. On observe que cette température

est sensiblement inférieure à la température de cuisson effective de la céramique, laquelle était, on l'a vu, de 900°C.

Cas d'un palier de 6 heures

On réitère sur un nouveau bâtonnet de la même argile les opérations précédentes de cuisson à 900°C, de refroidissement et de recuisson, mais en insérant en fin de cuisson et avant le refroidissement un palier (dit de cuisson) au cours duquel la température est maintenue constante à 900°C pendant 6 heures. Les courbes qui décrivent ces différentes phases sont celles de la figure 3.

La courbe ASB de dilatation /retrait de l'argile est sensiblement la même que sur les figures 1 et 2, au changement d'échelle près. Mais à partir du point B se manifeste, à température constante, un retrait important qui tient au fait que les transformations physiques et chimiques qui s'étaient produites en fin de cuisson, avant le point B, se poursuivent pendant un certain temps bien que la température n'évolue plus, car il s'agit on l'a vu de transformations lentes qui ne sont pas achevées en B. En revanche on peut considérer qu'elles le sont presque au point B'. Ce qui explique que la courbe de refroidissement B'C débute sans que se manifeste l'arrondi qui caractérisait cette même portion de courbe sur la figure 2. Pour le reste, la courbe de refroidissement de la céramique ne présente pas de particularité notable par rapport à celle de la figure 2.

La courbe de recuisson de la céramique n'est elle non plus guère différente de celle de la figure 2, à cela près qui est d'importance, que le maximum M déterminant la température de cuisson apparente se trouve fortement déplacé vers les

températures élevées. Alors que pour un palier de 0 heure la température apparente était inférieure à la température de cuisson effective, elle est supérieure à présent. Il s'agit là d'une question particulièrement importante pour la mesure des températures de cuisson des céramiques, question à laquelle on consacrera maintenant quelque développement.

Influence de la durée du palier

La courbe de la figure 4 permet de suivre l'évolution de la température de cuisson apparente des échantillons de céramique fabriqués avec l'argile de Fazamoes, en fonction de la durée de leur palier de cuisson. La température de cuisson effective, celle du palier, est la même pour tous ces échantillons ; elle est encore de 900°C, dans le cas de la figure 4.

L'augmentation de la température de cuisson apparente des céramiques avec la durée du palier que l'on observe sur la figure 4 est un phénomène général qui concerne toutes les céramiques, quel que soit le type d'argile ayant servi à leur fabrication. Cette augmentation n'est que la traduction, en dilatométrie, de la constatation banale suivante, qu'une céramique est d'autant plus cuite, ou, si l'on préfère, que son degré de cuisson est d'autant plus élevé que la durée du palier de cuisson a été plus longue. Constatation banale que chacun peut faire en observant quelques caractéristiques simples des céramiques, que l'on relie habituellement à l'élévation des températures de cuisson: couleur, dureté, sonorité... La température de cuisson apparente se substitue donc avantageusement à ces caractéristiques.

Ce qui vient d'être dit peut l'être d'une autre façon en soulignant que la température de

cuisson effective ne suffit pas à déterminer le degré de cuisson d'une céramique, si on ne connaît pas quelle a été la durée de son palier de cuisson. Comme c'est généralement le cas, la température de cuisson apparente est une grandeur qui a plus de signification, et donc plus d'intérêt, dans la plupart des applications archéologiques, que ne pourrait en avoir la température de cuisson effective, si on savait la mesurer.

Bien que l'augmentation de la température de cuisson apparente des céramiques avec la durée de leur palier soit un phénomène général, il arrive parfois que cette augmentation devienne extrêmement faible dans certains intervalles de temps, donc pour certaines durées de palier, comme on peut le constater sur la figure 14 (toutefois cela ne concerne guère les paliers d'une ou deux heures qui sont normalement pratiqués lors de la cuisson des céramiques). On ajoutera que la forme de la courbe donnant les températures de cuisson apparentes en fonction de la durée des paliers varie souvent beaucoup avec la température des paliers, comme on peut le voir par exemple sur cette même figure 14. L'augmentation de la température de cuisson apparente d'une céramique avec la durée de son palier de cuisson est due évidemment à la lenteur déjà signalée des transformations physiques et chimiques qui se produisent lors de la cuisson initiale, et se poursuivent encore, mais avec de moins en moins d'intensité, au long du palier de cuisson (voire même au tout début du refroidissement comme on l'a signalé à propos de la figure 2). Plus on permet à ces transformations de se produire lors de la cuisson initiale de la céramique, en augmentant par exemple la durée du palier de cuisson, plus on retarde leur réactivation au cours de la recuisson, ce qui

revient à déplacer vers les températures élevées le maximum M de la courbe de recuisson. Or c'est lui qui définit la température de cuisson apparente de la céramique.

Dans ces conditions on comprend que la vitesse de montée en température, au voisinage du palier, aura également une influence sur la température de cuisson apparente. Plus cette vitesse sera lente, et plus la température de cuisson apparente sera élevée, la température et la durée du palier restant égales par ailleurs. Mais il s'agit là d'un facteur moins important que la durée du palier de cuisson. Quant à l'influence de la vitesse de refroidissement au voisinage du palier, elle est encore moins importante, pour une double raison. C'est, d'abord, que les transformations physiques et chimiques qui pourraient se poursuivre au début du refroidissement ont déjà beaucoup diminué d'intensité au long du palier de cuisson, ce qui restreint d'autant la possibilité qu'elles ont de se prolonger au-delà de ce palier. Ensuite ces transformations n'auraient guère le temps de se produire car, aux températures élevées, le refroidissement est beaucoup plus rapide, lorsqu'on cesse d'alimenter le four en combustible, que n'a été la montée en température, juste avant le palier.

Quoi qu'il en soit, la mesure des températures de cuisson apparentes des céramiques demeure un excellent moyen pour comparer leur degré de cuisson. Cela exige certes que l'on prenne quelques précautions qui seront évoquées dans la suite de cet exposé, et au travers des rares exemples d'application que l'on donnera. Mais ce sera pour une large part l'étude des relations qui existent entre les températures de cuisson apparentes et les températures effectives qui permettra de les formuler. Ce sont ces relations qui nous occuperont maintenant.

Influence des températures effectives

Pour étudier l'influence des températures de cuisson effectives sur les températures apparentes on a cuit différents bâtonnets de la même argile de Fazamoes, à des températures s'échelonnant de 500 à 1100°C, avec un palier de cuisson de 1 heure. On a procédé ensuite à la recuisson des échantillons de céramique ainsi obtenus, afin de mesurer leur température de cuisson apparente. Ce sont ces valeurs qui ont été reportées sur la figure 5, en fonction des températures de cuisson effectives correspondantes.

On observe, sur cette figure 5, que la courbe qui traduit l'évolution des températures de cuisson apparentes en fonction des températures effectives débute par un segment sensiblement horizontal, lequel se prolonge un peu au-delà de 800°C sur l'axe des températures effectives. Cela signifie que la température de cuisson apparente reste la même quelles que soient les températures de cuisson effectives, tant que ces dernières ne dépassent guère les 800°C.

L'explication de ce phénomène est simple dès lors qu'on se reporte à la figure 1. Supposons en effet que l'on arrête la cuisson d'un échantillon d'argile en un point quelconque de la courbe AS, donc à une température effective inférieure à 844°C, puis qu'on laisse refroidir jusqu'à la température ambiante l'échantillon de céramique qui vient d'être fabriqué, et qu'on le recuit enfin bien au-delà de sa température de cuisson effective. Parvenu au cours de sa recuisson à une température proche de celle de sa température de cuisson effective, et la température continuant à augmenter, l'échantillon décrira la portion de la courbe de dilatation/retrait de l'argile qui n'avait pas été parcourue lors de la cuisson initiale. Dans ces conditions

la courbe de recuisson de l'échantillon de céramique comportera toujours un sommet S à une température voisine des 844°C. Ce sera donc ce sommet S qui tiendra lieu du maximum M de la courbe de recuisson, tant que la température de cuisson effective ne dépassera guère les 800°C.

Concrètement, cela implique qu'il ne soit pas possible d'étudier par dilatométrie les températures de cuisson apparentes des céramiques qui auraient été faites avec des argiles illitiques non calcaires, lorsque leurs températures de cuisson effectives sont inférieures à la température qui correspond au sommet S de la courbe de dilatation/retrait de l'argile. On a signalé précédemment que pour toutes les argiles illitiques non calcaires cette température reste proche de 850°C, à 10 ou 20 degrés près.

La limitation précédente est parfois très gênante, d'autant que la diffraction X qui est une autre méthode fréquemment utilisée pour la détermination des températures de cuisson devient elle aussi largement inopérante dans ce domaine de températures. Mais il est vrai que pour les périodes gréco-romaine et médiévale nombre d'applications archéologiques exigent seulement que l'on puisse démontrer que les températures de cuisson de certains ensembles de céramiques sont restées notablement inférieures à 800°C, inférieures donc à la température correspondant au sommet S. Or cela se voit facilement, dès lors que les maxima mesurés se regroupent autour de 850°C, et qu'on ait l'assurance d'avoir affaire à des argiles illitiques non calcaires.

Toutefois il faut savoir qu'il existe aussi des cas favorables permettant d'évaluer des températures de cuisson qui seraient comprises entre 650 et 800°C. Cela devient possible lorsqu'on peut

distinguer assez nettement, sur la partie ascendante de la courbe de recuisson d'une céramique, deux segments dont le premier, sublinéaire (à l'exception de la zone de transformation α, β du quartz), correspond à la dilatation de la céramique, et dont le second, avec une pente généralement plus marquée, correspond à la portion de la courbe de dilatation/retrait de l'argile qui n'avait pas été décrite lors de la cuisson initiale. Ce deuxième segment débute à une température qui est proche de la température de cuisson de la céramique, ce qui permet une certaine évaluation de cette température, en dessous des 800°C.

Examinons à présent sur la figure 5 ce qui se passe lorsque la température de cuisson effective, maintenue 1 heure en palier, a dépassé le seuil de 844°C, température qui correspond au sommet S de la courbe de dilatation/retrait de l'argile. On voit que les difficultés précédentes disparaissent et qu'à chacune des températures de cuisson effectives on peut associer une température de cuisson apparente et une seule. On voit aussi que ces deux températures sont peu différentes, leur écart ne dépassant pas une trentaine de degrés à 1100°C ; on pourrait donc les confondre sans difficulté pour la quasi-totalité des applications archéologiques. Cela demeure vrai pour toutes les argiles illitiques non calcaires, quelle que soit d'ailleurs la durée de leur palier de cuisson, pourvu qu'on se tienne dans les limites admises pour la fabrication des céramiques anciennes, et qu'on reste dans le domaine supposé de leurs températures de cuisson. Pourtant, on a éprouvé parfois le besoin de revenir aux températures effectives. C'est à ce besoin que répond la notion de température de cuisson équivalente, qu'on va examiner.

Températures de cuisson équivalentes

Se reportant encore à la figure 5 on peut voir que si la température de cuisson effective d'une céramique a été de 1000°C, et qu'elle a été maintenue en palier pendant 1 heure, la température apparente qui lui correspond est d'environ 985°C. Mais le fait de mesurer sur une céramique une température apparente de 985°C ne permet pas de conclure que sa température de cuisson effective ait été de 1000°C, même s'il s'agit, comme on le suppose pour l'instant, d'une céramique qui a été fabriquée avec l'argile dont on s'est servi pour établir la figure 5.

Si la durée du palier a été plus courte qu'une heure, la température effective aura été nécessairement plus élevée que 1000°C. Si au contraire la durée du palier a été plus longue, la température effective aura été moins élevée. Ceci n'étant rien d'autre que l'application de la règle générale déjà énoncée qui veut que les températures apparentes augmentent avec la durée du palier de cuisson.

Une telle situation pose évidemment quelques problèmes lorsqu'il s'agit de déterminer comment a été cuite une céramique ancienne dont on a mesuré la température de cuisson apparente. Il est évident qu'il n'existe pas de réponse unique à cette question. Il faudrait normalement pouvoir proposer pour cette céramique toute une série de températures effectives possibles, correspondant à des paliers supposés de 0, 1, 2, 3, 4 heures, entre lesquelles le choix est impossible. Mais il faut être conscient de la difficulté de réalisation, quasi insurmontable, de ces multiples déterminations de température, dont le bénéfice serait d'ailleurs bien mince. Certes il peut être intéressant d'avoir

des idées, même approximatives, sur les conditions possibles de cuisson des céramiques anciennes. Mais l'important, pour les applications archéologiques, est moins de pouvoir comparer ces diverses possibilités, ce qui de surcroît n'est guère réalisable, que de comparer le degré de cuisson des céramiques étudiées. C'est ce qu'on fait habituellement, bien que dans ce domaine on pâtisse d'un abus de langage manifeste car, parlant de comparaison des températures de cuisson, on songe en réalité à comparer des degrés de cuisson. Aussi est-il important de ne pas se laisser abuser par le vocabulaire.

Puisqu'il s'agit donc de comparer le degré de cuisson des céramiques en utilisant pour l'exprimer des températures qui seront nécessairement fictives, deux voies ont été envisagées pour cela.

La première va consister à se servir uniquement des températures de cuisson apparentes des céramiques. C'est ce qu'on préconise ici. Les températures apparentes tiennent compte, comme on l'a vu, de la durée du palier de cuisson. Elles fournissent en outre une assez bonne indication des températures effectives qui ont pu être réalisées, l'écart de ces deux températures étant généralement inférieur à une cinquantaine de degrés lorsque la durée du palier de cuisson n'est pas exceptionnellement longue, ou courte. Mais l'utilisation des températures apparentes exige évidemment que l'on sache éviter les zones à l'intérieur desquelles ces températures perdent toute signification. On a vu que c'était le cas pour les argiles illitiques non calcaires, lorsque les températures de cuisson effectives sont inférieures à la température du sommet S de la courbe de dilatation/retrait. On sera donc amené à préciser ultérieurement, pour d'autres

types d'argile très répandus, quelles sont ces zones. La seconde voie qui a été préconisée pour comparer le degré de cuisson des céramiques consiste à transformer la température de cuisson apparente en température de cuisson effective, laquelle, maintenue en palier pendant 1 heure, aurait donné, avec l'argile qui a servi à fabriquer la céramique étudiée, la même température apparente que celle qui a été mesurée. Cette température effective théorique est dite température de cuisson équivalente. Elle représente donc, parmi toutes les températures effectives qui peuvent correspondre à la température équivalente qu'on a déterminée, celle dont le palier de cuisson aurait été de 1 heure.

Le fait qu'avec les températures équivalentes on ramène en principe toutes les températures à des conditions de palier identiques semblerait pouvoir favoriser les comparaisons des degrés de cuisson. Mais c'est oublier qu'on ne dispose pratiquement jamais, pour les différentes argiles et céramiques concernées, des courbes donnant les températures apparentes en fonction des températures effectives maintenues pendant 1 heure, comme est la courbe de la figure 5 pour les argiles et céramiques de Fazamoes.

On sera donc obligé pour déterminer les températures équivalentes d'employer des méthodes qui reposent le plus souvent sur des hypothèses difficilement contrôlables. C'est le cas notamment du procédé consistant à recuire la céramique pendant 1 heure à une température supérieure de quelques dizaines de degrés à sa température apparente, puis à mesurer la nouvelle température apparente qui correspond à cette recuisson. La température équivalente devrait présenter par rapport à la première température apparente le même écart que la température du palier de recuisson par rapport

à la seconde température apparente (TITE M.S., 1969). Mais la validité de cette méthode pose des problèmes extrêmement complexes, moindres cependant avec les argiles illitiques non calcaires. Surtout, on peut se demander quel intérêt il y a d'ajouter des incertitudes supplémentaires à la mesure des températures de cuisson apparentes. On s'en tiendra donc à celles-ci.

Argiles illitiques calcaires

L'exemple que l'on a choisi pour ce type d'argile provient de la fouille des ateliers de céramiques sigillées de La Graufesenque à Millau (Aveyron, France). Il s'agit d'une argile appelée Fronto, du nom du potier de la seconde moitié du I^{er} siècle de notre ère dans l'atelier duquel a été découvert un stock d'argile abandonné. Son pourcentage de chaux, CaO, est de 11,1. On rappelle à ce propos que les pourcentages de chaux, CaO, de la plupart des argiles sont dus pour l'essentiel à la calcite qu'elles contiennent; ils constituent donc une manière d'évaluer cette calcite.

Courbe de dilatation/retrait de l'argile

La figure 6 donne la courbe de dilatation/retrait de cette argile illitique calcaire. Sa caractéristique principale est la présence d'au moins deux sommets, marqués S₁ et S₂. Le sommet S₁ est précédé d'une sorte de plateau subhorizontal où peut apparaître, comme c'est ici le cas, un autre sommet qui correspond à une température de 757°C, dans le cas présent.

Le plateau subhorizontal résulte de deux effets antagonistes. Le premier est une contraction due

à la décomposition de la calcite, CaCO_3 , que contient l'argile calcaire, et à sa transformation en chaux, CaO , avec perte de gaz carbonique, CO_2 . Cette contraction débute ici un peu avant 750°C . Le second tient à l'augmentation de la dilatation qui se produit avec toutes les argiles illitiques, calcaires ou non calcaires, entre la zone de transformation α , β du quartz et la température correspondant au sommet de la courbe de dilatation/retrait de l'argile non calcaire, donc avant le retrait important qui se manifeste au-delà de 850°C environ (cf. fig. 1). Il est clair que selon leur importance relative, ces deux effets déplaceront la position des sommets, lesquels sont situés sur la figure 6 à 757 et 824°C . Ils peuvent même masquer complètement l'un ou l'autre d'entre eux.

Sur la courbe de la figure 6, la décarbonatation de l'argile et le retrait de l'illite conjuguent leurs effets sur la portion de courbe qui va de 824 à 935°C . Mais un peu avant cette dernière température débute une nouvelle expansion liée à la silicatisation de la chaux, c'est-à-dire à sa transformation en silicate de chaux par combinaison avec l'argile. Cette expansion est responsable du sommet S_2 , à 987°C dans le cas présent, avant la reprise du retrait qui se poursuivra jusqu'au ramollissement ou à la fusion de l'argile.

Il est clair également que le sommet S_2 , situé ici à 987°C , se déplacera lui aussi en fonction du pourcentage de chaux (cf. fig. 9).

Températures de cuisson apparentes et effectives

La figure 7 regroupe certaines portions des courbes donnant, pour l'argile Fronto, et pour 3 valeurs des paliers de cuisson: 1 heure, 4 heures et 16 heures, les températures de cuisson

apparentes en fonction des températures effectives.

On observe que la courbe correspondant au palier de 1 heure débute, comme c'était déjà le cas sur la figure 5, par un segment sensiblement horizontal. La raison est celle indiquée précédemment. L'échantillon qui aura été cuit à une température inférieure à 824°C décrira en principe, lors de sa recuisson, la portion de la courbe de dilatation/retrait de l'argile qui n'avait pas été parcourue lors de sa cuisson initiale. Avec toutefois quelques modifications mineures dues à la décomposition partielle de la calcite durant le palier de cuisson, ce qui a pour effet notamment d'escamoter le sommet à 757°C et d'abaisser un peu la température du sommet S_1 . Mais il reste que les céramiques dont les températures apparentes sont proches de 800°C ne peuvent être classées valablement en fonction de leur degré de cuisson. En revanche le classement reprend un sens lorsqu'on compare ces températures à des températures apparentes qui sont sensiblement plus élevées.

Pour les autres courbes, non figurées, que l'on tracerait en donnant aux paliers des valeurs de 4 et 16 heures, les conclusions seraient sensiblement les mêmes.

Sur la figure 7 on devrait rencontrer ensuite les portions de courbes donnant, pour des températures effectives comprises entre 800 et 900°C environ, les températures apparentes qui leur correspondent. Celles-ci ne sont pas très significatives, car par suite de la valeur élevée de la pente elles sont très sensibles à de faibles variations des températures effectives. Cela constitue une zone d'instabilité pour les températures apparentes, instabilité à laquelle concourent aussi dans le cas des céramiques anciennes les variations des pourcentages de chaux et les

phénomènes de recarbonatation ultérieure. Il ne faut donc pas accorder trop d'importance au classement des céramiques en fonction de leur degré de cuisson, et donc de leur température de cuisson apparente, lorsque ces dernières n'offrent que des écarts de quelques dizaines de degrés à l'intérieur d'un intervalle allant, pour ces températures, de 825 à 950°C environ (ce qui correspond approximativement à l'intervalle des températures effectives indiqué précédemment). C'est pour cela qu'on a laissé en pointillé les portions de courbes qui s'y rapportent, mais rien ne s'oppose à la mise en évidence d'écarts des degrés de cuisson, plus importants et significatifs, à l'intérieur de ces mêmes limites, ou entre des températures apparentes toujours comprises dans ces limites et d'autres qui seraient supérieures à 950°C.

L'utilisation au-delà de 950°C des températures apparentes pour l'évaluation du degré de cuisson des céramiques pose moins de problèmes. Toutefois on doit souligner une autre caractéristique des courbes qui représentent l'évolution des températures de cuisson apparentes en fonction des températures effectives. Lorsque les températures apparentes s'approchent de 1100°C, ces courbes s'infléchissent au point de ne plus faire qu'un angle assez faible avec l'horizontale. Cela risque évidemment de provoquer un regroupement un peu artificiel des températures apparentes au-dessus de 1075°C, ce dont il faut tenir compte pour certaines applications. En outre cela constitue pour les températures effectives une zone d'instabilité manifeste, au cas où l'on souhaiterait y revenir. Cet infléchissement des courbes de la figure 7 aux températures élevées est habituel avec les argiles illitiques calcaires. Il résulte des phénomènes de silicatisation de la chaux, qui se manifestent aussi par l'émergence du sommet

S_2 de la courbe de dilatation/retrait de l'argile (cf. fig. 6), mais encore par l'existence d'une plage de températures importantes où le retrait à la cuisson évolue peu, ce qui constitue pour ce type d'argile un avantage technique apprécié. Bien que cette propriété ne soit pas indispensable à notre propos, c'est ce que montre la figure 8 où sont reportées, pour comparaison, la courbe du retrait à la cuisson de l'argile Fronto, celle de la même argile une fois décalcifiée, et enfin celle de l'argile Fronto débarrassée de sa calcite et de la plus grande partie de son quartz (toutes les cuissons ont été effectuées avec des paliers de 1 heure). Cela souligne bien le rôle essentiel de la calcite dans tous ces phénomènes, et rend d'autant plus nécessaire d'examiner l'influence de ses pourcentages sur les températures apparentes.

Influence des pourcentages de chaux

Pour illustrer l'influence des pourcentages de chaux sur les températures de cuisson apparentes des céramiques on a choisi une autre argile illitique calcaire, qui provient de l'atelier traditionnel de Grottaglie dans les Pouilles (Italie) (CUOMO di CAPRIO, 1982). Son pourcentage de chaux est de 17,7.

La courbe de dilatation/retrait de cette argile est donnée figure 9. Par rapport à celle de l'argile Fronto (fig. 6), on y observe les modifications qui avaient été prévues en cas d'augmentation des pourcentages de chaux: élévation de la température du sommet S_2 qui passe de 987°C à 1057°C, diminution de celle du sommet S_1 qui passe de 824°C à 757°C (la coïncidence de cette dernière valeur avec la température du troisième sommet de la courbe de la figure 6 est en partie fortuite).

L'allure de la courbe de dilatation/retrait de l'argile de Grottaglie permet de prévoir certaines des caractéristiques de la courbe qui relie les températures de cuisson apparentes aux températures effectives maintenues en palier pendant 1 heure (fig. 10). On y observe en effet une petite portion d'un segment subhorizontal qui correspond à des températures de cuisson inférieures à 757°C, température qui est celle du sommet S_1 . Les raisons qui rendent compte de son existence ont été déjà été données, à propos des segments semblables des figures 5 et 7. Ces mêmes raisons expliquent la présence de cet autre segment subhorizontal dont les températures apparentes sont proches de 1050°C, celles-ci étant associées à des températures effectives inférieures à celle du sommet S_2 (le segment comparable est pratiquement impossible à mettre en évidence pour l'argile Fronto, à cause du caractère peu marqué du sommet S_2). Entre ces deux segments presque horizontaux la zone d'instabilité des températures apparentes est encore plus marquée que sur la figure 7, la courbe étant sensiblement verticale. Enfin, au-delà de 1050°C, les températures apparentes amorcent une remontée, car les températures de cuisson effectives deviennent supérieures à celles du sommet S_2 .

Sans entrer dans des explications qui demanderaient de plus amples développements, la figure 10 montre bien que l'augmentation des pourcentages de chaux peut arriver à déformer profondément l'image des différents degrés de cuisson d'un ensemble de céramiques. Au point de rendre malaisée, sinon impossible, l'exploitation des résultats obtenus dans ces conditions. Il y a là, une limitation évidente des méthodes dilatométriques.

Argiles kaolinitiques non calcaires

On ne saurait, dans le cadre de cet article, passer en revue tous les types d'argile que l'on risque de rencontrer dans les céramiques. Ceux qu'on a présentés, et celui qu'on va examiner maintenant, devraient toutefois permettre d'étudier la plupart des productions anciennes, et en tout cas de comprendre la nature des problèmes que pose l'étude dilatométrique de leur degré de cuisson.

Pour ce troisième exemple on a choisi une argile provenant de l'atelier de céramiques traditionnelles de Pereruela (Zamora, Espagne) (SEMPERE E., 1982). Il s'agit d'une argile kaolinitique impure contenant un peu de mica muscovite, de montmorillonite et d'illite, mais peu de quartz. Son pourcentage de chaux est de 2,9.

Courbe de dilatation/retrait de l'argile

La courbe de dilatation/retrait de cette argile kaolinitique non calcaire est donnée figure 11. Elle diffère de celle d'une argile kaolinitique typique par l'existence d'un plateau qui s'étend approximativement de 650 à 900°C, et comporte deux sommets S_2 à 734°C et S_3 à 873°C. Or on devrait avoir, avec une argile kaolinitique typique, une décroissance continue au-delà de S_1 , bien qu'avec de notables variations de pente comme on l'observe par exemple entre S_3 et B. Le plateau est dû à l'action antagoniste du retrait de la kaolinite et de l'expansion de l'illite et de la muscovite qui culmine en S_3 , et sans doute de la montmorillonite en S_2 .

Le retrait de la kaolinite qui paraît commencer au-delà de S_1 , à 517°C, devrait en réalité se produire un peu plus tôt, vers 450-460°C. Il se

trouve déplacé par l'expansion qui résulte de la transformation α, β du quartz. Si le quartz était en plus forte proportion dans l'argile, ce sommet disparaîtrait complètement.

Températures de cuisson apparentes et effectives

Sur la figure 12 on a reporté la courbe reliant les températures de cuisson apparentes aux températures effectives, pour des paliers de cuisson de 1 heure. Les exemples donnés précédemment fournissent l'interprétation du segment horizontal supérieur, qui se développe entre les températures effectives de 750 et 900°C. Il est dû au sommet S_3 de l'illite et de la muscovite et se traduira par le regroupement d'un certain nombre de températures de cuisson apparentes autour de 875°C. Mais il laisse subsister la possibilité de nombreuses valeurs plus faibles. Dans le détail on ne saurait affirmer que ces valeurs des températures apparentes inférieures à 875°C permettent de classer, sans interversion possible, les céramiques selon leur degré de cuisson. Mais ce classement conserve tout son intérêt si on accepte de raisonner uniquement sur des températures apparentes dont les écarts sont de plusieurs dizaines de degrés.

On ajoutera que c'est au caractère peu accentué des sommets S_1 et S_2 que l'on doit de ne pas avoir d'autres segments horizontaux où les températures de cuisson apparentes n'évoluent pratiquement pas.

Les températures apparentes supérieures à 875°C ne posent pas de problème particulier ; elles permettent aisément de classer les céramiques selon leur degré de cuisson. On notera que si l'argile kaolinitique n'avait pas renfermé diverses impuretés telles que mica

muscovite, illite et montmorillonite, c'est théoriquement à partir de 450-460°C qu'un tel classement eût été possible. Mais généralement ce classement ne peut se faire qu'à partir de 600°C, par suite de la présence constante de quartz dans les argiles kaolinitiques non calcaires.

Données complémentaires

L'intérêt de l'argile de Pereruela et de la figure 12 est de permettre d'explicitier l'influence, sur les températures apparentes, des différents sommets de la courbe dilatation/retrait. Mais la figure 12 reste pour cela un peu exceptionnelle. Elle se singularise aussi par l'importance des écarts qui existent, pour des températures effectives supérieures à 850°C, entre ces températures et les températures apparentes. Généralement ces écarts sont nettement plus faibles pour les argiles kaolinitiques non calcaires, comme le montre la figure 13 qui concerne l'argile « forte » de Casal de Rei, utilisée dans l'atelier de poteries grises traditionnelles de Molelos (Tondela, Portugal) (PICON M. *et alii*, 1995a). Mais, dans un cas comme dans l'autre, les températures apparentes supérieures à 875°C permettent un classement satisfaisant, en fonction de leur degré de cuisson, des productions qui sont faites avec des argiles kaolinitiques non calcaires.

On clora ces remarques sur un ultime diagramme soulignant qu'on ne saurait généraliser ce qui a été dit sur les écarts relativement modérés qui séparent les températures apparentes et effectives. La courbe de la figure 4 montrait déjà qu'en augmentant considérablement la durée du palier de cuisson, au-delà de ce qui est pratiqué habituellement pour la cuisson des céramiques,

ces écarts pouvaient devenir importants. C'est aussi ce que montraient les courbes de la figure 7, et ce que démontrent encore mieux les courbes de la figure 14 qui concernent des argiles kaolinitiques non calcaires utilisées dans des creusets de cémentation destinés à la préparation du laiton à l'époque romaine (PICON M. *et alii*, 1995 b). Un palier d'une vingtaine d'heures semblait en ce cas fort probable, générant des écarts importants. Or on a pu montrer que si la durée des paliers cumulés est proche d'une semaine la température apparente atteint 1120°C pour une température effective de 1000°C. C'est dire les précautions dont il faut s'entourer lorsqu'il ne s'agit plus de céramiques mais d'éléments de fours.

Les applications à l'archéologie

Rappelons d'abord qu'on parle habituellement de mesure des températures de cuisson des céramiques anciennes, quelle que soit la méthode employée pour cela : dilatométrie, diffraction X... alors qu'en réalité ce qu'on mesure et ce qu'on compare ce sont les degrés de cuisson des céramiques. On s'est suffisamment exprimé sur ce point pour qu'il soit nécessaire d'y revenir plus longuement.

Autre notion qu'il convient de ne pas perdre de vue lorsqu'on traite des applications, et particulièrement ici de celles qui utilisent les températures apparentes, c'est que beaucoup de facteurs secondaires interviennent dans les mesures, à côté des facteurs principaux que sont la température de cuisson et la durée du palier. Même si les mesures concernaient uniquement des céramiques qui seraient produites avec le

même gisement d'argile, et qui auraient été cuites dans des conditions rigoureusement identiques, les températures apparentes présenteraient d'inévitables fluctuations dues pour une large part à celles de leurs compositions et particulièrement, mais pas uniquement, à celles du calcium. Et si les céramiques étudiées avaient des origines diverses, leurs températures apparentes fluctueraient encore plus, tout en ne s'écartant que modérément, comme on l'a déjà dit, d'une valeur moyenne. Cela ne constituerait pas un obstacle sérieux pour la résolution des très nombreux problèmes archéologiques où interviennent des différences importantes des degrés de cuisson, correspondant par exemple à des écarts de près d'une centaine de degrés sur les moyennes des températures apparentes. Mais cela ôte toute signification aux comparaisons qui prétendraient se fonder sur quelques dizaines de degrés de différence. Il est vrai qu'on ne voit pas, dans le domaine de la céramique, quelle situation artisanale, technique ou économique, pourrait exiger une analyse aussi fine.

Les céramiques de La Graufesenque

L'exemple que l'on a choisi concerne les ateliers de La Graufesenque (cf.2.2) qui ont fabriqué diverses catégories de céramiques, mais qui sont connus surtout par leur très importante production de céramiques sigillées au Ier siècle de notre ère. Le problème que l'on examinera est celui des céramiques communes de ce site, et de leurs relations avec les céramiques sigillées. Ont-elles été produites avec les céramiques sigillées, dans les mêmes conditions, ou

constituent-elles une production qui se veut différente ? Question en apparence plutôt dépourvue d'intérêt, si elle n'entraîne dans une réflexion plus vaste sur les coûts de production et leur rôle dans la commercialisation de la céramique sigillée (PICON M., 1993).

Pour étudier cette question on se servira des histogrammes des températures de cuisson apparentes (figure 15). D'abord celui des 23 exemplaires de céramiques sigillées, puis ceux des céramiques communes réparties en 3 ensembles, en fonction de leur pourcentage de chaux (dont on a souligné l'influence sur les températures apparentes). L'ensemble dont les pourcentages de chaux sont dits moyens est en fait constitué de céramiques qui ont été fabriquées avec les pâtes des céramiques sigillées. Les chiffres renvoient à la banque de données du laboratoire où ils sont précédés du symbole GRF.

Occupons-nous d'abord de l'histogramme des céramiques sigillées. On connaît, ce qui est extrêmement rare, les courbes reliant les températures apparentes aux températures effectives, pour une argile, l'argile Fronto, dont les caractéristiques sont très proches de celles de la moyenne des céramiques sigillées de La Graufesenque, et pour 3 durées de palier : 1 h, 4 h, 16 h (figure 7). Aussi peut-on proposer, correspondant à la température apparente moyenne de ce groupe, laquelle est de 1080°C, trois moyennes éventuelles des températures effectives : 1065 °C si le palier avait été de 1 heure, 1030°C s'il avait été de 4 heures, et 990°C s'il avait été de 16 heures. On n'a évidemment aucun moyen qui nous permettrait de choisir entre ces 3 solutions, et entre toutes celles que l'on aurait pu proposer si l'on avait disposé de

courbes plus nombreuses. Illustration du fait que le degré de cuisson d'une céramique dépend de sa température de cuisson et de la durée de son palier de cuisson, et que mille solutions différentes peuvent conduire à la même température apparente. Ajoutons qu'on n'a pas de moyen fiable qui nous permettrait de déterminer la température équivalente de 1065°C, si l'on ne dispose pas, ce qui est le cas général, de la courbe d'une heure de la figure 7. Mieux vaut alors s'en tenir à la température apparente de 1080°C.

Pour déterminer les 3 températures effectives précédentes on a tenu compte de l'infléchissement des courbes de la figure 7, vers les hautes températures. Celui-ci est en outre partiellement responsable du resserrement de l'histogramme des températures apparentes des céramiques sigillées, ce qu'il faut évidemment ne pas oublier lorsqu'on doit comparer la dispersion de ces températures à celles d'autres catégories de céramiques dont le degré de cuisson serait moindre. La question s'étant posée par exemple lorsqu'il avait fallu apprécier le degré de standardisation de différentes productions, comme ce fut par exemple le cas à La Graufesenque pour les présigillées, les sigillées tardives et les sigillées classiques (PICON M., 1993).

Si on passe à l'histogramme des céramiques communes qui ont des pourcentages moyens de CaO et sont faites avec les pâtes des céramiques sigillées, on constate, par rapport aux céramiques sigillées, un décalage très important vers des températures de cuisson apparentes qui sont plus basses. Sans doute le décalage réel fut-il plus important encore si l'on considère que la colonne allant de 975°C à 1000°C, la plus nombreuse, a pu être gonflée artificiellement,

s'agissant précisément de celle qui est la plus proche de la température du sommet S_2 de la courbe de dilatation/retrait de la figure 6. Il y a donc sûrement parmi les exemplaires de cette colonne des céramiques qui - ayant été cuites initialement à des températures notablement inférieures à celle du sommet S_2 - ont décrit lors de leur cuisson la portion de la courbe de dilatation/retrait qu'elles n'avaient pas pu parcourir lors de leur cuisson initiale, et qui ont donné de ce fait un maximum proche de S_2 . C'est un phénomène qui a été amplement décrit plus haut. Il peut avoir concerné ici des céramiques dont les températures de cuisson effectives seraient probablement comprises entre 850-875°C et 975°C (cela restant très approximatif car les effets de la recarbonatation demeurent difficilement prévisibles). Et on ne manquera pas de noter que si l'on avait ignoré l'influence du sommet S_2 , ce qui n'est pas à recommander, la conclusion eût été qualitativement la même : un décalage des températures apparentes et donc des degrés de cuisson de ces deux groupes, qu'aucune raison technique n'imposait.

On abrégera la discussion des histogrammes dont les deux derniers confirment amplement l'observation précédente. Celle-ci est un des éléments de réflexion, parmi d'autres, qui permet de saisir la spécificité de la production des céramiques sigillées. Cette spécificité apparaît encore mieux en comparant les degrés de cuisson des sigillées (et quelques autres caractéristiques aussi) avec ceux des présigillées et des sigillées tardives. On a pu montrer ainsi que la fabrication des sigillées « vraies » se poursuit tant que leur diffusion demeure très importante, ce qui a entraîné un profond renouvellement des conceptions techniques et économiques que l'on avait sur cette production.

Les céramiques de Thasos au IV^e siècle

Des céramiques du IV^e siècle avant notre ère, provenant des fouilles exécutées à Thasos (BLONDE F., 1989), avaient fait l'objet d'analyses en laboratoire et d'une classification fondée sur leurs compositions chimiques. Plusieurs groupes de composition avaient été isolés, dont les plus importants, qui nous occuperont ici, sont numérotés 1, 2, 3 et 5. Plusieurs catégories de céramiques avaient été étudiées : céramiques à vernis noir - VN, céramiques communes - CC, céramiques culinaires - CW. Les résultats des mesures dilatométriques sont rassemblés, par groupe et par catégorie, sous forme d'histogrammes, figure 16. Les chiffres renvoient à la banque de données du laboratoire où ils sont précédés du symbole THG.

On se trouve ici dans une situation plus habituelle que précédemment, puisqu'on ne dispose pas des argiles qui ont servi à la fabrication des céramiques, seules leurs compositions nous sont connues.

Les groupes 1 et 2 sont calcaires, mais ils ont des pourcentages de chaux peu élevés, environ 6 à 7% pour l'un comme pour l'autre, donc moindres que l'argile Fronto dont les caractéristiques dilatométriques sont reportées figures 6 et 7. Aussi peut-on considérer que les températures apparentes mesurées correspondent à des températures effectives qui sont au minimum proches de celle du sommet S_2 , et, plus vraisemblablement, bien supérieures. En tout cas il ne semble pas y avoir d'objection à les considérer comme représentatives du degré de cuisson des céramiques des groupes 1 et 2.

C'est aussi la conclusion à laquelle on arrive pour les groupes 2 et 5 qui utilisent des argiles non

calcaires, et, semble-t-il, à dominante kaolinique. Pour les températures apparentes supérieures à 850°C, cela ne fait aucun doute car on se trouve certainement au-delà du dernier sommet de la courbe de dilatation/retrait de l'argile. Pour les températures inférieures on peut se référer à ce qui a été dit, à propos de l'argile de Pereruela, sur le classement des céramiques d'après leur degré de cuisson. Il a peu de signification si les écarts entre les températures de cuisson apparentes sont faibles, mais garde toute sa valeur si on se contente d'affirmer que les céramiques dont les températures apparentes sont inférieures à 850°C sont dans l'ensemble moins cuites que les autres, et que les moins cuites d'entre elles sont celles dont les températures apparentes sont les plus basses. En revanche on ne saurait affirmer par exemple que la céramique 148 appartenant au sous-groupe CW3 est moins cuite que l'exemplaire 41 de ce même sous-groupe, ou que l'exemplaire 52 du sous-groupe CC3... Ce qui de surcroît n'aurait aucun intérêt.

On doit donc considérer comme assuré que la cuisson des céramiques des groupes 1 et 2 est, dans l'ensemble, très supérieure à celle des groupes 3 et 5. Cela n'a rien d'étonnant pour le groupe 1 qui est attique. Pour le groupe 2 qui est thasien, comme le sont aussi les groupes 3 et 5, cela peut sembler surprenant. Il faut admettre alors que l'artisanat céramique est au IV^e siècle, à Thasos, scindé en deux ensembles largement indépendants. Le premier qui correspond aux compositions du groupe 2 produit surtout des céramiques à vernis noir, VN2, et quelques céramiques communes, CC2. Le second, où l'on a réuni par commodité les groupes 3 et 5 dont les compositions sont assez proches et qui fabriquent les mêmes choses, produit des

céramiques communes, CC3 et CC5, et des céramiques culinaires, CW3 et CW5. Il est intéressant de noter sur la figure 16 que lorsque les potiers fabricants de céramiques à vernis noir font des céramiques communes, ils les font avec la même argile que les céramiques à vernis noir et les cuisent de la même manière. De même les potiers des groupes 3 et 5 fabriquent selon des procédés identiques les céramiques communes et les céramiques culinaires, ce qui est loin d'être toujours le cas. Il existe donc bien un double artisanat céramique, indépendant l'un de l'autre, à Thasos au IV^e siècle.

Ainsi les mesures des températures de cuisson apparentes, associées aux déterminations de composition, permettent-elles généralement de retrouver la structure de l'artisanat céramique existant dans un territoire déterminé. Celle-ci varie énormément selon les régions et les époques, mais il est souvent indispensable de la connaître pour pouvoir interpréter de nombreux phénomènes techniques, économiques et sociaux.

Les deux exemples qui ont été présentés avaient surtout pour objectif de montrer comment utiliser les températures de cuisson apparentes. Ils sont loin d'épuiser les multiples possibilités d'application de la mesure des températures apparentes à la résolution de problèmes archéologiques.

Bibliographie

- BLONDE F., 1989, La Céramique, in BLONDE *et alii*, Le comblement d'un puits public à Thasos, B.C.H., CXIII, p.481-549.
- CORREIA A., 1980, O ultimo oleiro de Fazamos, Beira alta, Viséu, p.241-275.
- CUOMO di CAPRIO N., 1982, Ceramica rustica tradizionale in Puglia, Galatina.
- PICON M., 1993, Le schéma de développement proposé pour l'atelier de Lezoux peut-il s'appliquer à La Graufesenque ?, Annales de Pegasus, 1990-1991, p.33-37.
- PICON M. *et alii*, 1995a, Estudo em laboratorio e observação etnoarqueologica das ceramicas negras portuguesas, in Actas das las Jornadas de Ceramica Medieval e Pos-Medieval, Porto, p.189-206.
- PICON M. *et alii*, 1995b, Un type particulier de grands récipients en terre réfractaire utilisés pour la fabrication du laiton par cémentation, S.F.E.C.A.G., Actes du Congrès de Rouen, p.207-215.
- SEMPERE E., 1982, Rutas a los Alfares/Espana-Portugal, Barcelona.
- TITE M. S., 1969, Determination of the firing temperature of ancient ceramics by measurement of thermal expansion : a reassessment, Archaeometry, 11, p.131-143.

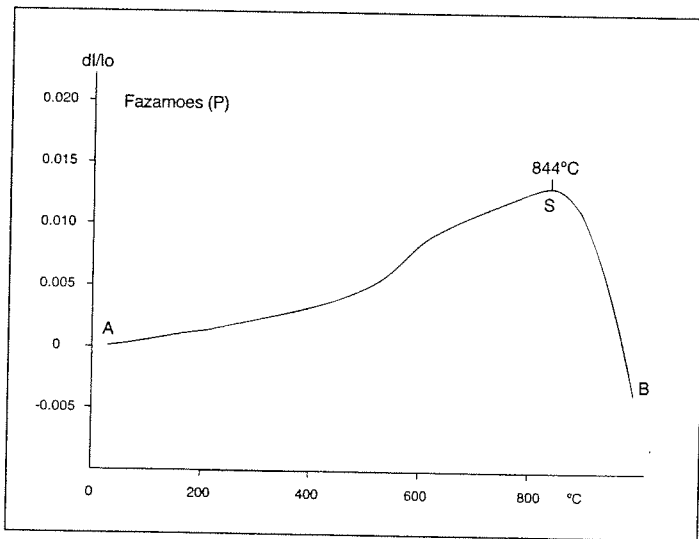


Fig. 1 - Courbe de dilatation/retrait de l'argile de Fazamoes.

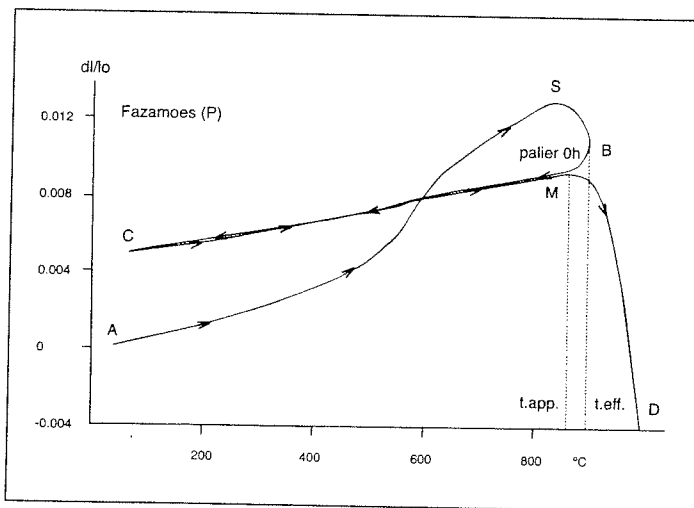


Fig. 2 - Cuisson à 900°C, sans palier, de l'argile de Fazamoes, refroidissement et recuisson ultérieurs.

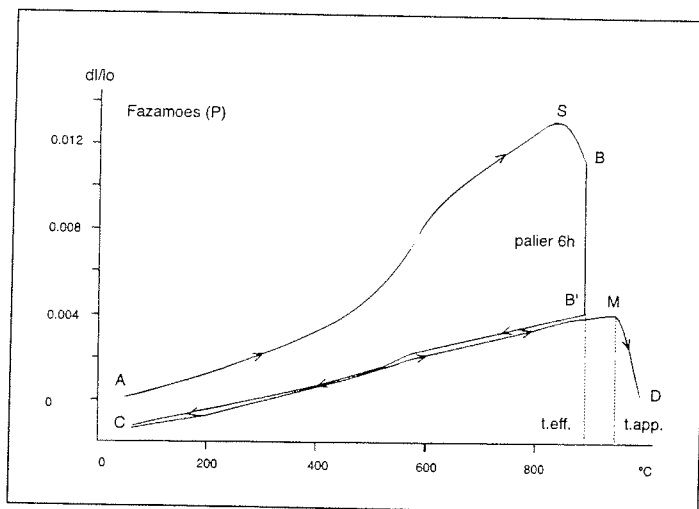


Fig. 3 - Cuisson à 900°C, avec un palier de 6h, de l'argile de Fazamoes, refroidissement et recuisson ultérieurs.

Fig. 4 - Evolution des températures de cuisson apparentes, en fonction de la durée du palier, de l'argile de Fazamoes cuite à 900°C.

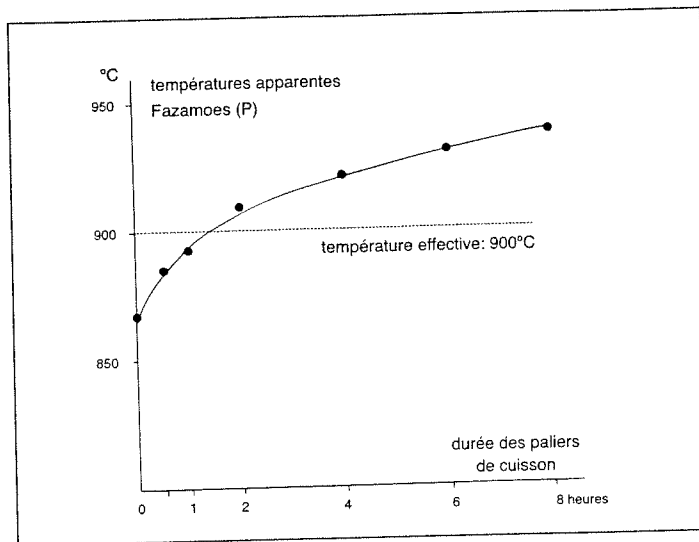


Fig. 5 - Courbe reliant les températures apparentes aux températures effectives, pour l'argile de Fazamoes cuite avec des paliers de 1 heure.

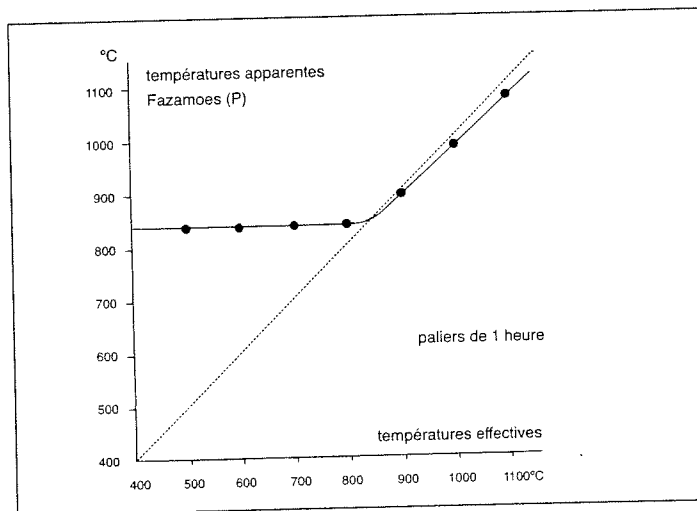
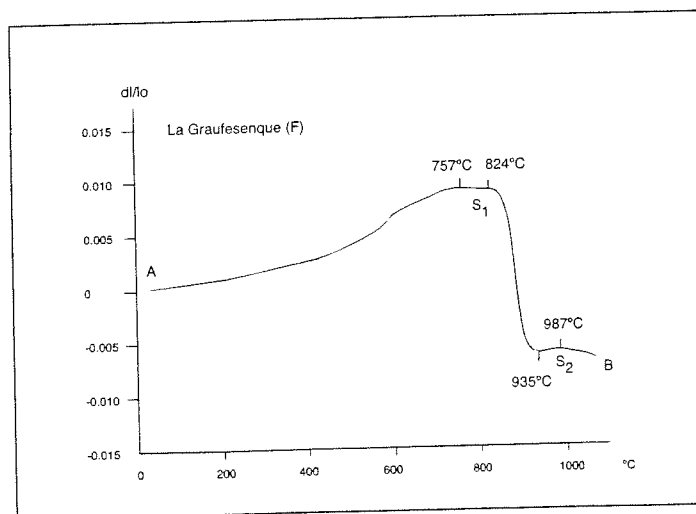


Fig. 6 - Courbe de dilatation/retrait de l'argile Fronto.



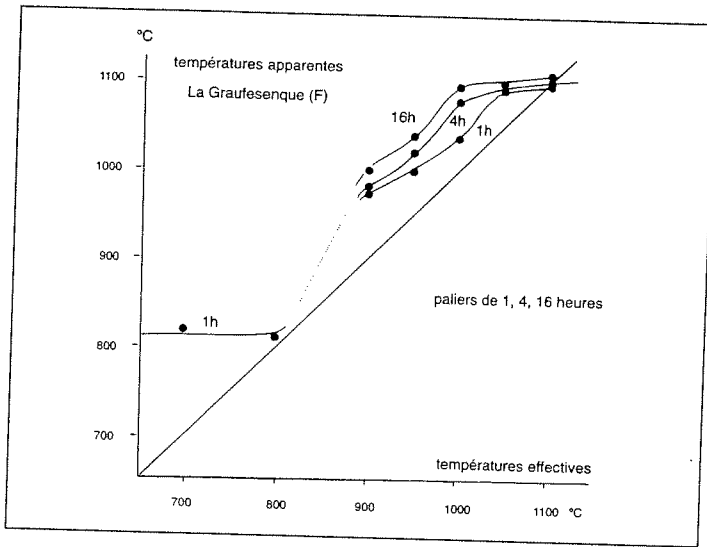


Fig. 7 - Courbe reliant les températures apparentes aux températures effectives, pour l'argile Fronto cuite avec des paliers de 1, 4 et 16 heures.

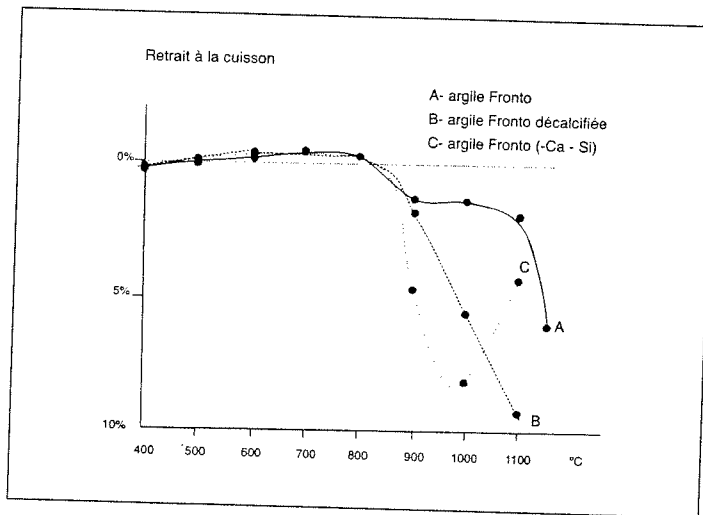


Fig. 8 - Courbes du retrait à la cuisson de l'argile Fronto, de celle-ci décalcifiée, et de la même débarrassée de sa calcite et de son quartz (marquée - Ca - Si). On notera la remontée de cette dernière courbe due à la fermeture des pores.

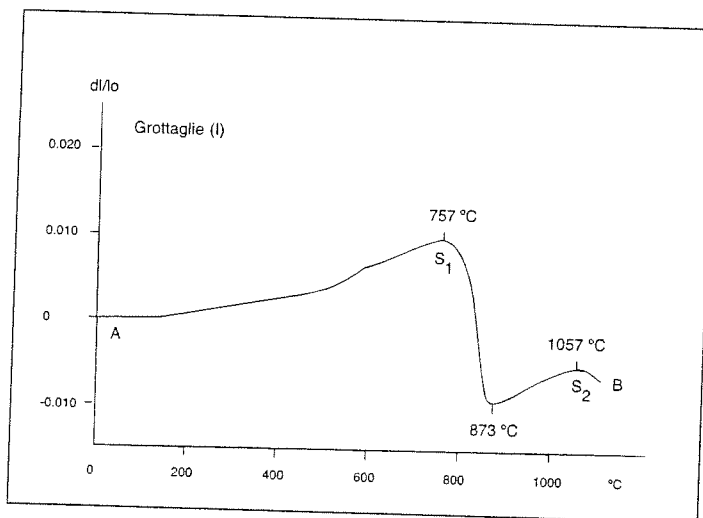


Fig. 9 - Courbe de dilatation/retrait de l'argile de Grottaglie.

Fig. 10 - Courbe reliant les températures apparentes aux températures effectives, pour l'argile de Grottaglie cuite avec des paliers de 1 heure.

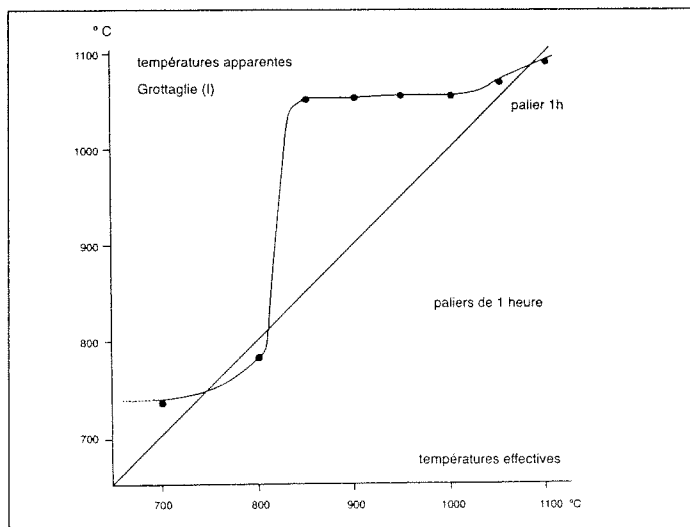


Fig. 11 - Courbe de dilatation/retrait de l'argile de Pereruella.

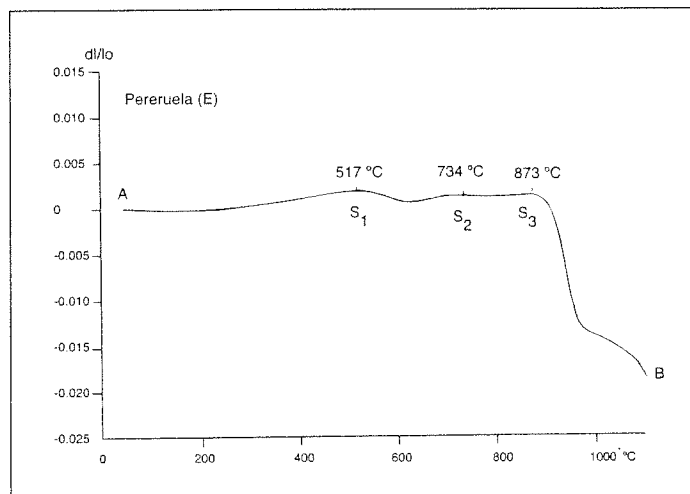
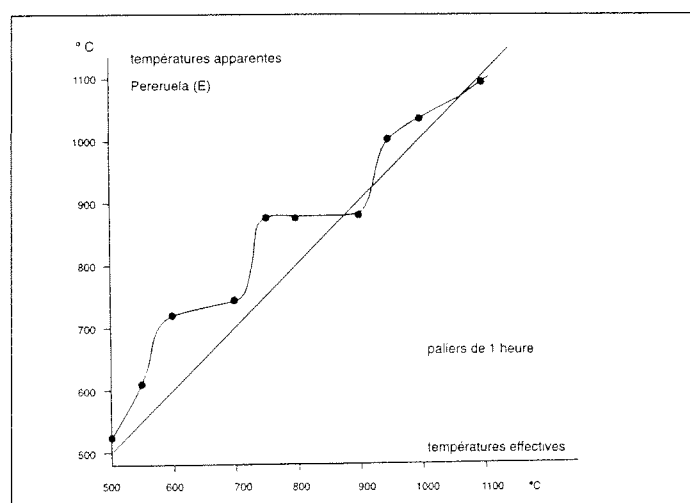


Fig. 12 - Courbe reliant les températures apparentes aux températures effectives, pour l'argile de Pereruella cuite avec des paliers de 1 heure.



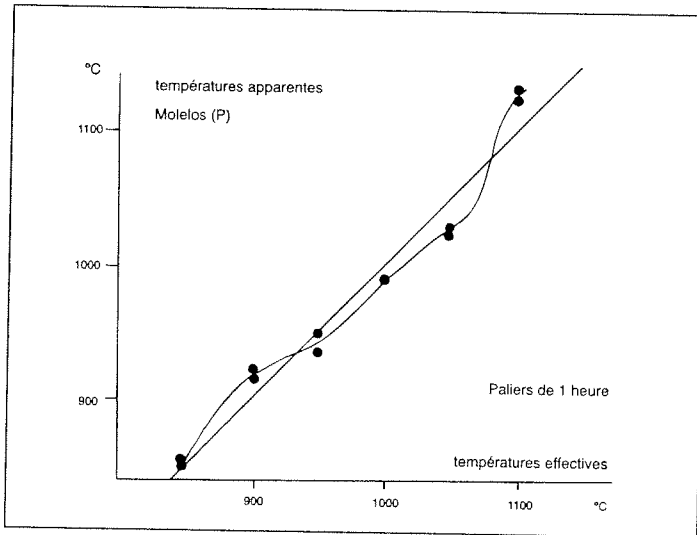


Fig. 13 - Courbe reliant les températures apparentes aux températures effectives, pour l'argile forte de Molelos cuite avec des paliers de 1 heure.

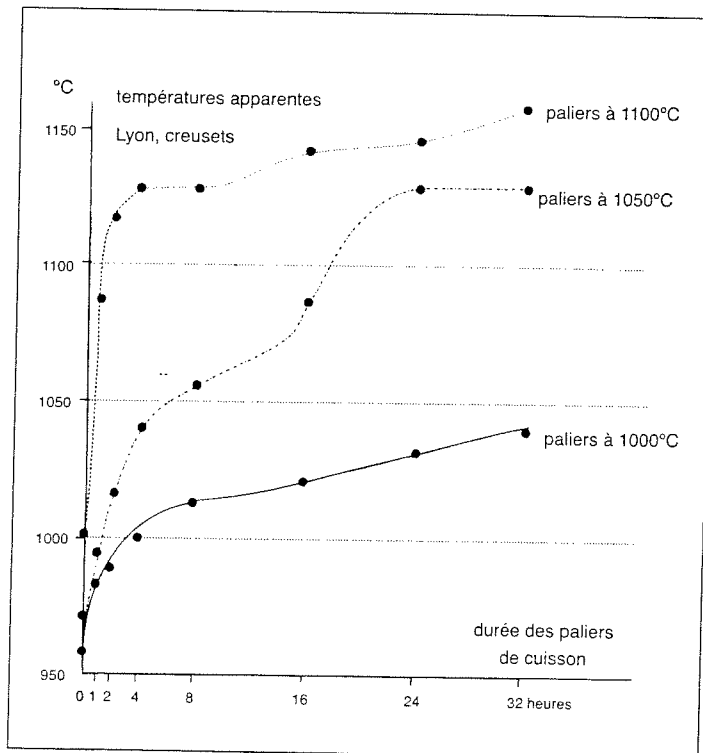


Fig. 14 - Evolution des températures de cuisson apparentes, en fonction de la durée du palier, de l'argile des creusets de cémentation de Lyon cuite à 1000, 1050 et 1100°C.

La Graufesenque (F)
Histogrammes des températures de cuisson apparentes

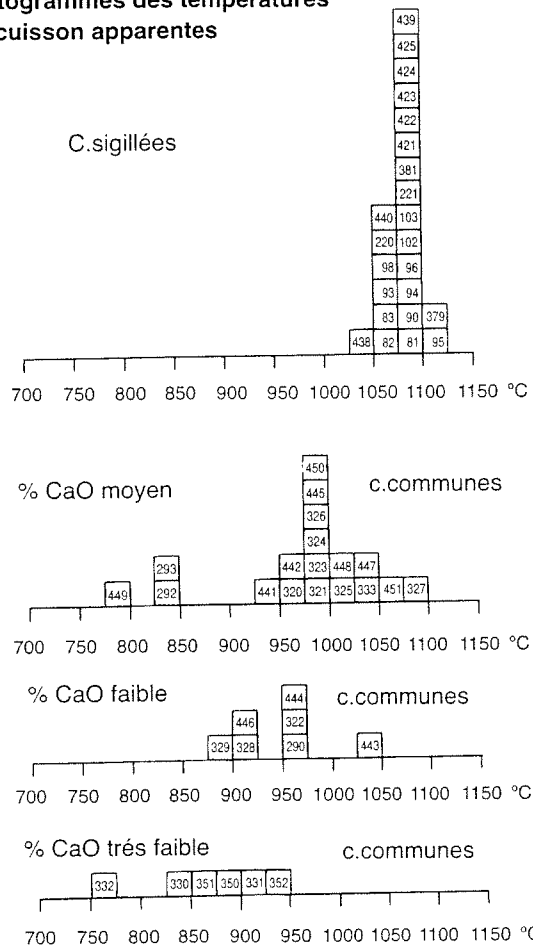


Fig. 15 - Histogrammes des températures de cuisson apparentes des céramiques sigillées et des céramiques communes de La Graufesenque.

Thasos (Gr)
Histogrammes des températures de cuisson apparentes

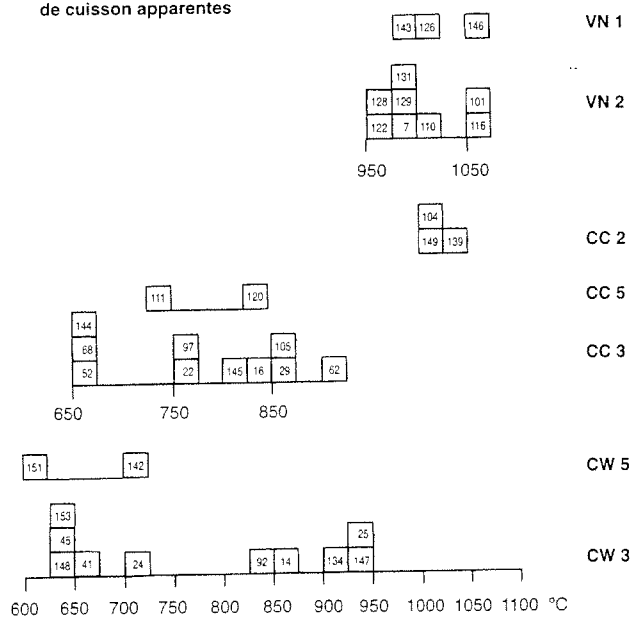


Fig. 16 - Histogrammes des températures de cuisson apparentes des céramiques du IV^e siècle à Thasos.