# Archéomagnétisme des matériaux déplacés : applications à la datation des matériaux de construction d'argile cuite en archéologie

Philippe Lanos

▶ **To cite this version:**

Philippe Lanos. Archéomagnétisme des matériaux déplacés : applications à la datation des matériaux de construction d'argile cuite en archéologie. Archéologie et Préhistoire. Université de rennes 1; U.E.R Structure et Propriétés de la Matière, 1987. Français. NNT : . tel-02406347

**HAL Id: tel-02406347**

**https://theses.hal.science/tel-02406347**

Submitted on 16 Dec 2019

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

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

HAL
archives-ouvertes.fr

# Archéomagnétisme des matériaux déplacés : applications à la datation des matériaux de construction d'argile cuite en archéologie

Philippe Lanos

▶ **To cite this version:**

Philippe Lanos. Archéomagnétisme des matériaux déplacés : applications à la datation des matériaux de construction d'argile cuite en archéologie. Archéologie et Préhistoire. Université de rennes 1; U.E.R Structure et Propriétés de la Matière, 1987. Français. tel-02406347

**HAL Id: tel-02406347**
**https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02406347**

Submitted on 16 Dec 2019

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

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

N° d'ordre : 127

# THESE

présentée

DEVANT L'UNIVERSITE DE RENNES I

U.E.R. STRUCTURES ET PROPRIETES DE LA MATIERE

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE RENNES I

MENTION SCIENCES DE LA TERRE

par

**Philippe LANOS**

Sujet de la Thèse :

## ARCHEOMAGNETISME DES MATERIAUX DEPLACES APPLICATIONS A LA DATATION DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION D'ARGILE CUITE EN ARCHEOLOGIE

soutenue le 19 Juin 1987 devant la commission d'Examen :

| | | |
|---|---|---|
| MM. | N. BONHOMMET | Président |
| | L. DALY | Rapporteur |
| | J. L. LE MOUEL | Rapporteur |
| | L. LANGOUET | Examinateur |
| | J. P. MOREL | Examinateur |
| | G. BARRUOL | Examinateur |

TA RENNES 1987/79

N° d'ordre : 127

# THESE

Exclu du prêt

présentée

DEVANT L'UNIVERSITE DE RENNES I

U.E.R. STRUCTURES ET PROPRIETES DE LA MATIERE

pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE RENNES I

MENTION SCIENCES DE LA TERRE

par

**Philippe LANOS**

Sujet de la Thèse :

## ARCHEOMAGNETISME DES MATERIAUX DEPLACES APPLICATIONS A LA DATATION DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION D'ARGILE CUITE EN ARCHEOLOGIE

soutenue le 19 Juin 1987 devant la commission d'Examen :

TA RENNES 1987/79

| | | |
|---|---|---|
| MM. | N. BONHOMMET | Président |
| | L. DALY | Rapporteur |
| | J. L. LE MOUEL | Rapporteur |
| | L. LANGOUET | Examinateur |
| | J. P. MOREL | Examinateur |
| | G. BARRUOL | Examinateur |

LV REVENUE

# AVANT-PROPOS

Ce travail a été effectué au Laboratoire d'Archéométrie de l'Université de Rennes I, sous la direction de Mrs Loïc Langouët et Louis Goulpeau. Je leur adresse ici toute ma reconnaissance pour m'avoir accueilli au sein de leur équipe. Les nombreux conseils qu'ils m'ont prodigués ainsi que l'appui et la confiance qu'ils m'ont constamment accordés ont largement favorisé l'accomplissement de ce travail.

Je tiens à remercier vivement Mr Norbert Bonhommet qui m'a accepté comme étudiant dans son Laboratoire de Géophysique Interne, à l'Université de Rennes I, et qui m'a toujours soutenu et encouragé.

J'exprime également ma profonde gratitude aux membres du Laboratoire de Géomagnétisme de Saint-Maur-des-Fossés où j'ai effectué mes premières armes en archéomagnétisme. Je remercie tout particulièrement Mme Ileana Bucur et Mrs Lucien Daly, Maxime Le Goff et John Thompson qui m'ont guidé dans mes recherches et qui m'ont aidé à réaliser certaines expériences.

J'adresse à Mr Yvon Cailleau, briquetier aux Rairies, toute ma sympathie pour l'accueil qu'il nous a fait lors de la visite de son atelier et pour toutes les facilités qu'il nous a accordées dans la réalisation des mesures et des prélèvements effectués sur place.

Je voudrais enfin adresser mes sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué, à des titres divers, à l'élaboration de ce travail.

Le Laboratoire d'Archéométrie (Université de Rennes I) a mis gracieusement à ma disposition son ensemble à traitement de texte Micral-30 et imprimante Laser, me permettant la réalisation directe de ce présent mémoire.

L'atelier de reprographie de l'Université de Rennes I a bien voulu se charger d'en réaliser les présents tirages.

# SOMMAIRE

INTRODUCTION 11

## Première partie

## ARCHEOMAGNETISME DES MATERIAUX DEPLACES D'ARGILE CUITE

**Chapitre I : PRINCIPES DE LA METHODE** 15

Introduction 15

A - Les domaines d'application de la datation archéomagnétique 16
Les argiles cuites en archéologie 16
Les structures en place 17
Les matériaux déplacés 17

B - Datation archéomagnétique des matériaux déplacés 17
Hypothèses sur la position des matériaux lors de la cuisson 17
Constitution de l'échantillonnage 20
Préparation des carottes et mesures des aimantations 20
Détermination de l'inclinaison et de la position de cuisson 22
La notion de déviation 22
Les diagrammes I-Δ 27

**Chapitre II : TRAITEMENTS STATISTIQUES DES DONNEES** 29

Introduction 29

A - Positions de cuisson et déviation 29

B - Repérage des faces des objets 33

C - Représentation des directions d'aimantation 33
Le diagramme de Schmidt 33
Les diagrammes de pointage I-Δ 39

D - Les diagrammes de densité 43
Probabilité d'existence d'agglomérats artificiels dus à la fragmentation 46

E - Statistique de Fisher 53
Application aux diagrammes de pointage 54

F - Traitement informatique des données 57

Conclusion : les causes d'erreurs 60

## Deuxième partie

## ETUDE ET CORRECTION DES EFFETS PERTURBATEURS

**Chapitre III : LES AIMANTATIONS SECONDAIRES** 65

Introduction 65

A - Les aimantations thermorémanentes partielles 65

B - Exploitation des mesures de désaimantation 67
Exploitation informatique 67
Exemple de traitement 69
Etude des aimantations primaires 74
Etude des aimantations secondaires 74

Conclusion 76

*Article* : Les apports de la désaimantation thermique
dans des études archéomagnétiques de matériaux déplacés. 81

**Chapitre IV : L'EFFET DE FORME ou EFFET DU CHAMP DEMAGNETISANT** 91

*Article* : The effects of demagnetizing fields on thermoremanent magnetization
acquired by parallel sided baked clay blocks. 93

Summary 93

Introduction 93

Preparation of samples and measurement of the TRM 94
Determination of firing position 94
Application of measurements 96
Application example : Le Mans - Chappe - 96

The shape effect : outline of the problem 97
Theory of demagnetizing field 97
Apparent and intrinsic susceptibility 101
The demagnetizing field in a parallelepiped 104

Evaluation of the parameters 104
Correction of shape effect 111
Correction examples 111
Experimental verification 119

Conclusion 123
References 123

**Chapitre V : L'ANISOTROPIE D'AIMANTATION THERMOREMANENTE** 125

Introduction 125

A - L'anisotropie d'ATR 127
Notion de tenseur 127
Surface des aimantations apparentes 127

B - L'anisotropie d'ATR dans les matériaux déplacés 129
Conditions expérimentales 129
Proportionnalité entre l'ATR et le champ 130
Détermination expérimentale des termes du tenseur 130
Stabilité de l'aimantation d'une chauffe à l'autre 134
Invariance des facteurs d'anisotropie vis à vis des vitesses de refroidissement 134
Indépendance des facteurs $F_{xz}$ et $F_{xy}$ vis à vis des températures de blocage 135

C - Correction des effets de l'anisotropie d'ATR 135
Formules de correction 135
Modèle du plan de facile aimantation 136
Interaction avec l'effet de forme 136
Modalités d'application des corrections 137

D - Vérifications expérimentales 138
Expériences sur des tuiles entières 138
Etude expérimentale sur un lot de carreaux de pavage 146

Conclusion 160

*Article* : The anisotropy as a disturbance of the archaeomagnetic dating method. 171

**Chapitre VI : LES EFFETS DES POSITIONS DE CUISSON** 185

Introduction 185

A - La pente 185
Matériaux déplacés retrouvés en dehors du contexte de fabrication 187
Matériaux retrouvés dans ou près d'un four bien conservé 187

B - Le pendage 188

Conclusion 197

## Troisième partie

## ARCHEOMAGNETISME DE MATERIAUX DEPLACES AUTRES QUE LES TUILES, BRIQUES ET CARREAUX DE PAVAGE

Chapitre X : LES MONNAIES 243

*Article* : The remanent magnetization of ancient struck coins. 247

Introduction 247
Remanent magnetization 248
Correlation between magnetization intensity and iron content 252
Saturation isothermal magnetization 254
The internal distribution of the magnetization 256
Conclusions 258
References 258

## Quatrième partie

## APPLICATIONS A L'ARCHEOLOGIE

Chapitre XI : ARCHEOMAGNETISME ET DATATION 261

A - Le champ magnétique terrestre 261

B - Homogénéité de la variation séculaire pour l'Europe de l'Ouest 261

C - La variation en direction du CMT, en France, durant les deux derniers millénaires 263

Conclusion 265

Chapitre XII : ARCHEOMAGNETISME ET ARCHEOTECHNOLOGIE 269

Introduction 269

A - Les positions de cuisson 269
Epoque gallo-romaine 269
Epoque médiévale 272
Les pendages 272
La pente des sols 272

B - Les directions de rangement et le plan des fours 274

C - L'orientation des faces des matériaux 281

D - Les intensités moyennes d'aimantation 281

E - L'anisotropie d'aimantation thermorémanente 282

Conclusion 283

Chapitre VII - LES TUBULI ET LES IMBRICES 201

Introduction 201

A - Les *tubuli* 201
Etude archéomagnétique des tubuli 201
Interprétation archéologique 207
Conclusion 207

B - Les *imbrices* 207
Etude archéomagnétique des imbrices 207
Conclusion 210

Chapitre VIII : LES BRIQUETAGES 211

Introduction 211

A - Apports de l'archéomagnétisme à la technologie des briquetages 211

B - Etude archéomagnétique des briquetages de Karreg-ar-Yellan en Ploubazlanec (Côtes-du-Nord) 212
L'échantillonnage 215
Les résultats des mesures 215
Interprétation archéologique des résultats 220

Conclusion 223

Chapitre IX : LES FONDS DE POTS 225

*Article* : Datation archéomagnétique de la poterie carolingienne de Launay-Margat en Guipel (Ille-et-Vilaine). 226

Introduction 226

A - Découverte et identification du site 226

B - La fouille 226
1 - Le sol d'occupation 227
2 - Le four 228

C - La production de l'atelier 231

D - La datation 232
1 - La datation par le carbone 14 232
2 - La datation par l'archéomagnétisme 232
Exposé de la méthode 232
Etude archéomagnétique du four 234
Etude archéomagnétique de la poterie 235

Conclusion 241

Bibliographie 241

Chapitre XIII : DES EXEMPLES D'APPLICATION 285

A - Apport de l'archéomagnétisme à l'étude du parcellaire antique 285

B - Apport de l'archéomagnétisme à l'étude des matériaux de construction gallo-romains recueillis en milieu rural en Haute-Bretagne. 288

*Article* : Datation archéomagnétique des édifices ruraux gallo-romains en Haute-Bretagne. 289

Introduction 289

A - Datation 290
Rappel de la méthode 290
Les sites étudiés 295
L'utilisation du mobilier céramique 295
La datation archéomagnétique 297
Conclusions sur la datation 298

B - Exploitation des données archéotechnologiques 298
Les positions de cuisson 298
Les intensités d'aimantation 302
Le nombre d'ensembles distincts par lot 305
L'orientation des plans d'aplatissement des tuiles et le caractère rectangulaire des fours 305
L'agencement des tuiles dans les fours 307

Conclusion 307

Bibiographie 307

CONCLUSION 309

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 311

BIBLIOGRAPHIE 317

# INTRODUCTION

La datation par l'archéomagnétisme repose sur la variation dans le temps des éiéments Inclinaison, Déclinaison et Intensité qui décrivent le champ magnétique terrestre (CMT) en un lieu donné, à un instant donné, et sur la propriété qu'ont certains matériaux, en particulier les terres cuites, d'acquérir une aimantation rémanente colinéaire et proportionnelle à ce champ. A la suite des travaux précurseurs d'E. Thellier, l'archéomagnétisme des matériaux déplacés, c'est-à-dire des matériaux retrouvés dans une position différente de celle qu'ils avaient lors de l'acquisition de leur aimantation, a connu récemment un nouvel essor grâce aux recherches de L. Langouët et L. Goulpeau, responsables du Laboratoire d'Archéométrie de Rennes I. Dans ce laboratoire, la datation des argiles cuites telles que les matériaux de construction et les céramiques repose sur l'exploitation de l'inclinaison moyenne déduite des mesures de l'aimantation. Le report de cette valeur moyenne sur la courbe de variation séculaire de l'inclinaison permet ainsi de remonter à la date de dernière cuisson des matériaux. La déclinaison n'est plus accessible du fait du déplacement des objets. Par contre, la notion de déviation a été introduite pour caractériser l'orientation, dans le plan horizontal, des matériaux par rapport au Nord magnétique de l'époque. Dans ce mémoire, nous nous intéresserons uniquement à l'étude de la direction de l'aimantation mesurée sur les matériaux et nous laisserons de côté les problèmes liés à l'intensité.

L'objectif de ce travail a été d'améliorer la fiabilité et la précision de la datation archéomagnétique des matériaux déplacés, d'étendre cette méthode de datation à de nouveaux objets et d'en montrer les apports à l'archéologie et à l'archéotechnologie.

La première partie expose les développements apportés dans les traitements statistiques des données de mesure. Un nouveau mode de représentation des résultats permet non seulement une détermination rigoureuse de l'inclinaison moyenne servant à la datation, mais aussi de reconstituer plus précisément l'agencement des matériaux dans les fours, lors de la cuisson.

La deuxième partie est consacrée à l'étude des perturbations de la direction de l'aimantation provoquées par les aimantations secondaires, le champ démagnétisant, l'anisotropie d'aimantation thermorémanente et les effets de pente ou de pendage. L'étude théorique des trois derniers effets a pour but de mettre au point des modèles de correction dans lesquels la déviation joue un rôle essentiel. Une vérification expérimentale réalisée sur une production actuelle et artisanale de carreaux de pavage montre la validité de ces corrections et apporte une nouvelle démonstration de la grande précision et de la fiabilité des datations obtenues par la méthode.

Dans la troisième partie, des études effectuées sur des *tubuli*, des *imbrices*, des éléments de briquetages et des fonds de pots fournissent autant d'exemples d'application faisant intervenir les nouveaux traitements statistiques et les corrections des effets perturbateurs. En outre, une étude originale a été effectuée à propos de l'intérêt archéomagnétique de l'aimantation observée sur les monnaies frappées. Chaque exemple s'inscrit dans le cadre d'une problématique archéologique particulière et met en évidence la collaboration nécessaire entre l'archéomagnéticien et l'archéologue pour une exploitation optimale des résultats archéomagnétiques.

Enfin, la quatrième partie de ce mémoire s'attache à développer les aspects archéologiques de la datation archéomagnétique appliquée aux tuiles, briques et carreaux de pavage. Un rappel des connaissances en matière de variation séculaire de la direction du CMT, en France, pour la période historique, indique les possibilités de datation offertes actuellement par la méthode. De plus, l'exploitation des données archéotechnologiques déduites des mesures archéomagnétiques constitue pour l'archéologie un nouveau moyen de caractériser et éventuellement de différencier des productions à partir de l'étude des matériaux retrouvés sur les sites d'utilisation.

# Première partie

# ARCHEOMAGNETISME DES MATERIAUX DEPLACES D'ARGILE CUITE

# I - PRINCIPES DE LA METHODE

## INTRODUCTION

La datation par l'archéomagnétisme repose d'une part sur la variation dans le temps du champ magnétique terrestre (CMT) et d'autre part sur la propriété qu'ont certains matériaux d'acquérir une aimantation rémanente colinéaire et proportionnelle à ce champ.

En un point O de la surface de la terre, à l'instant, le CMT peut être représenté par un vecteur $\overrightarrow{OF}$ dont la direction est celle que prendrait une aiguille aimantée mobile autour de son centre de gravité placé en O, et le sens, celui qui va du pôle sud de l'aiguille à son pôle nord (fig.I-1).

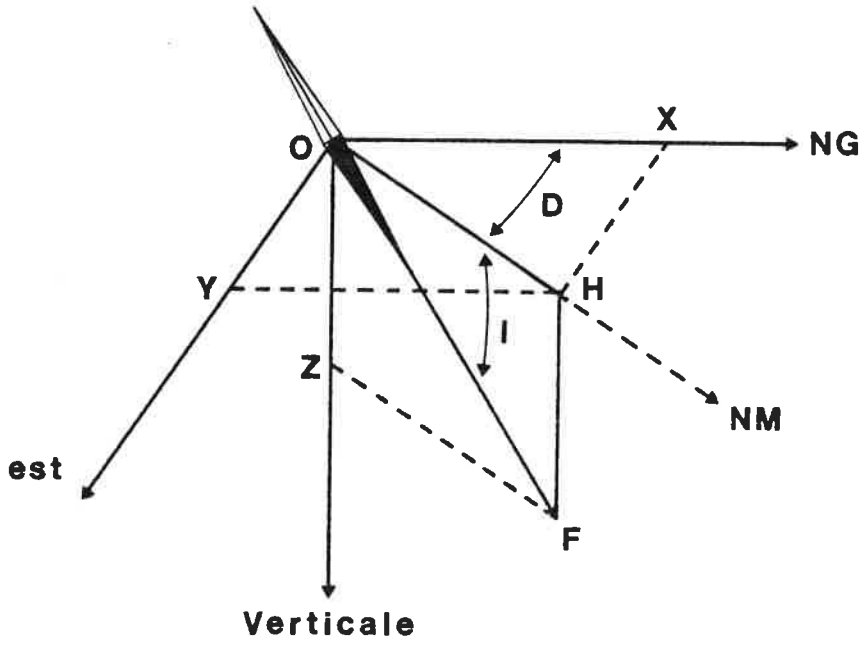



**Fig. I-1** : Composantes du vecteur aimantation exprimées dans le repère géographique.

La déclinaison D est l'angle du plan méridien magnétique (NM) avec le plan méridien géographique (NG). L'inclinaison I est l'angle entre $\overrightarrow{OF}$ et sa projection orthogonale sur le plan horizontal local (Oxy). F est l'intensité du champ, ou module du vecteur géomagnétique. En magnétisme terrestre, l'unité d'intensité est le gamma ($1\ \gamma = 10^{-5}$ Oe). A titre d'exemple, le CMT à Paris en 1975 était caractérisé par une inclinaison de 64°, une déclinaison de 5° ouest et une intensité de 47000 $\gamma$. Les premières mesures directes de la direction du CMT remontent aux années 1600 en Europe occidentale. Pour les temps historiques et géologiques, la connaissance de l'évolution de ce champ n'est accessible que de façon indirecte par l'intermédiaire de l'aimantation rémanente des argiles cuites et des roches.

L'aimantation rémanente des roches peut être provoquée par des mécanismes variés. Le processus le plus important est celui qui consiste en un chauffage à une température supérieure à la température de Curie $T_c$ des constituants antiferromagnétiques et ferrimagnétiques de la roche, suivi d'un refroidissement en présence d'un champ magnétique extérieur. La roche acquiert ainsi une aimantation, dite thermorémanente (ATR), colinéaire à la direction du champ agissant, souvent plus intense que l'aimantation induite et généralement d'une grande stabilité dans le temps. Ce processus d'aimantation affecte principalement les argiles cuites et les roches volcaniques. En ce qui concerne les matériaux archéologiques, d'autres processus ont été mis en évidence. Citons par exemple l'aimantation biogénique des argiles crues (Kirschvink, 1982) ou encore l'aimantation des monnaies frappées (Tarling, 1982 ; Hoye, 1983 ; Goulpeau *et al.*, 1987).

Les terres cuites, que l'on retrouve en grande quantité et sous des formes variées sur les sites archéologiques, ont des aimantations naturelles (ARN) qui sont presque toujours des ATR. Elles contiennent des minéraux magnétiques variés : sesquioxydes de fer (hématite $Fe_2O_3\alpha$ et maghémite $Fe_2O_3\gamma$ ), magnétite et titanomagnétites, qui se présentent généralement en grains très fins. Les lois générales de l'aimantation des argiles cuites furent découvertes par E. Thellier (1938), et ce fut L. Néel (1949 et 1955) qui, le premier, en établit la théorie. Depuis les travaux de ces précurseurs, les recherches théoriques et expérimentales sur le sujet n'ont cessé de progresser. Elles ont fait l'objet de quelques synthèses, en particulier par F.D. Stacey (1963) et par F.D. Stacey et S.K. Banerjee (1974).

La détermination de la direction de l'aimantation rémanente d'un échantillon, repéré *in situ* avant prélèvement, est à même de fournir la direction du champ magnétique à l'époque et au lieu de l'acquisition de cette aimantation. Bien que plus délicates, les mesures d'intensité effectuées sur les échantillons permettent également de déterminer, dans certains cas, l'intensité du CMT qui a produit l'aimantation rémanente.

Les mesures effectuées sur des terres cuites bien datées ont permis de reconstituer, avec une certaine précision, l'évolution du CMT au cours des deux derniers millénaires (*cf.* chapitre XI). En France, durant cette période, l'inclinaison a fluctué entre 55° et 74° et la déclinaison entre 23° ouest et 20° est. L'intensité, quant à elle, semble avoir diminué de façon continue. Elle était de l'ordre de 70000$\gamma$ à l'époque gallo-romaine. Par contre, les incertitudes sur les âges des roches interdisent pratiquement toute proposition de courbe précise de la variation séculaire du CMT pour les époques récentes du quaternaire (Salis, 1986) et *a fortiori* pour les temps géologiques.

Les différents aspects de la datation archéomagnétique abordés dans ce mémoire concerneront principalement les argiles cuites. L'archéomagnétisme des monnaies fera l'objet d'une étude particulière au chapitre X. Les aimantations rencontrées seront presque uniquement du type aimantation thermorémanente (ATR). Enfin, seul l'aspect directionnel de l'aimantation sera discuté, aussi bien dans les traitements statistiques et la correction des effets perturbateurs que dans la datation archéomagnétique.

## A - LES DOMAINES D'APPLICATION DE LA DATATION ARCHEOMAGNETIQUE

### LES ARGILES CUITES EN ARCHEOLOGIE

Les argiles cuites ont été utilisées dans la fabrication des poteries, dès l'époque néolithique, et dans la construction de monuments des civilisations anciennes de la Mésopotamie et de la Grèce. Mais il faut attendre le I$^{er}$ siècle avant notre ère pour voir, dans le monde occidental grec et romain, l'utilisation courante des argiles cuites dans la fabrication des matériaux de construction (Adam, 1984). Les multiples usages de celle-ci dans

l'architecture des différentes civilisations, à travers le monde, offrent un très vaste champ d'application à la méthode de datation par l'archéomagnétisme. Selon qu'elles ont conservé ou non la position de leur dernière cuisson, les argiles cuites peuvent être classées en structures en place ou en matériaux déplacés.

### LES STRUCTURES EN PLACE

Il s'agit des vestiges de fours, de foyers et de constructions incendiées ou fortement chauffées (thermes par exemple). Le prélèvement, sur de telles structures, d'échantillons orientés *in situ* selon le repère géographique (nord, est, verticale) permet, après mesure, d'obtenir la direction (inclinaison, déclinaison) du CMT ayant régné au lieu et à la date de la dernière cuisson. Cela suppose que ces structures n'aient ni basculé ni subi de déformations internes depuis la date de leur dernière chauffe. Dès les années 1950, E. Thellier commença l'étude archéomagnétique des fours en place (Thellier, 1951), puis il publia, en 1981, les résultats obtenus sur plus de 200 structures datées (Thellier, 1981). Ces recherches ont permis une première reconstitution de la variation de la direction du CMT, dans nos régions, pour la période historique. Notons que l'aimantation des structures en place permet, en principe, l'obtention des trois composantes du champ, à savoir l'inclinaison, la déclinaison et l'intensité.

### LES MATERIAUX DEPLACES

Ce sont tous les matériaux d'argile cuite déplacés du lieu de leur fabrication (l'atelier) au lieu de leur utilisation (la construction). Il s'agit principalement des poteries et des matériaux de construction tels que les tuiles, les briques, les carreaux de pavage, ou encore les *tubuli* et les éléments de briquetages (fig. I-2). De tels matériaux ne sont utilisables à des fins de datation par l'archéomagnétisme que s'il est possible de retrouver la position qu'ils avaient par rapport au plan horizontal local lors de leur dernière cuisson.

## B - DATATION ARCHEOMAGNETIQUE DES MATERIAUX DEPLACES

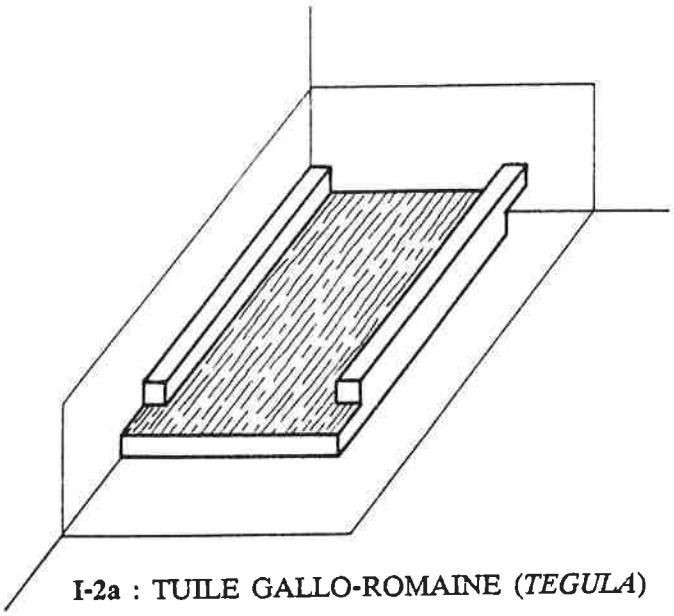
### HYPOTHESES SUR LA POSITION DES MATERIAUX LORS DE LA CUISSON

L'hypothèse de base de l'archéomagnétisme des matériaux déplacés intervient au niveau du positionnement des objets dans les fours lors de la cuisson.

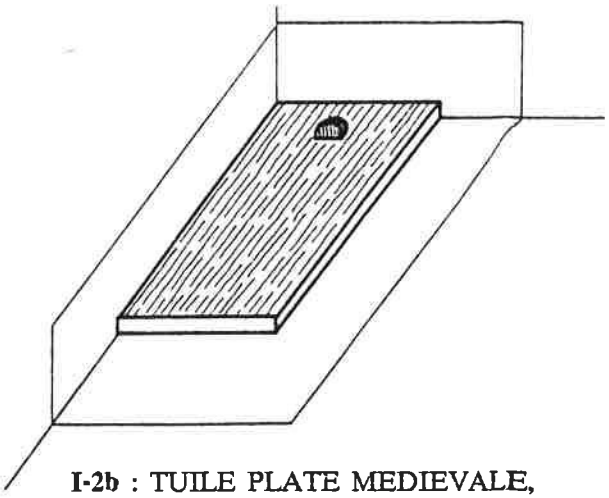
- Les objets sont supposés cuits, l'une de leur face plane posée à plat parallèlement au plan horizontal local matérialisé par la sole des fours.

Chaque face extérieure plane d'un objet correspond en fait à une position possible bien déterminée de ce dernier sur le plan horizontal local. Ainsi, les matériaux ayant la forme de parallélépipèdes rectangles offrent les trois positions à plat, de chant et debout (fig. I-2a, b, c, d et e) tandis que les fonds de pots et les piliers de briquetages n'en offrent qu'une, à savoir debout (fig. I-2h et i). Quant aux *imbrices*, on peut leur associer les positions simples à plat et debout (fig. I-2g).

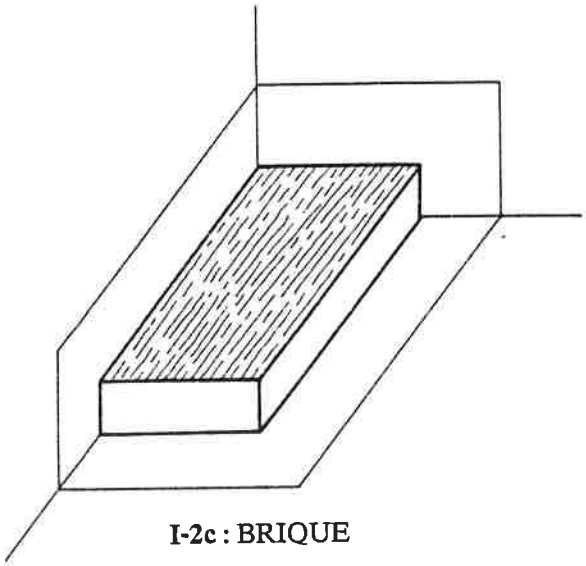
Il arrive que l'une ou l'autre des deux hypothèses énoncées ci-dessus ne soit pas vérifiée. C'est le cas par exemple lorsque les sols des fours sont inclinés ou lorsque les matériaux font l'objet d'un pendage systématique. Ces effets des positions de cuisson seront étudiés en détail au chapitre VI.



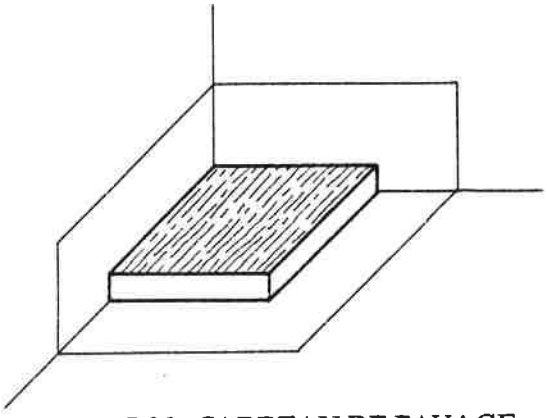
**I-2a** : TUILE GALLO-ROMAINE (*TEGULA*)



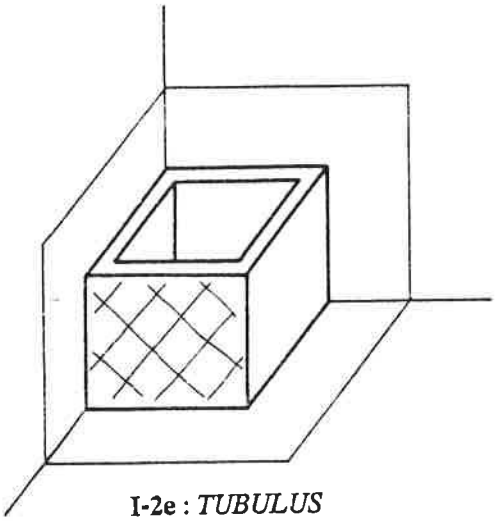
**I-2b** : TUILE PLATE MEDIEVALE, A CROCHET



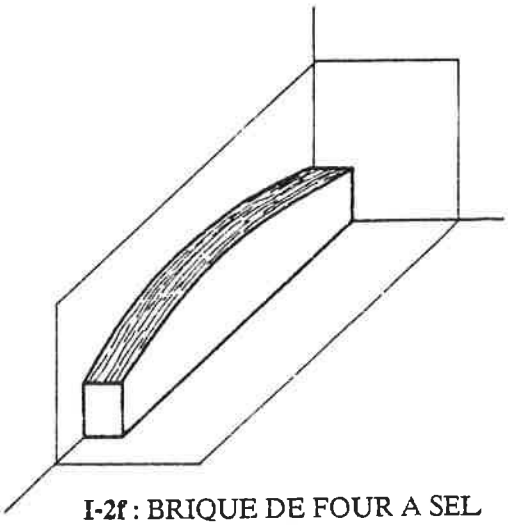
**I-2c** : BRIQUE



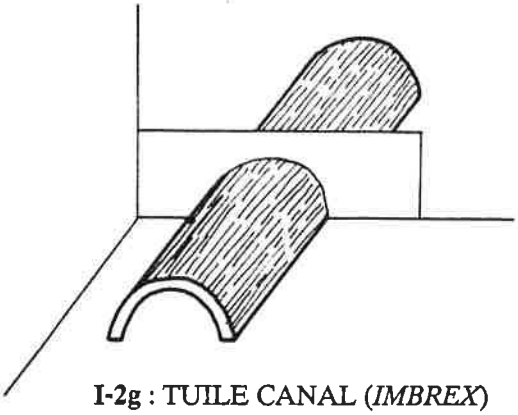
**I-2d** : CARREAU DE PAVAGE



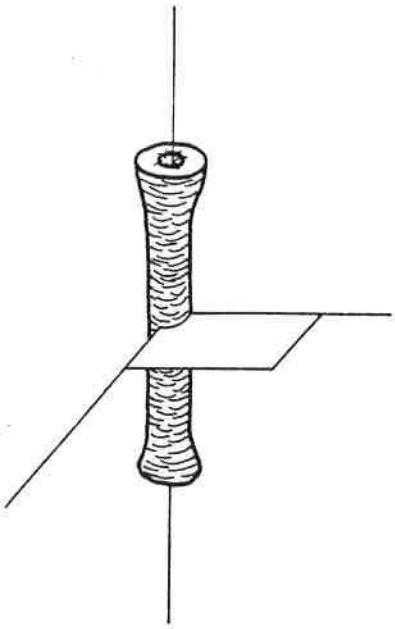
**I-2e** : *TUBULUS*



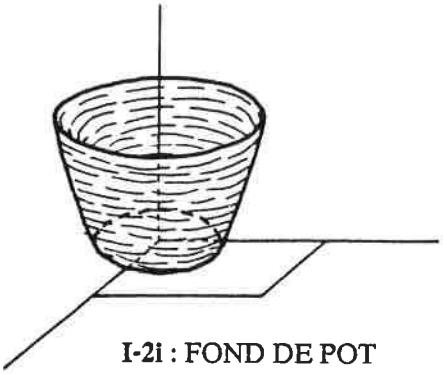
**I-2f** : BRIQUE DE FOUR A SEL



I-2g : TUILE CANAL (*IMBREX*)



I-2h : PILIER DE BRIQUETAGE



I-2i : FOND DE POT

**Fig. I-2** : Schémas des matériaux déplacés étudiés dans ce mémoire.

**I-2a** : Schéma d'une tuile plate gallo-romaine, appelée *tegula*. Les *tegulae*, approximativement de forme parallélépipédique, sont caractérisées par des rebords prononcés le long des deux grands cotés. Elles possédent aux quatre angles des encoches qui leur permettent de s'emboîter les unes dans les autres. Les traces de lissage apparaissent sur la face portant les rebords. La face inférieure présente un aspect rugueux dû au sable sur lequel les tuiles étaient moulées. Les longueurs des *tegulae* sont généralement de l'ordre de 30 à 60 cm, les largeurs de 25 à 40 cm et les épaisseurs de 2 à 3 cm (Goulpeau et Langouet, 1980 ; Le Ny, 1985).

**I-2b** : Schéma d'une tuile plate médiévale. Les traces de lissage apparaissent presque toujours du côté du crochet (destiné à la fixation sur la toiture) lorsque ce dernier existe. Les longueurs généralement observées sont de l'ordre de 25 à 30 cm, les largeurs de 15 à 25 cm et les épaisseurs de 1 à 1,5 cm. Ces matériaux se caractérisent surtout par leurs faibles épaisseurs.

**I-2c et d** : Schémas d'une brique et d'un carreau de pavage. Ces matériaux ont été produits à toutes les époques selon des formats extrêmement variés.

**I-2e** : Schéma d'un *tubulus*, sorte de boisseau rectangulaire entrant dans la construction des doubles parois chauffantes des thermes gallo-romains. Les dimensions des *tubuli* sont très variées, mais l'épaisseur des parois reste généralement de l'ordre de 1,5 à 2 cm. L'étude archéomagnétique de ces éléments fait l'objet du chapitre VII.

**I-2f** : Schéma d'une brique en forme de poutre. Ces éléments étaient utilisés dans certaines installations de briquetages de l'époque gauloise pour former des sortes de grilles au-dessus des foyers. Leur étude archéomagnétique fait l'objet du chapitre VIII.

**I-2g** : Schéma d'une tuile demi-cylindrique, appelée *imbrex* à l'époque gallo-romaine et tuile-canal de nos jours. A l'époque gallo-romaine, les *imbrices* recouvraient les rebords jointifs des *tegulae*. Des joints de mortier servaient éventuellement de liaison entre ces types de tuiles.

**I-2h** : Schéma d'un pilier servant de support dans certains types de briquetages gaulois et gallo-romains.

**I-2i** : Schéma d'un fond de pot.

## CONSTITUTION DE L'ECHANTILLONNAGE.

Les sites de prospection fournissent le plus souvent un matériel très fragmenté en raison des labours répétés. La collecte d'un maximum d'échantillons doit se faire, en principe, sur un périmètre restreint. La constitution de lots différenciés, sur un même site de grande étendue (diamètre de plusieurs centaines de mètres) ne peut que contribuer à l'obtention de résultats discriminants. Outre la grande fragmentation, les sites de prospection offrent assez souvent un matériel plus ou moins érodé. Le tri opéré au laboratoire permet de ne retenir que les fragments en bon état de conservation, de taille suffisante et présentant au moins une surface plane et un bord. L'expérience a montré que le nombre d'éléments collectés sur de tels sites doit être le plus grand possible. Cette quantité est rarement atteinte en un seul ramassage. Le plus souvent, il faut plusieurs années de collecte pour obtenir un échantillonnage important de l'ordre de 100 à 200 fragments utilisables. Une étude archéomagnétique systématique a été réalisée sur de tels lots de matériaux provenant de sites ruraux gallo-romains de Haute Bretagne. Cet exemple est présenté au chapitre XIII.

Les sites de fouille offrent généralement de très bons échantillonnages tant en qualité qu'en quantité. La fragmentation est généralement beaucoup plus faible que sur les sites de prospection. De plus les matériaux apparaissent presque toujours dans un meilleur état de conservation. Un des avantages de la fouille est de fournir des lots bien délimités, repérés dans les unités stratigraphiques et collectés en association avec du mobilier.

D'une manière générale, l'échantillonnage requis pour toute étude archéomagnétique de matériaux déplacés doit atteindre au moins la centaine d'échantillons différents. Ce fait souligne la différence essentielle entre l'archéomagnétisme des structures en place et l'archéomagnétisme des matériaux déplacés. Les structures restées en place font l'objet de prélèvements *in situ* rigoureusement orientés selon un repère géographique (nord, est, verticale). Dans ce cas, la précision des résultats dépend essentiellement de la dispersion intrinsèque des directions d'aimantation dans l'argile cuite et des erreurs commises lors du repérage et des mesures. Dans le cas des matériaux déplacés, les erreurs dues aux problèmes de repérage deviennent prépondérantes. Ces erreurs proviennent de la forme plus ou moins régulière des matériaux et de la dispersion des positions réelles de cuisson autour des positions théoriques supposées. Il est évident que seuls des traitements statistiques opérés sur de grands échantillonnages sont à même de faire ressortir un signal significatif (la direction moyenne des aimantations mesurées sur un lot) du bruit de fond provoquée par toutes ces erreurs.

## PREPARATION DES CAROTTES ET MESURE DES AIMANTATIONS

Les matériaux, aussi bien entiers qu'à l'état de fragments, ne sont datables par l'archéomagnétisme que s'ils possèdent au moins l'une des faces planes décrites en figure I-2. Dans le cas des parallélépipèdes, on exige la présence d'un bord et d'une face parallèle au plan d'aplatissement de l'objet. Les carottes sont prélevées sur les échantillons sous la forme de cylindres de 25 mm de diamètre et de 17 à 25 mm de longueur. Dans le cas des tuiles, des briques et des carreaux de pavage, le carottage est effectué selon la position la plus commode, c'est-à-dire la position à plat, à la condition que cette dernière offre une bonne assise et un bord (ou un rebord, dans le cas des tuiles gallo-romaines). Lorsque ces bords sont inexistants, on peut éventuellement utiliser les stries de lissage de la face supérieure pourvu qu'elles soient très visibles. En effet, on a pu montrer que ces stries étaient statistiquement parallèles à l'axe d'allongement des matériaux (Lanos, 1983). Par convention, l'axe x correspond à la longueur, l'axe y à la largeur et l'axe z à l'épaisseur (fig. I-3).

Le carottage, de même que le sciage (servant à la normalisation des longueurs des carottes), provoque des contraintes mécaniques et des vibrations qui peuvent perturber l'aimantation des matériaux. Cela a été observé, par exemple, sur certaines roches volcaniques de l'Etna pour lesquelles les ATR sont assez fragiles (Tanguy, 1980). Cependant, ce type de perturbation semble tout à fait négligeables au regard des très fortes aimantations mesurées sur les argiles cuites étudiées.

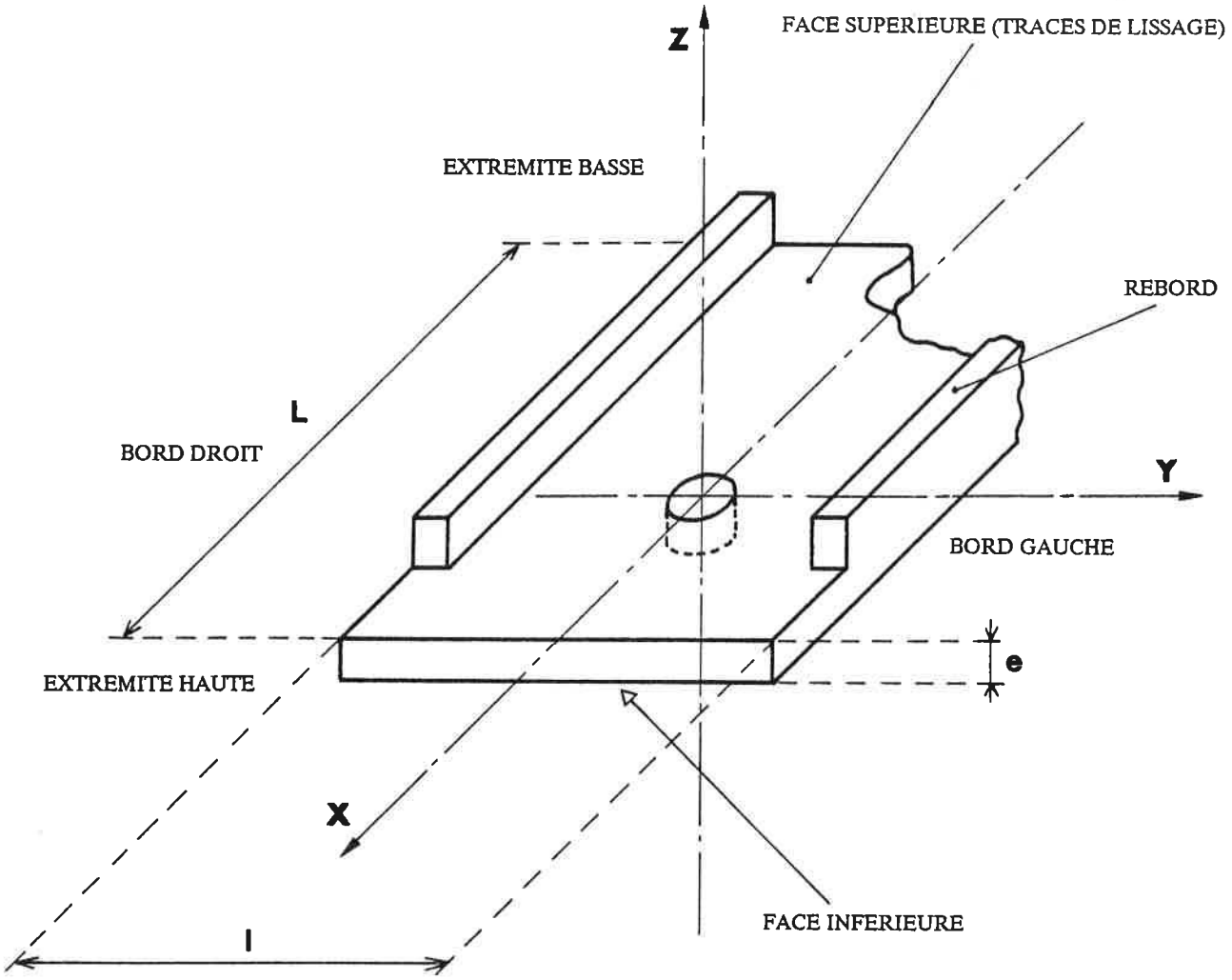



**Fig. I-3** : Repère de carottage (oxyz) sur un fragment de tuile.

En revanche, la taille des échantillons paraît avoir une certaine importance. La méthode de prélèvement au plâtre, développée par E. Thellier, permet l'obtention de gros échantillons (10 cm de côté en moyenne) qui offrent l'avantage d'éviter en partie les problèmes d'hétérogénéité magnétique de la pâte. Les mesures de ces gros échantillons sont effectuées, en France, sur l'inductomètre à rotation continue développé au Laboratoire de Géomagnétisme de Saint-Maur-des-Fossés par E. Thellier et M. Le Goff (Le Goff, 1975). Ne disposant pas de ce type d'appareil au Laboratoire d'archéométrie, les carottes sont taillées de telle sorte qu'elles soient mesurables par le magnétomètre spinner Schonstedt DSM1 du Laboratoire de Géophysique de l'Université de Rennes I. Le volume des carottes (10 $cm^3$) est beaucoup plus faible que celui des échantillons au plâtre (200 à 400 $cm^3$), mais semble encore raisonnable en considération des hétérogénéités magnétiques observées à l'intérieur des tuiles entières (cf. chapitre V). Par contre, la taille des petits échantillons (3 à 9 mm de diamètre) utilisés sur les magnétomètres cryogéniques ne semblent plus répondre au soucis de minimiser les erreurs dues aux hétérogénéités. En revanche, ces faibles volumes permettent d'accélérer les processus expérimentaux d'aimantation et de désaimantation et offrent la possibilité d'une étude fine de l'aimantation dans les matériaux.

## DETERMINATION DE L'INCLINAISON ET DE LA POSITION DE CUISSON

La mesure de la direction de l'aimantation dans le repère de carottage permet de calculer, par des changements de repère simples, l'inclinaison I pour chacune des positions correspondant aux différentes faces planes susceptibles d'avoir été placées parallèlement au plan horizontal local lors de la cuisson. La bonne position de cuisson est celle qui fournit une valeur de l'inclinaison comprise entre 50° et 75°, c'est-à-dire dans l'intervalle de variation de l'inclinaison du CMT dans nos régions durant les temps historiques (Thellier, 1938 et 1981).

Si l'on considère le cas des objets ayant la forme de parallélépipèdes rectangles, les mesures et les calculs donnent les trois valeurs de l'inclinaison $I_p$, $I_c$ et $I_d$ qui correspondent respectivement aux trois positions à plat, de chant et debout. Le critère de sélection énoncé ci-dessus permet de déterminer le couple (inclinaison - position) à retenir parmi les trois solutions possibles. L'unicité de la solution retenue vient de ce que les limites de l'intervalle de variation de l'inclinaison du CMT sont supérieures à 45°, dans nos régions pour les temps historiques, et de ce que les trois positions théoriques correspondent à des faces planes perpendiculaires entre elles.

Dès 1938, E. Thellier avait utilisé ces hypothèses de positionnement et ce critère de sélection afin d'obtenir des mesures d'inclinaison à partir de séries de briques provenant de monuments bien datés. Il avait pu montrer que les briques étaient cuites majoritairement en position sur tranche. Une vingtaine d'éléments par lot lui paraissait raisonnable. Les études archéomagnétiques présentées tout au long de ce mémoire montreront que ce nombre est largement insuffisant en ce qui concerne les matériaux déplacés.

## LA NOTION DE DEVIATION

L'idée d'utiliser l'angle entre la projection du vecteur aimantation sur le plan (Oxy) et l'axe x fut lancée par L. Goulpeau et L. Langouët du Laboratoire d'Archéométrie de Rennes I (1980). Cet angle $\Delta$, baptisé déviation pour ne pas le confondre avec la déclinaison, a été introduit à propos de matériaux de forme parallélépipédique tels que les tuiles et les briques gallo-romaines. Il représente l'orientation d'une des faces verticales de ces objets par rapport au Nord magnétique de l'époque (fig. I-4). S'agissant de matériaux déplacés, l'angle entre ce Nord magnétique et le Nord géographique, c'est-à-dire la déclinaison, reste inaccessible.

De nombreuses observations archéologiques effectuées en particulier par A. McWhirr (1979) pour la Grande-Bretagne et largement confirmées depuis pour la Gaule par F. Le Ny (1987), montrent que les fours de tuiliers gallo-romains étaient majoritairement de forme rectangulaire. Comme le fait remarquer A. McWhirr : "A square, rectangular firing chamber is a sensible design to stacking objects which themselves are of that shape". En conséquence de quoi, "la cohérence du chargement induit que le matériau, entassé pour une cuisson, respectait non seulement la face plane horizontale (de la sole), mais aussi les parois. Ainsi, autant $\Delta$ que I ont de l'importance" (Goulpeau et Langouët, 1980). Les premières mesures effectuées sur des lots homogènes de plusieurs centaines de fragments de *tegulae* montrèrent à maintes reprises un regroupement des déviations selon deux ensembles distincts, de valeurs moyennes le plus souvent quasi-complémentaires (fig. I-5b). L'interprétation de ce résultat était immédiate : Les deux groupes de déviation traduisent le fait que les tuiles étaient rangées debout parallèlement aux deux parois d'un four de forme rectangulaire. L'utilisation conjointe de l'inclinaison et de la déviation a permis un important développement de la méthode, tant au niveau des traitements statistiques et de la détection des effets perturbateurs de l'aimantation qu'au niveau de l'obtention d'un certain nombre de renseignements archéologiques concernant les modes de rangement des matériaux dans les fours.

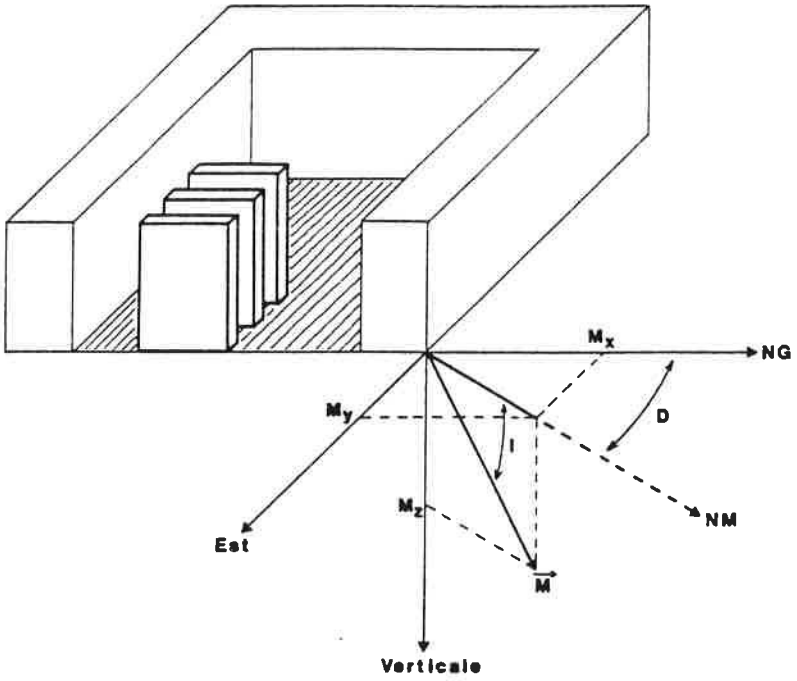
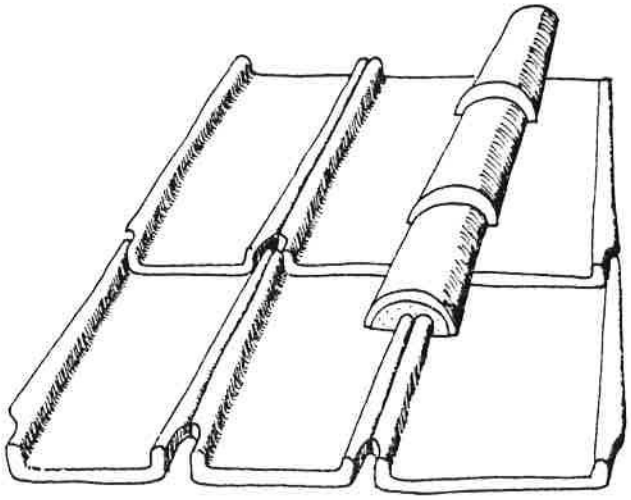
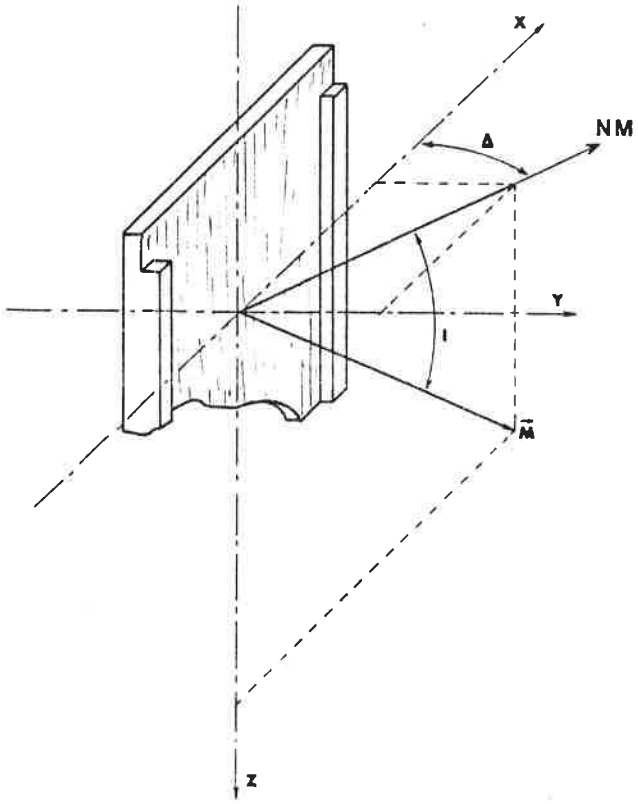



**Fig. I-4** : Notion de déviation.

Tuiles rangées debout, parallèlement aux parois d'un four de forme rectangulaire. Les orientations des tuiles et du four sont parfaitement définies dans le repère géographique local (nord, est, verticale).



Utilisation des tuiles en toiture. Eventuellement, nouveau repère de cuisson en cas d'incendie.




Fragment de tuile retrouvé en fouille ou en prospection. La valeur de l'inclinaison permet de déterminer la position de cuisson. La déviation Δ indique quelle était l'orientation relative du plan d'aplatissement des matériaux par rapport au Nord magnétique de l'époque. La déclinaison est définitivement perdue.

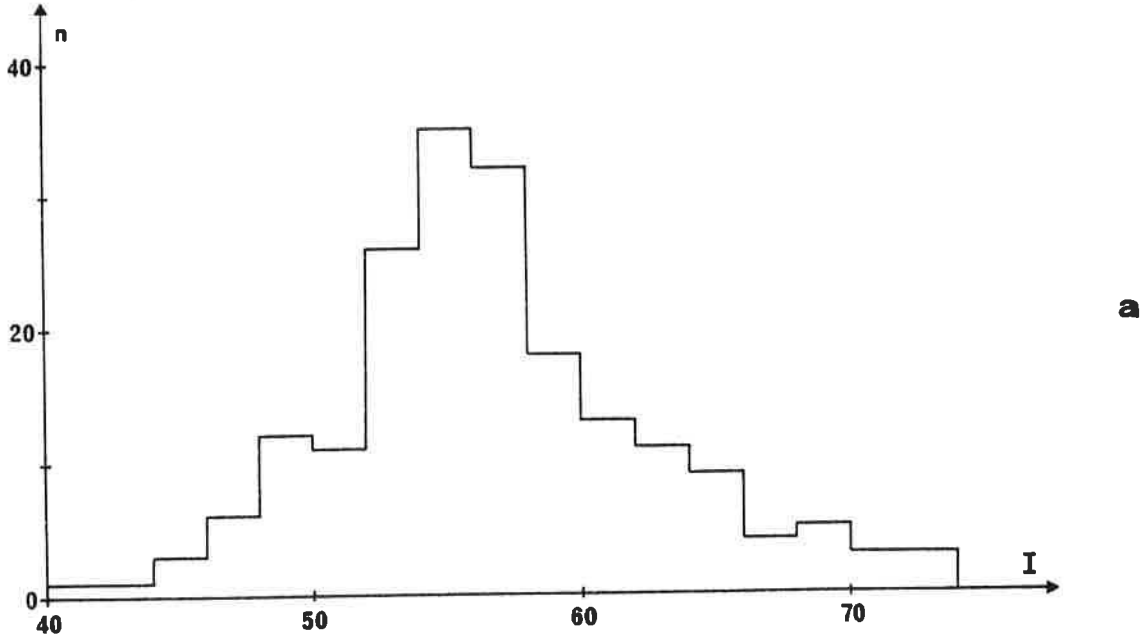
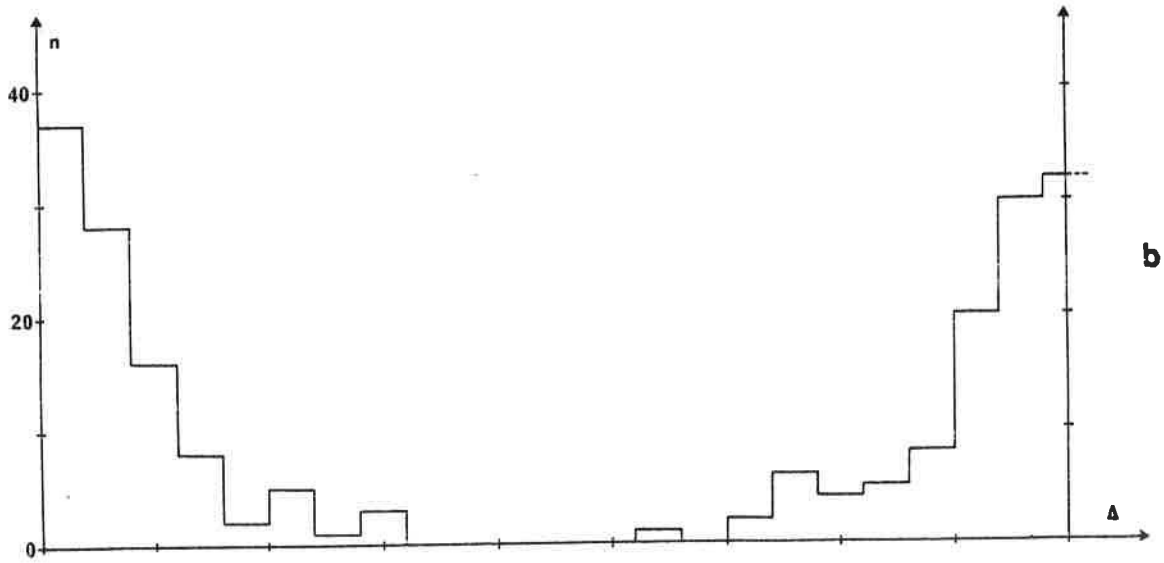



**Fig. I-5 :** Guignen, Le Biffoué (Ille-et-Vilaine). Etude archéomagnétique portant sur plus de 190 échantillons de briques recueillis en fouille (Goulpeau *et al.*, 1982). a) Histogramme des inclinaisons. b) Histogramme des déviations.



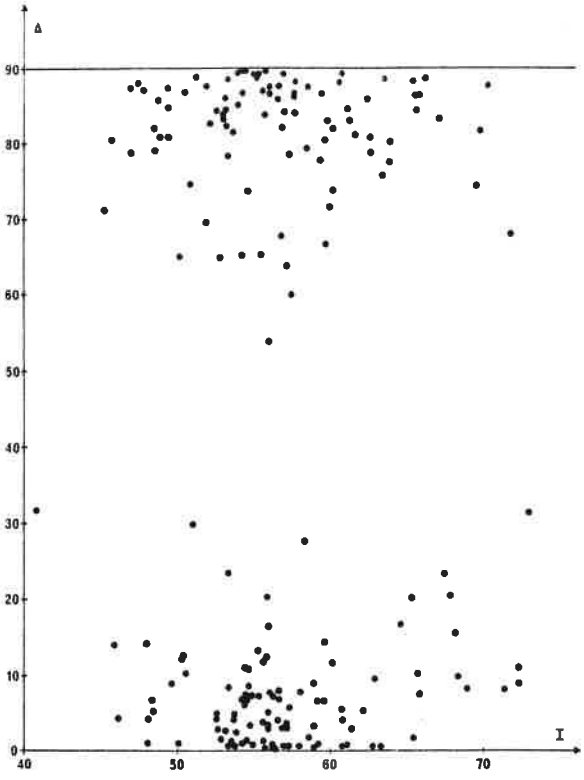
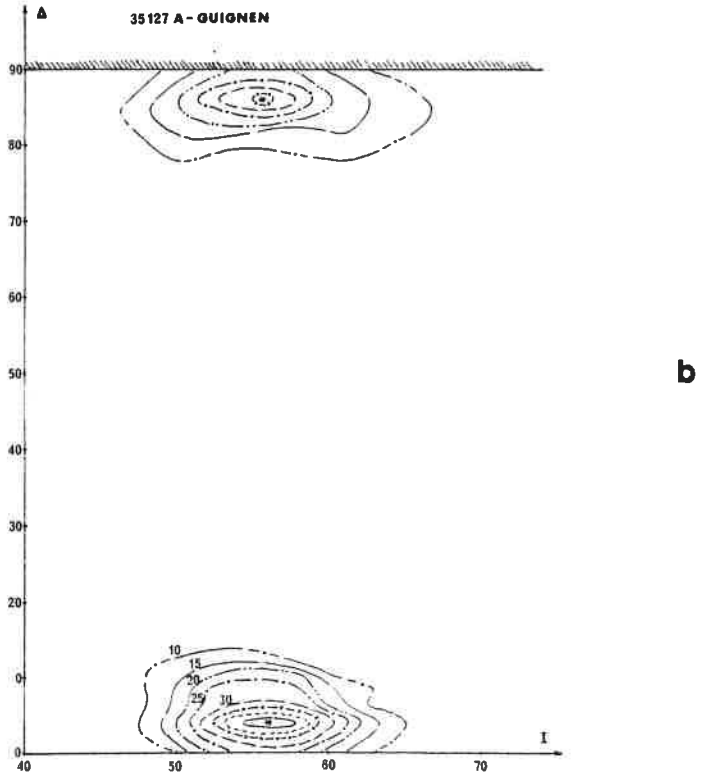
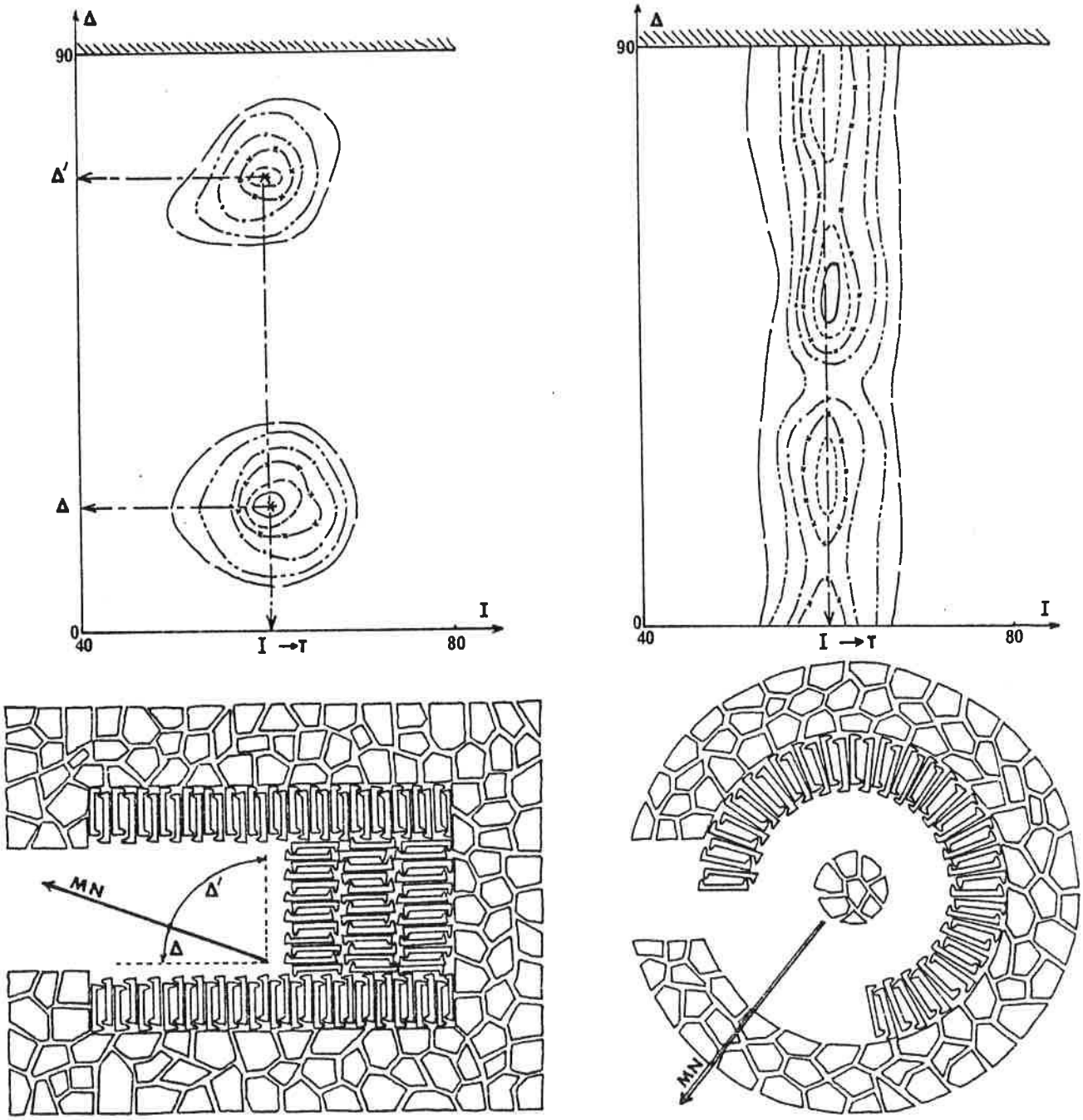



**Fig. I-6** : Guignen, Le Biffoué : **a)** Diagramme de pointage. **b)** Diagramme de densité.






a) Four rectangulaire.

b) Four circulaire.

**Fig. I-7** : Exemples de rangements de tuiles debout et diagrammes de densité théoriques $(I, \Delta)$ associés (Goulpeau and Langouet, 1982).

## LES DIAGRAMMES I-Δ

L'utilisation des histogrammes des inclinaisons (fig. I-5a) fut vite supplantée par l'introduction des diagrammes cartésiens (I, Δ) dans lesquels chaque couple de valeur inclinaison-déviation est représenté par un point (fig. I-6a) (Goulpeau et Langouët, 1980 et 1982). Divers procédés classiques de recherche d'agglomérats (Hodder and Orton, 1976) ont été appliqués à ces réseaux de points. En particulier, la méthode du quadrillage a permis de montrer, en faisant varier la dimension de la maille, que la taille moyenne des agglomérats est de l'ordre de 8° sur 8°. Le réseau irrégulier du pointage est transformé en un réseau régulier de valeurs numériques grâce à la méthode de la fenêtre mobile. Pour chaque position d'une fenêtre de dimensions proches de celles des agglomérats (8° sur 8°), on compte le nombre de points inclus. Ce nombre est attribué au centre de la fenêtre. Le réseau des valeurs numériques permet ensuite de tracer les courbes d'isodensité (fig. I-6b) (Goulpeau and Langouët, 1982). Cette excellente visualisation des concentrations de points fait ressortir immédiatement les maximums de densité, dont les coordonnées déterminent l'inclinaison moyenne et la déviation moyenne pour chacun des agglomérats.

On peut imaginer différents modèles théoriques de diagrammes (I, Δ) en fonction des modes de rangement des matériaux dans les fours. Les deux exemples de la figure I-7 sont une illustration de la méthode :

- Le premier exemple s'applique à un rangement de tuiles debout dans un four rectangulaire (fig. I-7a). On observe dans le diagramme (I, Δ) deux agglomérats distincts de déviations moyennes Δ et Δ' complémentaires : $\Delta + \Delta' \sim 90°$. La datation d'un tel lot s'obtient à partir de l'inclinaison moyenne I, statistiquement la même, en principe, pour les deux agglomérats. Les deux valeurs moyennes de la déviation redonnent, indirectement, l'orientation des deux parois du four par rapport à la direction du nord magnétique de l'époque et du lieu de la cuisson.

- Le deuxième exemple correspond à un rangement de tuiles debout dans un four circulaire (fig. I-7b). Dans le diagramme (I, Δ), les valeurs de la déviation s'étalent plus ou moins régulièrement entre 0° et 90°. De la même manière que précédemment, l'inclinaison moyenne I permet de remonter à la date de fabrication du lot.

A chaque mode de chargement des matériaux, dans un four d'orientation donnée, correspond un et un seul diagramme (I, Δ) caractéristique. Par contre, rien n'empêche qu'un même diagramme (I, Δ) puisse refléter différents modes de chargement ou encore différentes formes ou orientations de fours. Le caractère surjectif (au sens mathématique du terme) de la relation entre les données archéologiques et l'ensemble des diagrammes (I, Δ) provient en partie de ce que la déviation représente non pas l'orientation des parois du four par rapport au N.M. , mais uniquement la position relative des matériaux par rapport à ce nord. Cette remarque est d'une grande importance en ce qui concerne l'interprétation "archéotechnologique" des données archéomagnétiques (*cf.* chapitre XII).

A côté de lots de matériaux présentant un seul ensemble d'éléments fabriqués à une date unique et provenant d'un seul four caractérisé par les déviations moyennes Δ et Δ', il existe des lots constitués d'un mélange de plusieurs ensembles différents généralement indiscernables à première vue. Ces lots sont recueillis sur des sites archéologiques à histoire complexe : approvisionnements multiples à une même date, agrandissements, réparations, *etc*... L'utilisation des diagrammes inclinaison-déviation permet une séparation statistique de ces ensembles, séparation que l'utilisation des histogrammes de l'inclinaison seule ne permet pas. La figure I-8 donne un exemple d'un tel traitement. Malgré l'intrication plus ou moins grande des différentes sous-populations, la méthode des densités fait bien ressortir les différents agglomérats ainsi que les directions moyennes (I, Δ) associées à chacun des maximums de densité (Goulpeau and Langouët, 1982). L'exemple de la figure I-8

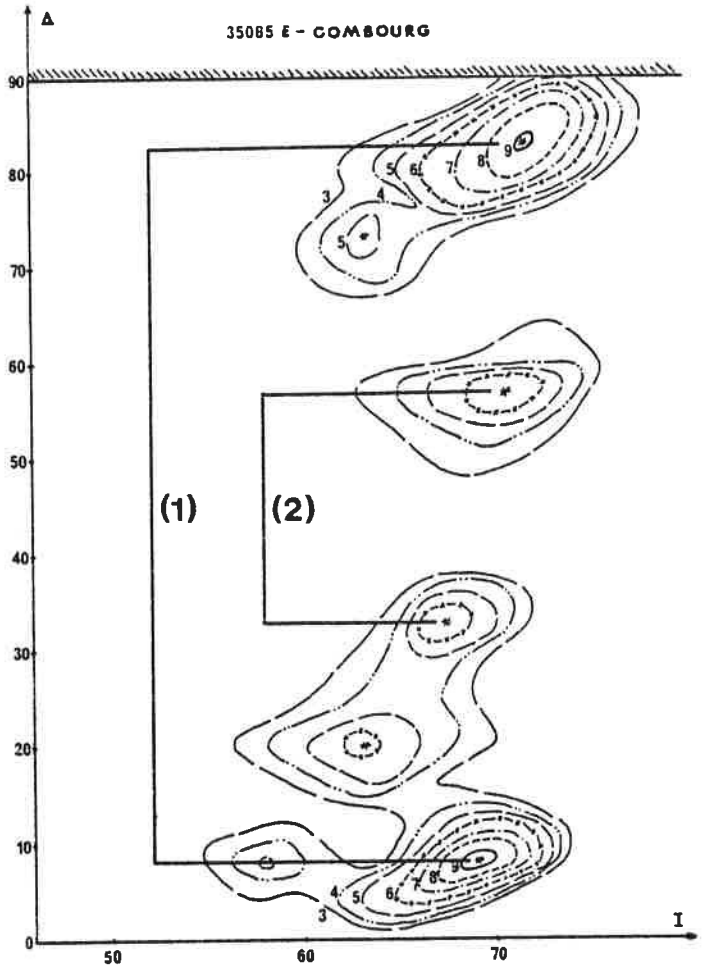



**Fig. I-8** : Combourg, La Haute-Bouessière : Diagramme de densité montrant la présence de plusieurs ensembles au sein d'un même lot (Goulpeau and Langouet, 1982).

fait apparaître deux principaux ensembles (1) et (2) caractérisés respectivement par des déviations moyennes $\Delta_i$ et $\Delta'_i$ (i = 1,2) quasi-complémentaires. Par contre, on peut observer un décalage entre les inclinaisons $I_i$ et $I'_i$ pour chacun de ces deux ensembles. Différentes causes de ce décalage (effet de forme, anisotropie, pendages) seront étudiées dans la deuxième partie de ce mémoire.

# II - TRAITEMENTS STATISTIQUES DES DONNEES

## INTRODUCTION

L'examen des diagrammes de pointage et de densité en figure I-5a et b amène un certain nombre de remarques :

a) Les déviations sont repliées dans l'intervalle 0 - 90°. Ainsi, une déviation de 94° est ramenée à une valeur de 86° et une déviation de -5° devient +5°. Ce repliement interdit toute détermination est ou ouest de l'orientation des matériaux et de plus, provoque une concentration artificielle des points qui se situent normalement de part et d'autre des déviations 0° et 90°.

b) Mis à part la reconstitution des positions de cuisson, aucune indication n'est donnée sur l'orientation des faces des matériaux par rapport au N.M. magnétique de l'époque.

c) La représentation cartésienne (I, Δ) ne semble pas vraiment appropriée à la représentation des directions de vecteurs dans l'espace. En particulier, la notion d'azimut contenue dans la notion de déviation manque d'une visualisation claire permettant une interprétation rapide, à l'oeil, de l'orientation des matériaux par rapport au N.M.

d) S'agissant de directions d'aimantation, la technique de la fenêtre mobile devrait en principe s'appliquer à une répartition de vecteurs dans l'espace. Ce qui n'était pas le cas ici. En effet, si on imagine une distribution uniforme des vecteurs (I, Δ ) dans toutes les directions de l'espace, l'application de cette technique au diagramme cartésien inclinaison-déviation révèlera une plus grande concentration de points pour les fortes valeurs de l'inclinaison que pour les faibles valeurs. Les densités déterminées dans le diagramme cartésien à partir d'une maille carrée (8° sur 8°) sont donc entachées d'une erreur, faible mais réelle. Pour la corriger, la taille de la fenêtre devrait être fonction de sa position dans le diagramme. Nous verrons plus loin qu'il existe une autre façon plus simple de procéder.

e) Enfin, la méthode des densités ne permet pas de définir une estimation de la précision des directions moyennes obtenues.

Les solutions apportées à chacun de ces problèmes font l'objet des cinq premiers paragraphes A, B, C, D et E. Le dernier paragraphe F décrit l'organisation des programmes informatiques permettant la réalisation de ces nouveaux traitements statistiques.

## A - POSITIONS DE CUISSON ET DEVIATION

Les matériaux de forme parallélépipédique présentent six faces différentes, d'où six positions théoriques différentes de cuisson. A chacune de ces positions est associé un repère ($Ox_h$ $y_h$ v) de telle sorte que l'axe v définisse la verticale du lieu, et que le plan ($Ox_h$ $y_h$) corresponde à la face reposant sur le plan horizontal local. L'axe $x_h$ est placé dans le plan d'aplatissement des matériaux. Il correspond à la longueur des parallélépipèdes pour les positions à plat et de chant, et à la largeur pour la position debout (fig. II-1). La connaissance

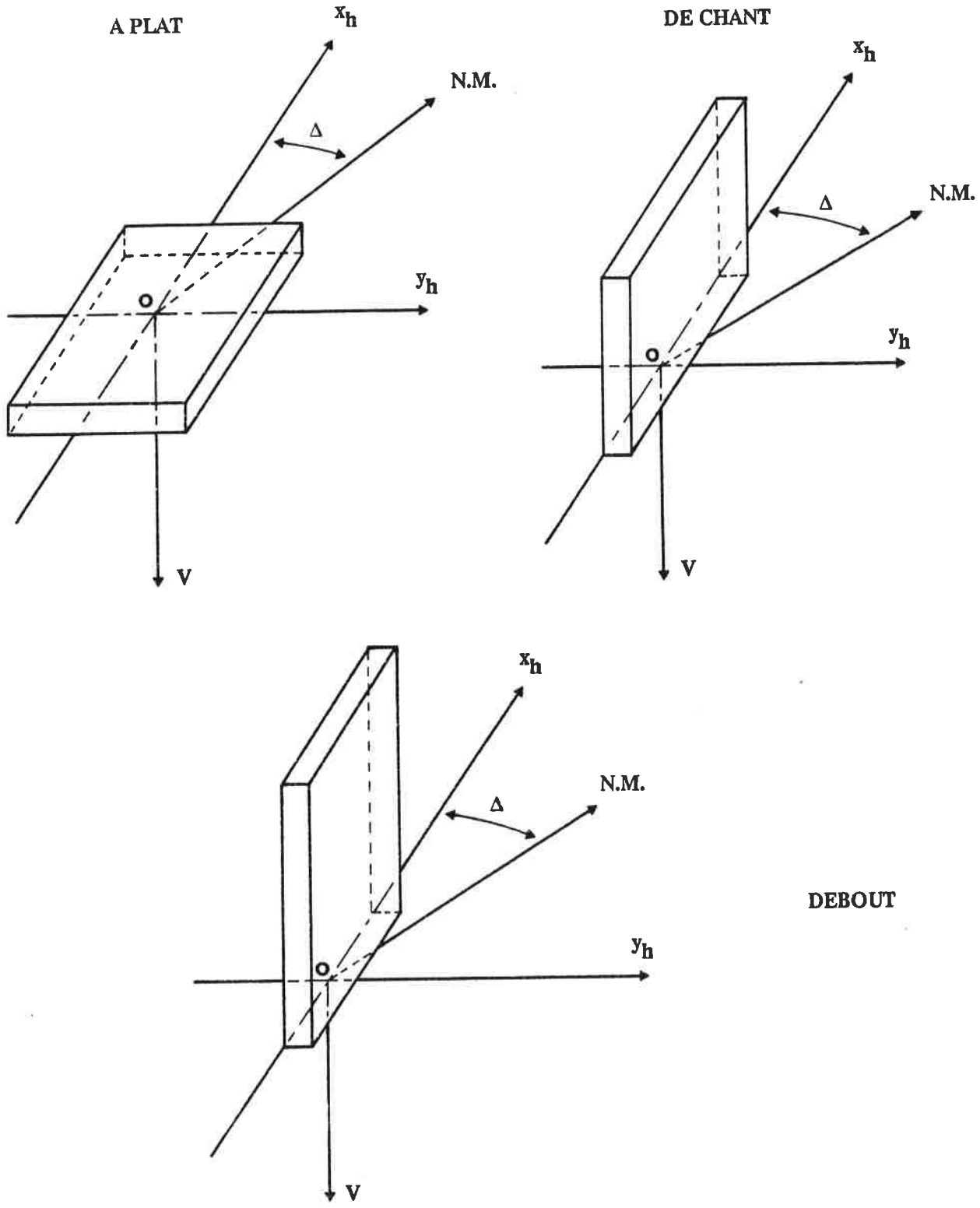



**Fig. II-1 :** Positions théoriques de cuisson d'un parallélépipède rectangle dans le repère ($Ox_h\ y_h\ v$).

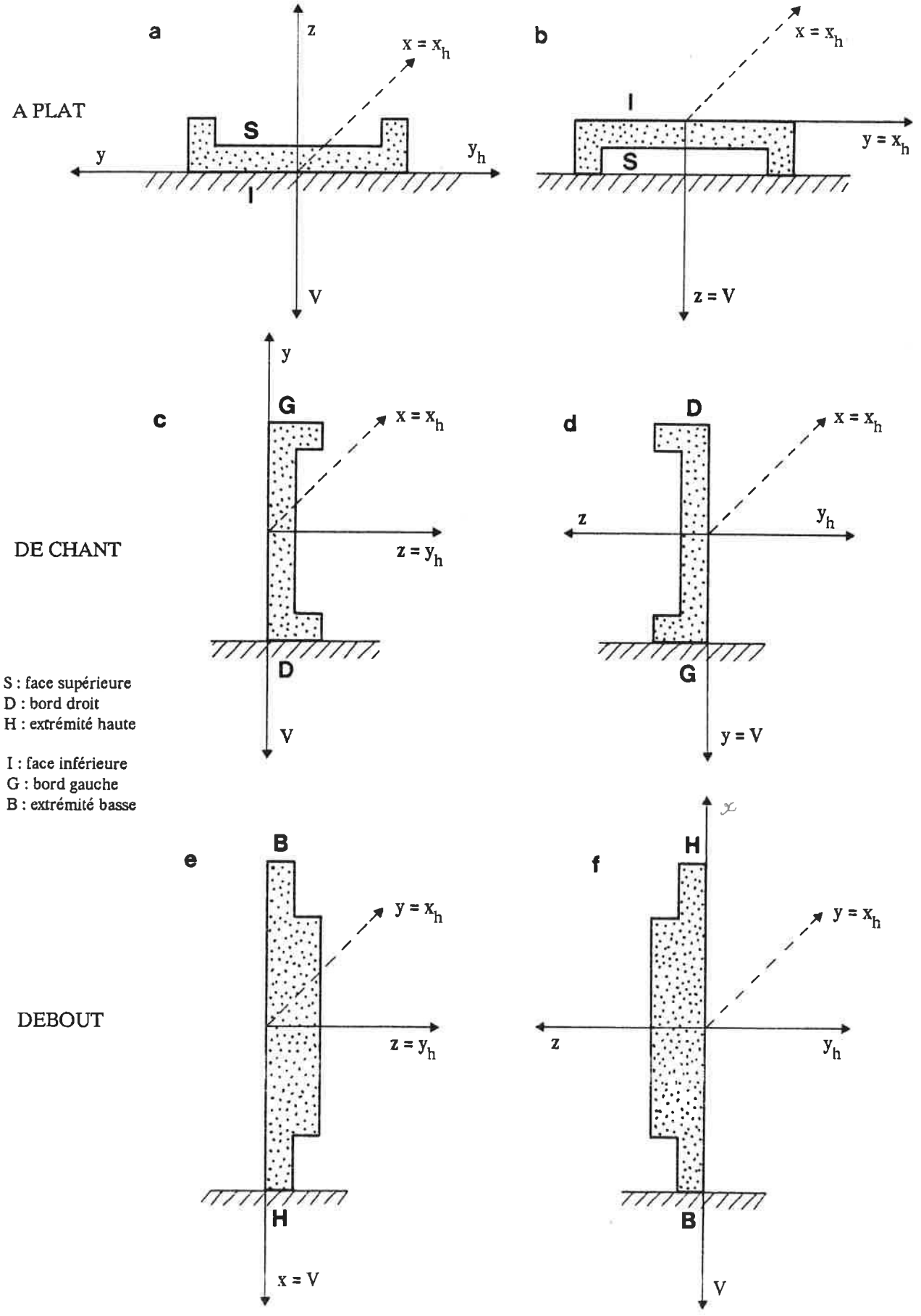



**Fig. II-2** : Schémas des six positions théoriques correspondant aux six faces d'un parallélépipède.

des composantes $M_{xh}$, $M_{yh}$ et $M_V$ de l'aimantation, dans ce repère, permet de calculer l'inclinaison I et la déviation $\Delta$ à partir des formules :

$$\sin I = M_V / M \qquad \tan \Delta = M_{yh} / M_{xh}$$

L'inclinaison I correspond en principe à l'inclinaison du CMT de l'époque pour le lieu considéré. La déviation $\Delta$ exprime l'orientation par rapport au Nord magnétique (N.M.), de l'axe d'allongement pour la position à plat, et du plan d'aplatissement pour les positions de chant et debout (fig. II-1).

Dans la pratique, la mesure de l'aimantation s'effectue à partir de carottes prélevées dans le repère (Oxyz) tel qu'il est défini en figure I-3 (*cf.* chapitre précédent). L'axe x est placé parallèlement au côté le plus long ou, à défaut, parallèlement à la direction des stries de lissage. L'axe z est placé perpendiculairement au plan d'aplatissement et est orienté positivement de la face inférieure vers la face supérieure portant les traces de lissage. L'axe y est défini de telle sorte que le trièdre (Oxyz) soit direct.

Pour chacune des six positions théoriques définies en figure II-2, les couples inclinaison-déviation sont déterminés à partir de la projection dans le repère ($Ox_h$ $y_h$ v) des composantes $M_x$, $M_y$ et $M_z$ de l'aimantation mesurée dans le repère de carottage. On obtient ainsi :

| | | | |
|---|---|---|---|
| Position à plat | (a) : | $\sin I = -M_z / M$ | $\tan \Delta = -M_y / M_x$ |
| | (b) : | $\sin I = M_z / M$ | $\tan \Delta = M_y / M_x$ |
| Position de chant | (c) : | $\sin I = -M_y / M$ | $\tan \Delta = M_z / M_x$ |
| | (d) : | $\sin I = M_y / M$ | $\tan \Delta = -M_z / M_x$ |
| Position debout | (e) : | $\sin I = M_x / M$ | $\tan \Delta = M_z / M_y$ |
| | (f) : | $\sin I = -M_x / M$ | $\tan \Delta = -M_z / M_y$ |

La bonne position de cuisson est celle qui donne une inclinaison positive, comprise dans l'intervalle (45°, 90°). La valeur de la déviation associée s'exprime normalement entre -180° et +180° par rapport à l'axe $x_h$. Cependant, la figure II-3 montre à l'évidence que l'angle $\Delta$ et son supplément 180° - $\Delta$ décrivent une orientation identique des parallélépipèdes par rapport à une direction donnée du N.M. On peut donc restreindre l'expression de la déviation sur un intervalle de 180°. Par convention, on prendra l'intervalle compris entre -90° et +90°. Notons que la fonction tangente, utilisée dans les formules ci-dessus, fournit une valeur directement comprise dans cet intervalle.

Le tableau suivant fournit un exemple de calcul des directions d'aimantation pour les différentes positions à plat, de chant et debout. Il s'agit de mesures effectuées sur un lot de tuiles provenant du site gallo-romain de la Mare-Pilais en Plénée-Jugon (Côtes-du-Nord). Ce lot fait l'objet d'une étude détaillée dans la suite de ce chapitre. Les résultats présentés ici correspondent à une inclinaison positive.

| | Mesure dans (Oxyz) | | à plat | | de chant | | debout | | Aimant. vol. (SI) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| N° | I | D | $I_p$ | $D_p$ | $I_c$ | $D_c$ | $I_d$ | $D_d$ | M |
| 1T | -19°3 | 82°1 | 19°3 | -82°1 | 69°2 | 68°6 | 7°5 | -19°5 | 3,056 |
| 2T | 16°2 | 100°9 | 16°2 | -79°1 | 70°6 | 56°9 | 10°5 | -16°5 | 4,494 |
| 3T | -6°1 | -107°1 | 6°1 | -72°9 | 71°9 | 20° | 17° | -6°4 | 3,066 |
| 4T | -11°8 | -68°1 | 11°9 | 58°1 | 65°2 | -29°5 | 21°4 | 12°8 | 3,229 |
| 5T | 3°6 | 147°6 | 3°6 | 57°6 | 57°4 | -6°7 | 32°3 | 4°3 | 0,117 |

L'obtention du signe de la déviation offre la possibilité d'orienter les objets vers l'est ou vers l'ouest, par rapport au N.M. de l'époque. Ceci résoud complètement le problème du repliement des valeurs de la déviation dans l'intervalle (0°, 90°).

## B - REPERAGE DES FACES DES OBJETS

A condition de pouvoir distinguer les six faces les unes des autres, on associe le repère de carottage (Oxyz) aux matériaux de telle sorte que l'axe x soit orienté positivement de l'extrémité "basse" vers l'extrémité "haute", l'axe y du bord "droit" vers le bord "gauche" et l'axe z de la face inférieure vers la face supérieure (*cf.* fig. I-3). En principe, ce repérage permet de déterminer l'orientation relative des différentes faces d'un parallélépipède par rapport à la direction de l'aimantation. Mais la plupart du temps, seule la face supérieure reste facilement reconnaissable sur les fragments. L'orientation de cette face par rapport à la direction de l'aimantation s'obtient grâce au signe de l'inclinaison exprimée dans le repère (Oxyz). Si l'inclinaison est positive, alors la face supérieure était tournée dans le sens de l'aimantation, c'est-à-dire vers le Nord magnétique de l'époque. Sinon, elle l'était dans le sens opposé, vers le Sud magnétique (S.M.).

Ainsi, pour toute solution inclinaison-déviation retenue, il est possible d'indiquer l'orientation, vers le N.M. ou vers le S.M. , de la face supérieure des objets étudiés. Ce renseignement supplémentaire sera d'une grande utilité dans la caractérisation des rangements des matériaux dans les fours.

## C - REPRESENTATION DES DIRECTIONS D'AIMANTATION

Les directions d'aimantation mesurées dans le repère (Oxyz) peuvent être figurées par une répartition de points à la surface d'une sphère, de rayon a quelconque et dont le centre coïncide avec l'origine O. Les coordonnées sphériques inclinaison et déviation définissent respectivement l'angle du vecteur aimantation par rapport au plan horizontal (Oxy) et l'azimut par rapport à l'axe x. La représentation de ces directions d'aimantation dans un diagramme à deux dimensions doit traduire le plus fidèlement possible l'information tridimensionnelle inhérente aux deux variables inclinaison et déviation. Le type de projection choisi pour représenter ces variables est la projection Lambert, à surface égale, appelée encore canevas de Schmidt. La figure II-4 donne le principe de cette projection. L'azimut par rapport à l'axe x d'un point de la sphère projeté sur le plan horizontal (Oxy) correspond à la déviation. La distance R de ce point projeté au centre du diagramme est fonction de l'inclinaison I. La projection à surface égale entraîne :

$$R = 2\,a \sin(45° - I/2) \quad , \quad a \text{ étant le rayon de la sphère.}$$

Tout point situé sur la circonférence du diagramme de Schmidt correspond à une inclinaison nulle. Par contre l'inclinaison est de 90° au centre O.

### LE DIAGRAMME DE SCHMIDT

La figure II-5a représente le diagramme de Schmidt associé au repère de carottage (Oxyz). La direction de l'aimantation mesurée s'inscrit entre -90° et +90° pour l'inclinaison, et entre -180° et +180° par rapport à l'axe x pour la déviation. Les valeurs négatives de l'inclinaison correspondant à des directions de la demi-sphère supérieure sont représentées dans le plan par des points blancs, tandis que les valeurs positives le sont par des

points noirs (fig. II-4). A chacun des pôles de projection x , -x , y , -y , z , -z de la figure II-5a est associé une des six positions théoriques de cuisson définies en figure II-2. On passe facilement d'une position à l'autre par simple rotation de ± 90° ou de ± 180° autour des axes x et y. L'avantage d'une telle représentation des mesures brutes est de permettre une lecture immédiate de la bonne position de cuisson. Pour cela, il suffit de repérer l'emplacement du point inclinaison-déviation par rapport aux intervalles (45°, 90°) associés à chacun des six pôles de projection. La figure II-5a montre que l'utilisation de l'intervalle (45°, 90°) comme critère de sélection de la bonne position de cuisson assure l'unicité de la solution retenue. La figure II-5b définit les positions de cuisson pour l'intervalle (40°, 90°). Il apparaît dans ce cas des zones de recouvrement qui correspondent à deux positions possibles pour une même direction mesurée. Ce fait explique la raison pour laquelle la datation archéomagnétique des matériaux déplacés de forme parallélépipédique ne peut être appliquée aux régions du globe pour les périodes où l'inclinaison du CMT a connu des valeurs inférieures à 45°.

Deux exemples serviront de démonstration pour les traitements exposés dans ce chapitre. Il s'agit d'une part d'un lot de 230 briques provenant de la paroi d'un four de tuilier gallo-romain, fouillé en 1980 au lieu-dit Le Biffoué en Guignen (Ille-et-Vilaine) (Goulpeau *et al.*, 1982) et d'autre part d'un lot de 158 *tegulae* recueillies en prospection sur un site gallo-romain situé au lieu-dit La Mare-Pilais en Plénée-Jugon (Côtes-du-Nord).

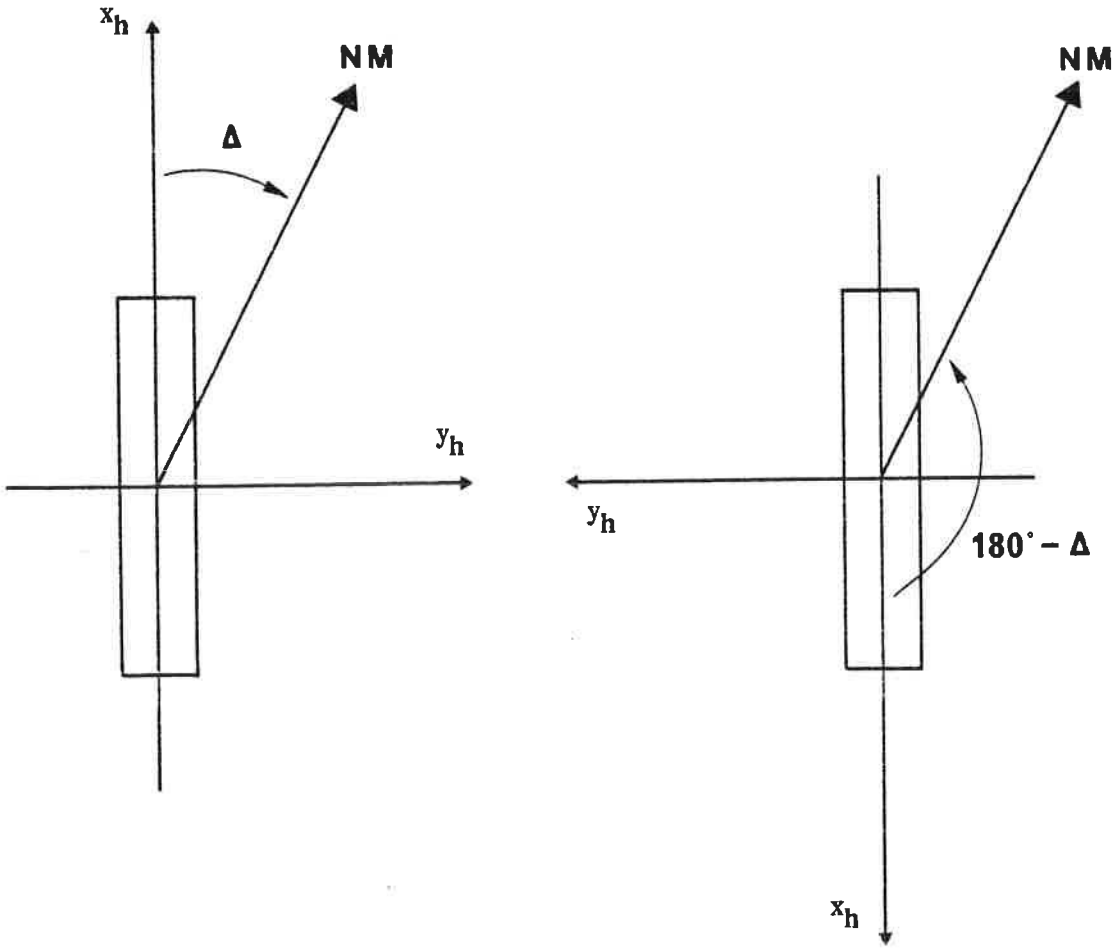



**Fig. II-3** : Orientation d'un parallélépipède par rapport au N.M.

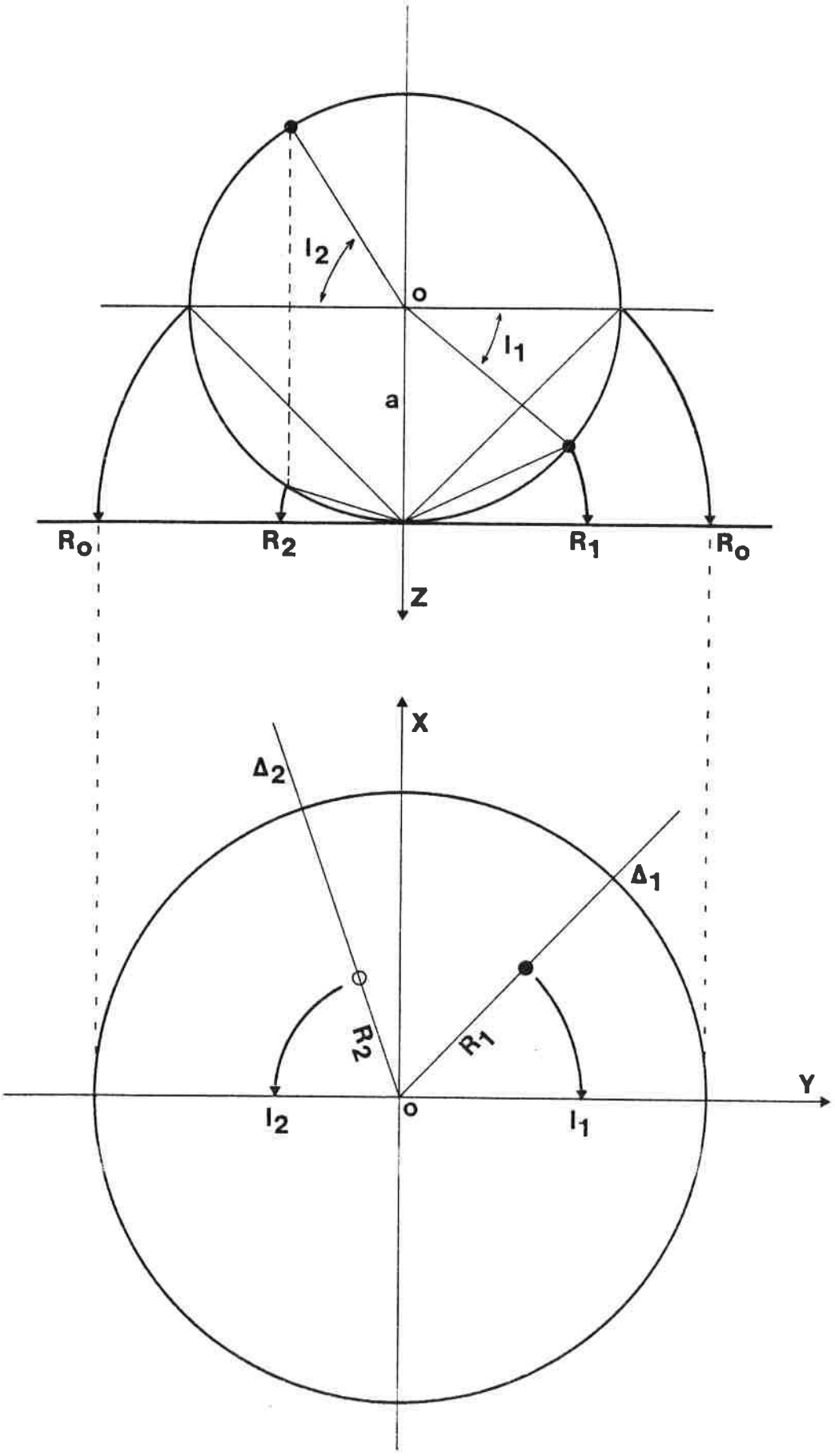
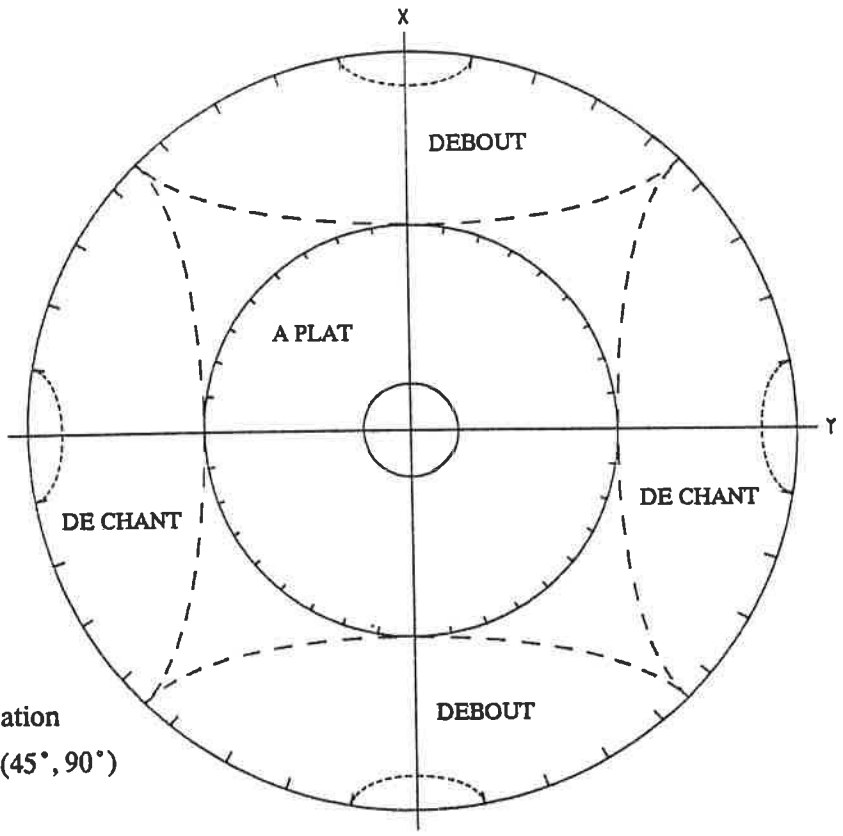
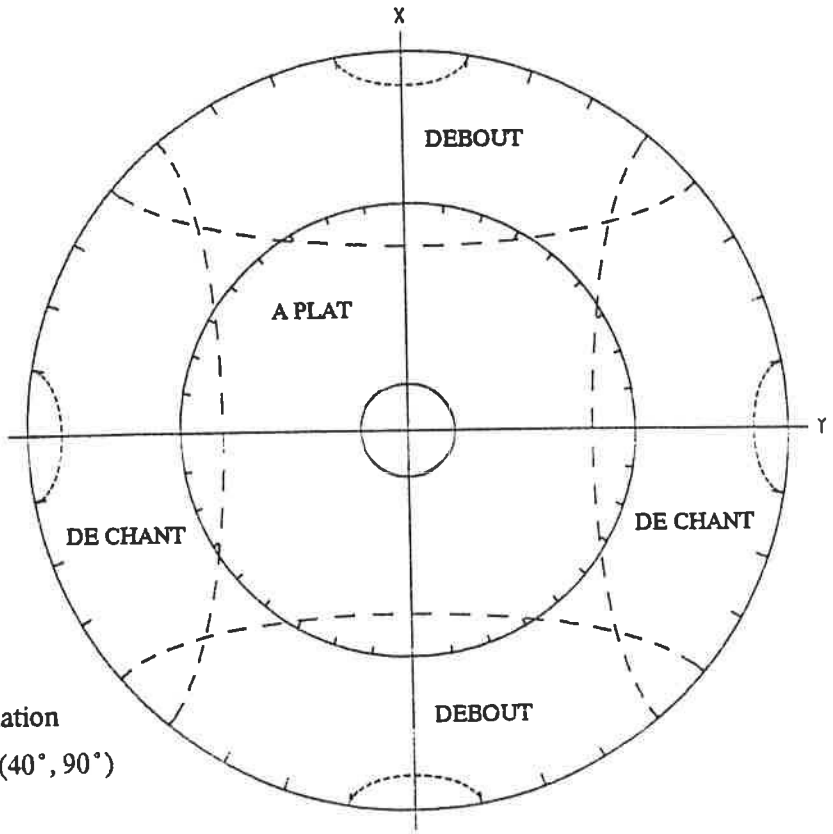



Fig. II-4 : Projection Lambert, à surface égale, appelée aussi canevas de Schmidt.




a) Intervalle de variation
de l'inclinaison : (45°, 90°)

**Fig. II-5a et b** : Diagramme de Schmidt associé au repère de carottage (Oxyz).
Pôles de projection correspondant aux six positions théoriques définies en figure II-2.




b) Intervalle de variation
de l'inclinaison : (40°, 90°)

GUIGNEN
Four du Biffoue
Fichier : 35127A
25-10-85

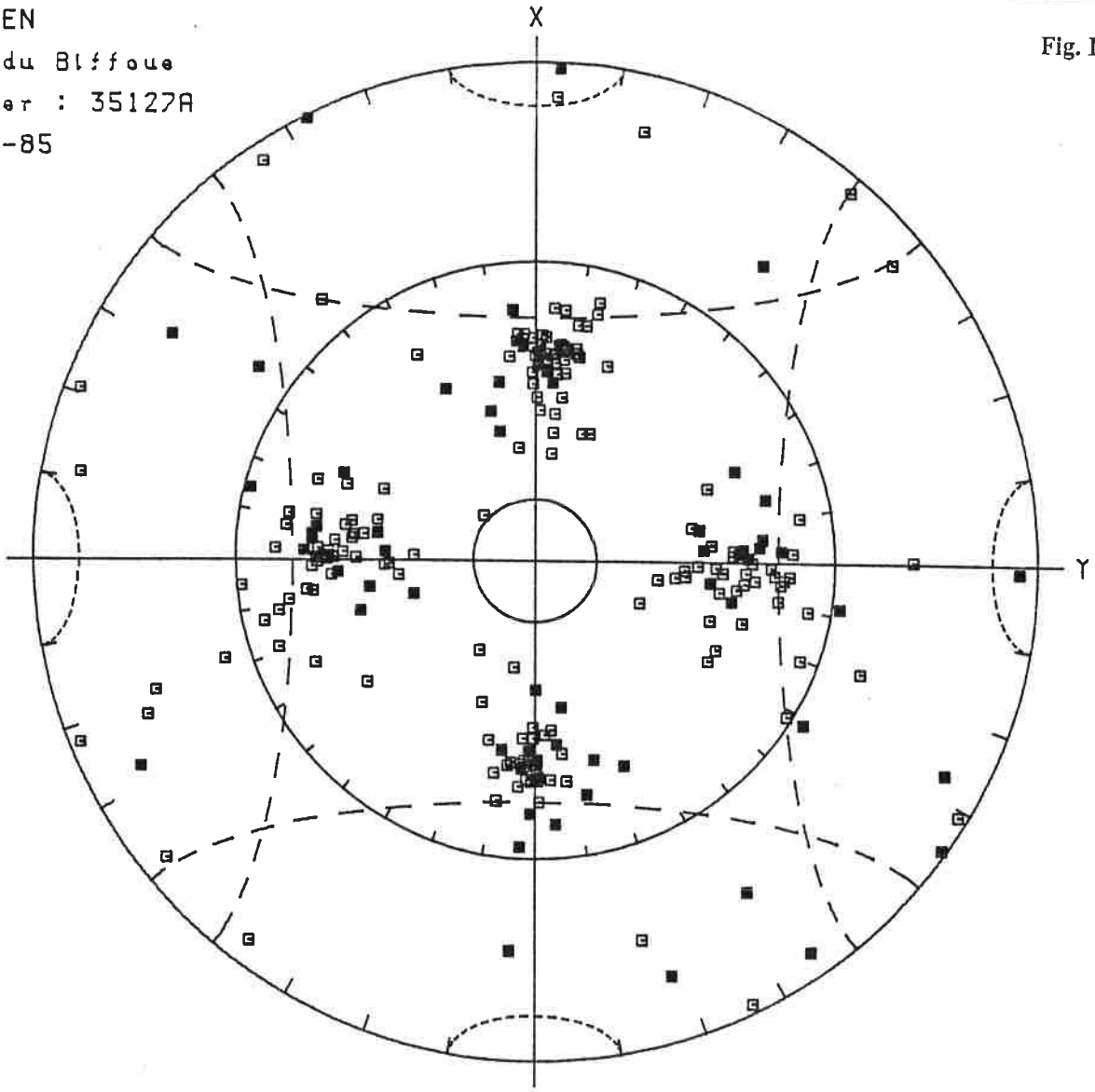



Fig. II-6a

Elements traites : BRIQUES
(Donnees brutes)

■ : Inclin. > 0
□ : Inclin. < 0

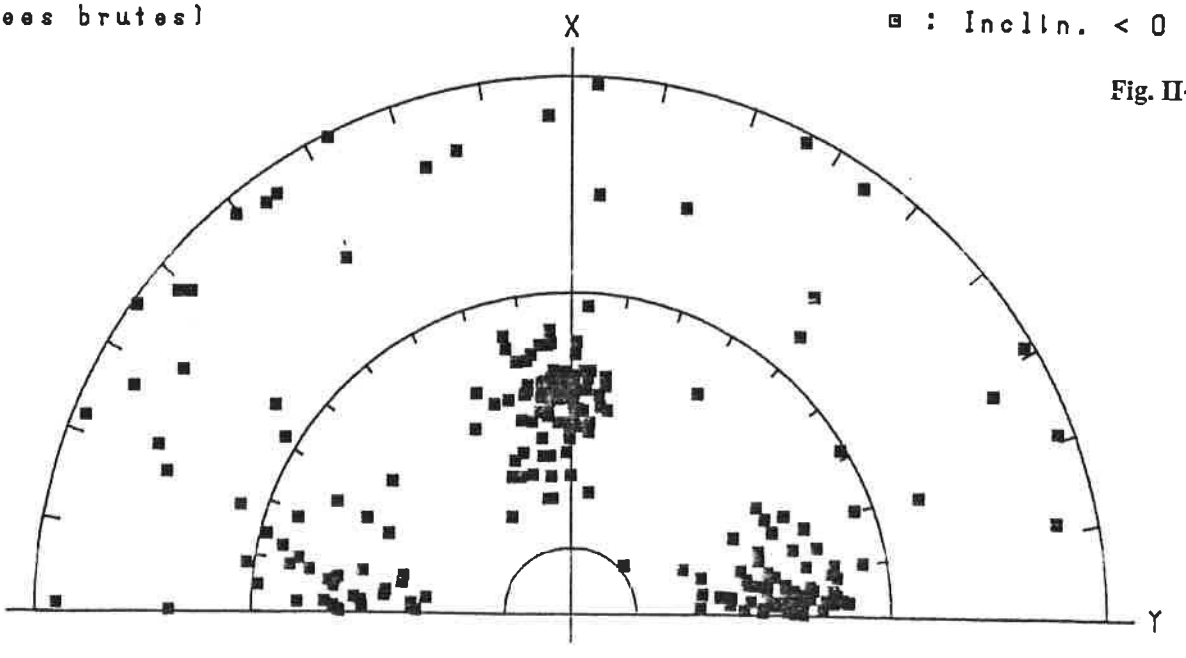
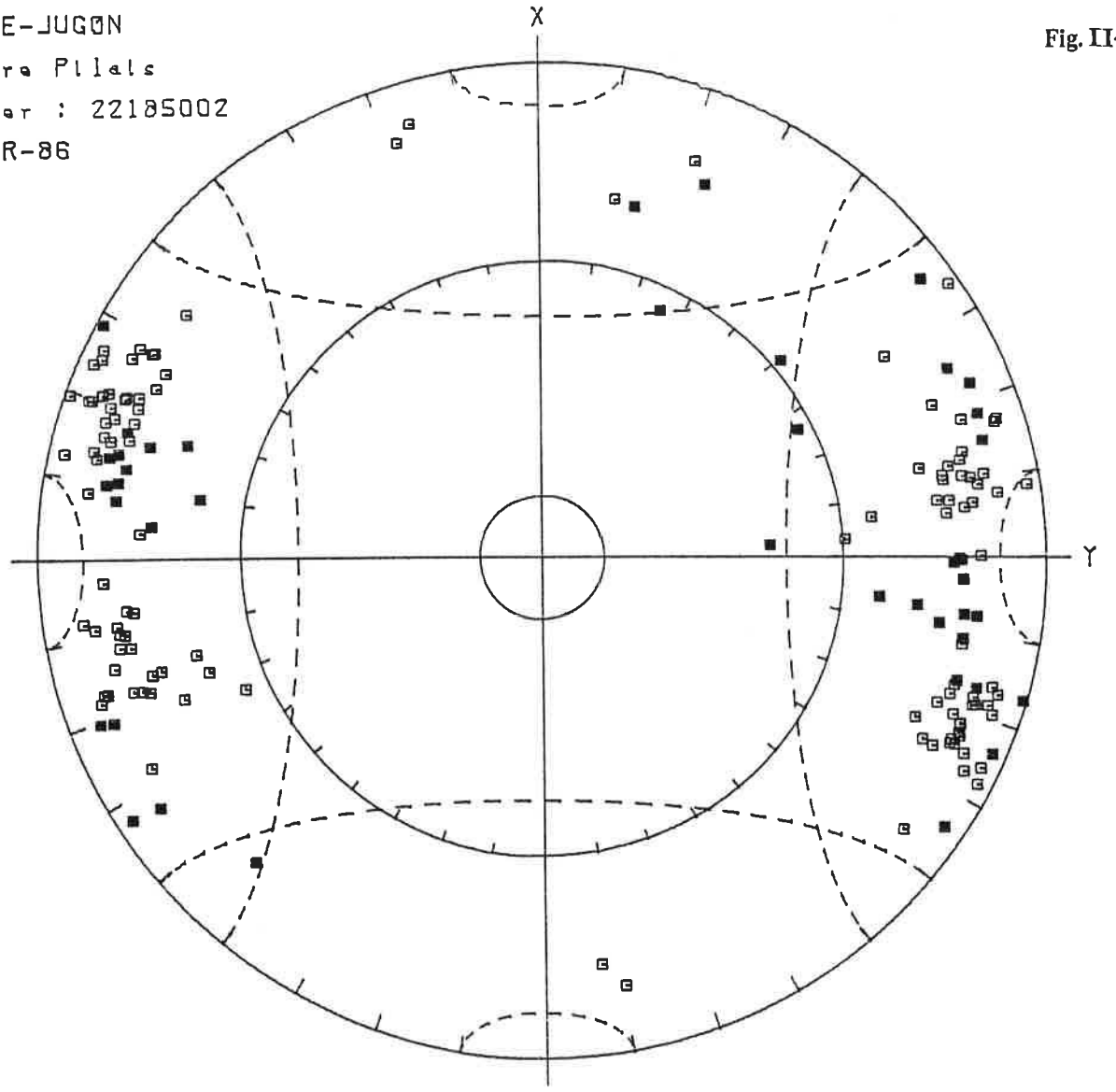



Fig. II-6b

PLENEE-JUGON
La Mare Pilais
Fichier : 22185002
13-MAR-86

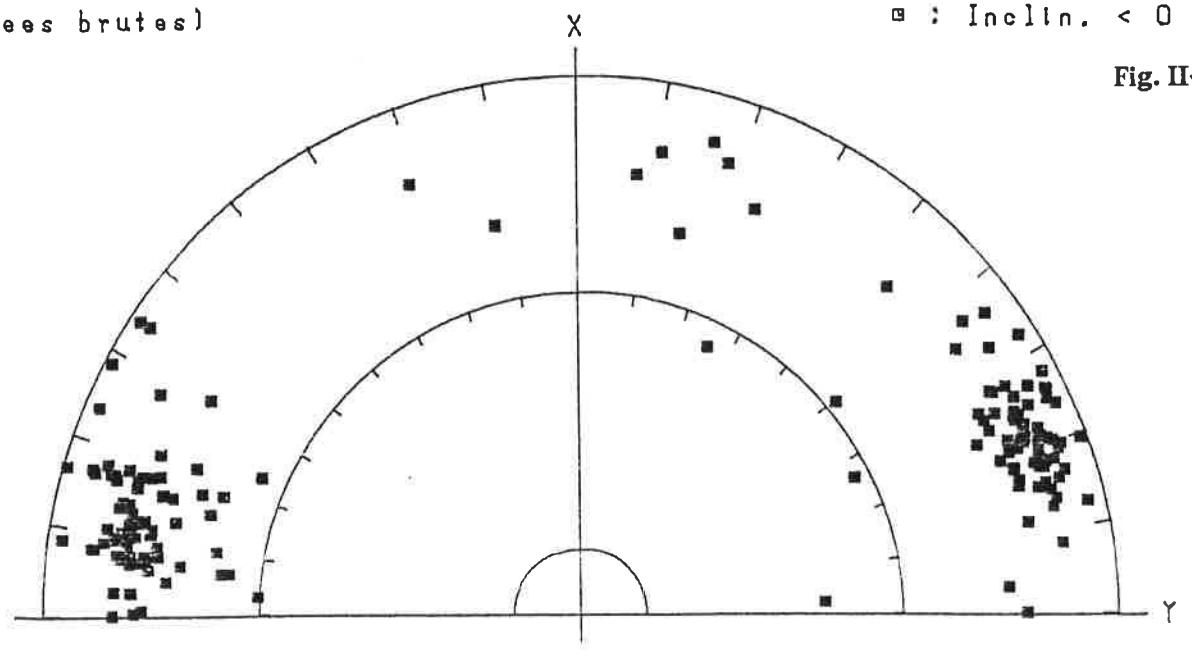
Fig. II-7a




Elements traites : T+S
(Donnees brutes)

■ : Inclin. > 0
□ : Inclin. < 0

Fig. II-7b



L'exemple de Guignen a déjà été utilisé dans le cadre des traitements présentés au chapitre I. Il sera ainsi possible de comparer l'apport des nouveaux traitements statistiques par rapport aux anciens. Le pointage des directions dans le diagramme de Schmidt en figure II-6a montre immédiatement que ces briques ont été cuites majoritairement à plat (84%). On s'en serait douté puisqu'elles ont été prélevées effectivement dans cette position dans les parois du four resté en place. On constate la présence de quatre agglomérats très concentrés aussi bien en déviation qu'en inclinaison. La déviation Δ et son supplément 180° - Δ représentent en fait la même orientation des matériaux parallélépipédiques par rapport au N.M. (fig. II-3). La signification des résultats reste donc inchangée si l'on replie les valeurs de la déviation dans l'intervalle (-90°, +90°). D'autre part, pour des raisons de cohérence avec l'orientation générale du CMT sous nos latitudes pendant la période historique, il convient de ramener les directions de la demi-sphère supérieure dans la demi-sphère inférieure. Cela revient à changer les signes de l'inclinaison et de la déviation. On obtient ainsi la figure II-6b qui montre deux agglomérats bien distincts, de déviation moyennes quasi-complémentaires. L'agglomérat voisin de +90° est scindé en deux groupes de points, l'un au voisinage de +90° et l'autre au voisinage de -90°. Mais ce dédoublement n'est qu'apparent puisqu'un diagramme représentant les déviations entre -45° et +135° par exemple n'offrirait plus cette séparation. La position de carottage étant dans ce cas la position de cuisson des briques, l'inclinaison moyenne et la déviation moyenne de chacun des deux agglomérats peuvent être déduites directement d'une simple lecture dans l'intervalle (40° , 90°) centré sur le pôle z.

L'exemple de Plénée-Jugon en figure II-7a indique immédiatement qu'il s'agit de tuiles cuites majoritairement de chant (92%). Le repliement des directions en figure II-7b fait apparaître nettement deux agglomérats bien distincts. Cependant, une telle représentation rend difficile la lecture des directions d'aimantation correspondant aux positions effectives de cuisson des tuiles. C'est pourquoi on utilise une autre représentation qui exprime les directions inclinaison-déviation directement dans le repère de la position de cuisson retenue pour chacun des matériaux.

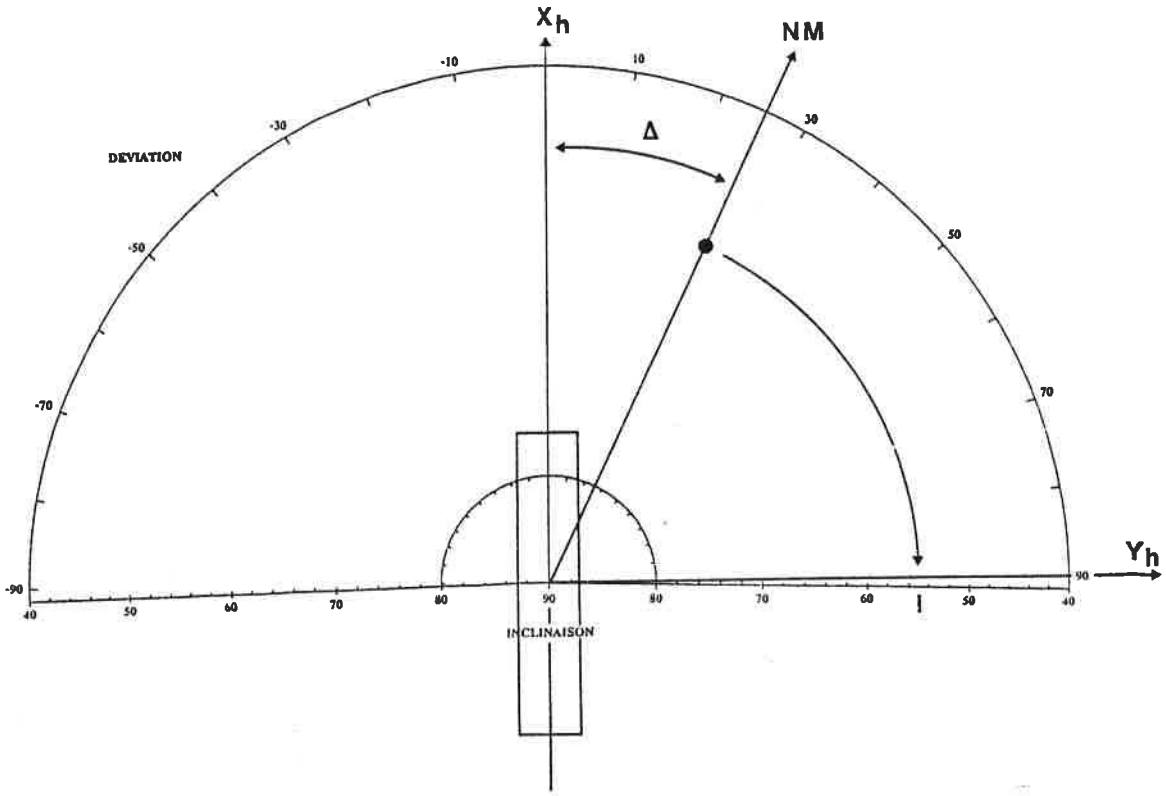
## LES DIAGRAMMES DE POINTAGE I - Δ

Ce type de diagramme figure les directions d'aimantation dans le repère de cuisson ($Ox_h\ y_h\ v$) défini en figure II-1. Pour simplifier, ce dernier sera noté (Oxyz) comme le repère de carottage. L'inclinaison est positive et comprise entre 40° et 90°. La déviation est conventionnellement comprise entre -90° et +90°. Dans ce diagramme de pointage (fig. II-8a), la déviation indique l'angle entre la direction de l'aimantation projetée sur le plan (Oxy) et l'axe x. En fait, il est archéologiquement plus intéressant d'exprimer l'orientation relative des axes x par rapport au N.M. de l'époque. Ce qui revient à changer le signe de la déviation (fig. II-8b). Ce choix d'un même nord commun à tous les matériaux suppose une parfaite colinéarité entre l'aimantation acquise et le CMT ambiant lors de la cuisson. Cela est effectivement vérifié tant qu'aucune cause d'erreurs ne vient détruire cette colinéarité. En conséquence, chaque point du diagramme représente l'inclinaison du CMT et l'azimut de l'axe x de l'objet par rapport à la direction du N.M. Les exemples de pointage pour les lots de Guignen et de Plénée-Jugon sont donnés en figure II-9a et b. Les positions des objets sont indiquées par des symboles différents :

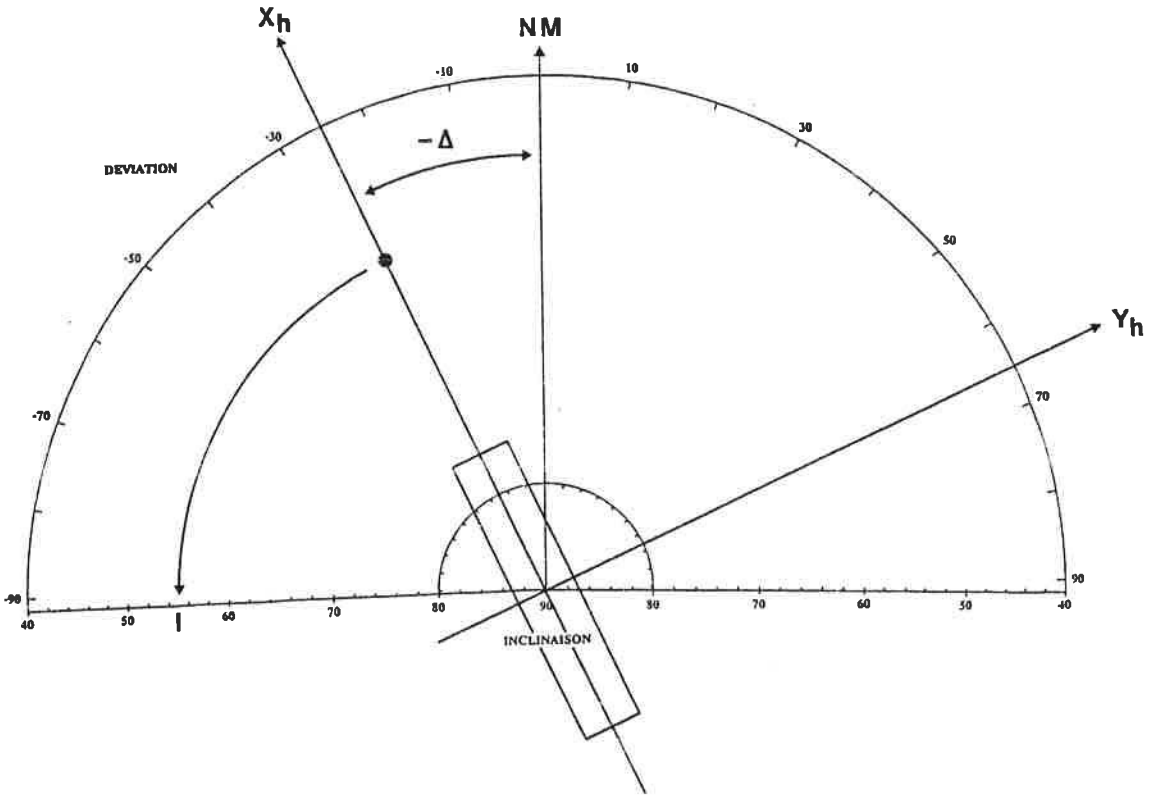
◇ : à plat
□ : de chant
△ : debout

Le symbole est noir lorsque la face supérieure des objets est tournée vers le N.M. ; il est blanc lorsque la face inférieure est tournée vers ce N.M.

**Fig. II-8a et b** : Diagramme de pointage des directions d'aimantation associées aux positions de cuisson retenues.




a) Déviation exprimant l'angle entre les directions d'aimantation, dans le plan ($x_h$, $y_h$), et l'axe $x_h$ des matériaux pris comme référence unique pour tous les objets.




b) Déviation exprimant l'angle entre l'axe $x_h$ des objets et le N.M. pris comme référence unique.

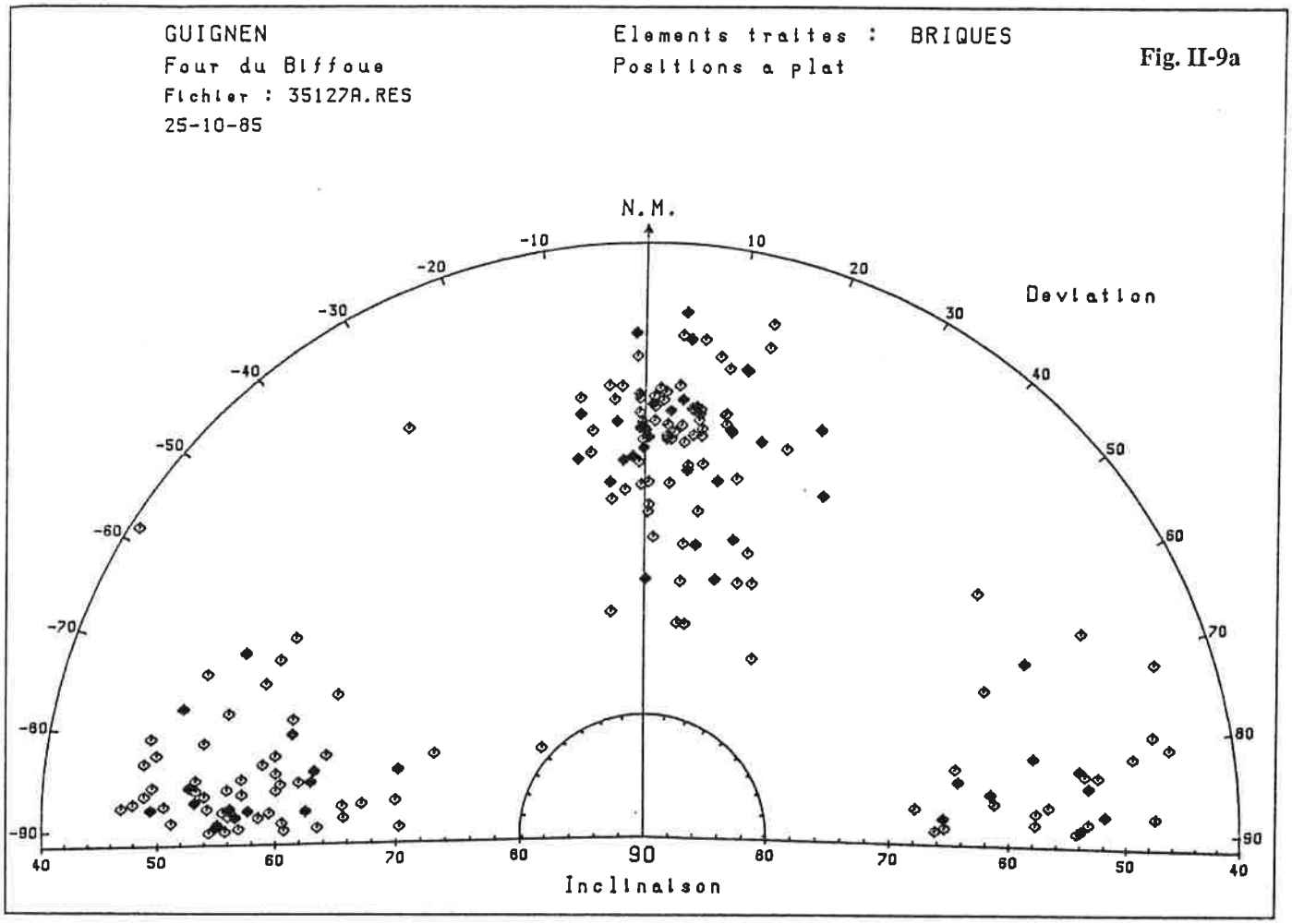



Fig. II-9a

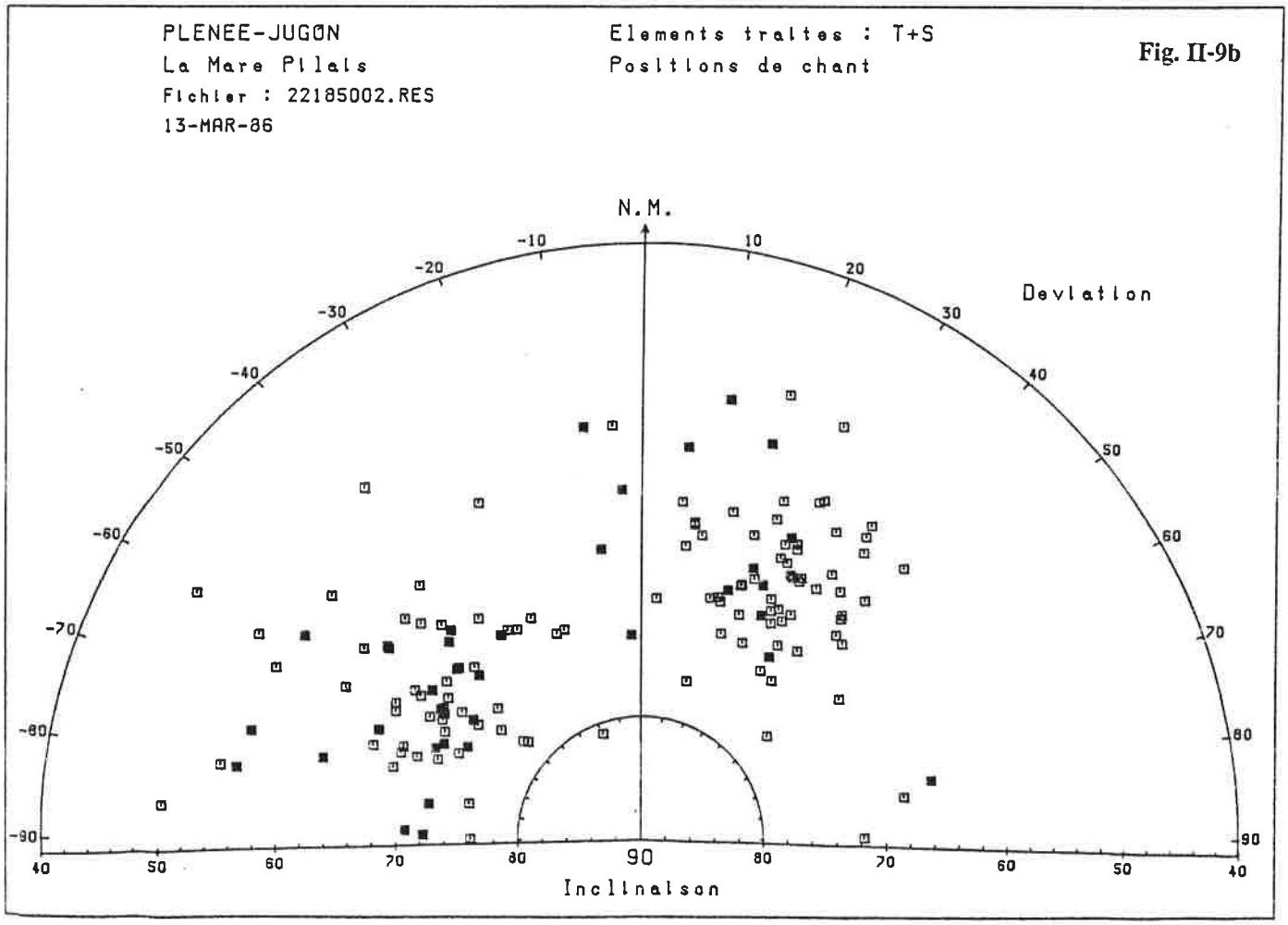



Fig. II-9b

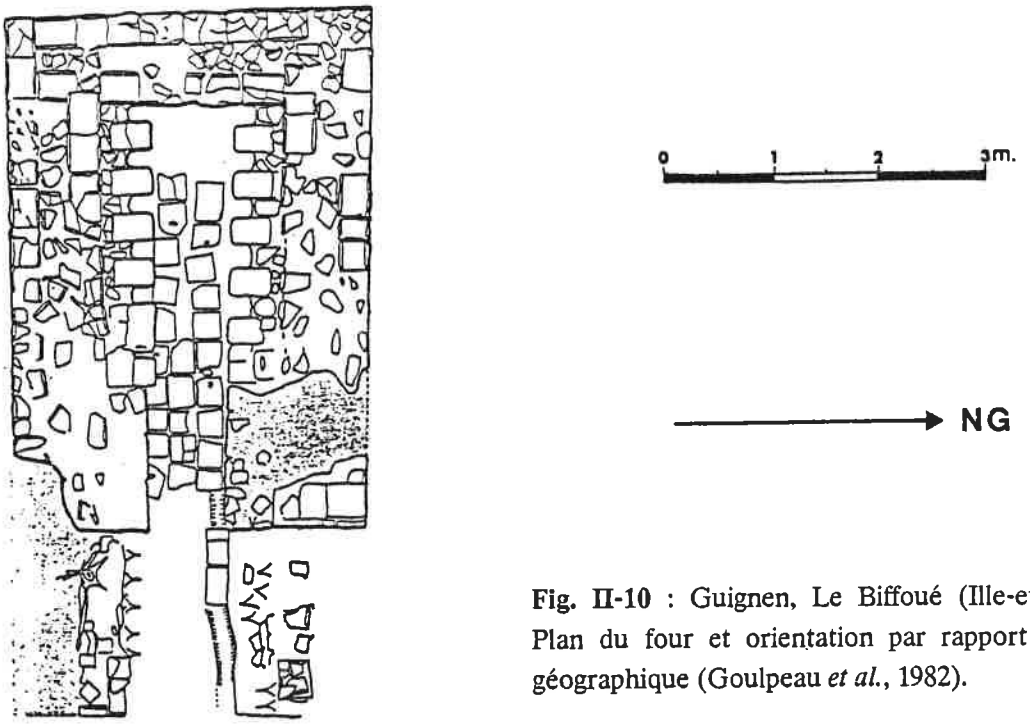



**Fig. II-10** : Guignen, Le Biffoué (Ille-et-Vilaine). Plan du four et orientation par rapport au Nord géographique (Goulpeau *et al.*, 1982).

Dans l'exemple de Guignen, les positions de cuisson, pratiquement toutes à plat, et la cohérence des directions d'aimantation montrent que les briques ont acquis leur aimantation après réchauffement total dans la structure même du four où elles furent réutilisées. La rareté des points noirs indique que les faces supérieures, lissées, des briques étaient majoritairement orientées vers le haut dans les parois du four. Cette régularité dans la pose des matériaux dénote le coup de main attentionné du constructeur. Les déviations moyennes quasi-complémentaires indiquent qu'il s'agit d'un four de forme rectangulaire avec des parois pratiquement parallèles et perpendiculaires au N.M. de l'époque. Ce Nord étant très voisin du Nord géographique durant l'époque gallo-romaine (Thellier, 1981), on en conclut, à partir du simple examen des données archéomagnétiques rassemblées dans le diagramme de pointage (fig. II-9a), que le four de Guignen était orienté pratiquement selon les points cardinaux. La véracité d'une telle déduction est tout à fait conforme aux données de la fouille (fig. II-10) (Goulpeau *et al.* , 1982).

Le diagramme de pointage pour le lot de Plénée-Jugon permet cette fois une lecture directe des inclinaisons et des déviations associées à la position de cuisson de chant. Cette position est la seule représentée puisqu'elle concerne plus de 92% de l'échantillonnage. Les autres positions apparaissent en comparaison comme un bruit de fond dont il convient de ne pas tenir compte. Le pointage montre nettement l'existence de deux agglomérats très concentrés, de déviations moyennes quasi-complémentaires. Lors de l'acquisition de leur aimantation, les tuiles étaient posées de chant, selon deux directions de rangement orthogonales entre elles. Cela correspond de toute évidence à une cuisson des matériaux dans un four de forme rectangulaire, orienté à environ 60° ouest et 30°est par rapport au N.M. de l'époque. Les données archéomagnétiques peuvent ainsi renseigner indirectement sur l'orientation des fours , sans que ces derniers aient été préalablement retrouvés et fouillés sur le terrain. Les orientations des rebords des tuiles sont indiquées par les points noirs. Les tuiles de l'agglomérat proche de +30° ont leurs rebords presque tous tournés vers l'Est magnétique tandis que celles de l'agglomérat complémentaire ont leurs rebords orientés moitié vers le N.M. , moitié vers le S.M. Tous ces renseignements concernant les modes de chargement seront étudiés en détail aux chapitres XII et XIII.

## D - LES DIAGRAMMES DE DENSITE

La technique de la fenêtre mobile appliquée à la sphère des directions permet de calculer les densités de points dans le diagramme de pointage. Une valeur de densité correspond au nombre de vecteurs aimantation dont les directions sont comprises dans un cône d'ouverture $\propto$ centré sur une direction fixée. Le diagramme de densité est obtenu en cartographiant dans le plan $(I, \Delta)$ les densités calculées pour toutes les directions centrées sur les noeuds d'un réseau régulièrement réparti à la surface de la sphère. Soit un noeud caractérisé par la direction ON, d'inclinaison $I_N$ et de déviation $D_N$. Le test d'appartenance d'une direction quelconque OQ à un cône d'ouverture $\propto$ centré sur le noeud N de direction ON est basé sur le produit scalaire de deux vecteurs dans l'espace. En supposant la sphère de rayon unité, c'est-à-dire $\|ON\| = \|OQ\| = 1$, on obtient en coordonnées sphériques :

$$\cos \theta = \cos I_Q \cdot \cos I_N \cdot \cos (D_Q - D_N) + \sin I_Q \cdot \sin I_N$$

$\theta$ est l'angle entre les deux directions. Si $\theta < \propto / 2$ (demi-angle au sommet du cône), alors la direction OQ est comprise dans le cône d'ouverture $\propto$. Cette méthode des densités appliquée directement à des directions dans l'espace résoud complètement la distorsion introduite par l'utilisation d'un quadrilage à mailles régulières dans un diagramme cartésien (cf. chapitre I). En d'autres termes, les densités déterminées dans le diagramme cartésien ne sont comparables à celles déterminées par la méthode du cône que si les dimensions de la maille tiennent compte de la position du noeud dans le réseau. D'après la figure II-11, on montre que ces dimensions sont données par :

$$I_N - \propto / 2 \;\; ; \;\; I_N + \propto / 2$$

$$D_N - \arcsin (\sin(\propto / 2) / \cos I_N) \;\; ; \;\; D_N + \arcsin (\sin(\propto / 2) / \cos I_N)$$

Il n'y a que lorsque le noeud se situe à l'équateur de la sphère ($I_N = 0$) que la maille a une forme carrée ($\propto$ sur $\propto$). Par contre, plus l'inclinaison $I_N$ devient forte, et plus l'intervalle des déviations à tester devient grand. La maille devient alors de forme rectangulaire.

En principe, le diagramme des densités est obtenu à partir d'un réseau de points uniformément répartis à la surface de la sphère. En pratique, les densités sont déterminées de 1° en 1° selon l'inclinaison et de 2° en 2° selon la déviation, ce qui ne correspond pas vraiment à un réseau régulier sur la sphère. Cependant, la distorsion est minime, surtout si l'on s'en tient uniquement à l'intervalle (40°, 80°) de variation de l'inclinaison, et n'affecte en rien la signification des agglomérats mis en évidence. Tout au plus cela se traduit-il par un resserrement des valeurs affichées lorsque l'inclinaison approche de 80° et plus.

Le calcul des densités est obtenu en incrémentant d'une unité tous les cônes d'ouverture donnée auxquels appartient une direction (inclinaison-déviation) du diagramme de pointage. Ce procédé est beaucoup plus rapide que celui qui consiste à tester tous les points du diagramme pour un cône donné. En effet, dans le premier cas, le fichier des mesures n'est lu qu'une seule fois tandis que dans le second cas, il est lu autant de fois qu'il y a de cônes répartis sur la sphère.

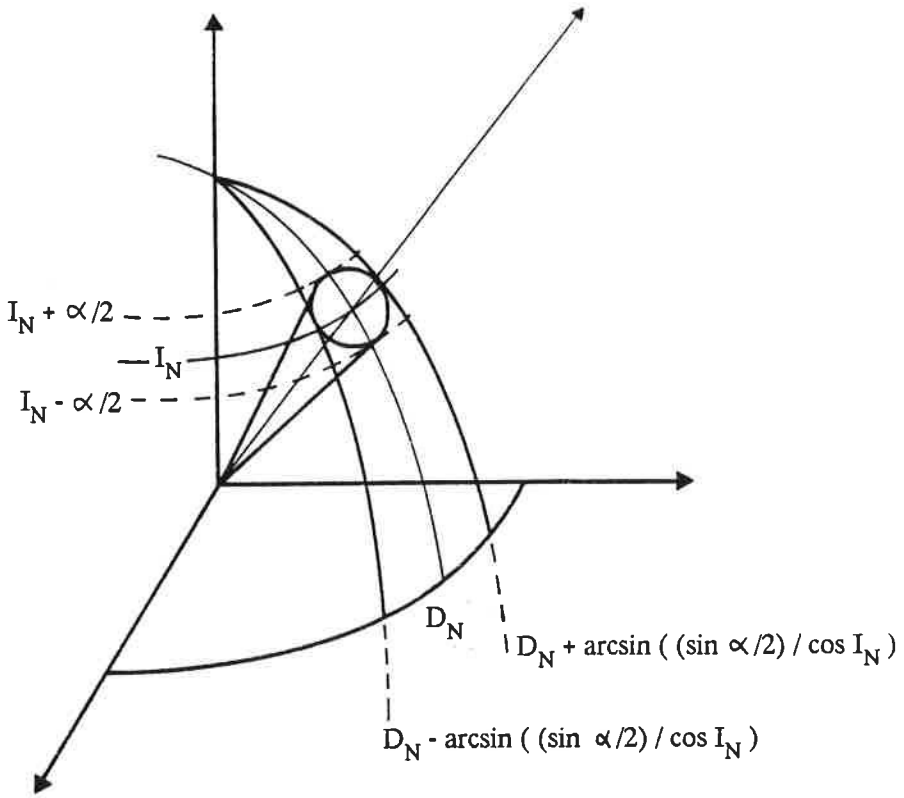



**Fig. II-11** : Technique de la fenêtre mobile selon un cône d'ouverture $\alpha$ balayant la sphère des directions selon un réseau uniformément réparti.

Le calcul des densités tient compte de la définition à 180° près des valeurs de la déviation. Ainsi, un cône d'ouverture 10° centré sur une inclinaison de 60° et une déviation de +90° testera des points dont les déviations se situent dans l'intervalle 90° ± arcsin (sin 5° / cos 60°), soit entre +80° et +100°. Autrement dit, les directions dont les déviations se situent entre -80° et -90° seront elles aussi testées. Il n'y a donc, dans la signification des valeurs de densité, aucune distorsion due au choix conventionnel des bornes (-90°, +90°) dans les diagrammes inclinaison-déviation.

L'ouverture du cône dépend en principe de la taille des agglomérats que l'on cherche à mettre en évidence. L. Goulpeau et L. Langouët (1980) ont montré que la taille moyenne des agglomérats était de l'ordre de 8° sur 8°. Dans la pratique, il s'avère qu'un cône d'ouverture 8° permet de même un très bon lissage des directions d'aimantation. En fait, la méthode des densités revient à faire une moyenne mobile en deux dimensions. Le but de l'opération est de bien faire ressortir les maximums de densité sans trop intégrer le bruit de fond dû à la dispersion des directions ni sans trop tenir compte des variations de détail souvent le fruit du hasard.

Les figures II-12a et b donnent les diagrammes de densité des sites précités de Guignen et de Plénée-Jugon. On obtient les résultats suivants :

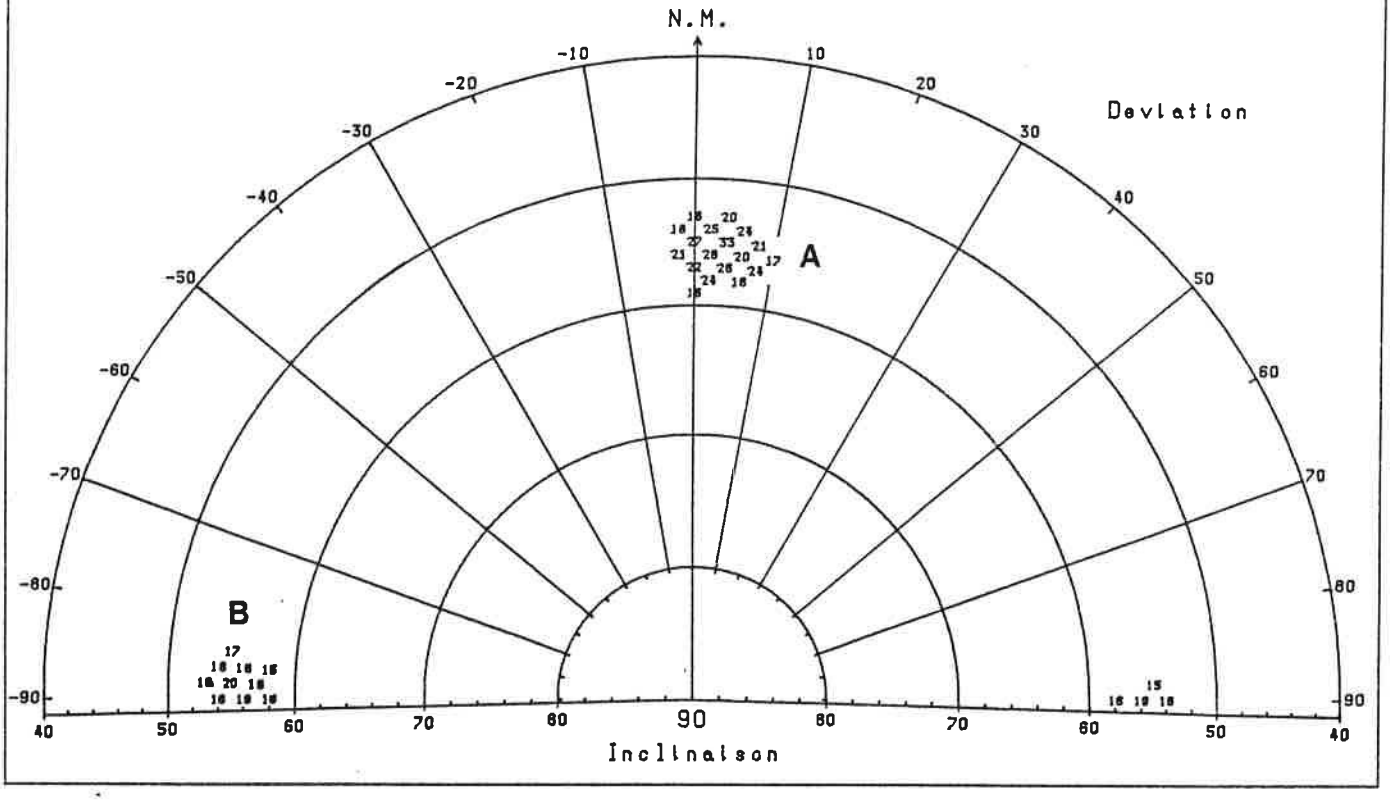
| | | | |
|---|---|---|---|
| GUIGNEN : | agglomérat A : | $\bar{I} = 55°$ | $\bar{\Delta} = +4°$ |
| | agglomérat B : | $\bar{I}' = 55°$ | $\bar{\Delta}' = -88°$ |
| PLENEE-JUGON : | agglomérat A : | $\bar{I} = 67°$ | $\bar{\Delta} = +28°$ |
| | agglomérat B : | $\bar{I}' = 70°$ | $\bar{\Delta}' = -62°$ |

GUIGNEN
Four du Biffoue
Fichier : 35127A.RES
25-10-85

Elements traites : BRIQUES
Positions a plat

Fenetre mobile
selon un cone
de 6 degres
d'ouverture

Fig. II-12a

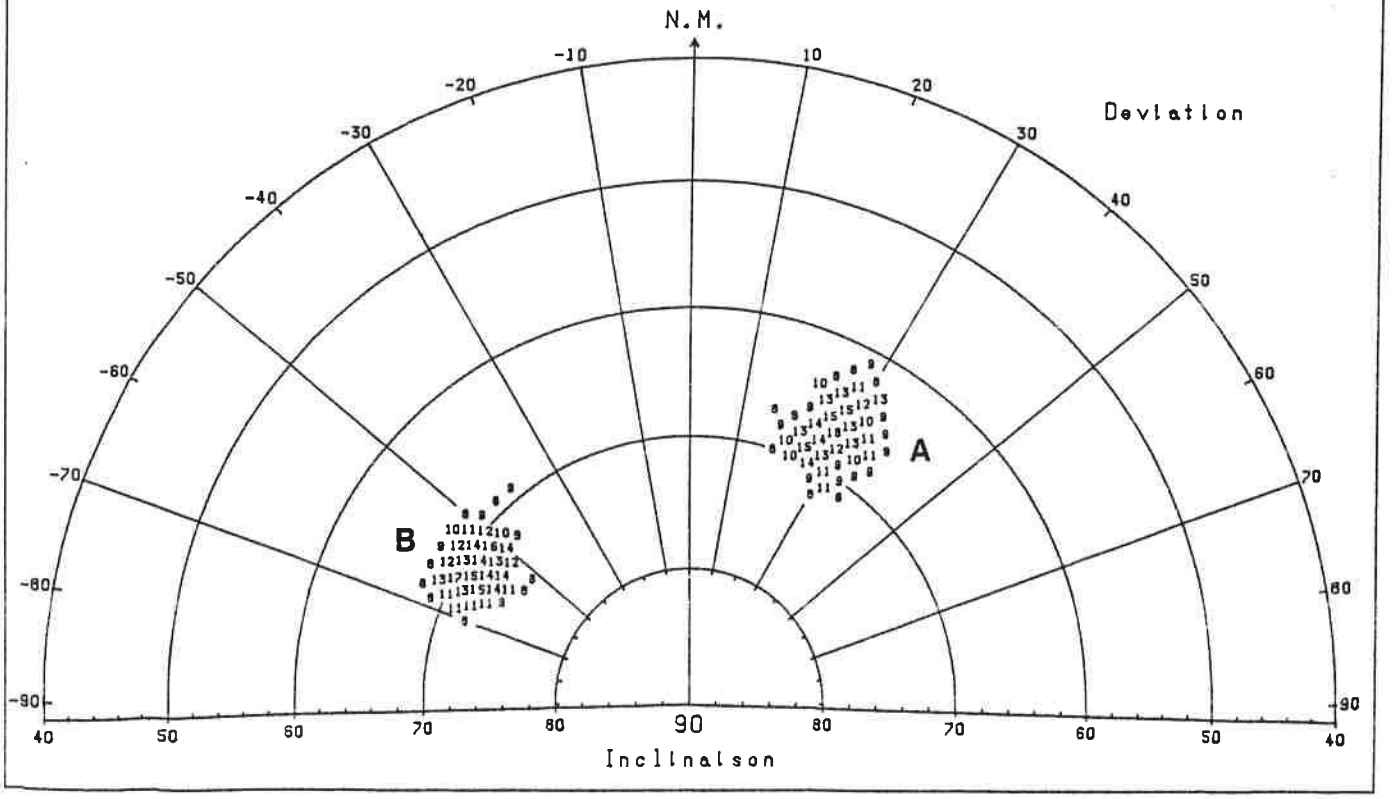



PLENEE-JUGON
La Mare Pilais
Fichier : 22185002.RES
13-MAR-86

Elements traites : T+S
Positions de chant

Fenetre mobile
selon un cone
de 6 degres
d'ouverture

Fig. II-12b



Ces densités ont été établies avec des cônes de 6° d'ouverture (± 3°) à cause de la très forte concentration des groupements de points. Pour Guignen, le maximum atteint 33 ! L'affichage des densités est effectué à partir de 15. Pour Plénée-Jugon, le maximum atteint 18 et l'affichage commence à partir de 8. Dans ces deux exemples, les agglomérats sont bien délimités et faciles à mettre en évidence. Par contre, il existe des lots pour lesquels les maximums de densité ne dépassent pas 4, 5 ou 6. Dans ce cas, la signification des groupements n'est assurée que s'ils correspondent au plus grand nombre d'éléments différents échantillonnés. Chaque direction du diagramme de pointage représente en principe un seul objet. Cependant, la fragmentation peut entraîner des échantillonnages doubles, triples voire quadruples d'un même objet, qui introduisent par voie de conséquence l'existence d'agglomérats artificiels.

## PROBABILITE D'EXISTENCE D'AGGLOMERATS ARTIFICIELS DUS A LA FRAGMENTATION

Il est généralement prélevé une seule carotte par élément entier ou par fragment d'élément. Si plusieurs prélèvements sont effectués sur un même élément, la direction de l'aimantation pour ce dernier sera obtenue à partir de la moyenne statistique, au sens de Fisher, des directions mesurées sur les différentes carottes prélevées. Lorsque les matériaux sont entiers, il ne fait aucun doute que chaque direction pointée dans le diagramme $(I, \Delta)$ correspond à un seul objet. Par contre, dans le cas de lots constitués de matériaux fragmentés, rien n'empêche d'avoir plusieurs fragments provenant d'un même élément. Lorsque les conditions sont favorables, en fouille par exemple, il est parfois possible de recoller les fragments entre eux. Ceci est un moyen d'éviter d'échantillonner un même élément plusieurs fois. Cependant, la majorité des lots étudiés, en particulier ceux provenant de sites de prospection, fournissent un matériel très fragmenté et érodé qui rend difficile les reconstitutions. Aussi, rien ne permet de vérifier s'il existe des fragments communs à un même objet.

Les mesures d'aimantation effectuées sur des fragments provenant d'objets identiques donnent généralement des directions très voisines, écartées de quelques degrés seulement. Il en résulte l'apparition de groupements de deux ou plusieurs points très voisins dans le diagramme de pointage. Le calcul des densités révèle en conséquence des agglomérats tout à fait artificiels qui ne représentent que la direction moyenne de l'aimantation d'un objet, et non celle d'une série d'objets tous différents. Un moyen d'éliminer ce bruit de fond consiste à ne faire apparaître que les densités supérieures au nombre maximum de fragments que l'on peut "craindre" par objet.

L'impossibilité de reconnaître les fragments d'un même élément oblige à aborder le problème sous un angle statistique. Il s'agit d'évaluer la probabilité P que l'on a de prendre f fragments d'un même objet lorsque l'on tire au hasard r éléments dans un ensemble de T objets différents chacun brisé en F fragments.

### EVALUATION DES PARAMETRES

Le nombre r est connu puisqu'il s'agit du nombre de fragments constituant le lot à étudier. Il est généralement de l'ordre de la centaine.

Les deux autres nombres T et F sont évalués à partir des observations archéologiques. Considérons l'exemple de tuiles gallo-romaines provenant d'un édifice ayant une superficie au sol de 100 $m^2$. Le nombre total T de tuiles intervenant dans la couverture dépend de la taille moyenne de ces dernières, du taux de recouvrement et de la pente de la toiture. On peut prendre les évaluations suivantes :

- surface moyenne d'une tuile : 0,30 x 0,50 = 0,15 $m^2$,
- surface de recouvrement : 1/4 de la surface d'une tuile,
- pente moyenne des toitures : 20° (Adam, 1984).

d'où $T = 100 / ( 0{,}15 . 0{,}75 . \cos 20° ) \sim 946$ tuiles

Ainsi, on peut évaluer à environ 1000 le nombre moyen de *tegulae* formant la toiture d'un édifice gallo-romain ayant une emprise au sol de 100 $m^2$.

Le nombre moyen de fragments par tuile est évalué à partir de la masse totale du lot de fragments à étudier :

F = masse moyenne d'une tuile / masse moyenne d'un fragment

avec masse moyenne d'un fragment = masse des r fragments étudiés / nombre de fragments r

On envisagera le cas théorique où F = 5, ce qui correspond à une dimension moyenne des fragments de l'ordre de 15 cm x 15 cm de côté. C'est la dimension généralement requise dans les études archéomagnétiques de *tegulae*.

EXEMPLE SIMPLE

Afin de mieux expliciter le principe du calcul de la probabilité P, on traitera le cas simple de 5 tuiles chacune brisée en 3 fragments. Faute de pouvoir évaluer l'influence de la taille et de la forme des fragments, on admettra le principe de l'équiprobabilité de tirer au hasard tel ou tel fragment.

Le nombre de façons différentes de prendre 4 fragments parmi 15, sans tenir compte de l'ordre, est le coefficient binômial C(4,15).

$$C(p,n) = n! / (n-p)!\, p!$$

Il existe donc 1365 tirages différents possibles.

La population des 15 fragments est composée de 5 sous-populations comprenant 3 fragments chacune. Aussi, il existe plusieurs façons de prendre les 4 fragments parmi ces 5 sous-populations. Par exemple, le nombre de façons de prendre un seul fragment par tuile est égal au produit des coefficients binômiaux :

$C(1,3) . C(1,3) . C(1,3) . C(1,3)$

soit 81 cas favorables. Ainsi, la probabilité d'avoir quatre fragments tirés parmi les quatre tuiles 1,2,3,et 4 est :

$P(T1=1 , T2=1 , T3=1 , T4=1 , T5=0) = ( C(1,3) . C(1,3) . C(1,3) . C(1,3) ) / C(4,15) = 0{,}05934$

On peut encore faire ce même type de tirage parmi les quatre tuiles 2,3,4,5, ou 1,3,4,5 ... Le nombre de combinaisons différentes, toujours sans tenir compte de l'ordre, est le coefficient binômial C(4,5). C'est le nombre de façons de choisir 4 tuiles parmi les 5. Finalement, la probabilité totale de tirer quatre fragments de quatre tuiles différentes est :

$P1 = C(4,5) . 0{,}05934 = 0{,}2967$

De la même manière, on peut calculer la probabilité de tirer deux fragments d'une même tuile et les deux autres de deux tuiles différentes. La probabilité d'un tel tirage est :

$$P(T1=2 , T2=1 , T3=1 , T4=0 , T5=0) = ( C(2,3) . C(1,3) . C(1,3) ) / 1365 = 0,01978$$

Le nombre de tirages de ce type est $C(2,5) . C(1,3) = 30$, d'où :

$$P2 = 0,5934$$

de même :

$$P(T1=2 , T2=2 , T3=0 , T4=0 , T5=0) = ( C(2,3) . C(2,3) ) / 1365 = 0,00659$$

$$P3 = C(2,5) \times 0,00659 = 0,0659$$

$$P(T1=3 , T2=1 , T3=0 , T4=0 , T5=0) = ( C(3,3) . C(1,3) ) / 1365 = 0,002198$$

$$P4 = C(1,5) . C(1,4) . 0,002198 = 0,0440$$

On vérifie aisément que $P1 + P2 + P3 + P4 = 1$ (probabilité certaine)

A partir de ces résultats, on peut calculer la probabilité de deux variables aléatoires discrètes différentes :

- d'une part, la probabilité P(t = i) d'avoir, parmi les r fragments tirés, i tuiles différentes échantillonnées.

- d'autre part, la probabilité P(f = j) d'avoir, parmi les r fragments tirés, au maximum j fragments provenant d'une même tuile. On obtient les lois suivantes :

| | | | |
|---|---|---|---|
| P(t = 2) = P3 + P4 | = 11% | P(f = 1) = P1 | = 30% |
| P(t = 3) = P2 | = 59% | P(f = 2) = P2 + P3 | = 66% |
| P(t = 4) = P1 | = 30% | P(f = 3) = P4 | = 4% |
| | 100% | | 100% |

On peut remarquer que la probabilité P(f = 1) d'avoir au maximum un fragment par tuile est exactement égale à celle d'avoir tous les fragments provenant de tuiles différentes, soit P(t = 4).

CAS GENERAL

A partir de l'algorithme de calcul élaboré dans cet exemple, on déduit la formule générale exprimant la probabiiité de tirer r fragments parmi 5000 (1000 tuiles en 5 fragments chacune) avec a tuiles différentes fournissant chacune 1 fragment, b autres tuiles différentes fournissant chacune 2 fragments, ..., e autres tuiles différentes fournissant chacune 5 fragments :

$$P = C(a,1000) . C(b,1000-a) . C(c,1000-a-b) . C(d,1000-a-b-c) . C(e,1000-a-b-c-d) . C(1,5)^a . C(2,5)^b . C(3,5)^c . C(4,5)^d . C(5,5)^e / C(r,5000)$$

Cette probabilité est calculée pour toutes les solutions a , b , c , d , e vérifiant l'équation :

$$a + 2b + 3c + 4d + 5e = r$$

Pour chacune des solutions de cette équation, le nombre de tuiles différentes échantillonnées est :

$$t = a + b + c + d + e ,$$

et le nombre maximal f de fragments provenant d'une même tuile est le premier des nombres e , d , c , b , a différent de 0.

Comme pour l'exemple précédent, la somme des probabilités pour chaque t donné et chaque f donné permet de tracer les lois de probabilité P(t = i) et P(f = j). Le calcul de ces lois a été programmé en Turbo-Pascal sur un Bull Micral 9050D possédant le processeur de calcul Intel 8087. Ce processeur permet des opérations extrêmement rapides sur des nombres réels pouvant aller jusqu'à $10^{\pm 300}$, et fournit des résultats avec 15 chiffres significatifs.

Les "diagrammes en bâton" des probabilités P(t = i) et P(f = j) sont respectivement présentés en figure II-13 et II-14 pour r = 25, 50, 100 et 150. Pour des échantillonnages de 100 fragments, la probabilité d'avoir entre 90 et 100 tuiles différentes échantillonnées est de 99,9%. La probabilité maximale se situe autour de 96 - 97 tuiles.

$$P(t = 96 \text{ ou } 97) = 41\%$$

Notons pour l'anecdote que la probabilité d'avoir 100 fragments provenant de 20 tuiles différentes (soit 5 fragments par tuiles) est extrêmement faible :

$$P(t = 20) = 1{,}09 \cdot 10^{-170}$$

La probabilité d'avoir, parmi les 100 fragments tirés, au maximum 2 fragments provenant d'une même tuile est de l'ordre de 91%. Elle tombe à 7% pour 3 fragments. Un tirage de 150 fragments donne dans les mêmes conditions 77,5% et 22%.

En conclusion, ces calculs montrent que la probabilité n'est pas négligeable d'avoir 2 ou 3 fragments provenant d'une même tuile dans un lot de 100 à 150 fragments prélevés au hasard sur une surface de prospection ou de fouille de l'ordre de 100 $m^2$. De plus, on imagine facilement que cette probabilité ne peut qu'augmenter en fonction de la fragmentation moyenne F des tuiles. En conséquence, le seuil d'écrêtement des valeurs de densité dans le diagramme inclinaison-déviation doit être placé au moins à 4 sinon 5 si l'on veut éliminer le risque d'avoir des agglomérats artificiels dus à la fragmentation d'un même élément. Or, dans les études, ce seuil a toujours été dépassé.

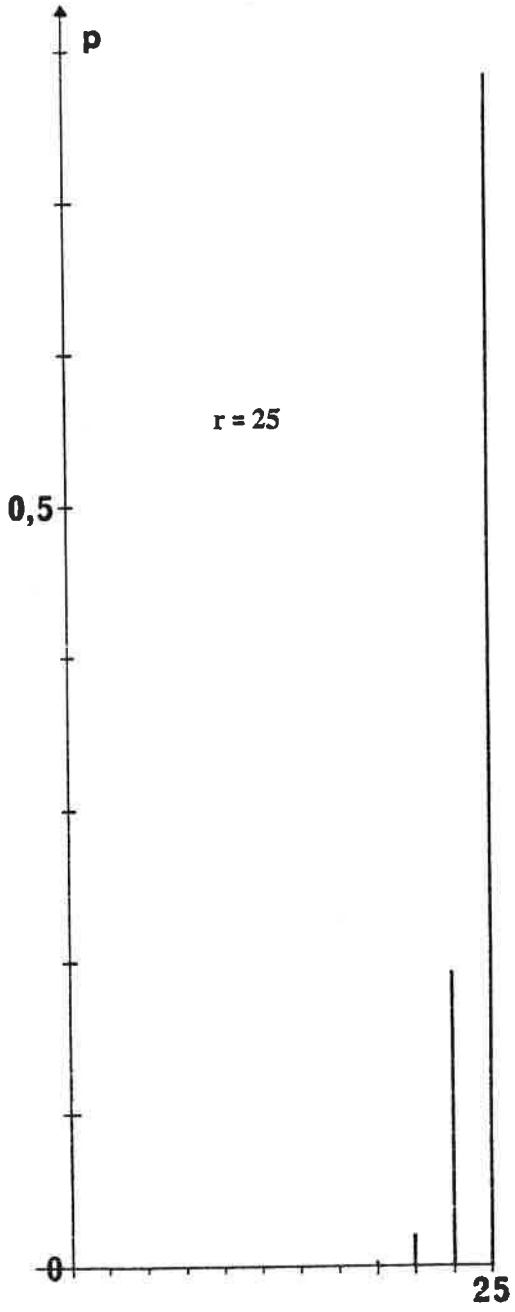
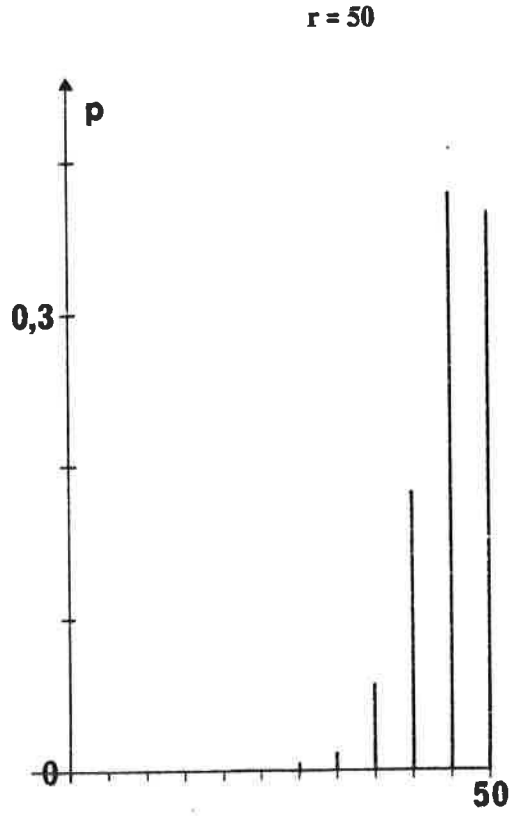
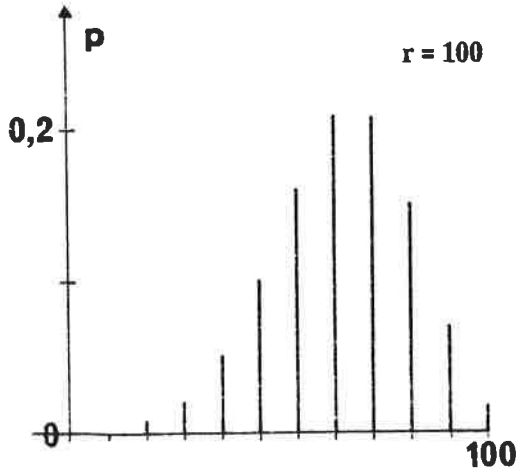



Fig. II-13 : Probabilité P (t = i) d'avoir, parmi r fragments tirés au hasard dans un ensemble de 5000 fragments (1000 tuiles brisées en 5 fragments chacune), i tuiles différentes échantillonnées.



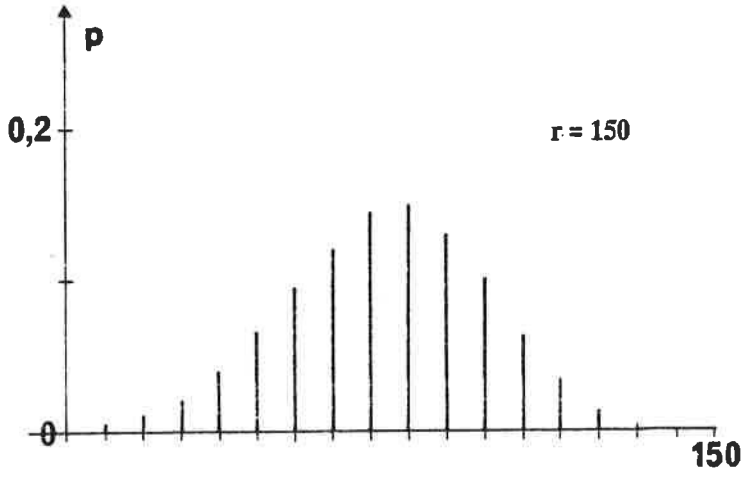
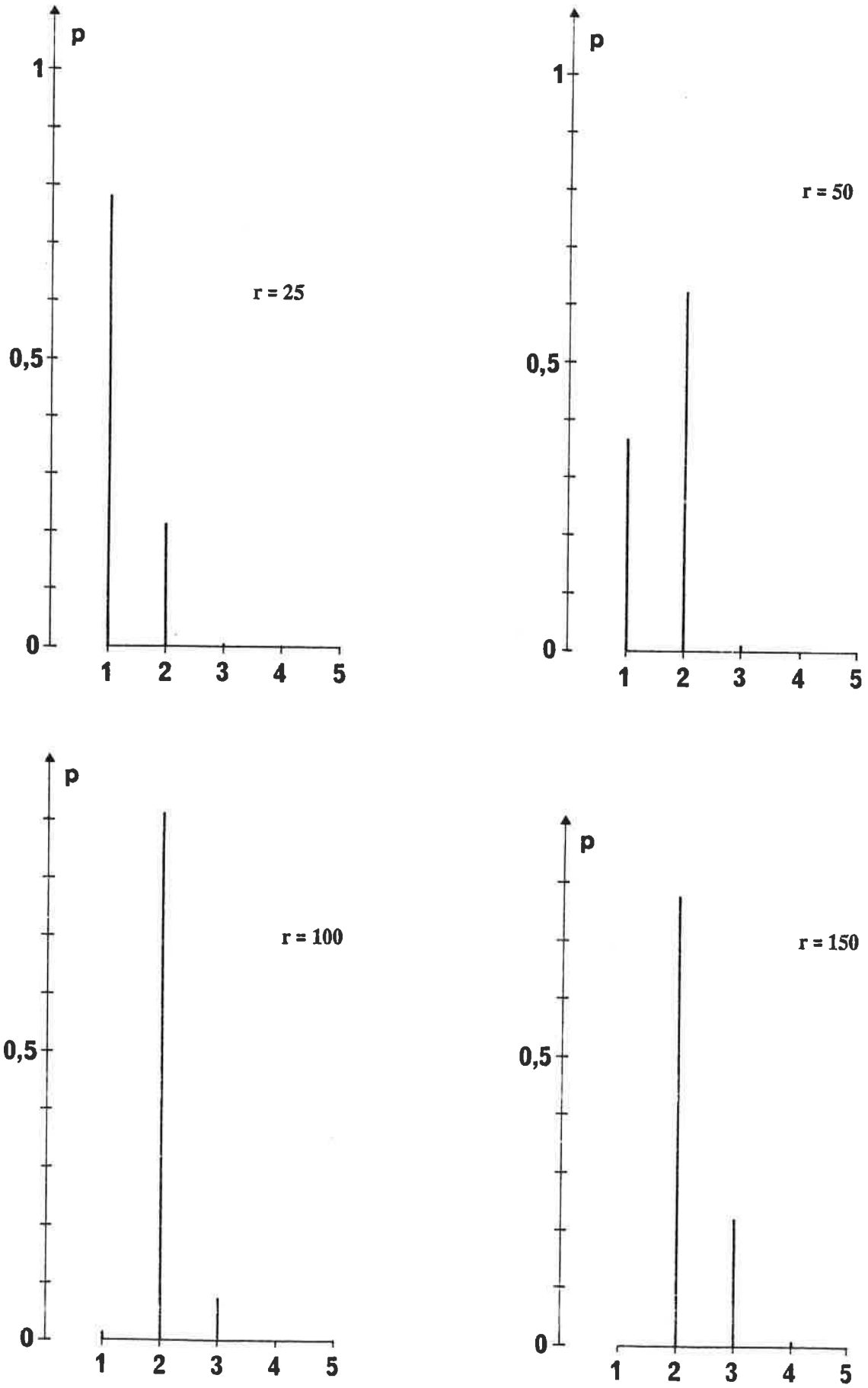



**Fig. II-14 :** Probabilité P (f = j) d'avoir, parmi les r fragments tirés, au maximum j fragments provenant d'une même tuile.



Principales valeurs numériques des lois de probabilité P (t = i) et P (f = j) dont les diagrammes "en bâtons" sont donnés en figures II-13 et 14.

| r = 25 | |
|---|---|
| t | P |
| 5 | $4{,}56\ 10^{-55}$ |
| . | |
| . | |
| 21 | 0,005% |
| 22 | 0,1% |
| 23 | 2,1% |
| 24 | 19,3% |
| 25 | 78,5% |
| f | P |
| 1 | 78,5% |
| 2 | 21,4% |
| 3 | 0,1% |
| 4 | $2{,}46\ 10^{-6}$ |
| 5 | $2{,}04\ 10^{-9}$ |

| r = 50 | |
|---|---|
| t | P |
| 10 | $1{,}15\ 10^{-97}$ |
| . | |
| . | |
| 43 | 0,002% |
| 44 | 0,02% |
| 45 | 0,18% |
| 46 | 1,2% |
| 47 | 5,6% |
| 48 | 18,3% |
| 49 | 37,9% |
| 50 | 36,8% |
| f | P |
| 1 | 36,8% |
| 2 | 62,3% |
| 3 | 0,9% |
| 4 | 0,004% |
| 5 | $8{,}15\ 10^{-8}$ |

| r = 100 | |
|---|---|
| t | P |
| 20 | $1{,}09\ 10^{-170}$ |
| . | |
| . | |
| 87 | 0,004% |
| 88 | 0,02% |
| 89 | 0,08% |
| 90 | 0,27% |
| 91 | 0,84% |
| 92 | 2,25% |
| 93 | 5,16% |
| 94 | 10,0% |
| 95 | 16,0% |
| 96 | 20,7% |
| 97 | 20,8% |
| 98 | 15,1% |
| 99 | 7,1% |
| 100 | 1,6% |
| f | P |
| 1 | 1,6% |
| 2 | 91,1% |
| 3 | 7,2% |
| 4 | 0,07% |
| 5 | $2{,}89\ 10^{-6}$ |

| r = 150 | |
|---|---|
| t | P |
| 30 | $1{,}89\ 10^{-234}$ |
| . | |
| . | |
| 130 | 0,01% |
| 131 | 0,03% |
| 132 | 0,09% |
| 133 | 0,23% |
| 134 | 0,53% |
| 135 | 1,14% |
| 136 | 2.24% |
| 137 | 4,00% |
| 138 | 6,48% |
| 139 | 9,46% |
| 140 | 12,4% |
| 141 | 14,4% |
| 142 | 14,7% |
| 143 | 13,0% |
| 144 | 9,9% |
| 145 | 6,3% |
| 146 | 3,3% |
| 147 | 1,3% |
| 148 | 0,4% |
| 149 | 0,08% |
| 150 | 0,007% |
| f | P |
| 1 | 0,007% |
| 2 | 77,5% |
| 3 | 22,1% |
| 4 | 0,4% |
| 5 | 0,002% |

## E - STATISTIQUE DE FISHER

La méthode des densités ne permet pas de définir une estimation de la précision des directions moyennes obtenues pour chaque agglomérat. C'est pourquoi on utilise la statistique de Fisher (1953). Une distribution de n vecteurs dans l'espace est fishérienne si la densité de probabilité p de trouver un point dans une direction faisant un angle $\alpha$ avec la direction moyenne, est donnée par l'expression :

$$p(\alpha) = c \cdot \exp(k \cos \alpha)$$

k est le facteur de concentration. Il définit la précision. c est le facteur de normalisation. Il est défini de telle sorte que la probabilité de trouver un point sur la sphère est 1. On a :

$$c = k / (4 \pi \ \mathrm{sh}\, k)$$

La probabilité de trouver une direction dans une couronne infiniment petite $d\alpha$, centrée sur la direction moyenne, est :

$$P\, d\alpha = (k / 2 \,\mathrm{sh}\, k) \ \exp(k \cos\alpha) \ \sin\alpha \, d\alpha$$

Fisher a montré que la meilleure estimation de la direction moyenne d'une distribution fishérienne est le vecteur somme des n vecteurs (ATR mesurées). Chaque vecteur est caractérisé par une inclinaison $I_i$ et une déviation $\Delta_i$. En coordonnées cartésiennes, on obtient :

$$x_i = \cos I_i \cos \Delta_i$$
$$y_i = \cos I_i \sin \Delta_i$$
$$z_i = \sin I_i$$

On en déduit l'inclinaison $I_m$ et la déviation $\Delta_m$ de la direction moyenne de la distribution par :

$$I_m = \arcsin (\Sigma z_i / R)$$

$$\Delta_m = \arctan (\Sigma y_i / \Sigma x_i)$$

avec $R^2 = (\Sigma x_i)^2 + (\Sigma y_i)^2 + (\Sigma z_i)^2$

La meilleure estimation de k est fournie par la formule :

$$k = (n-1) / (n-R)$$

Le demi-angle au sommet du cône dans lequel sont situés 95% des vecteurs est égal à $140 / \sqrt{k}$. C'est la déviation standard angulaire, analogue à la déviation standard d'une distribution normale.

Enfin, le demi-angle au sommet du cône, centré sur la direction moyenne estimée, dans lequel la direction moyenne réelle a 95% de chance de se situer est donnée par :

$$\alpha_{95} = 140 / \sqrt{n\,k}$$

valable pour $k > 3$ et $\alpha$ petit

La figure II-15 montre trois exemples de distributions de Fisher pour n = 100 vecteurs.

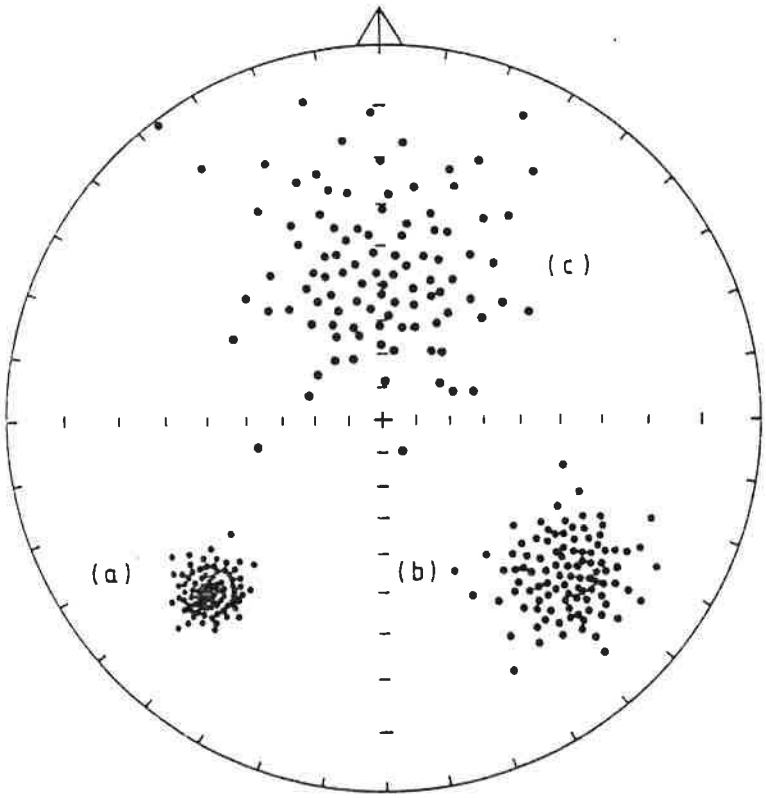



**Fig. II-15** : Exemples de distributions de Fisher pour n = 100 vecteurs.
a) k = 200 b) k = 50 c) k = 10 (Collinson, 1983).

## APPLICATION AUX DIAGRAMMES DE POINTAGE

L'existence au sein des diagrammes de pointage de plusieurs agglomérats distincts interdit d'appliquer la statistique de Fisher à l'ensemble de tous les points pris globalement. La statistique doit donc s'appliquer à chacun des agglomérats pris séparemment. Le problème se pose alors de la sélection des points à prendre en compte pour le calcul de la direction moyenne d'un agglomérat donné. Les diagrammes de pointage de Guignen et Plénée-Jugon (fig. II-9a et b) montrent, malgré des groupements bien concentrés et délimités, une certaine dispersion des directions résultant d'un bruit de fond qu'il convient d'éliminer. En pratique, la méthode utilisée est la suivante : pour un agglomérat donné, les points sélectionnés sont ceux compris dans un cône d'ouverture $\beta$ centré sur la direction moyenne déterminée à partir du diagramme des densités. Le choix de l'ouverture $\beta$ du cône est important. En effet, une ouverture trop grande conduit à intégrer des directions faisant partie du bruit

de fond général. A l'opposé, une ouverture trop petite revient à éliminer une partie des points constitutifs de l'agglomérat étudié. Il ne peut donc s'agir que d'un compromis entre la nécessité d'éviter le bruit de fond dû aux points aléatoirement dispersés et la nécessité de prendre en compte le maximum de points susceptibles d'appartenir statistiquement au groupement. Dans le même ordre d'idée, E. Thellier avait proposé une sélection des valeurs pour le calcul de l'inclinaison moyenne à partir de mesures effectuées sur des tuiles et des briques. Cette sélection était nécessitée par l'existence de valeurs trop faibles ou trop fortes dues à différentes causes d'erreurs qui, ajoutées les unes aux autres, sont la source d'un bruit de fond aléatoire. En conséquence, cet auteur propose d'éliminer les objets donnant une inclinaison dépassant de $\beta$ , en plus ou en moins, la valeur moyenne I de la série ou bien, la valeur médiane facile à obtenir des valeurs individuelles observées. Pour la plupart des séries étudiées, E. Thellier prend $\beta = \pm 5^\circ$ ou, lorsque la dispersion est trop forte, $\beta = \pm 10^\circ$ (Thellier, 1981).

Il semble qu'un test puisse être défini quant à la détermination de l'ouverture maximale $\beta$ du cône. Ce test consiste à prendre l'ouverture la plus grande telle que la direction moyenne au sens de Fisher soit encore identique, au degré près, à celle définie par la méthode des densités. Ce raisonnement a été appliqué aux deux sites de Guignen et de Plénée-Jugon et a permis de montrer que les résultats commencent à diverger lorsque l'ouverture devient de l'ordre de 24° et plus. Le tableau suivant donne le détail des résultats :

Guignen :

| $\beta$ | | 6° | 8° | 10° | 14° | 20° | 24° | 30° | 34° |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n | | 33 | 38 | 50 | 65 | 81 | 87 | 93 | 94 |
| $\bar{I}$ | 55° | 55°3 | 55°3 | 55°7 | 55°2 | 55°7 | 56° | 56°7 | 56°8 |
| $\bar{\Delta}$ | 4° | 3°6 | 3°3 | 3°6 | 3°7 | 3°4 | 4° | 4°6 | 4°7 |
| $\alpha_{95}$ | | 0°6 | 0°6 | 0°7 | 0°9 | 1° | 1° | 1°1 | 1°2 |
| k | | 1536 | 1252 | 741 | 399 | 257 | 206 | 163 | 157 |

Plénée-Jugon :

| $\beta$ | | 6° | 8° | 10° | 14° | 20° | 24° | 30° | 34° |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| n | | 18 | 23 | 30 | 42 | 57 | 62 | 67 | 70 |
| $\bar{I}$ | 67° | 67° | 66°8 | 66°6 | 67°2 | 66°2 | 66°5 | 66°4 | 65°8 |
| $\bar{\Delta}$ | 28° | 28°1 | 27°8 | 27°4 | 29°3 | 28° | 28°4 | 26°3 | 25°8 |
| $\alpha_{95}$ | | 0°9 | 1° | 1° | 1°1 | 1°2 | 1°3 | 1°4 | 1°5 |
| k | | 1280 | 933 | 639 | 389 | 222 | 179 | 140 | 121 |

Une ouverture de cône de 20° apparait comme un compromis raisonnable dans la prise en compte des directions d'un agglomérat particulier. Cependant, il faut garder à l'esprit qu'une restriction volontaire des directions testées à une portion de la sphère influe fatalement sur le facteur de précision k et induit une direction moyenne forcément située dans le cône prédéfini. Il est donc nécessaire de conserver en permanence un regard critique et de ne pas hésiter à revenir aux données brutes des diagrammes de pointage pour vérifier tout le sens et la valadité des résultats obtenus.

A titre d'exemple, la statistique de Fisher, basée sur un cône de 20° d'ouverture, a été appliquée aux agglomérats A et B des deux lots de Guignen et Plénée-Jugon. Les résultats en sont les suivants :

Guignen :

| | | |
|---|---|---|
| A | n = 81<br>$\bar{I} = 55°5 \pm 1°$<br>k = 260 | $\bar{\Delta} = 3°5 \pm 1°5$ |
| B | n = 62<br>$\bar{I} = 55°5 \pm 1°$<br>k = 226 | $\bar{\Delta} = -87°5 \pm 2°$ |

Plénée-Jugon :

| | | |
|---|---|---|
| A | n = 57<br>$\bar{I} = 66° \pm 1°$<br>k = 222 | $\bar{\Delta} = 28° \pm 3°$ |
| B | n = 53<br>$\bar{I} = 70° \pm 1°5$<br>k = 206 | $\bar{\Delta} = -57° \pm 4°$ |

Ces deux exemples montrent que l'inclinaison moyenne des agglomérats est définie pratiquement au degré près. Cette excellente précision est due en particulier au grand nombre des vecteurs aimantation entrant dans la statistique.

Dans le cas de matériaux gallo-romains cuits à une date t dans un four rectangulaire orienté à $\Delta$ et $\Delta'$ par rapport au N.M., on obtient le plus souvent un diagramme de pointage où figurent deux groupements de points très concentrés, l'un situé autour de $\Delta$ et l'autre autour de $\Delta'$. L'inclinaison moyenne I est en principe la même pour les deux agglomérats. Le nombre d'éléments intervenant dans chaque agglomérat dépend du nombre total d'échantillons étudiés. Soit un lot de 100 échantillons parmi lesquels 90% ont été cuits dans une même position (par exemple debout pour les tuiles). Seuls sont utilisés les points de la position majoritaire, laquelle correspond de fait au mode normal de rangement, c'est-à-dire le moins susceptible d'être le fruit du hasard. Dans le diagramme de pointage sont représentées 90 directions selon deux agglomérats en principe très concentrés de 45 points chacun si l'on considère que la chance est égale d'avoir des rangées de tuiles parallèlement aux deux parois du four. En réalité, il existe toujours une certaine dispersion qui interdit d'attribuer indubitablement chaque point à l'un des deux agglomérats. En d'autres termes, le cône d'ouverture $\beta$ tel qu'il est défini plus haut ne permet pas de retenir tous les 45 points sans altérer la signification de la direction moyenne calculée.

Dans tous les exemples précédents, les agglomérats sont bien individualisés et aussi concentrés en déviation qu'en inclinaison. Dans ces conditions, la statistique de Fisher est relativement facile à appliquer. Par contre, il existe un certain nombre de cas de figure où cette statistique n'est plus applicable. Cela se produit par exemple lorsque les groupements de points sont très proches les uns des autres. Il n'est alors plus possible d'attribuer un point donné à l'un ou à l'autre des groupements. De même, on ne peut appliquer cette statistique lorsque les déviations s'échelonnent régulièrement entre -90° et +90°, c'est-à-dire lorsque les agglomérats ont une forme allongée en couronne. Ainsi, l'applicabilité de la statistique de Fisher dépend fortement du mode de rangement des matériaux dans les fours lors de la cuisson et de l'existence dans les diagrammes de pointage d'agglomérats bien distincts et concentrés.

## F - TRAITEMENT INFORMATIQUE DES DONNEES

Le Laboratoire d'Archéométrie étudie chaque année plusieurs dizaines de lots de matériaux déplacés, chaque lot comportant en moyenne une centaine d'échantillons. Aussi, seule une informatisation complète des traitements décrits ci-dessus permet d'étudier, de façon standardisée et dans un temps relativement court, la masse des mesures effectuées sur ces matériaux. L'introduction des nouveaux calculs des directions d'aimantation, des diagrammes de Schmidt, de pointage et de densité ainsi que l'introduction de la statistique de Fisher a nécessité la création d'un nouveau logiciel de traitement des données. Ce logiciel, appelé ARCHEOMA, a été réalisé en Basic Microsoft sur un Apple II muni d'une imprimante I.D.S. et d'une table traçante Watanabe. Sa conception repose d'une part sur l'exploitation des mesures brutes et d'autre part sur l'exploitation des directions d'aimantation après détermination de la bonne position de cuisson.

Les mesures brutes de chaque lot sont stockées dans un fichier "données", de type accès direct, dont l'organisation est présentée en figure II-16a. Ce fichier contient les informations nécessaires à son identification et à sa gestion ainsi que l'ensemble des mesures d'aimantation de tous les échantillons du lot. Ces mesures sont exprimées dans le repère de carottage (Oxyz) selon les coordonnées sphériques inclinaison, déviation et moment magnétique.

Les formules du paragraphe A de ce chapitre permettent de déterminer la bonne position de cuisson et la direction d'aimantation associée, pour chacun des échantillons du fichier "données". Les résultats des calculs sont stockés dans un fichier "résultats", également de type accès direct, dont l'organisation est présentée en figure II-16b. Les deux premiers enregistrements de ce fichier contiennent les valeurs des paramètres des éventuelles corrections apportées aux mesures brutes : correction d'effet de forme, d'anisotropie d'ATR et d'effet des positions de cuisson (*cf.* deuxième partie)

Le logiciel ARCHEOMA intègre l'ensemble des modules nécessaires à la gestion des fichiers et à la réalisation des divers traitements statistiques (fig. II-17).

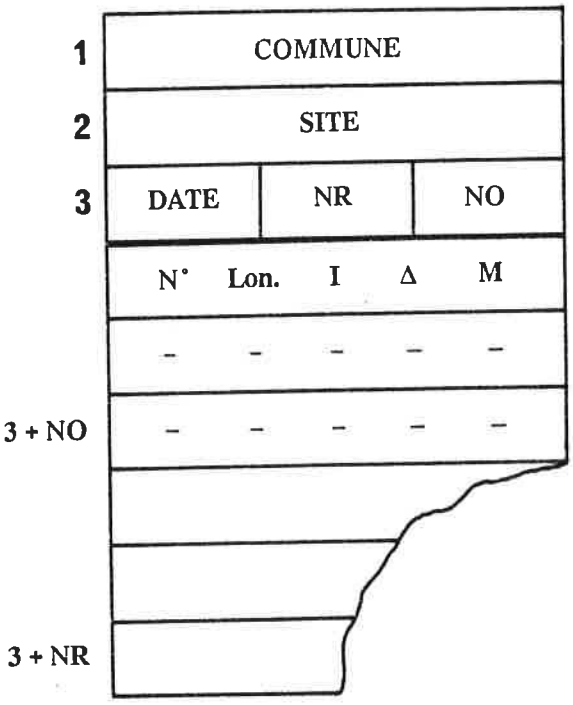
Les modules ENREGIST et CALCULID permettent respectivement de créer et de gérer les fichiers "données" et "résultats".

Les modules SCHMIDT et FISH-DON utilisent les fichiers "données". Le premier trace les diagrammes de Schmidt (dans le repère de carottage Oxyz) (fig. II-6 et 7), tandis que le second permet d'appliquer la statistique de Fisher à un groupe de directions choisies dans ces diagrammes.

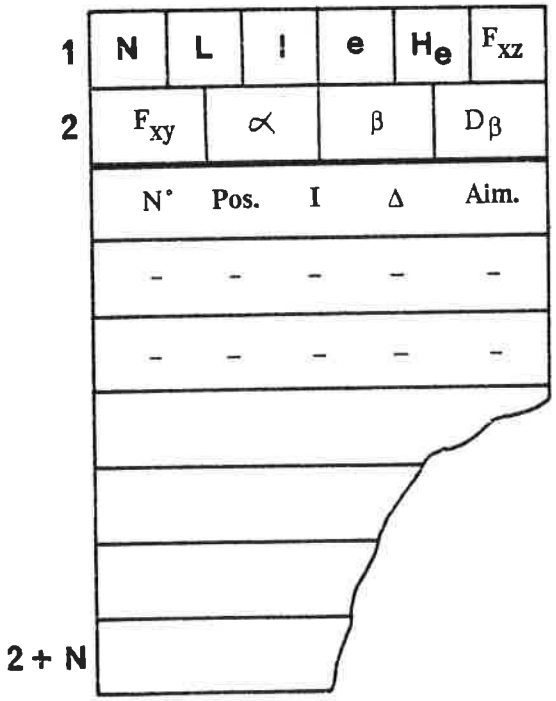
Les modules HISTOGRA, POINTAGE, DENSITE et FISH-RES utilisent les fichiers "résultats". Comme leur nom l'indique, les trois premiers modules tracent respectivement les histogrammes des inclinaisons et des aimantations, les diagrammes de pointage (fig. II-9) et les diagrammes de densité (fig. II-12). Le quatrième module permet d'appliquer la statistique de Fisher à un groupe de directions choisies dans les diagrammes de pointage.

Ces différents traitements fournissent tous les renseignements statistiques nécessaires à l'étude archéomagnétique des lots de matériaux déplacés. Ils procurent en outre l'avantage d'uniformiser la présentation des résultats, ce qui facilite largement les comparaisons entre lots différents. Enfin, un des intérêts majeurs de ces traitements est d'offrir, à tout instant, la possibilité d'effectuer une correction des principaux effets perturbateurs qui sont : l'effet de forme, l'anisotropie d'ATR et les effets des positions de cuisson (pente et pendage).

FICHIER "DONNEES"




FICHIER "RESULTATS"




a) FICHIER "DONNEES"

*Identification du lot et dimensions du fichier :*

Commune, site, date de traitement,
nombre de places réservées (NR),
nombre de places occupées (NO).

N° : Identificateur de l'échantillon.
(N° d'ordre et type de l'objet).
Lon. : Longueur de la carotte (17, 20 ou 25 mm).
I : Inclinaison (entre -90° et +90°).
Δ : Déviation (entre -180° et +180°).
M : Moment magnétique ($Am^2$).

b) FICHIER "RESULTATS"

N : Nombre d'enregistrements dans le fichier.

*Paramètres de correction de l'effet de forme :*

L : Longueur moyenne des objets.
l : Largeur moyenne des objets.
e : Epaisseur moyenne des objets.
$H_e$ : Intensité du CMT à l'époque de la cuisson.

*Paramètres de correction de l'anisotropie d'ATR :*

$F_{xz}$ : Facteur d'anisotropie dans le plan (xz).
$F_{xy}$ : Facteur d'anisotropie dans le plan (xy).

*Paramètres de correction des effets de pendage ou de pente :*

$\alpha$ : Angle de pendage.
$\beta$ : Angle de pente.
$D_\beta$ : Direction de pente.

---

N° : Identificateur.
Pos. : Position de cuisson retenue
(à plat, de chant ou debout).
I : Inclinaison pour la bonne position de cuisson.
Δ : Déviation pour la bonne position de cuisson.
Aim. : Aimantation volumique (A/m).

**Fig. II-16a et b** : Traitement informatique des mesures archéomagnétiques. Organisation des fichiers "données" et "résultats".

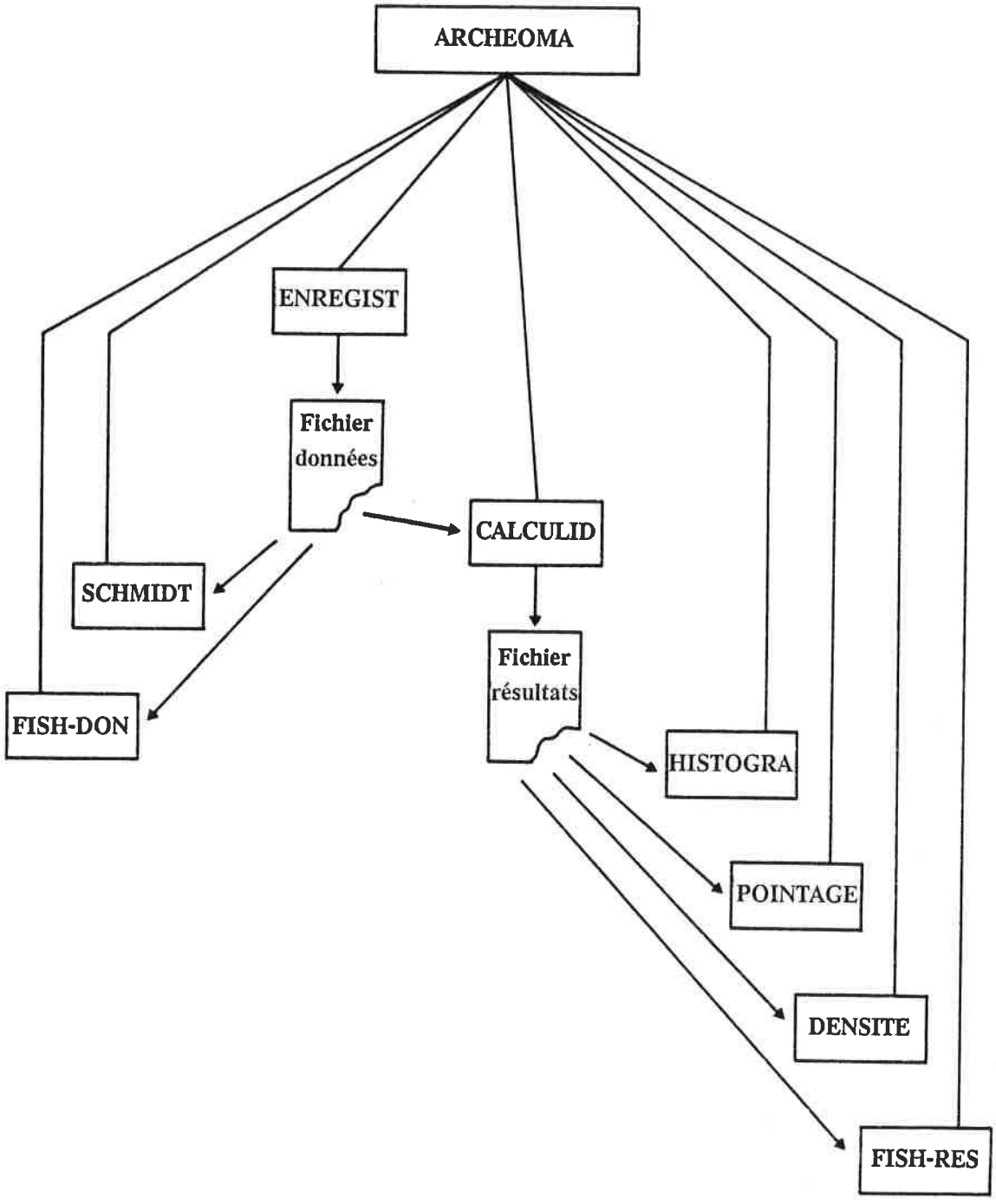



**Fig. II-17** : Organisation du logiciel ARCHEOMA.

## CONCLUSION : les causes d'erreurs

Les nouveaux traitements statistiques des données constituent un progrès important en ce qu'ils résolvent d'une part le problème du repliement des valeurs de la déviation dans l'intervalle (0°, 90°), et d'autre part le problème des densités déterminées à partir de la représentation cartésienne des couples inclinaison-déviation. De plus, la représentation des directions d'aimantation dans les nouveaux diagrammes facilite considérablement la compréhension des modes de rangement des matériaux lors de la cuisson.

L'examen des diagrammes en figure II-9 montre une dispersion non négligeable des directions d'aimantation. Selon la statistique de Fisher, la précision des directions moyennes obtenues est d'autant plus grande que le nombre n des vecteurs intervenant dans la statistique est grand. Ce qui justifie l'utilisation de grands échantillonnages.

La dispersion observée sur les directions d'aimantation résulte de la somme d'erreurs qui interviennent de façon aléatoire. Les causes de ces erreurs sont à rechercher principalement dans :

- le positionnement plus ou moins régulier des objets lors du chargement selon les positions théoriques,
- le caractère plus ou moins horizontal du plan de cuisson,
- le fait que les matériaux ne sont pas des parallèlépipèdes rectangles parfaits,
- la détérioration des plans de référence des fragments,
- l'hétérogénéité magnétique des pâtes,
- l'existence d'aimantations rémanentes visqueuses faibles.

La dispersion observée sur l'inclinaison relève directement de ces causes d'erreurs. Par contre, la dispersion observée sur la déviation intègre à la fois les erreurs sus-mentionnées et la diversité des orientations relatives des matériaux par rapport au N.M. de l'époque. Un exemple simple suffit à montrer cette différence. Soit une série de tuiles cuites debout selon un rangement en éventail dans un four circulaire. En l'absence de toute cause d'erreurs, les inclinaisons sont identiques avec une dispersion nulle. En revanche, la dispersion sur les déviations reste très importante du fait que ces dernières traduisent les différentes orientations des plans d'aplatissement des tuiles par rapport au N.M. Cette dispersion des déviations ne peut être nulle que si les tuiles sont rangées exactement selon une même orientation par rapport à ce N.M. C'est statistiquement le cas, par exemple, des tuiles gallo-romaines rangées parallèlement aux parois des fours rectangulaires. En conclusion, il est souvent difficile de distinguer, au sein de la dispersion observée sur la déviation, la part qui revient au bruit de fond résultant des causes d'erreurs énumérées ci-dessus et de la part correspondant aux différentes orientations des matériaux par rapport au N.M. Cette difficulté explique la raison pour laquelle la statistique de Fisher ne peut être appliquée à des directions dont la dispersion sur la déviation relève principalement de la diversité des orientations des matériaux.

A ce stade de la réflexion, on pourrait conclure que la déviation n'a d'autre intérêt que de fournir des renseignements d'ordre technologique sur les modes de rangements (positions, orientations) des matériaux déplacés lors de la cuisson. En fait, bien qu'elle ne soit pas directement utilisable à des fins de datation, la déviation possède une réelle importance en matière de datation puisqu'elle permet de contrôler l'existence éventuelle de phénomènes perturbateurs qui peuvent fausser notablement les valeurs moyennes de l'inclinaison. Les diagrammes de densité montrent assez souvent l'existence d'un écart entre les inclinaisons moyennes des agglo-

mérats complémentaires Δ et Δ'. Cet écart, qui est fonction de l'orientation des matériaux par rapport au N.M. , pose un problème quant au choix de la valeur à prendre en compte pour la datation. Son existence résulte de perturbations qui provoquent une erreur systématique sur les directions d'aimantation. Ces perturbations sont principalement dues :

- aux effets des aimantations secondaires (ATR partielles acquises lors de réchauffements),
- à l'effet de forme,
- à l'effet de l'anisotropie d'aimantation thermorémanente,
- à l'effet du pendage des matériaux et à l'effet de la pente du plan de cuisson de référence.

Ces quatre causes d'erreurs font respectivement l'objet des quatre chapitres de la deuxième partie. On montrera en particulier l'extrême importance de la déviation dans la caractérisation et la correction de ces effets perturbateurs.

# Deuxième partie

# ETUDE ET CORRECTION DES EFFETS PERTURBATEURS

# III - LES AIMANTATIONS SECONDAIRES

## INTRODUCTION

Les aimantations secondaires rencontrées dans les matériaux déplacés d'argile cuite sont de deux types. On distingue :

- les aimantations thermorémanentes partielles (ATRP), acquises à la suite de réchauffements. Elles ont généralement un rapport plus ou moins direct avec des faits humains (chauffages, incendies ...).

- les aimantations rémanentes visqueuses (ARV), rémanentes isothermes (ARI) et rémanentes chimiques (ARC) qui sont des aimantations parasites d'origine qu'on pourrait qualifier de naturelle, c'est-à-dire indépendante de l'homme. Les ARV sont acquises à la température ordinaire, lors du séjour des argiles cuites dans le CMT ambiant.Les ARV observées sur les lots étudiés sont toujours faibles, de l'ordre de 1 à 5% de l'aimantation totale, et sont facilement éliminées par des traitements thermiques en champ nul à 100° ou 150°C. Les ARI sont provoquées par les champs intenses instantanés créés par la foudre. Dans ce cas, les aimantations rémanentes naturelles (ARN) des argiles cuites peuvent être sérieusement perturbées. Fort heureusement, ce phénomène n'intervient que très rarement sur les matériaux étudiés. Les ARC, quant à elles, résultent généralement d'altérations minéralogiques. Ce peut être le cas par exemple de matériaux ayant séjourné très longtemps dans l'eau de mer.

## A - LES AIMANTATIONS THERMOREMANENTES PARTIELLES

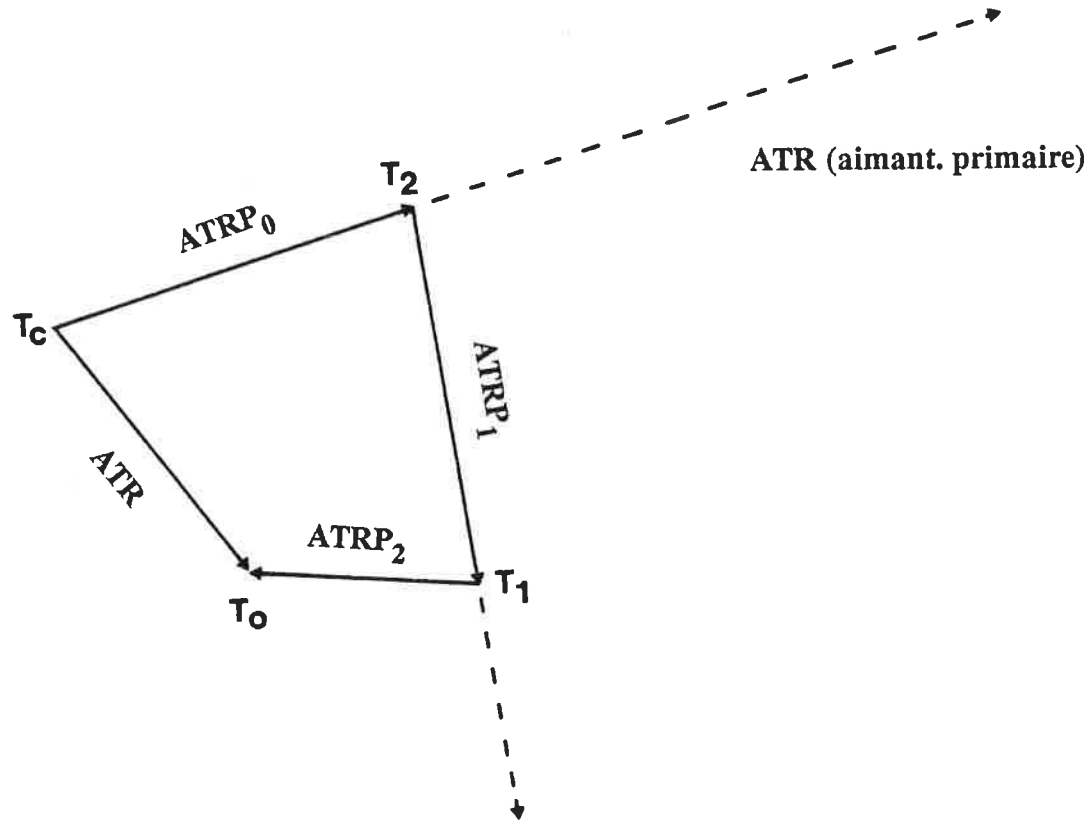
Selon la loi d'additivité des aimantations thermorémanentes (Thellier, 1938), dont la théorie repose, dans l'hypothèse de grains fins ferromagnétiques, sur la notion de température de blocage (Néel, 1949), il peut exister au sein d'une même argile cuite plusieurs aimantations thermorémanentes, dites partielles (ATRP), acquises dans des intervalles de température ($T_i$ , $T_{i-1}$) différents compris entre la température de Curie $T_c$ et la température ordinaire $T_o$. L'ATR totale mesurée s'exprime alors comme la somme vectorielle des différentes ATRP (fig. III-1) :

$$ATR_{totale} = ATRP(T_c, h_{ci}, T_i) + ... + ATRP(T_2, h_{21}, T_1) + ATRP(T_1, h_{1o}, T_o)$$

$h_{i,\ i-1}$ est le champ extérieur appliqué lors du refroidissement entre les températures $T_i$ et $T_{i-1}$ (on suppose que la position des matériaux reste fixe durant tout le temps du refroidisseemnt dans chaque intervalle de température). La désaimantation thermique, par chauffes successives à des températures croissantes suivies de refroidissements en champ nul, permet de retrouver la direction de chacune des ATRP. D'autres méthodes de désaimantation sont utilisées, en particulier celle par champ alternatif. Cependant, il est préférable de désaimanter selon le processus physique ayant présidé à l'acquisition de la rémanence. C'est pourquoi le procédé thermique apparaît le mieux adapté à l'étude des argiles cuites.

Par définition, on appelle aimantation primaire l'ATR acquise après chauffe complète de l'argile au-delà de la température de Curie. Cette aimantation correspond le plus souvent à la cuisson des matériaux lors de

Fig. III-1 : Aimantations thermorémanentes partielles (ATRP).




la fabrication. Les aimantations secondaires désignent les ATRP acquises lors des différents réchauffements postérieurs successifs des matériaux. Ces aimantations témoignent d'incendies, de feux de défrichage ou encore d'exposition à la chaleur dans des structures telles que les thermes, les parois de fours ou les foyers domestiques. Les positions des matériaux lors de ces réchauffements, la cohérence ou non des directions d'aimantation correspondantes de même que les observations archéologiques concernant le lot étudié, permettent généralement de reconstituer et éventuellement de dater les circonstances de ces réaimantations partielles.

Une étude basée sur la désaimantation thermique a été effectuée récemment par M.E. Evans et M. Mareschal (1986) sur des fragments de tuiles prélevées sur le sol d'un foyer domestique d'Italie du sud, daté du VI$^{e}$ siècle Ap. J.-C. Ces auteurs ont pu montrer l'existence de trois ATRP attribuées respectivement à la cuisson en position debout dans un four lors de la fabrication (ATRP entre 500°C et Tc), à ce qui doit probablement être un incendie (directions d'ATRP quelconques entre 300° et 500°C) et à la réutilisation dans un foyer domestique (entre 20° et 300°C). Cet exemple montre les multiples phases d'acquisition de l'aimantation qui peuvent intervenir sur les matériaux déplacés.

Les ATRP sont considérées comme parasites dans la mesure où elles sont archéomagnétiquement inexploitables. C'est le cas la plupart du temps lorque l'on a affaire à des destructions de toitures par incendie, ou à des brûlis de surface lors de défrichages. Par contre, ces ATRP deviennent fort intéressantes lorsqu'elles sont acquises dans des positions cohérentes. On peut ainsi dater différents événements successifs ayant affecté l'histoire magnétique d'une même série d'objets déplacés.

## B - EXPLOITATION DES MESURES DE DESAIMANTATION

La désaimantation thermique effectuée sur des lots de 100 à 200 échantillons représente un travail considérable, surtout lorsqu'il s'agit de traiter une grande quantité de lots différents. Actuellement, le Laboratoire d'Archéométrie dispose d'un four à désaimanter fabriqué en 1985 par M. Le Goff du Laboratoire de géomagnétisme de Saint-Maur-des-Fossés. Ce four permet de traiter 10 échantillons à la fois. Ce faible nombre explique le temps considérable qu'il faut pour étudier un lot de 100 éléments. Face à ce problème, nous avons adopté la procédure de travail suivante : une vingtaine d'échantillons sont complètement désaimantés selon des intervalles de température variant entre 50 et 100°. La séquence la plus couramment utilisée est 150, 250, 350, 425, 500, 550 et 600°C. Si les ATRP mises en évidence indiquent des positions et des directions cohérentes, il convient alors de désaimanter progressivement tout le lot afin de pouvoir étudier statistiquement les composantes primaires et secondaires sur un grand nombre d'éléments (c'est le cas pour l'exemple de La Mariais en Saint-Malo-de-Phily, présenté ci-dessous). Par contre, si les aimantations secondaires sont inexploitables parce qu'incohérentes, il est procédé à une désaimantation globale de tout le lot en une seule étape à une température seuil choisie de telle sorte que 80% à 100% des échantillons soient débarrassés de leurs ATRP secondaires parasites. Cette procédure permet ainsi de retrouver directement la direction de l'aimantation primaire tout en réalisant une précieuse économie de temps (*cf.* article en annexe).

### EXPLOITATION INFORMATIQUE

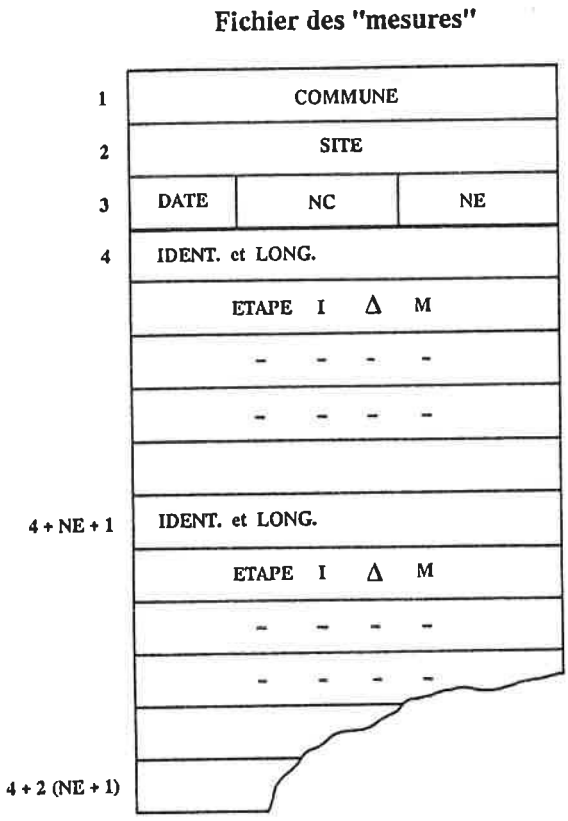
Le traitement des données de désaimantation a été informatisé sur l'ensemble Apple II + imprimante + traçante du Laboratoire. Un logiciel de saisie (FICHDES) assure le stockage des mesures dans des fichiers à accès direct dont l'organisation est donnée en figure III-2a. Corrélativement, un logiciel de traitement de ces données a été mis au point (TRAITDES) (fig. III-2b). Il comprend quatre modules exploitant les données du fichier de mesures.

- Le module CALCUL fournit les valeurs numériques des composantes inclinaison, déviation et intensité aussi bien pour l'aimantation mesurée à chaque étape que pour la différence vectorielle entre les aimantations de deux étapes successives (vecteurs delta) (fig. III-3a).

- Le module SCHMIDT permet de représenter, dans la projection Lambert associée au repère de carottage (Oxyz), les directions soit des aimantations mesurées, soit des différences vectorielles (vecteurs delta). La représentation de ces dernières différences visualise immédiatement l'existence ou non d'ATRP stables dans les matériaux (fig. III-3b, c et d).

- Le module ZIJDERVELD synthétise et visualise dans le plan les variations d'intensité et de direction de l'aimantation dans un échantillon (Zijderveld, 1967). Cette représentation reprend un principe de la géométrie descriptive qui figure la direction d'une droite dans l'espace par deux segments de droite résultant respectivement d'une projection orthogonale sur le plan horizontal (Oxy) et d'une projection sur un des plans (Oxz) ou (Oyz) perpendiculaires. Le choix de l'un de ces deux derniers plans est fait soit automatiquement, soit manuellement. Il doit visualiser au mieux les différentes directions d'aimantation et éviter les fausses linéarités. Dans de tels diagrammes, les différentes ATRP apparaissent sous la forme de segments de droites. Ces segments permettent de déterminer, par un ajustement à l'oeil, la direction moyenne de chacune des ATRP présentes (Perroud, 1986). Les argiles cuites offrent des diagrammes de Schmidt et de Zijderveld très faciles à interpréter. Lorsque l'aimantation est univectorielle, on observe un parfait alignement des points sur l'origine, quelquefois

**Fig. III-2** : Informatisation des traitements.




*Identification du lot et dimensions du fichier :*

- Commune, site, date de traitement,
- nombre maximum d'échantillons (NC),
- nombre maximum d'étapes (NE).

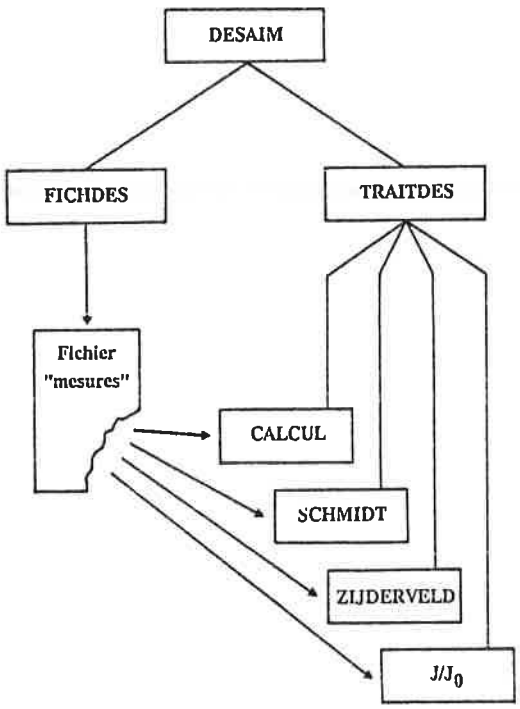
*Les échantillons :*

IDENT. : Identificateur de l'échantillon.
LONG. : Longueur des carottes

*Les mesures :*

ETAPE : Température de désaimantation.
I : Inclinaison (entre -90° et +90°).
Δ : Déviation (entre -180° et +180°).
M : Moment magnétique ($Am^2$)

a) Structure du fichier des données de désaimantation.




b) Organigramme des modules de traitement.

aux basses températures par une légère visqueuse (fig. III-3a). Dans le cas d'aimantations multi-vectorielles, les différentes composantes apparaissent très clairement avec des linéarités exemplaires et des coudes simultanés (fig. III-3b, c et d). Il arrive cependant des cas où les directions varient continuellement d'une étape de désaimantation à l'autre (fig. III-3e). On en conclut généralement qu'il s'agit de matériaux ayant bougé au cours du refroidissement. Cela est observé par exemple sur les tuiles provenant de toitures effondrées pendant un incendie.

- Le module J/Jo trace les courbes de variation relative de l'intensité d'aimantation en fonction des températures de désaimantation. Une procédure particulière offre la possibilité de superposer les courbes J/Jo de plusieurs échantillons sélectionnés.

Tous ces modules permettent d'éliminer une ou plusieurs étapes au choix lors des traitements. Cela est utile lorsque l'on veut agrandir certains détails des diagrammes, en particulier dans le cas des diagrammes de Zijderveld.

Lorsque les données sont exploitables, les directions moyennes (inclinaison, déviation) des différentes composantes sont traitées selon les procédures de traitement statistique décrites en première partie de ce mémoire. Dans le cas de deux composantes exploitables sont constitués un fichier "aimantation primaire" et un fichier "aimantation secondaire", chacun traité séparemment.

## EXEMPLE DE TRAITEMENT

L'ensemble des procédures de désaimantation thermique et de traitement des données décrites ci-dessus sont appliquées de façon courante à tous les sites présentant des aimantations multi-vectorielles. A titre d'exemple, on traitera ici le cas d'un lot de 124 tuiles provenant d'un site gallo-romain retrouvé par prospection au lieu-dit La Mariais en Saint-Malo-de-Phily (Ille-et-Vilaine). Les statistiques des données brutes indiquent que 65% des éléments ont été cuits en position debout, 9% en position de chant et 27% en position à plat. Ces pourcentages diffèrent notablement de ce que l'on rencontre sur les lots non perturbés de tuiles romaines où la proportion entre à plat et debout est habituellement de l'ordre de 10% - 90% (Langouet et Goulpeau, 1980 et 1982). Parallèlement, on observe une grande dispersion des résultats aussi bien pour l'histogramme des inclinaisons (fig. III-4a) que pour le diagramme de pointage (fig. III-6a).

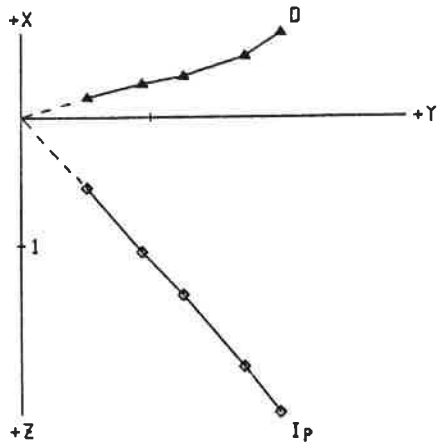
A la suite de ces observations, une désaimantation thermique a été entreprise sur un premier lot de 38 tuiles selon les étapes 150, 250, 350, 425, 500 et 550°C. L'existence au sein de ces matériaux de deux aimantations primaire et secondaire cohérentes a conduit à la désaimantation complète de tous les échantillons du lot. Les différents résultats obtenus se rattachent pratiquement tous aux exemples types donnés en figure III-3.

- En figure III-3a, on voit une seule direction d'aimantation avec une légère visqueuse.

- En figure III-3b, c et d apparaissent deux composantes avec coudes très nets intervenant simultanément sur les segments de droite des diagrammes de Zijderveld. Les diagrammes de Schmidt des vecteurs delta visualisent parfaitement les directions des deux ATRP (groupements entourés en pointillé). Les courbes de désaimantation J/Jo présentent des cassures irrégulières. On peut remarquer le comportement particulier de l'échantillon 84T pour lequel l'intensité d'aimantation croît de 30% avant de décroître.

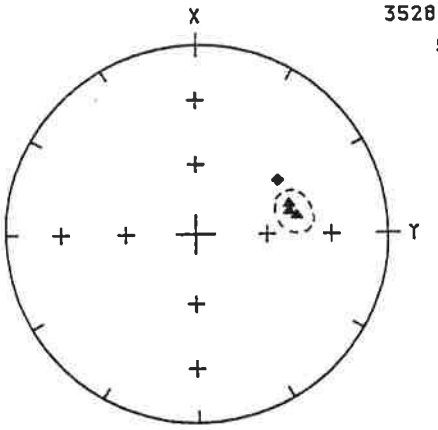
- En figure III-3e, il existe plus de deux ATRP. Ces aimantations sont acquises très probablement dans des positions variables au cours du refroidissement.

Fig. III-3a

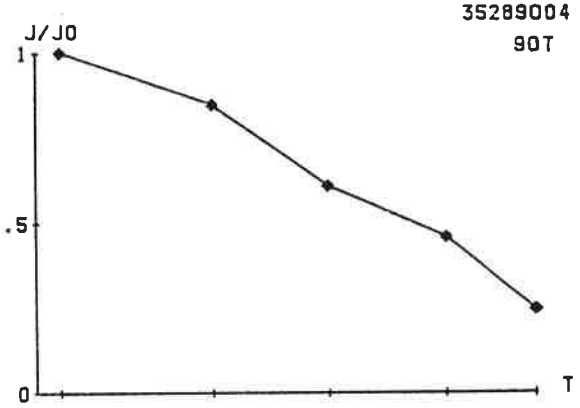



35289004
90T

| Etape | Mesures brutes Inc | Dev | M | vecteurs delta Inc | Dev | M |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 20°C | 47°5 | 71°8 | 3.127 | | | |
| 150°C | 47°3 | 74°6 | 2,652 | 47°4 | 56°3 | 0,484 |
| 250°C | 47°0 | 75°7 | 1,900 | 48°0 | 71°8 | 0,753 |
| 350°C | 47°3 | 74°4 | 1,433 | 46°0 | 79°6 | 0,467 |
| 425°C | 46°0 | 72°9 | 0,768 | 48°8 | 76°2 | 0,666 |

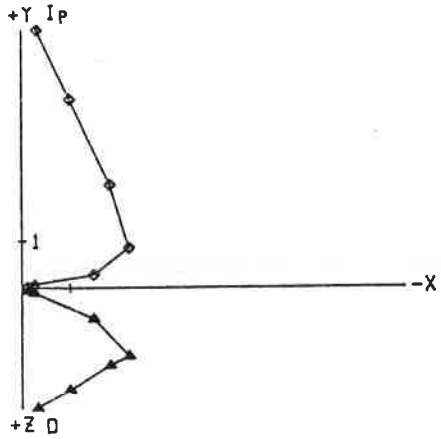



35289004
90T



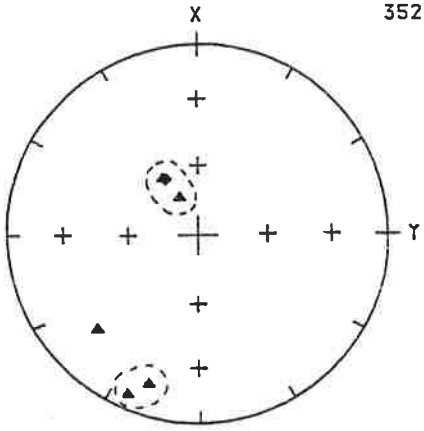

35289004
90T

Fig. III-3b

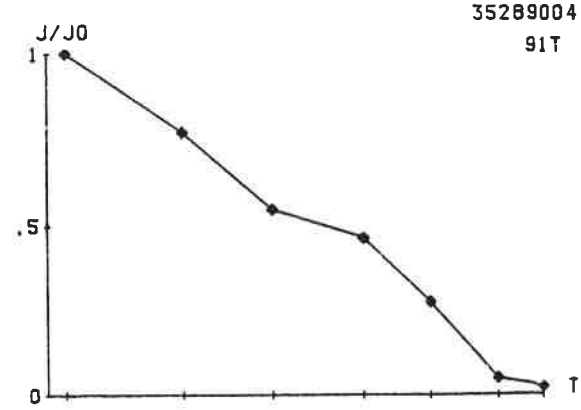



35289004
91T

| Etape | Mesures brutes Inc | Dev | M | vecteurs delta Inc | Dev | M |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 20°C | -64°9 | 262°8 | 6,031 | | | |
| 150°C | -59°3 | 245°3 | 4,650 | -62°2 | -29°6 | 1,654 |
| 250°C | -41°8 | 221°7 | 3,295 | -61°2 | -31°8 | 2,056 |
| 350°C | -17°9 | 213°0 | 2,790 | -72°0 | -25°6 | 1,408 |
| 425°C | -9°7 | 203°8 | 1,650 | -28°2 | 226°9 | 1,227 |
| 500°C | -15°4 | 201°7 | 0,289 | -8°5 | 204°2 | 1,364 |
| 550°C | -11°9 | 205°5 | 0,129 | -18°1 | 198°6 | 0,161 |

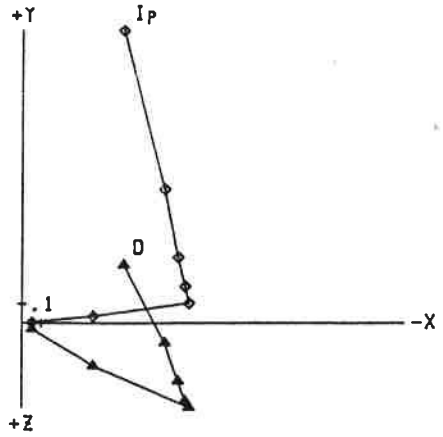



35289004
91T



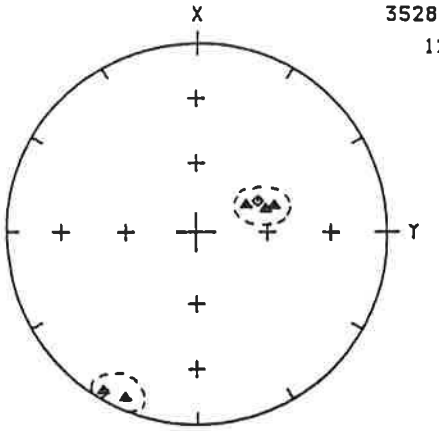

35289004
91T

**Fig. III-3c**

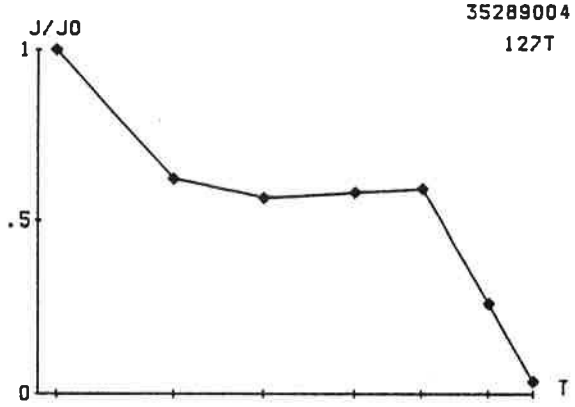



35289004
127T

| Etape | Mesures brutes Inc | Dev | M | vecteurs delta Inc | Dev | M |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 20°C | -68°3 | 149°5 | 1,634 | | | |
| 150°C | -43°2 | 187°9 | 1,017 | -60°7 | 62°4 | 0,943 |
| 250°C | -21°9 | 200°6 | 0,924 | -59°0 | 71°1 | 0,410 |
| 350°C | -11°6 | 205°7 | 0,950 | -54°9 | 70°6 | 0,188 |
| 425°C | -6°2 | 207°0 | 0,968 | -66°0 | 60°3 | 0,094 |
| 500°C | -5°0 | 211°0 | 0,429 | -7°1 | 203°8 | 0,541 |
| 550°C | -4°1 | 209°8 | 0,059 | -5°1 | 211°2 | 0,370 |

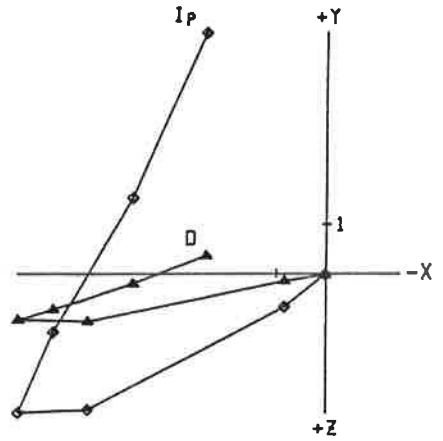



35289004
127T



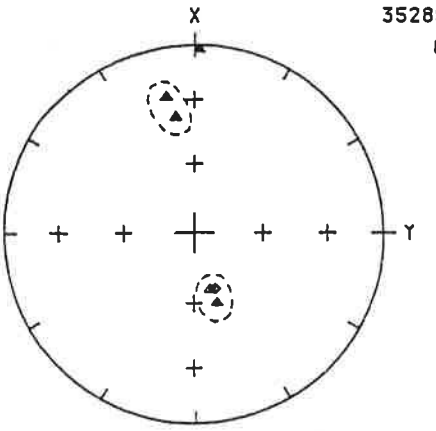

35289004
127T

**Fig. III-3d**

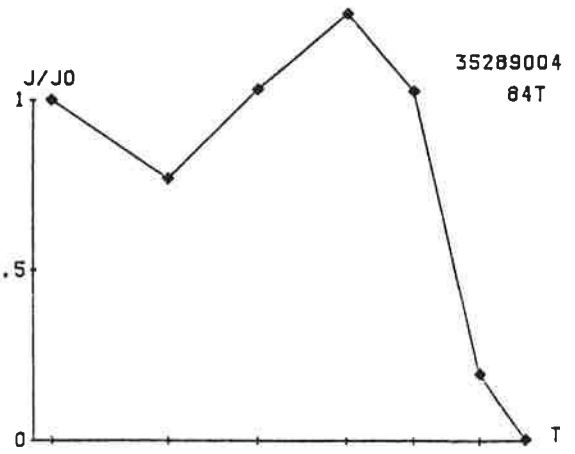



35289004
84T

| Etape | Mesures brutes Inc | Dev | M | vecteurs delta Inc | Dev | M |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 20°C | -63°2 | 8°6 | 5,447 | | | |
| 150°C | -21°5 | -2°9 | 4,188 | -64°8 | 158°9 | 3,678 |
| 250°C | 12°0 | -7°5 | 5,627 | -58°6 | 161°6 | 3,168 |
| 350°C | 24°1 | -8°5 | 6,847 | -65°1 | 164°2 | 1,792 |
| 425°C | 29°2 | -11°3 | 5,597 | 2°7 | 1°4 | 1,392 |
| 500°C | 37°7 | -9°7 | 1,079 | 27°2 | -11°6 | 4,533 |
| 550°C | 32°9 | -29°3 | 0,028 | 37°8 | -9°2 | 1,053 |




35289004
84T




35289004
84T

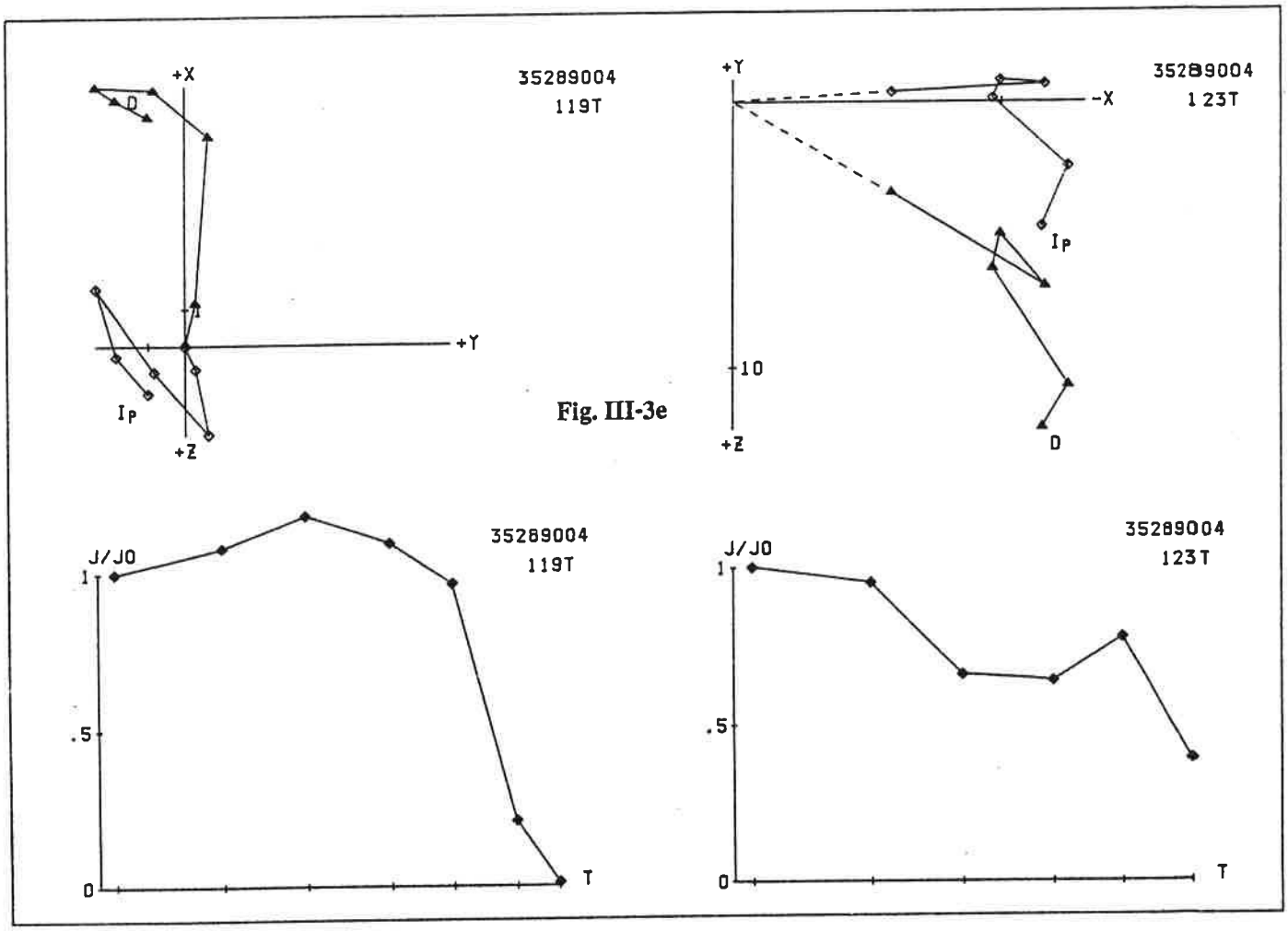



Fig. III-3e

SAINT-MALO-DE-PHILY
La Marlais
Fichier : 35289004.RES
26-07-85

SAINT-MALO-DE-PHILY
La Marlais fabric.
Fichier : 289004-2.RES
29-JAN-86

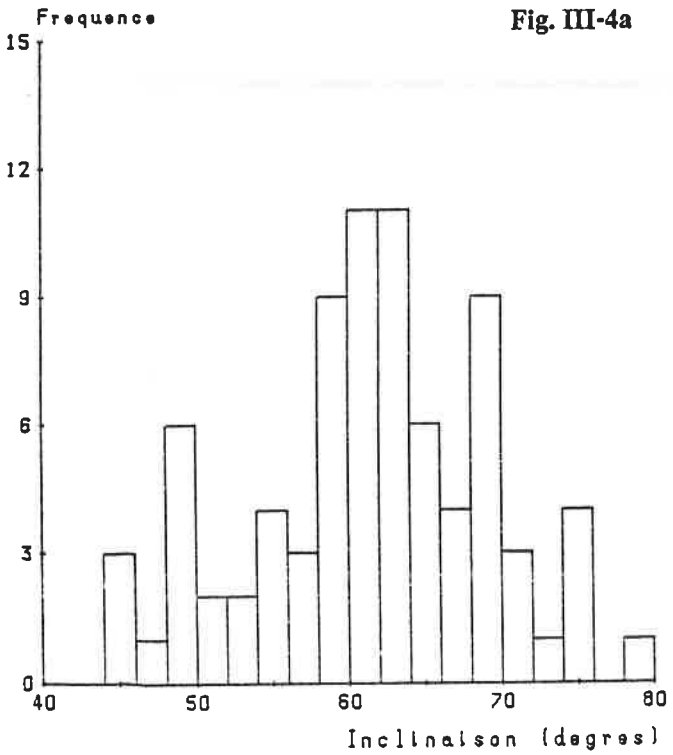



Fig. III-4a

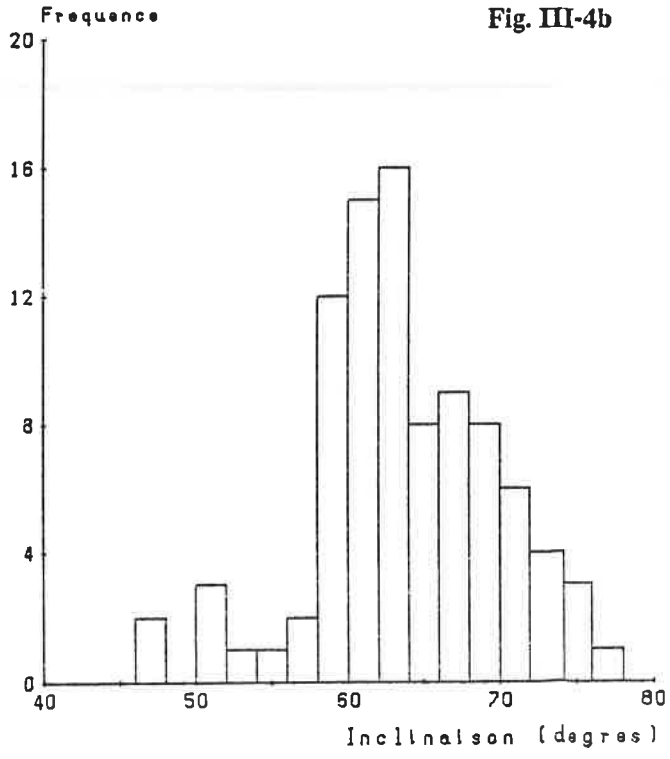



Fig. III-4b

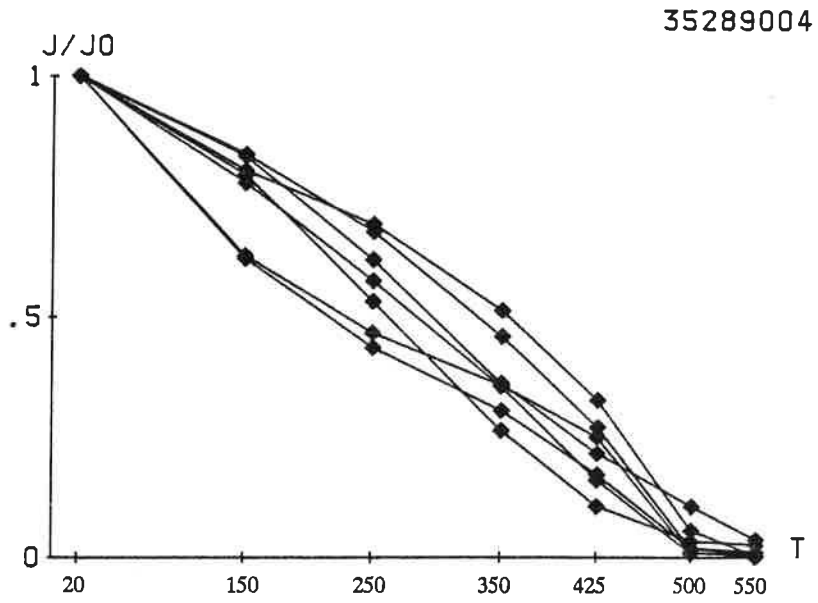



**Fig. III-5** : Courbes de désaimantation.

La figure III-5 rassemble toutes les courbes J/Jo obtenues à partir d'échantillons ne présentant qu'une seule composante d'aimantation (*cf.* fig. III-3a). L'extrême similitude de l'allure de ces courbes souligne la grande homogénéité du comportement magnétique des argiles étudiées. A partir des 46 tuiles ayant subi une ou plusieurs aimantations secondaires, exploitables ou non, on a pu établir une statistique des températures maximales de réchauffement :

150°C : 6%
250°C : 17%
350°C : 35%
425°C : 35%
500°C : 7%

Cette statistique doit être manipulée avec prudence. En effet, les matériaux totalement réaimantés ne sont pas comptabilisés ici puisqu'ils sont indiscernables de ceux n'ayant subi aucune perturbation. Le critère de distinction pourrait être la position de cuisson, mais là encore la distinction est difficile à faire puisqu'une partie des aimantations primaires sont acquises dans des positions identiques à celles du réchauffement. Un autre problème réside dans la difficulté de définir des composantes au delà de 500° - 550°C. En conséquence, on peut dire que les tuiles ont été soumises à des réchauffements allant globalement de 300° à plus de 550°C.

Les données de la désaimantation thermique ont été regroupées en deux ensembles, l'un correspondant aux aimantations primaires (ATRP alignée sur l'origine dans les diagrammes de Zijderveld et ATR univectorielles), l'autre correspondant aux aimantations secondaires ayant des directions bien définies. Les données difficiles à interpréter du type de la figure III-3e ont été rejetées.

*ETUDE DES AIMANTATIONS PRIMAIRES*

Sur 101 tuiles retenues, 90% sont cuites debout, 3% de chant et 7% à plat. Ces aimantations primaires ont donc été acquises à la fabrication, lors de la cuisson dans un four. L'histogramme des inclinaisons en figure III-4b et le diagramme de pointage en figure III-6b indiquent une très nette amélioration des résultats. Dans ce dernier diagramme, on voit apparaître deux principaux groupements A et B respectivement autour des déviations +20° et -70°. Les rebords (faces supérieures) des tuiles du groupement A sont tous orientés vers l'est tandis que ceux des groupements B1 et B2 le sont pratiquement tous vers le Nord magnétique. Le diagramme des densités en figure III-7 et la statistique de Fisher donnent les directions moyennes suivantes :

| | | | |
|---|---|---|---|
| A | $\bar{I} = 62° \pm 1°5$ | $\bar{\Delta} = 16° \pm 3°$ | k = 374 |
| B1 | $\bar{I} = 64°5 \pm 1°5$ | $\bar{\Delta} = -88° \pm 3°5$ | k = 539 |
| B2 | $\bar{I} = 71° \pm 2°$ | $\bar{\Delta} = -54° \pm 6°5$ | k = 272 |

Les deux agglomérats B1 et B2 proviennent très probablement d'un dédoublement dû à un pendage alterné des rangées de tuiles dans le four. Dans le cas de matériaux cuits sur tranche, l'agglomérat le moins susceptible d'être affecté, en inclinaison, par les effets perturbateurs (*cf.* chapitres IV, V et VI) est celui dont la déviation est la plus proche du N.M. ; ici c'est le groupement A. Après correction de latitude de 1° pour normalisation à Paris et compte-tenu du mobilier archéologique retrouvé sur le site, la date archéomagnétique de fabrication de ce lot de tuile est 165 - 215 Ap. J.-C. (*cf.* chapitre XIII).

*ETUDE DES AIMANTATIONS SECONDAIRES*

Quarante tuiles ont fourni des aimantations secondaires exploitables. Les statistiques des positions donnent : 83% à plat, 8% de chant et 10% debout. Les tuiles ont été recuites dans des positions apparemment cohérentes, à plat autour de l'horizontale. Ce fait tend à accréditer l'hypothèse d'un incendie avec refroidissement de la toiture soit en place sur la charpente, soit effondrée au sol en position statistiquement à plat. La première hypothèse d'une toiture refroidie en place doit se traduire en principe par les indices archéomagnétiques suivants :

a) position de réchauffement à plat,

b) dédoublement éventuel de l'histogramme des inclinaisons dans le cas de tuiles provenant d'un toit à double pente,

c) groupements de déviations indiquant l'orientation du bâtiment par rapport au NM de l'époque,

d) orientation systématique des rebords des *tegulae* vers le haut.

L'examen des figures III-8a et III-9 montre que les conditions a et b sont vérifiées. La correction de pente à apporter pour regrouper au mieux les deux groupes de l'histogramme des inclinaisons en figure III-8a est de ± 10° (fig. III-8c). C'est une valeur qui diffère assez largement des 20° en moyenne observés pour la pente des toitures romaines (Adam, 1984). En fait, l'argument décisif en faveur de l'effondrement de la toiture vient de ce qu'au moins 30% des tuiles ont acquis leur aimantation secondaire leurs rebords dirigés vers le bas (fig. III-9).

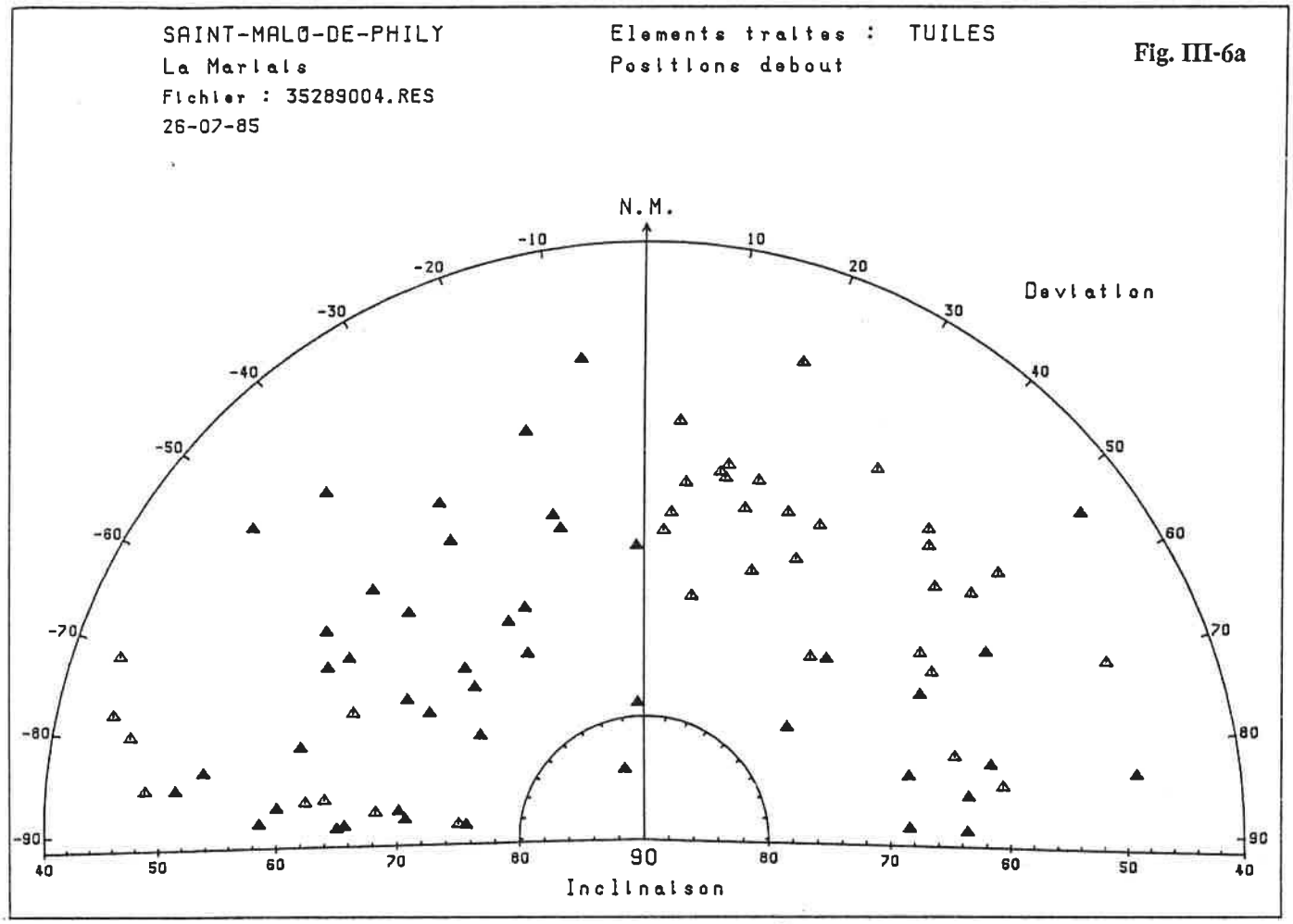



Fig. III-6a

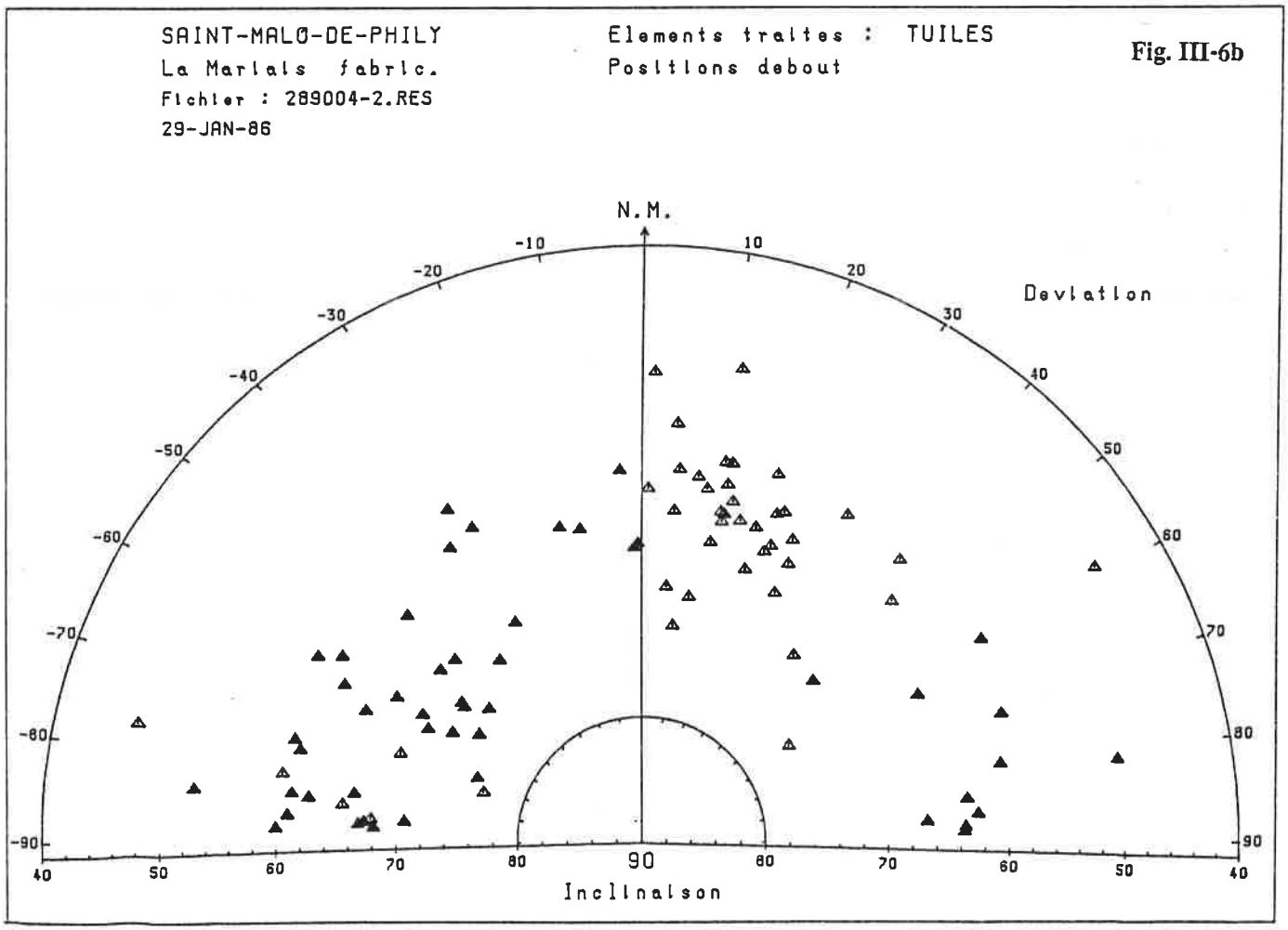



Fig. III-6b

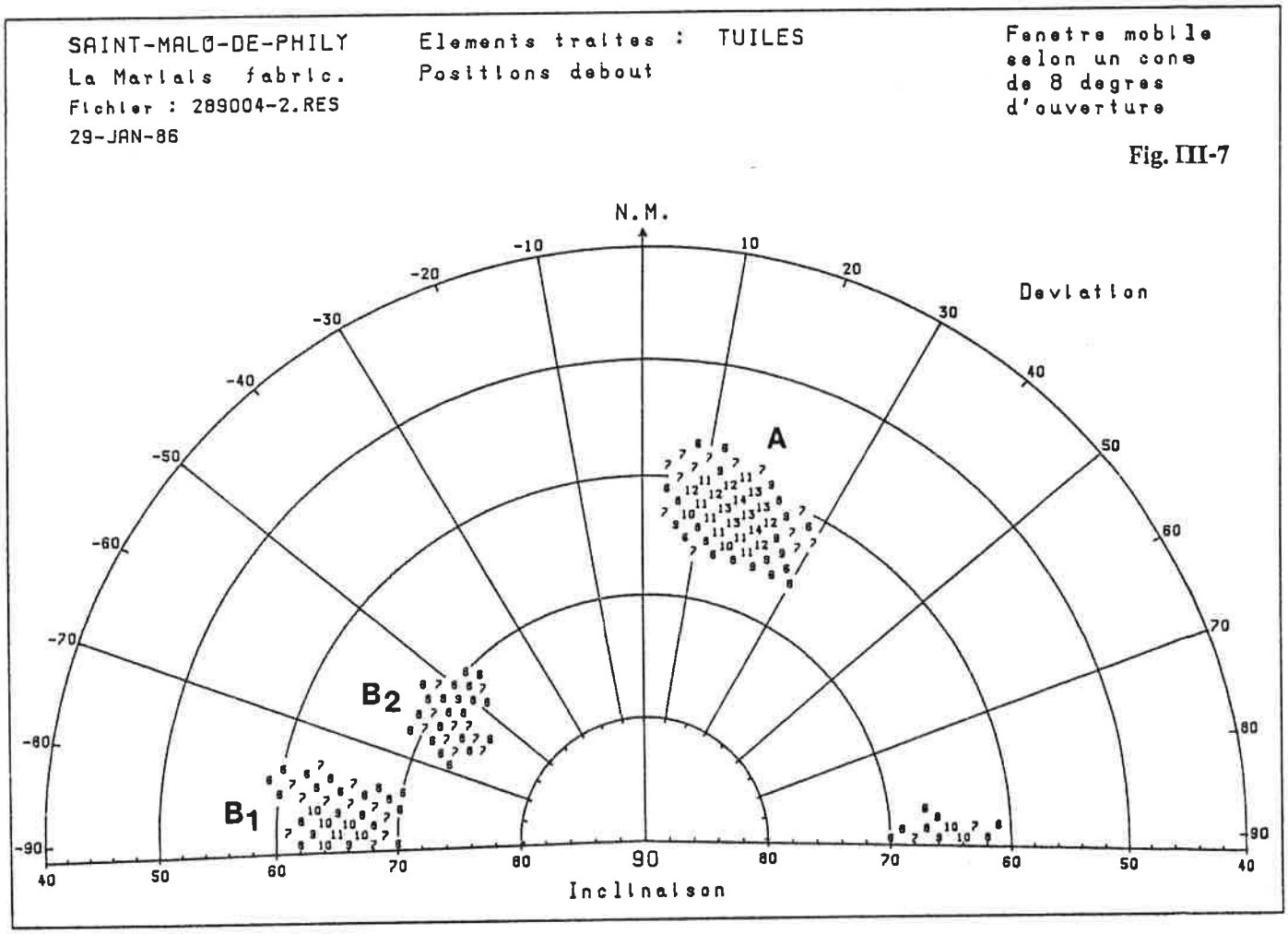



Fig. III-7

Cette donnée contredit fortement le critère (d) cité plus haut. En conclusion, l'effondrement a dû avoir lieu à la suite d'un incendie, d'une façon suffisamment cohérente pour garder trace à la fois de l'orientation générale du bâtiment (fig. III-9) et de la double pente de la toiture.

La valeur moyenne de l'inclinaison corrigée, soit 57°, obtenue à partir de l'histogramme en figure III-8c, devrait en principe fournir la date de l'incendie de cet édifice gallo-romain. Cependant, les valeurs brutes des inclinaisons mesurées sur des matériaux cuits uniquement à plat n'offrent pas, contrairement aux matériaux cuits sur tranche, la possibilité de déceler *a priori* l'existence d'éventuelles erreurs systématiques dues à l'action du champ démagnétisant et de l'anisotropie d'ATR. Faute d'avoir pu évaluer et corriger ces erreurs, on se contentera d'affirmer que l'incendie de l'édifice gallo-romain de la Mariais en Saint-Malo-de-Phily est survenu après la date de fabrication des tuiles, c'est-à-dire après 165 Ap. J.-C.

## CONCLUSION

Dans toute étude archéomagnétique, il convient de s'assurer de la présence ou non d'aimantations parasites ou secondaires dans les matériaux étudiés. Les désaimantations thermiques ont pour but de supprimer les aimantations parasites et de séparer les composantes cohérentes qui correspondent à autant d'épisodes particuliers de l'histoire magnétique d'une argile cuite. Un des renseignements archéologiques les plus intéressants que l'on puisse obtenir de ces désaimantations est l'évaluation des durées d'utilisation des matériaux dans les constructions. En effet, l'intervalle de date entre la fabrication, marquée par l'acquisition de l'aimantation primaire, et le dernier réchauffement partiel, marqué par l'acquisition de l'aimantation secondaire, peut corres-

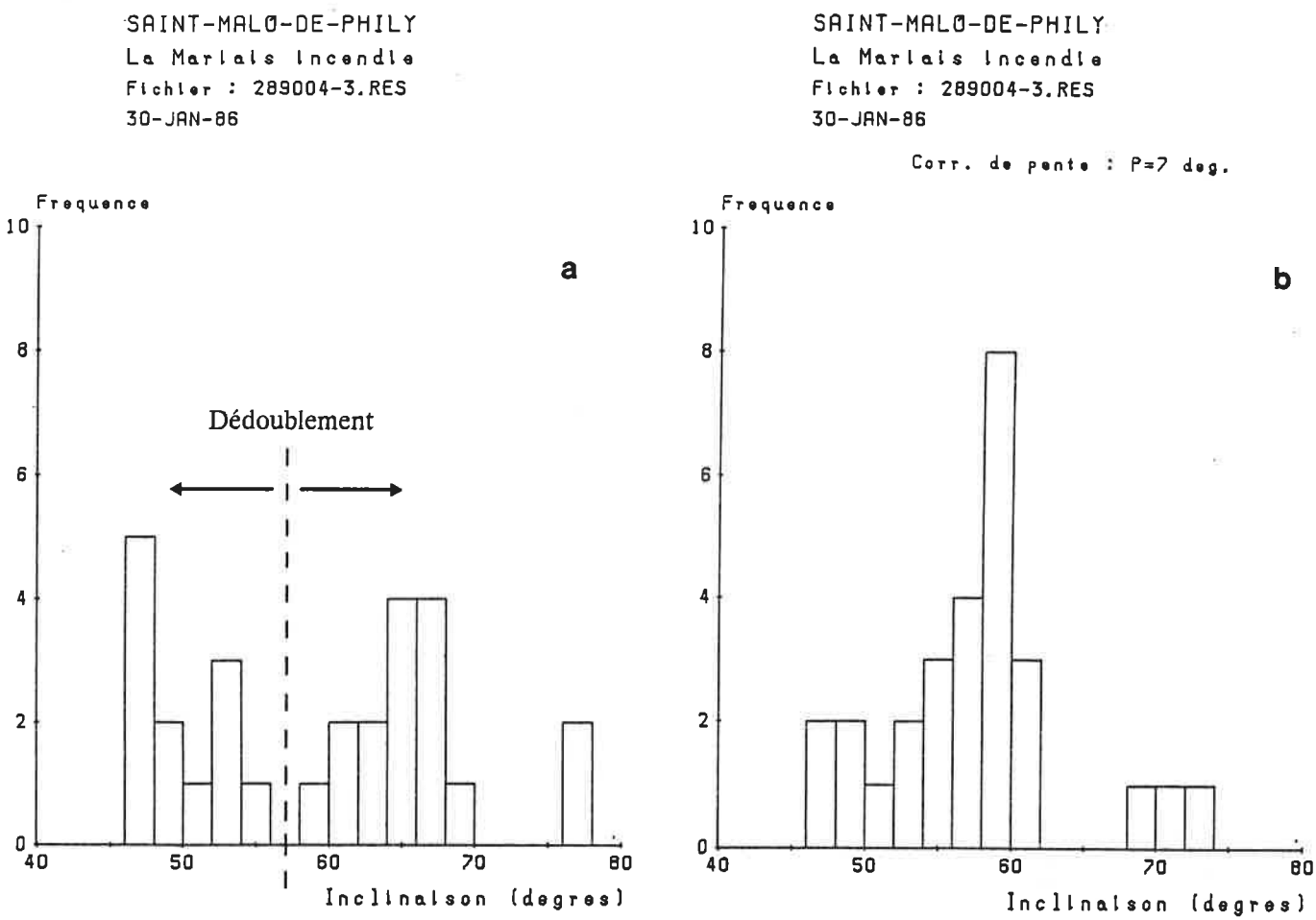
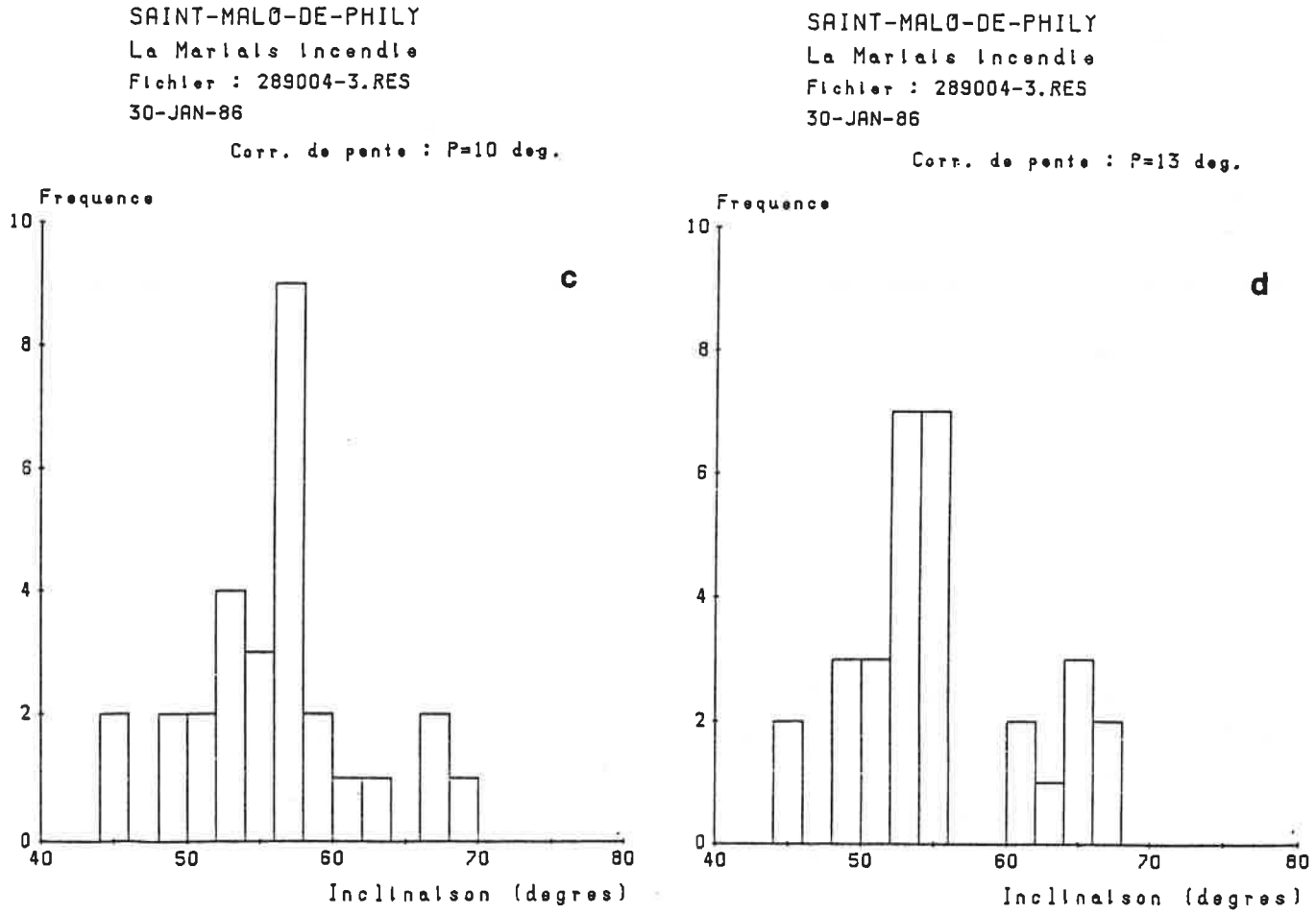

SAINT-MALO-DE-PHILY
La Marlais Incendie
Fichier : 289004-3.RES
30-JAN-86
Frequence
a
Dédoublement
Inclinaison (degres)
SAINT-MALO-DE-PHILY
La Marlais Incendie
Fichier : 289004-3.RES
30-JAN-86
Corr. de pente : P=7 deg.
Frequence
b
Inclinaison (degres)

Fig. III-8


SAINT-MALO-DE-PHILY
La Marlais Incendie
Fichier : 289004-3.RES
30-JAN-86
Corr. de pente : P=10 deg.
Frequence
c
Inclinaison (degres)
SAINT-MALO-DE-PHILY
La Marlais Incendie
Fichier : 289004-3.RES
30-JAN-86
Corr. de pente : P=13 deg.
Frequence
d
Inclinaison (degres)

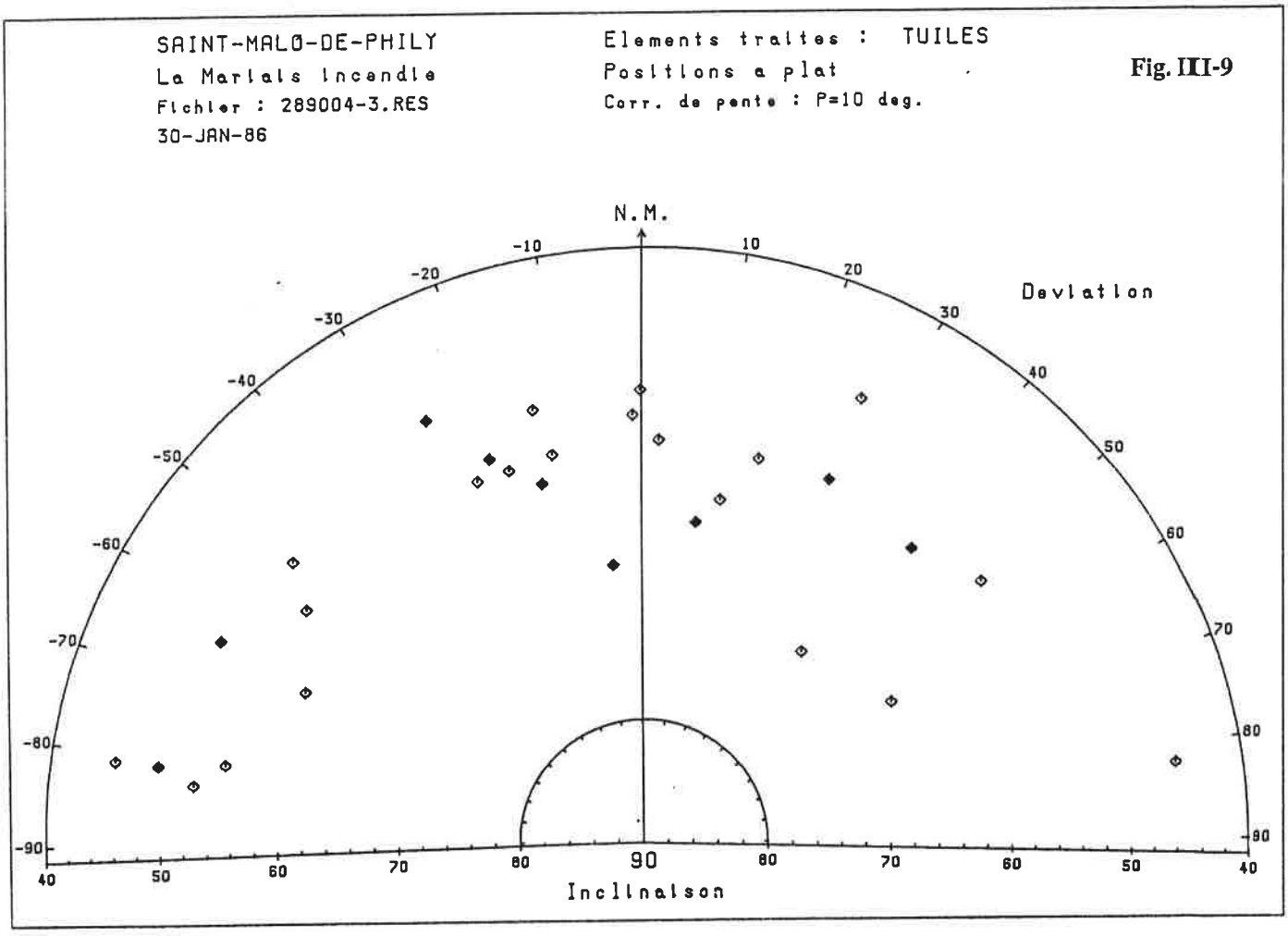



Fig. III-9

pondre à une période d'utilisation continue des matériaux dans une même structure. En toute rigueur, il faudrait considérer non pas la date de fabrication, mais la date de construction. Cependant, l'écart ne peut qu'être minime, de quelques années au plus, du fait que les matériaux étaient fabriqués le plus souvent à la demande, non loin des chantiers de construction. Les principales circonstances archéologiques pour lesquelles l'archéomagnétisme permet d'obtenir une évaluation de ces durées d'utilisation sont les suivantes :

*- Tuiles provenant d'une toiture incendiée.*

C'est l'exemple traité ci-dessus. Dans le cas le plus favorable, la toiture s'est effondrée en bon ordre sur le sol. Si la cohérence des positions de refroidissement est suffisamment grande, alors la datation de l'incendie peut être possible. On obtient ainsi une indication sur la durée de vie de la toiture. Cependant, les effondrements de toitures incendiées se font la plupart du temps dans le plus grand désordre. D'où l'impossibilité de déduire une date des aimantations secondaires (*cf.* l'exemple de Chênehutte-les-Tuffeaux dans l'article en annexe de ce chapitre).

*- Carreaux de pavage et briques en place respectivement sur le sol et dans les murs d'un bâtiment incendié.*

Les aimantations secondaires sont acquises dans des positions cohérentes. L'inclinaison moyenne de cette aimantation permet de remonter à la date de l'incendie tandis que la déviation redonne l'orientation du bâtiment par rapport au N.M. de l'époque. Si l'incendie correspond à l'abandon de l'édifice, alors la durée maximum d'occupation de ce dernier est donnée par l'intervalle de date compris entre la fabrication des matériaux et cet incendie (*cf.* l'exemple de N.D.-de-la-Capelle dans l'article en annexe de ce chapitre).

*- Tuiles, briques et carreaux utilisés en réemploi dans des parois de fours.*

La date de construction des parois est contemporaine ou postérieure à la fabrication des matériaux. C'est le cas lorsqu'un nouveau four est construit à partir du matériel récupéré sur place dans un atelier de production. La date de dernière utilisation du four est fixée par l'aimantation secondaire acquise lors de la dernière chauffe. On obtient ainsi une évaluation de la durée maximale d'utilisation du four (Goulpeau *et al.* , 1982).

*- Briques et tubuli utilisés dans des installations de chauffage (thermes).*

De même que précédemment, on obtient la durée d'utilisation de l'installation entre le moment où les matériaux sont fabriqués et le moment où l'installation a été chauffée pour la dernière fois.

La validité des durées d'utilisation déduites de ces différents scénarios suppose implicitement qu'il n'y a pas eu de période d'abandon ou de stockage entre le moment de la fabrication et le moment de la dernière utilisation. Dans le cas contraire, on peut envisager toutes sortes de scénarios complexes comme, par exemple, le scénario où les matériaux sont fabriqués, incendiés et abandonnés, puis récupérés et réutilisés dans des structures à nouveau chauffées (Evans et Mareschal, 1986).

Outre les nombreux apports à la datation et à la reconstitution des positions de cuisson, la désaimantation thermique permet aussi d'étudier la distribution des températures maximales atteintes au sein d'un four ou d'une installation de chauffage. Une étude de ce type sera prochainement réalisée sur des briques de pilettes d'hypocauste provenant d'un *caldarium* d'environ 6m sur 7m, fouillé à Entrains (Nièvre) en 1986, sous la direction de B. Mazingue.

*Revue d'Archéométrie, 10, (1986)*

# LES APPORTS DE LA DESAIMANTATION THERMIQUE DANS DES ETUDES ARCHEOMAGNETIQUES DE MATERIAUX DEPLACES

Louis GOULPEAU, Philippe LANOS et Loïc LANGOUET
*Laboratoire d'Archéométrie*
*Université de Rennes I*

**Résumé :** L'aimantation thermorémanente acquise par les matériaux de construction lors de leur cuisson peut être perturbée par des réchauffements accidentels ou fonctionnels ultérieurs. L'aimantation globale étant la somme vectorielle des aimantations partielles successives, nous montrons comment il est possible en laboratoire de restituer l'histoire thermique du matériau à l'aide de désaimantations thermiques partielles sous champ nul. Nous illustrons ce développement théorique par plusieurs exemples d'études de matériaux ayant subi des incendies durant leur utilisation dans des établissements anciens. Les matériaux ont pu subir cette perturbation thermique soit en position fixe (cas d'un carrelage) soit en position variable (cas de l'effondrement d'une toiture).

**Abstract :** The thermoremanent magnetization (TRM) acquired by the building materials during their baking can be disturbed by any later accidental or functional heating. The total magnetization being the vectorial summing of several partial ones, we show the possibility of finding the thermal history of the material by a zero field gradual demagnetizing. We support the theoretical point of view with several studies of tiles and bricks which have undergone any fire during their utilization. This thermal disturbance appears, these materials being in a spatially fixed position like with paving-tiles in a floor or in a variable one like for a gradually falling down roof.

La méthode des études archéomagnétiques appliquées à des matériaux déplacés que nous avons développée ces dernières années (1 à 7) repose sur une hypothèse quant à la position des matériaux lors de leur cuisson. Cette hypothèse peut s'énoncer simplement :

"Lors de leur cuisson, les matériaux de construction parallélépipèdiques reposent sur la sole statistiquement horizontale du four sur une de leurs faces planes en position à plat, de chant ou debout."

Elle a été vérifiée dans la pratique et on sait, par exemple, aujourd'hui, que les tuiles et les briques de l'époque gallo-romaine étaient cuites en position debout (dressées sur leur petit côté) dans une proportion allant de 90 % à 100 % selon les chargements, alors que les tuiles médiévales à crochet l'étaient dans la plupart des cas en position de chant (couchées sur leur grand côté). Des exceptions à ces règles générales existent et peuvent servir à caractériser des ateliers de production particuliers possédant des habitudes de chargement des fours non conformes aux pratiques générales de l'époque. C'est, par exemple, le cas d'un atelier de tuiliers gallo-romains non localisé avec précision à ce jour, situé dans l'est des Côtes-du-Nord et connu par sa production (3 sites d'utilisation actuellement repérés dans un rayon de 10 km), pour laquelle la mesure montre que les tuiles étaient cuites en position de chant. C'est ce qui se produit également pour l'atelier médiéval ayant fourni les tuiles à crochet de la toiture du château de Saint- Rémy (Côte d'Or) où a été utilisé un mode de chargement composite associant 2/3 de tuiles debout à 1/3 de tuiles en position de chant. Mais ces cas particuliers restent actuellement, pour ce que nous en savons, l'exception.

Un problème se pose lorsque, lors de leur utilisation, ces mêmes matériaux ont eu à connaître un réchauffement volontaire ou accidentel. A la première catégorie, correspondent les tuiles et briques employées dans la confection d'hypocauste, de foyers ou de fours et à la seconde celles utilisées dans un établissement ayant subi un incendie. Mais quelle que soit la cause, le matériau a connu, dans une position généralement différente de celle de la cuisson, une perturbation thermique de son aimantation initiale acquise lors de sa fabrication. Deux cas peuvent se présenter :

- la température atteinte a été suffisamment élevée (supérieure à la température de Curie de l'hématite : 675 °C) pour effacer la totalité de l'aimantation initiale et lui substituer une nouvelle aimantation dont l'orientation correspond à celle du champ magnétique terrestre (CMT) à la date de la dernière chauffe. C'est par exemple le cas des briques (ou tuiles) utilisées à plat dans les structures de la chambre de cuisson d'un four (voir l'étude sur le

four de Guignen (8)). La position à plat des matériaux lors de leur dernière chauffe révélée par la mesure archéomagnétique, est alors un indice important pour l'identification de fours à partir de matériaux recueillis en prospection de surface.

- la température atteinte a été très inférieure à cette température de Curie et nous avons la superposition de deux aimantations acquises à des dates et dans des positions différentes. Seule, la pratique de la désaimantation thermique sous champ nul permet alors de résoudre les problèmes archéologiques correspondants.

## L'ACQUISITION DE L'AIMANTATION THERMOREMANENTE

Dans les argiles cuites, l'aimantation est principalement portée par des microcristaux d'hématite et de magnétite (selon le degré d'oxydation de l'atmosphère du four lors de la cuisson, la température maximale atteinte et la nature de l'argile). Ces cristaux, de taille variable mais généralement très faible, peuvent être monodomaines ou polydomaines. Lors du refroidissement qui suit la cuisson et à des températures inférieures à celle de Curie (675°C pour l'hématite et 565°C pour la magnétite), l'aimantation nouvellement acquise des grains se fait avec une orientation qui est fonction des axes cristallins de chaque microcristal et des réorganisations des structures en domaines lorsque la température baisse. Mais, elle est toujours au plus près de celle du champ agissant (le CMT pour simplifier). En sommant sur des milliers de microcristaux, la résultante macroscopique est pratiquement orientée selon l'axe du champ agissant.

Il faut maintenant serrer de plus près le phénomène en fonction des aimantations parasites d'origine thermique. Thellier avait montré (9) que l'aimantation thermorémanente (ATR) était la somme vectorielle des aimantations thermorémanentes partielles (ATRP) acquises intervalle de température après intervalle de température lors du refroidissement. Dès 1949, Néel (10) proposa une explication théorique de ce phénomène propre aux structures de microcristaux ferromagnétiques dispersés dans une matrice. Pour ce, tenant compte des temps de relaxation de l'aimantation de chaque grain, temps qui traduit un équilibre entre l'énergie d'agitation thermique et l'énergie magnétocristalline, il détermine des températures de blocage de cette aimantation, température qui dépendra de la taille du grain, de son orientation par rapport au champ agissant et éventuellement de sa structure en domaines (bien que son développement théorique soit fait sur la base de grains monodomaines). Pour les milliers de grains, nous avons un spectre quasi-continu de ces températures de blocage, si bien que, durant un refroidissement entre $T_1$ et $T_2$, seuls les grains dont les températures de blocage se trouvent dans cet intervalle verront leur aimantation figée de façon irréversible.

Pour schématiser, disons que, si le matériau est fixe durant tout le refroidissement (cas du chargement d'un four lors de la cuisson), toutes les ATRP seront colinéaires et le vecteur $M_0$ se construit lors de celui-ci, intervalle de température après intervalle de température, selon la séquence O, F, E, $T_1$,... $M_0$ (figure 1).

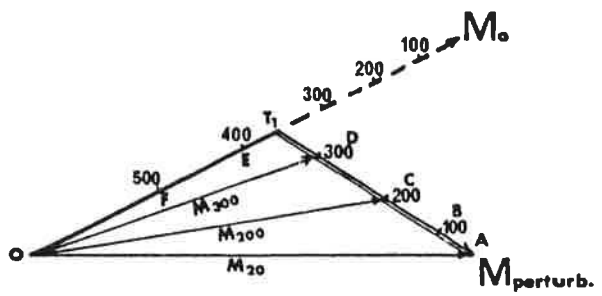



Fig. 1

Considérons maintenant le cas d'un matériau qui, après sa fabrication, subit, dans une position différente de celle de cuisson, un échauffement jusqu'à la température $T_1$ (vers 350°C sur la figure 1). Tous les grains dont la température de blocage est inférieure à $T_1$ voient leur aimantation statistiquement disparaître par suite de l'agitation thermique qui désoriente de façon aléatoire les composantes individuelles des aimantations de ceux-ci. Lors du refroidissement consécutif à cet échauffement, de nouvelles ATRP d'orientations différentes (mais à nouveau colinéaires entre elles si le matériau est fixe dans l'espace) apparaissent intervalle de température après intervalle de température. Nous avons sur la figure 1, à partir de $T_1$, la séquence D, C, B, A. L'aimantation observée à la mesure sera $M_{20}$, somme vectorielle de $OT_1$ et de $T_1A$.

## LA DESAIMANTATION THERMIQUE ET LA PRESENTATION DES RESULTATS

En laboratoire, nous avons la possibilité de désaimanter partiellement les échantillons. Pour cela, nous portons ceux-ci à une température $T_i$ contrôlée dans une enceinte en métal où le champ magnétique est nul. Si nous soumettons l'échantillon, dont l'histoire magnétique est résumée sur la figure 1, à un tel traitement pour des températures $T_i$ successivement égales à 200°C, 300°C, $T_1$, 400°C, 500°C, les aimantations mesurées entre chaque désaimantation thermique seront respectivement : $M_{200}$, $M_{300}$, $OT_1$, OE, OF.

Une telle étude nous permettra donc de déterminer, d'une part, l'orientation de l'aimantation initiale par l'alignement $T_1$, F, E, O, et celle de l'aimantation parasite à partir de la droite $ACDT_1$. Le cas décrit est le plus simple rencontré, mais on conçoit aisément que, si le matériau n'est pas resté fixe dans l'espace lors du refroidissement consécutif à l'échauffement parasite (cas, par exemple, d'une toiture s'effondrant progressivement), la situation peut être beaucoup plus compliquée.

Par convention, nous avons représenté les vecteurs d'aimantation initiale et d'aimantation parasite dans le plan de la figure 1. Mais, dans la pratique, la mesure se fait dans un système de coordonnées lié à un trièdre rectangle arbitrairement noté : V (pour verticale) d'après l'axe de carottage des échantillons, N (pour nord) et E (pour est). Il n'y a, en conséquence, aucune raison pour que le plan contenant

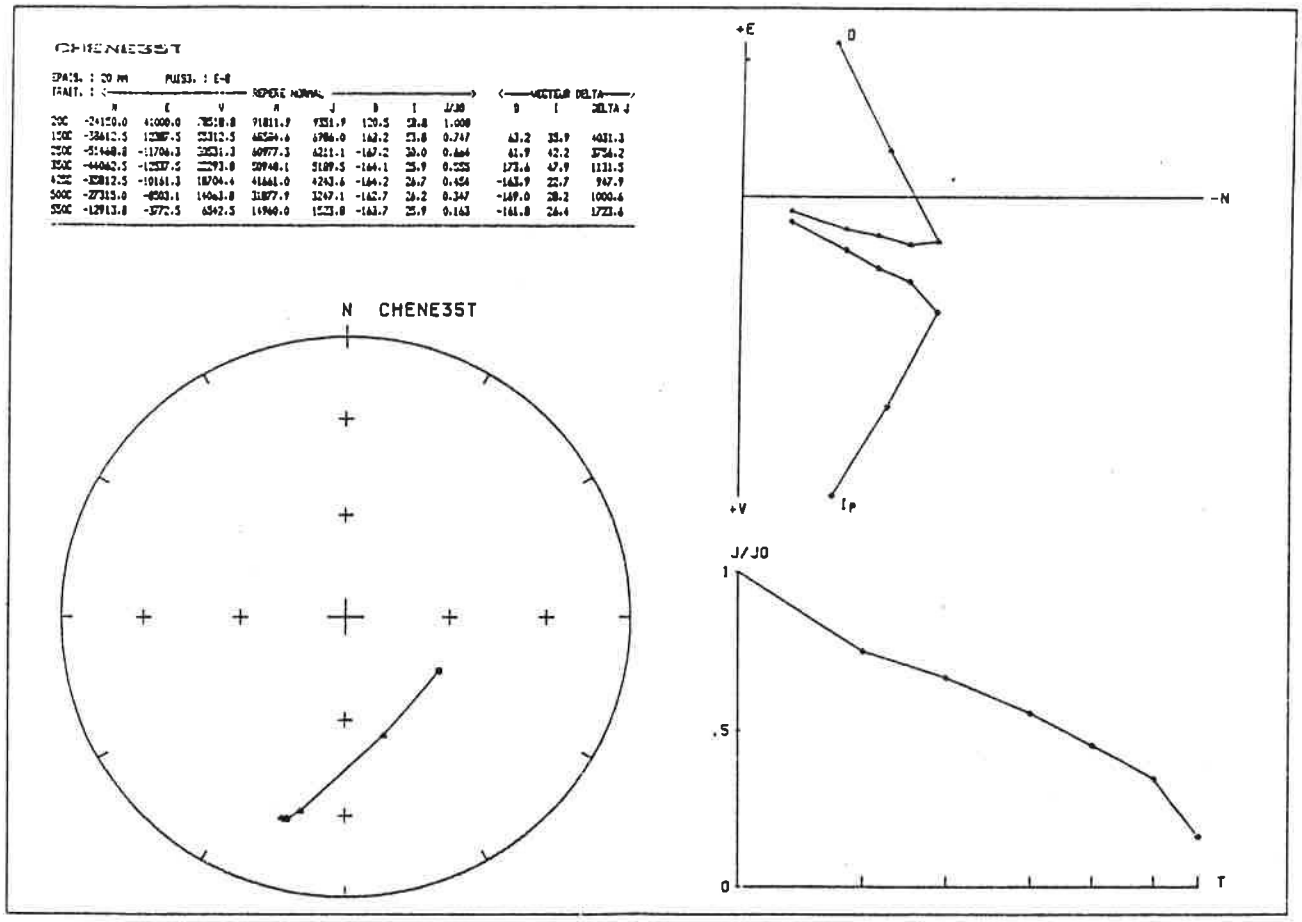



Fig. 2

les deux composantes ci-dessus (aimantation initiale et aimantation parasite) coïncide avec un des plans de base du trièdre. Il est donc nécessaire de projeter, sur deux de ces plans de base, la composition vectorielle de toutes les ATRP. On obtient ainsi un diagramme de Zijderveld dont un exemple est donné en figure 2, en haut à droite.

Une seconde manière de visualiser l'évolution des aimantations, mesurées entre chaque étape de la désaimantation thermique, est de projeter sur un plan les intersections avec une sphère des directions de ces différentes aimantations. L'amplitude est ignorée et nous obtenons un diagramme de Schmidt dont un exemple est donné en figure 2 en bas à gauche.

Parallèlement, nous pouvons représenter l'évolution de l'amplitude des aimantations J correspondantes, normalisées par rapport à $J_0$ (aimantation mesurée à température ambiante avant toute désaimantation), en fonction des températures $T_i$ des désaimantations successives. Un tel graphe est illustré en bas à droite sur la figure 2.

Nous avons programmé un microordinateur pour tracer automatiquement ces différents diagrammes à partir de données stockées préalablement sur disquette. On trouve à titre d'exemple, en figure 2, une telle représentation avec :

en haut à gauche : le tableau de tous les résultats,
en haut à droite : le diagramme de Zijderveld,
en bas à gauche : le diagramme de Schmidt,
en bas à droite : le graphe $J/J_0 = f(T_i)$.

Tous les résultats essentiels pour une interprétation correcte des perturbations thermiques subies par un échantillon (ici l'échantillon 35T du site de Chênehutte (49) étudié plus loin) se retrouvent côte à côte sur une même figure. Pour un site donné et pour lequel la nécessité d'une étude des perturbations thermiques s'avère indispensable compte-tenu des résultats des mesures antérieures, nous disposons en final d'un dossier, échantillon par échantillon, de ces représentations. Nous verrons plus loin quelques exemples discutés en détail.

Quels sont les principes de base qui président à de telles discussions ? Pour servir de support à nos explications, nous avons réalisé en figure 3, à partir des résultats particulièrement explicites de 3 échantillons de Chênehutte (49), un montage où figurent, pour les trois cas-types, côte à côte les diagrammes de Schmidt, de Zijderveld et d'évolution de l'amplitude.

Cas 1 : Le matériau n'a pas subi de perturbation thermique.

- Dans le diagramme de Zijderveld, les points sont pratiquement alignés entre eux et avec l'origine. Au cours de la désaimantation, l'orientation des aimantations résiduelles successives ne varie pas à la précision près des mesures.
- Dans le diagramme de Schmidt, l'orientation ne variant pas, les points figuratifs sont quasiment superposés les uns aux autres.

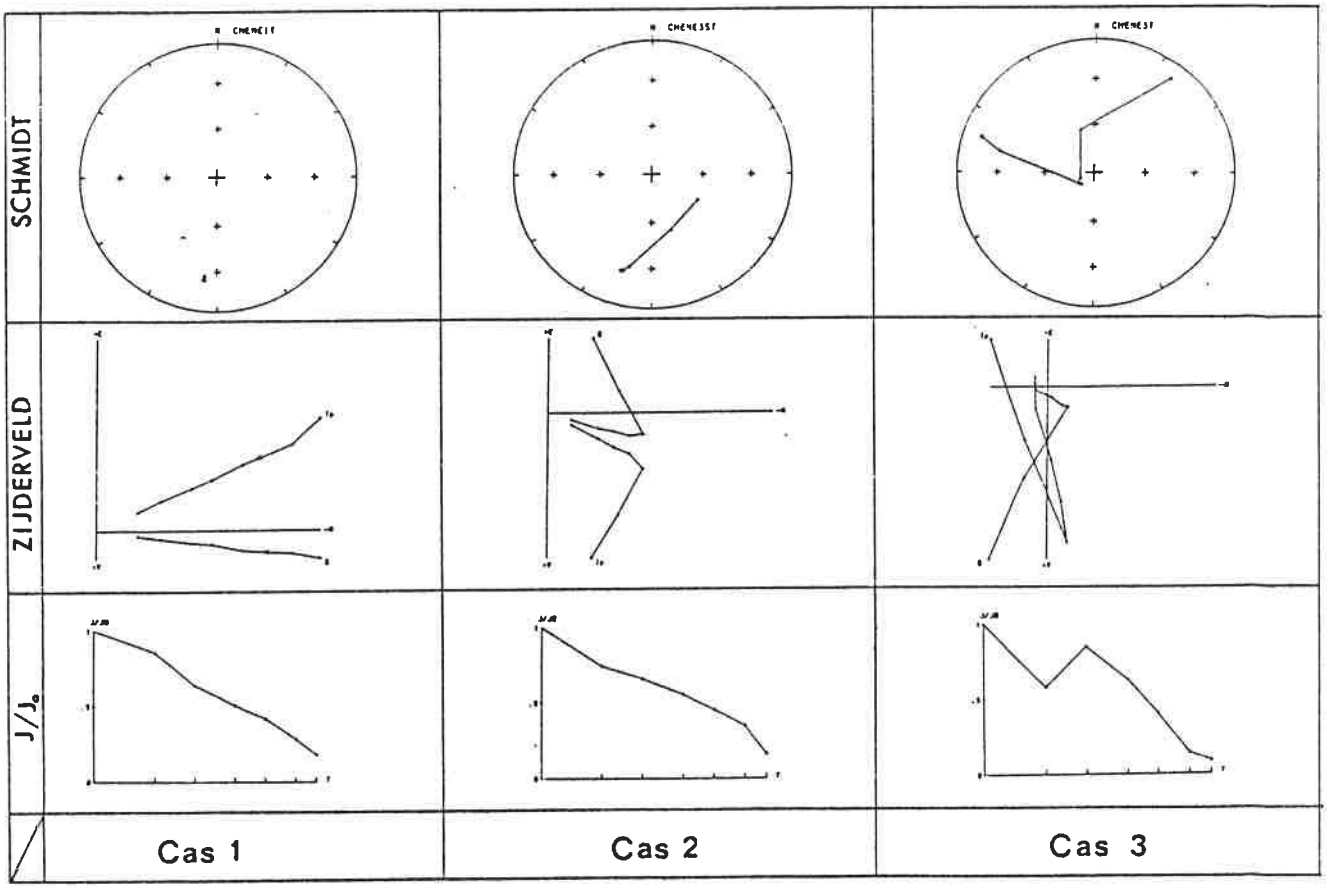



Fig. 3

- L'amplitude des aimantations résiduelles décroît de façon monotone.

Cas 2 : Le matériau a subi une perturbation thermique en position fixe.

- Dans le diagramme de Zijderveld, les points évoluent d'abord, tant sur la courbe Ip que sur la courbe D, selon des droites (points alignés entre eux mais pas sur l'origine), puis pour une température $T_i$ (ici $T_i$ = 280°C correspondant à la température maximale atteinte lors de la perturbation), on observe une cassure et les points suivants sont alignés entre eux et avec l'origine selon des droites qui traduisent l'orientation de l'aimantation initiale. Parallèlement, la lecture du tableau des résultats (se reporter à la figure 2 en haut à gauche) indique que la cassure apparaît bien entre 250°C et 350°C et que l'orientation de l'aimantation parasite (3 dernières colonnes) se situe dans le trièdre de référence autour des valeurs : I = 38° (entre 35°9 et 42°2) et D = 62° (entre 63°2 et 61°9).

- Dans le diagramme de Schmidt, les points évoluent d'abord jusqu'à ce que la température $T_i$ soit atteinte puis se comportent ensuite comme pour le cas 1 (points superposés).

- L'amplitude des aimantations résiduelles varie de façon monotone.

Cas 3 : Le matériau a subi une perturbation thermique dans une position variable lors du refroidissement.

- Dans le diagramme de Zijderveld, les points évoluent de façon erratique sans jamais s'aligner sur l'origine. La perturbation ayant dans le cas présent été subie à haute température et la position du matériau ayant continuellement évolué lors du refroidissement, les aimantations successives mesurées changent de sens sans arrêt.

- Dans le diagramme de Schmidt, nous observons cette même évolution erratique des points figuratifs.

- L'amplitude des aimantations résiduelles successives varie elle-même de façon chaotique.

A partir de ces trois cas-types, de nombreuses variantes peuvent apparaître selon les températures maximales atteintes, l'orientation relative des deux aimantations (initiale et parasite) et le degré plus ou moins important de fixité du matériau lors du refroidissement.

L'ensemble des mesures nécessaires à la réalisation de telles études prend énormément de temps, même en désaimantant simultanément dans le four et à une même température 12 échantillons sur un même ratelier. Pour pouvoir traiter commodément des ensembles importants d'échantillons (fréquemment plus de 100 échantillons), nous utilisons la procédure suivante qui nous a donné toute satisfaction. L'étude complète des désaimantations, étape par étape, est d'abord effectuée sur 24 échantillons (2 rateliers de 12) à des températures $T_i$ successives de 150°C, 250°C, 350°C, 425°C, 500°C et 550°C. Les mesures permettent alors de fixer la température maximale atteinte, par chaque échantillon du sous-ensemble de 24 soumis à l'étude détaillée, lors de sa perturbation thermique. Bien qu'il

y ait toujours des cas extrêmes d'échantillons totalement perturbés (tel celui correspondant au cas 3 de la figure 3), ils représentent bien souvent une infime minorité et nous pouvons généralement fixer arbitrairement une température $T_m$, telle que 80 % à 90 % des échantillons ont connu leur perturbation thermique à une température $T < T_m$. Tout le reste du lot est alors désaimanté en une seule fois à cette température $T_m$ déterminée par l'étude préalable. Il restera après cette désaimantation quelques cas d'échantillons gardant encore partiellement mémoire de la perturbation thermique parce qu'ayant subi celle-ci à une température supérieure à $T_m$. Mais pour la majorité d'entre eux, seule l'aimantation initiale participera à la mesure. Cette opération sera appelée par la suite "nettoyage thermique des échantillons". Simultanément, l'étude préalable menée sur 24 échantillons permet de déterminer si la composante de l'aimantation parasite a été acquise avec une cohérence des positions et d'en chercher alors la signification archéologique (voir plus loin l'exemple de Notre-Dame de la Capelle).

## EXEMPLES D'ETUDES DE QUELQUES SITES

### 1. Un nettoyage thermique : Chênehutte (49).

En 1981-1982, lors des fouilles de sauvetage programmé d'un fanum gallo-romain au lieu-dit Le Villier en Chênehutte-les-Tuffeaux (49),les fragments de tuiles de la toiture ont été recueillis dans une couche portant des traces d'incendie et 108 de ces fragments nous ont été soumis pour étude en vue de préciser une datation qui demeurait floue à partir des seules données archéologiques.

Les premières mesures ont confirmé la nature fortement perturbée par un incendie des aimantations de l'échantillon étudié : - seuls 77 % des fragments montrent une dernière cuisson en position debout,

- l'histogramme des inclinaisons est bimodal (figure 4) et très étalé, si bien que la valeur moyenne (I : 63°9) est sans signification,
- la représentation graphique dans le plan Inclinaison-Déviation est fortement bruitée et difficile à interpréter.

Pour cet ensemble, nous avons effectué l'étude détaillée, étape par étape, de tous les échantillons. Les résultats montrent que : 63,8% des échantillons ont été perturbés à une température inférieure à 150°C ; 11,1% entre 150°C et 250°C ; 7,4% entre 250°C et 350°C ; 6,5% entre 350°C et 425°C ; 3,7% entre 425°C et 500°C ; les 7% restant se sont révélés rebelles à tout traitement thermique et ont, en conséquence, connu une perturbation thermique à haute température (T > 550°C). Une désaimantation globale menée à 350°C aurait donc permis de retrouver l'orientation initiale de l'aimantation pour 82,3% de l'ensemble.

La désaimantation s'est traduite par une perte de l'amplitude de l'aimantation mesurée à peine inférieure à 50%.

Après nettoyage thermique des échantillons, les statistiques des positions de cuisson montrent que 94,9% des tuiles ont été cuites en position debout,

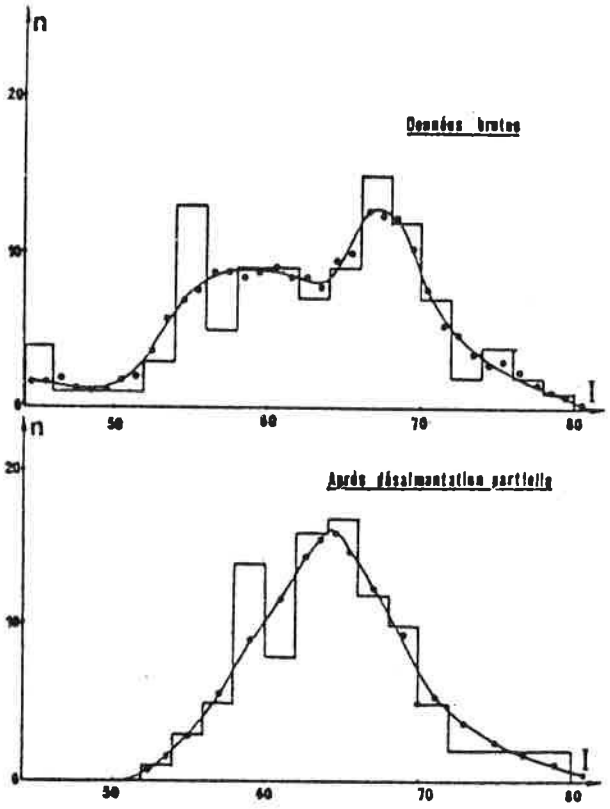



Fig. 4

ce qui est plus conforme à la norme à l'époque gallo-romaine. L'histogramme des inclinaisons (figure 4) est monomodal avec une valeur moyenne I = 64°5,

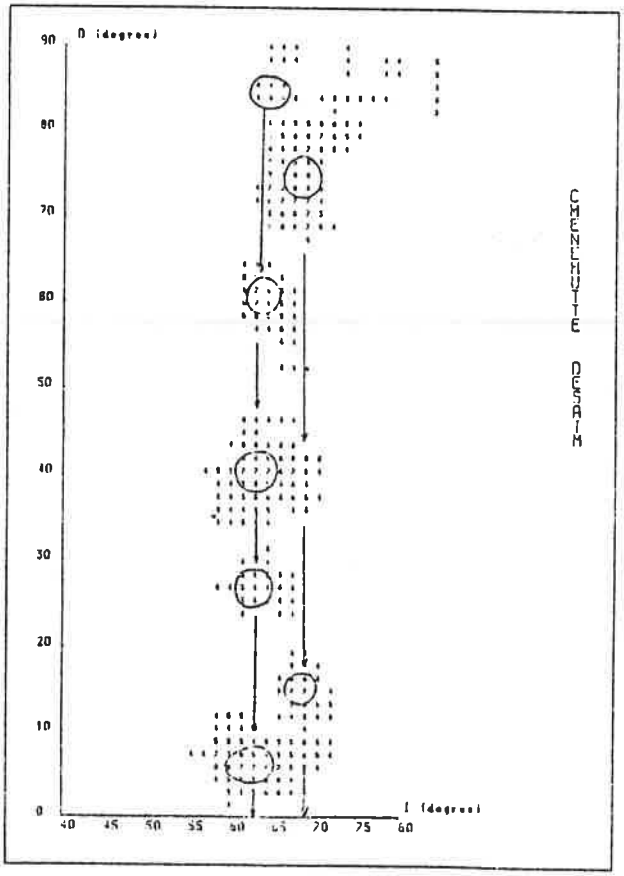


Fig. 5

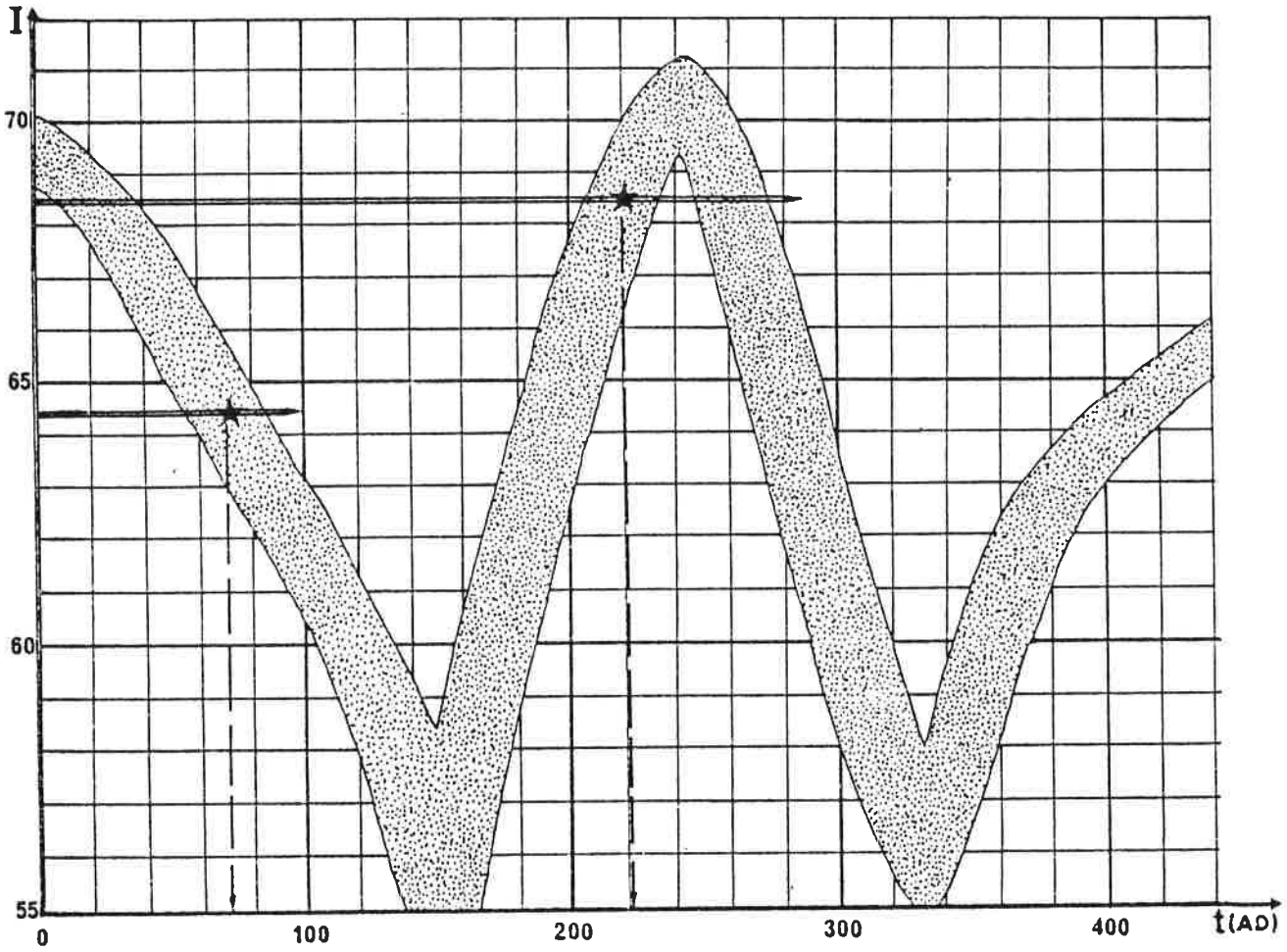



Fig. 6

masquant le fait, révélé par la représentation des points dans le plan Inclinaison-Déviation (dont les groupements sont illustrés en figure 5 par les valeurs des densités de points), que l'on a en réalité deux lots de dates différentes avec des inclinaisons caractéristiques respectivement de 63° et 67°. La complémentarité des valeurs des déviations des groupements est l'indice d'une cuisson des tuiles dans un four rectangulaire (3). Sur l'histogramme, le lot minoritaire (30% de l'ensemble), qui correspond vraisemblablement à une réfection partielle de la toiture, est masqué par la proximité d'un important lot majoritaire (70% des tuiles), si bien que le maximum correspondant est noyé dans le flanc droit du mode principal.

Compte-tenu de la différence de latitude entre le site et Paris, il est nécessaire d'effectuer une correction de + 1°1/2, et ce sont des valeurs de l'inclinaison de 64°1/2 et 68°1/2 qui sont à retenir pour la datation de l'apport principal et de l'apport secondaire de tuiles pour la toiture. Ces deux valeurs ont été reportées en figure 6 sur la courbe de référence des variations séculaires de l'inclinaison à Paris (11). Parmi les diverses solutions possibles, et en tenant compte des quelques données fournies par la fouille (céramiques sigillées de forme Drag 27, 35/36 importées à la fin du Ier siècle), c'est la date de 70 ± 15 ap. J.C. qui a été retenue, confortant les archéologues dans leur hypothèse d'une construction à l'époque flavienne. Par contre, l'absence totale de mobilier (monnaies ou poteries) antérieur à cette période exclut l'éventualité d'un réemploi de tuiles d'un édifice du début du Ier siècle. Il ne peut donc s'agir que d'une réfection de la toiture autour de 220 ap. J.C., infirmant l'hypothèse d'un abandon durant le IIIème siècle, émise par les archéologues sur la base d'une absence de monnaies entre les règnes de Commode et de Constantin II (vers 335 ap. J.C.).

## 2. Datation d'un incendie : Notre-Dame de la Capelle (62).

Les restes de cette abbaye fondée en 1096 ap. J.C. et apparemment détruite avec incendie par les Anglais en 1346, au début de la guerre de Cent Ans, ont fait l'objet d'une fouille de sauvetage en 1984. Deux sondages éloignés l'un de l'autre (notés "réfectoire" et "église" par les archéologues) conduisent à des stratigraphies déconnectées. Les fouilleurs ont cru devoir identifier deux niveaux sur la base d'une typologie des carreaux de dallage. Un niveau inférieur (sondage "église" - niveau A) comporte un fragment de dallage retrouvé en place, fait de tomettes grises de petit module. Celles-ci ont été retrouvées en "réemploi" dans la bordure du grand dallage du "réfectoire" (niveau B), associées à des carreaux à décor estampé du Groupe de l'Artois occidental et à des carreaux unis vernissés dans des

teintes vertes très foncées. Ce qui a conduit les archéologues à conjecturer un décalage chronologique entre ces deux niveaux est l'existence dans le sondage de l'église et à un niveau supérieur au niveau A, d'un reste de dallage du type de celui du "réfectoire" (niveau B).

Nous ne rendons compte ici que des résultats concernant les tomettes du niveau A, exemplaires en ce qui intéresse les renseignements accessibles par la technique de la désaimantation thermique.

Les résultats bruts (avant désaimantation) avaient montré à l'évidence que le lot avait subi un violent incendie : histogramme des inclinaisons très dispersé (pas de mode dominant net), positions de cuisson anormales (42% à plat pour 68% sur la tranche). Sur les 62 tomettes soumises à notre étude, 16 ont été peut correspondre à un chargement du four en couches alternées de carreaux sur la tranche et de carreaux à plat afin de constituer un nouveau plancher pour la couche suivante.

L'histogramme des inclinaisons (figure 8) montre un mode dominant situé autour de 60°, en accord avec la valeur moyenne de 59°1. La représentation dans le plan Inclinaison-Déviation n'apporte pas de renseignements supplémentaires, sinon l'indication d'une éventuelle anisotropie due à la texture feuilletée de la pâte qui est révélée par un léger décalage des groupements. Cette hypothétique anisotropie a pu être induite par une fabrication des carreaux par extrusion plutôt que par moulage à plat dans un cadre de bois.

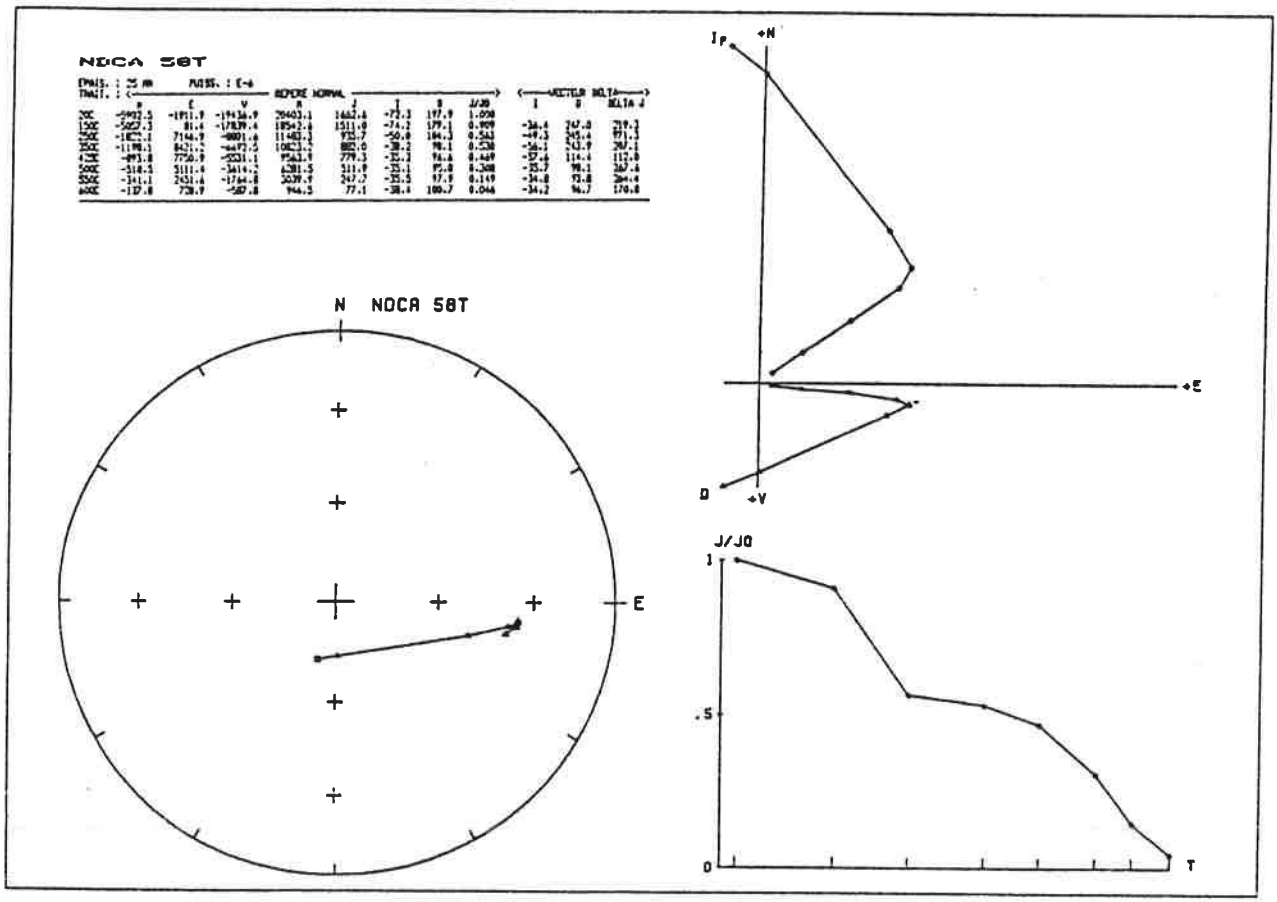



Fig. 7

étudiées par une désaimantation thermique progressive, étape par étape, avec la séquence suivante de températures : 150°C, 250°C, 350°C, 425°C, 500°C, 550°C et 600°C.

Nous donnons en figure 7 un exemple des résultats (obtenus sur l'échantilion 58T). La température atteinte lors de l'incendie par cette tomette est légèrement supérieure à 350°C. C'est en-dessous de cette température que se situent les températures $T_m$ de la plupart des carreaux étudiés et c'est cette valeur qui a été retenue pour le nettoyage thermique du reste du lot. Après ce nettoyage thermique, les statistiques des positions de cuisson donnent 80% de cuisson en position debout pour 20% à plat, ce qui, compte-tenu des dimensions des tomettes (rapport de 1 à 4 entre l'épaisseur et les côtés de ceux-ci),

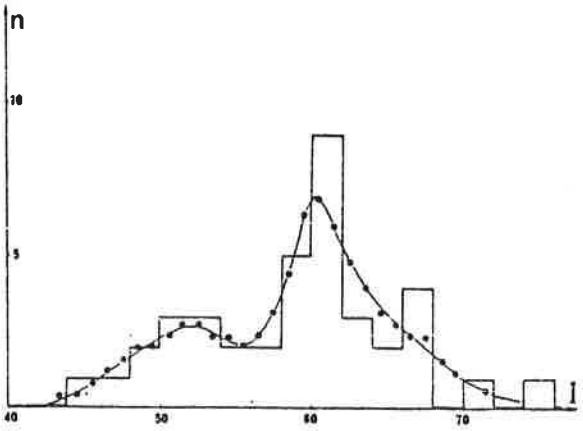



Fig. 8

Compte-tenu de la différence de latitude, c'est une valeur de l'inclinaison normalisée à Paris de 58° qui servira de base à la datation de la fabrication de ces tomettes, soit une date entre 1265 et 1285 ap. J.C. Celle-ci est assez proche, d'une part, de la date conjecturée par les archéologues et, d'autre part, de celle trouvée pour les carreaux à décor estampé du niveau B (sondage réfectoire). Il ne peut donc s'agir d'un "réemploi" dans la bordure du grand dallage du "réfectoire", et dans le sondage"église", c'est le niveau inférieur qui est contemporain de celui-ci. Le niveau supérieur de ce même sondage correspond, en conséquence, à un réemploi des carreaux à décor estampé.

Etudions maintenant l'aimantation parasite créée dans ces carreaux du lot A par la perturbation thermique induite par l'incendie. Les résultats, obtenus sur les 16 carreaux soumis à désaimantation thermique progressive, sont cohérents entre eux dans 12 cas sur 16 (soit 75%). Les inclinaisons indiquent une perturbation subie en position à plat (carrelage en place), avec une valeur de l'inclinaison autour d'une moyenne de 52°1/2 et avec une dispersion assez importante traduisant probablement des écarts par rapport au plan horizontal des carreaux en place. Cette valeur est très faible et ne se rencontre que durant le premier tiers du XIVème siècle.

Cette date est à rapprocher de celle de 1346 ap. J.C., connue comme celle de la destruction avec incendie de l'abbaye par les Anglais. Il est à noter que les carreaux étudiés du dallage du réfectoire sont, eux, exempts de toute perturbation thermique, et n'ont donc pas eu à souffrir de ce même incendie.

Les valeurs mesurées de la déviation se regroupent autour de - 23° et + 65°, ce qui est illustré en figure 9. L'orthogonalité entre ces deux directions découle de la forme carrée des tomettes et leur orientation ramenée au nord géographique est très proche de celles des axes de pose du carrelage relevées par les archéologues. Nous avons donc une double confirmation de l'incendie subi en place par ce carrelage.

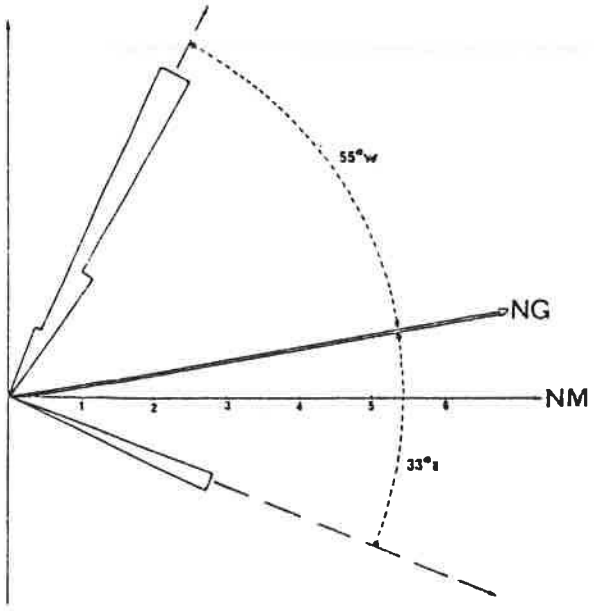



Fig. 9

Pour ce site, nous pouvons résumer la chronologie de la façon suivante. Une reconstruction générale (agrandissement, embellissement ou amélioration du cadre de vie dans l'abbaye) a utilisé des matériaux fabriqués autour de 1275 ap. J.C. Celle-ci s'est matérialisée lors de la fouille par la découverte d'un grand dallage en place dans une pièce identifiée comme le réfectoire, et d'un fragment de carrelage, à un niveau estimé inférieur par les archéologues, mais dont les mesures révèlent la contemporanéité, dans le sondage dit de l'église. Ce dernier a subi vers 1346 ap. J.C. un incendie consécutif à la destruction de l'abbaye par les Anglais. Des carreaux à décor estampé du même type que ceux du réfectoire, mais avec une organisation nettement différente, ont été réutilisés à une date postérieure dans un contexte dont nous ignorons tout puisque l'abbaye, d'après les documents locaux, n'a pas été relevée après sa destruction en 1346 ap. J.C.

## 3. Des données technologiques : Briquetages de Werl (RFA).

Dans l'antiquité préromaine et romaine, les saulniers de l'Europe occidentale ont fréquemment utilisé, pour obtenir le sel par évaporation forcée de saumures, des installations connues sous le nom de briquetages qui sont de différents types. Dans l'un d'eux, la saumure est disposée dans un creuset grossier qui repose sur une plaque d'argile cuite supportée au-dessus du foyer par quatre piliers grossièrement cylindriques avec des extrémités évasées pour asseoir leur stabilité. Nous avions déjà eu l'occasion d'étudier des éléments provenant de telles installations dont les restes avaient été trouvés dans le marais de Dol-de-Bretagne (12). Dans le cas détaillé ici, ce sont 18 fragments de tels piliers, provenant d'une installation fouillée près de Werl (RFA), qui ont été soumis à notre expertise.

Des carottes cylindriques ont été prélevées dans ces fragments selon leur axe (figure 11a), dans le but, d'une part, de vérifier leur verticalité dans l'installation, et, d'autre part, cette vérification étant faite, d'estimer l'inclinaison du CMT à l'époque de leur dernière cuisson.

Les premières mesures ont montré une grande dispersion des valeurs, tant de l'aimantation que de l'inclinaison (figure 10a). Un semblant de groupement des valeurs de cette dernière apparaît bien vers 80°, mais il est étalé sur un intervalle de 18° et ne regroupe que la moitié des échantillons étudiés.

Nous avons donc fait systématiquement pour tous les échantillons une étude de désaimantation thermique progressive avec la séquence de températures : 250°C, 350°C, 450°C, 550°C. Nous avons obtenu ainsi les résultats suivants que nous commentons :

a). 12 fragments sur 18 ont gardé mémoire de leur aimantation initiale. Celle-ci a toujours été acquise, le pilier étant en position verticale. Nous pouvons même préciser, à partir du signe de l'inclinaison mesurée (figure 11b), que nous avons étudié 6 extrémités hautes et 6 extrémités basses, alors que rien dans leur forme ne permet de les distinguer, tout au moins pour l'installation de Werl, alors que, pour celles du marais de Dol, une différence typologique était visible.

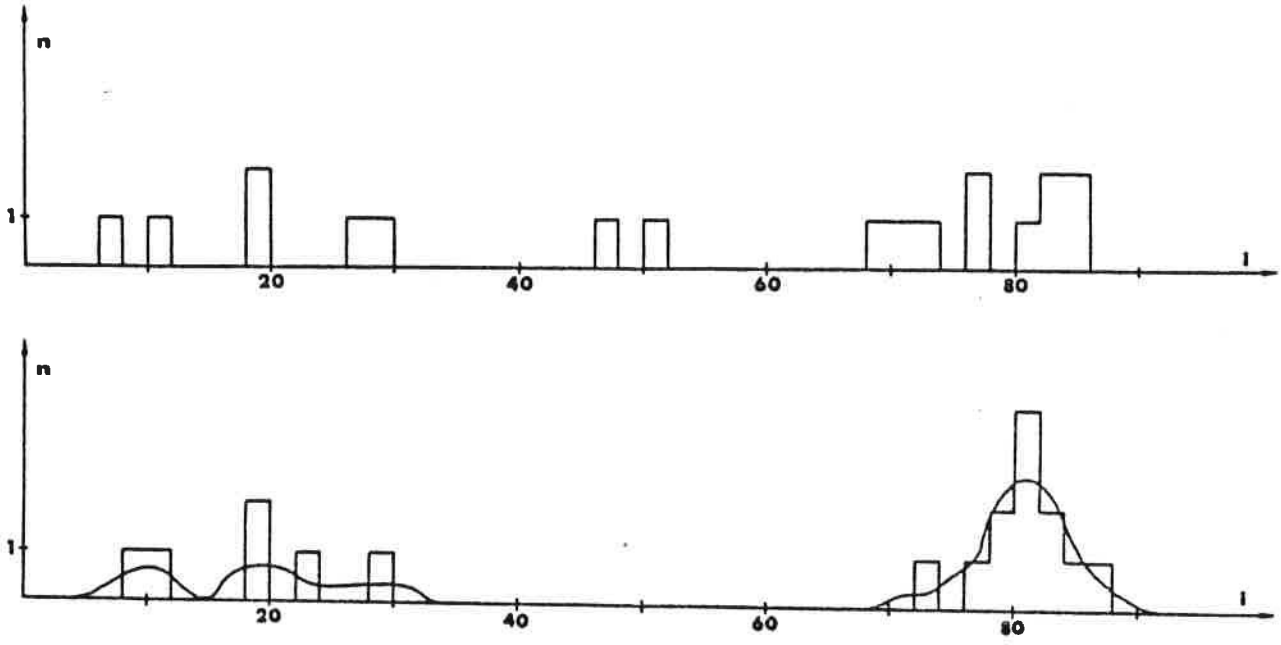



Fig. 10

b). Pour ces 12 fragments, les valeurs mesurées de l'inclinaison de cette aimantation initiale se regroupent autour de 80° (figure 10b). La dispersion est alors à prendre comme un indice d'une distribution de l'axe de ces piliers autour de la verticale, distribution peut-être volontaire afin de faire légèrement arc- boutant.

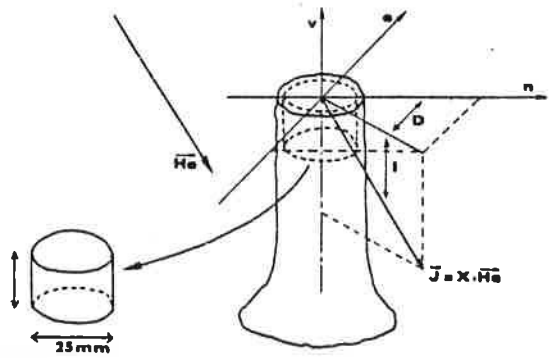



Fig. 11a

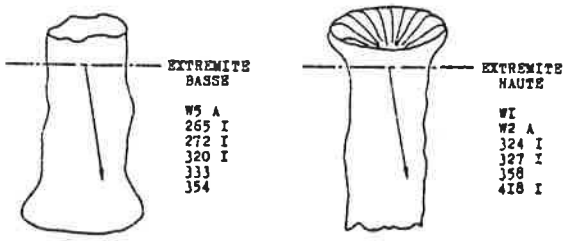



Fig. 11b

c). Pour les 6 fragments restants, la dernière cuisson a été connue en position horizontale. Deux solutions peuvent être envisagées :

- Ces piliers étaient utilisés dans la structure de l'installation dans cette position mais, comme rien dans leur forme ne permet de les distinguer des autres, c'est assez douteux.

- Ces piliers, après la fin du fonctionnement de l'installation de briquetage où ils étaient utilisés verticalement, sont tombés à plat directement dans le foyer où ils ont été totalement désaimantés, puis, au cours du refroidissement en position couchée, ils ont acquis une nouvelle aimantation. Mais alors, leur forme cylindrique exclut toute possibilité de retrouver aujourd'hui l'inclinaison du champ agissant à l'époque.

d). Si nous prenons en considération la valeur de 80° comme référence pour l'inclinaison à Werl lors de la dernière cuisson, après correction de latitude pour ramener la valeur à Paris (-2°1/2) et correction de l'effet de champ démagnétisant pour tenir compte des déformations du champ agissant créées par la présence du matériau assez fortement aimanté (-3°), il nous faudra rechercher la date pour laquelle l'inclinaison à Paris se situait entre 74° et 75°. C'est une valeur un peu trop forte pour l'époque historique, qui n'a été approchée que vers 800 ap. J.C. et 1730 ap. J.C.(Imax = 73°1/2) et d'un peu moins près vers 50 av. J.C. et 250 ap. J.C. où l'inclinaison a pu atteindre 71°. Mais en l'absence de renseignements archéologiques complémentaires permettant de resserrer la fourchette de datation, il nous est impossible de trancher, d'autant que, d'une part, une date protohistorique pour laquelle la courbe de référence n'existe pas encore ne peut être exclue et que, d'autre part, l'argile cuite totalement dépourvue de dégraissant quartzeux se prête mal à une datation par thermoluminescence qui, bien que moins précise, aurait pu permettre de lever cette indétermination. A titre indicatif, les installations de briquetage du marais de Dol ont pu être datées du tout début de notre ère grâce au matériel archéologique associé.

## CONCLUSIONS

Nous venons de donner trois exemples des possibilités offertes par la désaimantation thermique sous champ nul. Pour conclure, le nettoyage ther-

mique permet, par élimination des aimantations parasites acquises lors de la perturbation, de restaurer l'aimantation initiale dont l'orientation est seule à prendre en compte, tant pour rechercher la date de cuisson des matériaux que pour retrouver les données technologiques (principalement la position) ayant présidé à cette dernière cuisson. Dans quelques cas favorables, si les matériaux ont gardé une position cohérente durant la perturbation thermique et le refroidissement qui l'a suivie, il sera possible d'aller plus loin et de retrouver la date de celle-ci.

Tant que nous nous en tiendrons aux seules données véhiculées par l'orientation de l'aimantation, peu d'effets parasites seront susceptibles de venir brouiller l'application de la méthode. Il n'en serait pas de même si les données affectant l'amplitude de cette grandeur devaient être prises en compte (anisotropie, datation par les courbes de variation séculaire de l'amplitude). En effet, les recuits nécessités par la méthode peuvent perturber la nature chimique des oxydes de fer impliqués dans l'acquisition de l'aimantation et les vitesses de refroidissement peuvent avoir une incidence sur l'amplitude des aimantations induites. Il faudrait alors de nombreuses mesures de vérification, permettant d'éliminer ou au moins de tenir compte de ces effets parasites, avant de pouvoir être sûr des résultats.

## BIBLIOGRAPHIE

(1) GOULPEAU L. et LANGOUET L., 1980 - Datations d'apports de tuiles et briques sur des sites gallo-romains à l'aide de mesures archéomagnétiques opérées sur d'abondants échantillonnages, *Revue d'Archéométrie*, 4, p.153-164.

(2) GOULPEAU L., 1984 - Les possibilités de l'archéomagnétisme des matériaux déplacés, in Datation- caractérisation des céramiques anciennes, *PACT*, 10, p.191-202.

(3) GOULPEAU L. et LANGOUET L., 1982 - Problems of interpretation of different I- graphs obtained through an archaeomagnetic study of displaced materials, *The Proceedings of the 22nd Symposium on Archaeometry*, Bradford, p.112-121.

(4) GOULPEAU L., LANGOUET L. et LANOS P., 1984 - Datation archéomagnétique des établissements gallo-romains à partir des matériaux de construction d'argile cuite, *Bull. Soc. Sc. Bretagne*, n°56, p.107-116.

(5) GOULPEAU L., LANGOUET L. et LANOS P., Juin 1985 - Apport de l'archéomagnétisme à l'étude de l'évolution des technologies de fabrication des matériaux de construction en argile cuite, *Actes du Colloque de St-Omer*, à paraître.

(6) LANOS P., 1983 - *Etude méthodologique de l'archéomagnétisme des tuiles et des briques*, Diplôme d'Etudes Approfondies, Rennes.

(7) LANOS P., 1985 - Les effets du champ démagnétisant sur l'aimantation acquise par des matériaux de forme parallèlépipèdique, Colloque français d'Archéométrie, Besançon, *Geophysical Journal*, à paraître.

(8) GOULPEAU L., LANGOUET L., BARDEL J.P. et BUCUR I., 1982 - Possibilités de l'archéomagnétisme dans l'étude d'un four de tuilier, The 21th Symposium for Archaeometry, 1981, *Revue d'Archéométrie*, n°6, p.13-25.

(9) THELLIER E., 1938 - *Sur l'aimantation des terres cuites et ses applications géo-physiques*, Thèse, Paris.

(10) NEEL L., 1949 - Théorie du traînage magnétique des ferromagnétiques en grains fins avec applications aux terres cuites, *Annales de Géophysique*, n°5, p.99-136.

(11) LANGOUET L., BUCUR I. et GOULPEAU L., 1983 - Les problèmes de l'allure de la courbe de variation séculaire du champ magnétique terrestre en France. Nouveaux résultats archéomagnétiques, *Revue d'Archéométrie*, n°7, p.37-43.

(12) LANGOUET L., GOULPEAU L. et FAGUET G., 1982 - Etude archéomagnétique de quelques briquetages du marais de Dol, *Le Rouget de Dol*, n°39, p.1-7.

# IV - L'EFFET DE FORME ou EFFET DU CHAMP DEMAGNETISANT

Les effets du champ démagnétisant interviennent lorsque les matériaux sont à la fois fortement aplatis et fortement aimantés. La direction de l'aimantation acquise n'est alors plus colinéaire au champ agissant, mais tend à s'aligner dans le plan d'aplatissement des matériaux. Les tuiles et les briques de l'époque gallo-romaine sont particulièrement exposées à ce type de perturbation du fait de leurs aplatissements importants (rapports longueur/largeur supérieurs à 10) et de leurs aimantations volumiques dépassant souvent les 5 A/m. L'étude théorique et expérimentale du champ démagnétisant fait l'objet d'une publication qui paraîtra dans la revue *Geophysical Journal of R. A. S.*. La première partie consiste en un rappel de la méthode de datation archéomagnétique appliquée aux matériaux déplacés d'argile cuite. La deuxième partie est consacrée aux aspects théoriques du champ démagnétisant ainsi qu'aux moyens d'en corriger les effets. Enfin, la dernière partie apporte une vérification expérimentale de la validité du modèle de correction proposé, et introduit l'existence d'un autre effet perturbateur important : l'anisotropie d'aimantation thermorémanente.

La correction de l'effet de forme est intégrée au programme de calcul des directions d'aimantation (CALCULID) (*cf.* chapitre II) selon les modalités définies dans l'article. Elle est effectuée compte-tenu de l'aimantation volumique de chaque échantillon et des dimensions relatives moyennes des objets entiers. La susceptibilité d'ATR nécessaire à la correction est déterminée par le rapport entre l'aimantation rémanente mesurée et l'intensité du CMT à l'époque de cuisson. Pour l'époque gallo-romaine, on peut prendre un champ d'intensité moyenne 0,7 Oe (Thellier et Thellier, 1959), soit 55,7 A/m. La correction d'effet de forme est effectuée dans le repère de mesure, avant le calcul des directions d'aimantation pour les trois positions théoriques à plat, de chant et debout.

Dans l'état actuel des programmes informatiques mis au point, les effets du champ démagnétisant peuvent être corrigés à tout moment pour tous les échantillons d'un même lot. Dans ce cas, le fichier "résultats" conserve en mémoire les valeurs des paramètres, dimensions relatives et intensité du champ, ayant servi au calcul.

Par ailleurs, les abaques présentés dans l'article permettent une correction immédiate de l'effet de forme dans le cas de parallélépipèdes en position debout, de dimensions relatives proches de celles des tuiles gallo-romaines (a = 15, b = 11, c = 1) et de susceptibilité 0,1 - 0,2 - 0,3 ou 0,4 SI. L'effet sur la direction est négligeable tant que la déviation mesurée se situe entre -20° et +20° (*cf.* fig. II-1), c'est-à-dire tant que le plan d'aplatissement des matériaux sur tranche est quasi-parallèle au méridien magnétique.

Par contre, l'effet du champ démagnétisant est maximal lorsque le plan d'aplatissement est perpendiculaire au méridien magnétique, c'est-à-dire lorsque la déviation est proche de $\pm$90°. Ainsi, pour une inclinaison du CMT de 65°, l'inclinaison mesurée sera de 67° pour k = 0,1 , 68°5 pour k = 0,2 , 70° pour k = 0,3 et 71°2 pour k = 0,4 SI. Ces résultats se traduisent par une différence systématiquement positive entre l'inclinaison moyenne des agglomérats dont la déviation est proche de 90° et celle des agglomérats dont la déviation est proche de 0°. Le caractère positif de cette différence est effectivement très couramment observé dans les diagrammes de densité.

D'autre part, l'amplitude et le signe de l'écart entre l'inclinaison mesurée et celle du CMT ambiant sont fonction de la position de cuisson des matériaux. Lorsque ces derniers sont cuits debout, le signe est positif et l'amplitude dépend de la déviation. Par contre, lorsqu'ils sont cuits à plat, le signe est négatif et l'amplitude de

l'effet sur l'inclinaison est maximal, quelle que soit la déviation. Ces perturbations différentielles se traduisent dans les diagrammes archéomagnétiques par des agglomérats d'inclinaisons moyennes différentes selon les positions de cuisson et les déviations.

En l'absence des autres effets perturbateurs comme l'anisotropie d'ATR, la pente et le pendage, l'application de la correction d'effet de forme doit en principe ramener les inclinaisons moyennes des différents agglomérats autour d'une même valeur moyenne. L'étude expérimentale présentée en fin de l'article montre qu'une telle amélioration des résultats est effectivement possible.

En conclusion, les effets du champ démagnétisant sont loin d'être négligeables sur les matériaux de construction aplatis dont l'aimantation volumique est supérieure à 5 A/m. La correction de ces effets est donc essentielle dans la recherche de l'inclinaison moyenne à prendre en compte pour la datation. Il existe cependant un seul cas où cette correction paraît facultative. C'est celui où les matériaux sont cuits sur la tranche, le plan d'aplatissement étant confondu avec le méridien magnétique. Cette disposition est d'ailleurs courante avec les tuiles et les briques de l'époque gallo-romaine du fait que les parois des fours étaient très souvent orientées parallèlement et perpendiculairement au N.M. de l'époque (*cf.* chapitre XIII). Dans tous les autres cas, la correction des perturbations provoquées par un éventuel effet de forme est indispensable pour l'obtention de datations archéomagnétiques fiables.

# THE EFFECTS OF DEMAGNETIZING FIELDS ON THERMOREMANENT MAGNETIZATION ACQUIRED BY PARALLEL SIDED BAKED CLAY BLOCKS

Philippe LANOS

*Laboratoire d'Archéométrie*
*Université de Rennes I*

## SUMMARY

The archaeomagnetic study of displaced objects allows dating of homogeneous groups of tiles or bricks generally recovered as fragments during archaeological excavations or fieldwalking surveys. Its principle is based on the property of baked clay to acquire, during cooling after firing , a thermoremanent magnetization (TRM) parallel to the terrestrial magnetic field (TMF) present at the time and place of cooling. In taking together certain hypotheses verified a posteriori on the positions of the objects during firing, measurement of the direction of the TRM permits the inclination of the TMF to be obtained, and thus the date of firing through the use of reference curves of secular variation.

However, theoretical study of the properties of the magnetic induction field shows that this parallelism may be disturbed by the action of a demagnetizing field, known as the magnetic refraction or shape effect, in the case of materials which are strongly magnetized and of unusually flat shape. Theoretical calculations made for parallelepipeds of various dimensions and susceptibility placed in a uniform magnetic field, allow quantification of the effects of this demagnetizing field and the construction of charts for correcting the effect. Thus, for a parallelepiped of relative dimensions of thickness/length 1/15 and width/length 11/15, placed upright perpendicular to the magnetic meridian of an exterior uniform field of 65° inclination, the theoritical difference at the center of the object between the inclination of the TRM and that of the external field would be +3° for a susceptibility of 0.2 SI, and +6° for a susceptibility of 0.4 SI .

Some examples are given for groups of Romano-Gallic tiles, so-called *Tegulae*. As it happens, this material presents very high volumic susceptibilities which reach and sometimes exceed 0.2 SI, in which case producing important disturbances in the direction of the TRM. Using the values of inclination and deviation measured in this material it is possible to obtain the initial direction of the TMF at the time of firing. The correction model proposed thus allows an appreciable improvement of the precision and reliability of dates from displaced archaeomagnetic objects.

## INTRODUCTION

Baked clay structures which have remained undisturbed since their last heating constitute an important application of archaeomagnetic methods. In particular, undisturbed structures whose date has been determined by other methods (most often archaeological or historical) may serve to reconstitute the variation of the components of the TMF. In France, this work was begun by Thellier (1938, 1959, 1966, 1971, 1981) and is continued at the present by the Laboratoire de Géomagnétisme at Saint-Maur and the Laboratoire d'Archéométrie at Rennes (Langouet, Bucur and Goulpeau, 1983) with the object of establishing the curves of variation of inclination and declination for historical periods .

Alongside the study of in situ structures, that of displaced objects has also been developed.. Thellier (1938) had already studied the inclination of the TRM of bricks presumed to have been fired in an horizontal, upright, or on-edge position on the statistically horizontal floors of kilns. The archaeomagnetic use of baked clay construction materials has been followed and developed in particular at the Laboratoire d'Archéométrie at Rennes (Goulpeau and Langouet, 1980, 1982, 1984). Dating of homogeneous groups of bricks or tiles recovered by archaeologists during excavations or fieldwalking surveys allows a study of the construction phases of buildings during a given period and furnishes new information on the production of these materials.

## PREPARATION OF SAMPLES AND MEASUREMENT OF THE TRM

Contrary to in situ structures, construction materials such as tiles, bricks or paving tiles have been removed from their site of manufacture to the building site. This displacement of course means the definitive loss of the geographic coordinates (North, East, Vertical) in which they were fired.

However, it is reasonable to assume that a rectilinear object would lie preferentially on one of its flat sides during firing. Given that the floor of the kiln is statistically smooth and horizontal, the horizontal plane may be conserved by one of the three planes which constitute the basic trihedral system of the object (Fig. 1).

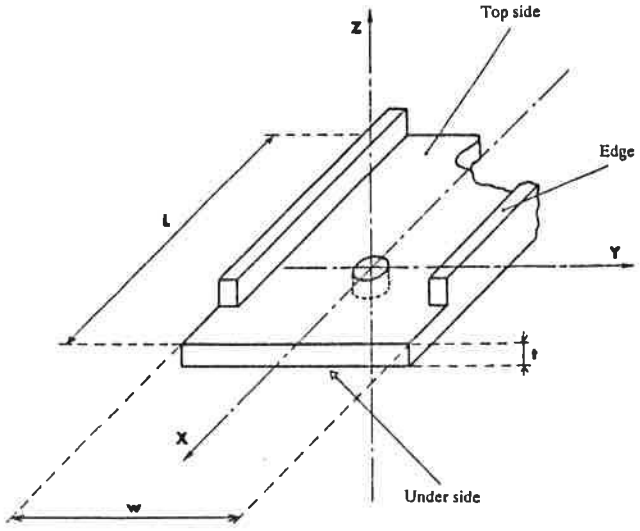



**Fig. 1.** Fragment of tegula in horizontal position showing core and coordinate system (oxyz). L represents length, w width and t thickness.

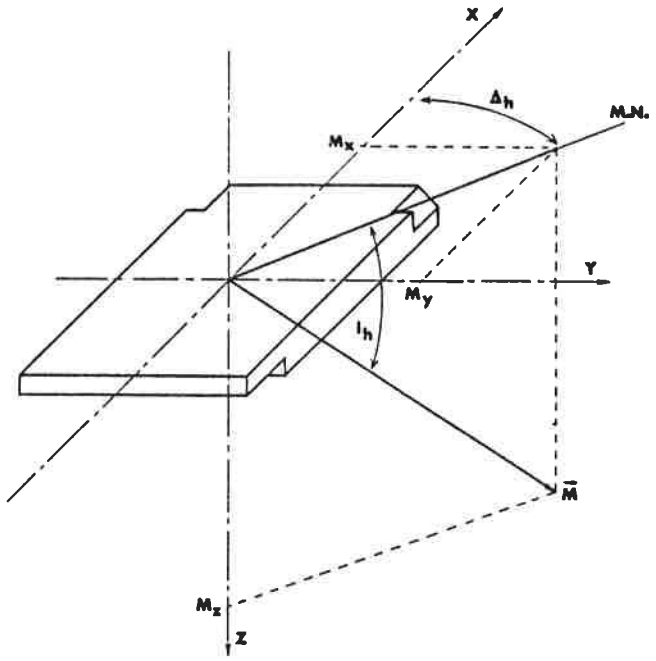
In practice, the direction of the TRM is defined in a trihedral system (0xyz) associated with the fragment of material *a priori* assumed to have been fired in a horizontal position and having at least one plane surface (plane 0xy) and one edge (x axis) or one side (y axis). Cores of 25 mm diameter and between 17 and 25 mm thickness are taken and the direction of the magnetization is measured using a Schonstedt spinner magnetometer at the Laboratoire de Géophysique of the University of Rennes.

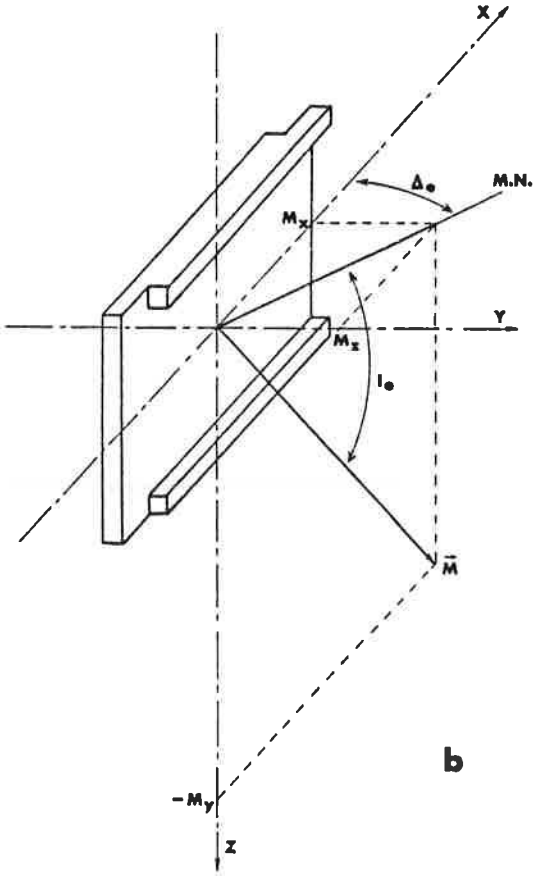
## DETERMINATION OF FIRING POSITION

The trigonometric equations

$$\sin Ie = - \cos Ih \cdot \sin \Delta h \qquad \sin I_u = \cos Ih \cdot \cos \Delta h$$

$$tg\ \Delta e = tg\ Ih/\cos \Delta h \qquad tg\ \Delta_u = tg\ Ih/\sin \Delta h$$



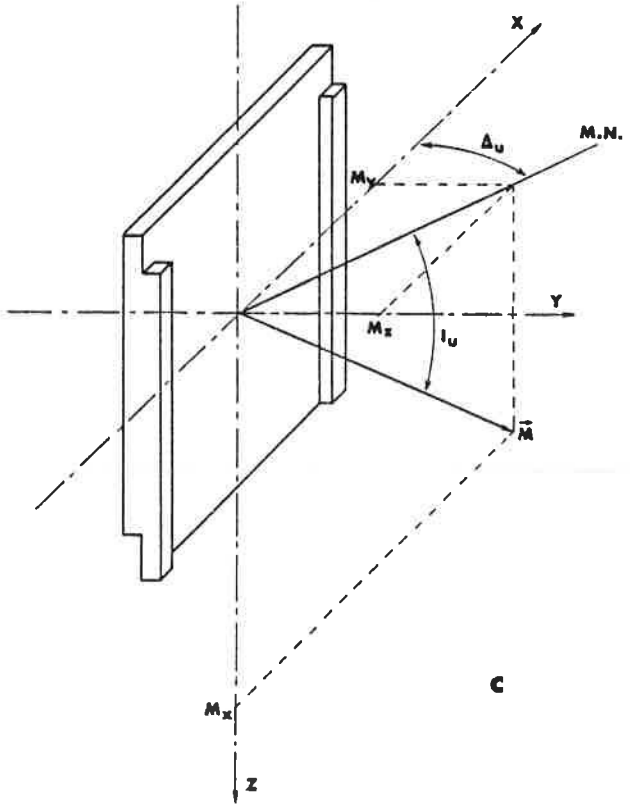




**Fig. 2a, b and c.** Representation of the angles of inclination and deviation in the three positions. a) flat. b) on side. c) upright.

allow the direction $(I_e, \Delta_e)$ for firing in on-edge position, $(I_u, \Delta_u)$ in upright position to be obtained from the inclination and deviation $(I_h, \Delta_h)$ deduced from the measured components $M_x$, $M_y$ and $M_z$ (Fig. 2a). The secular variation of the inclination in France having varied between 50° and 75° during the historical period (Thellier, 1981 ; Langouet, Bucur and Goulpeau, 1983), we may select from the three possible positions that giving an inclination within an enlarged interval 40° to 80° : the solution is to all intents and purposes unequivocal.

The deviation represents the angle between the projection of the magnetization vector in the plane (0xy) and the x axis. Since the object is displaced, the declination between this magnetic north direction and geographic north remains unknown. The deviation, lying between -90° and +90°, is determined such that the magnetization measured is effectively directed downwards with respect to the horizontal plane (positive inclination in the coordinate system (oxyz) shown on Fig. 2), in accordance with the general orientation of the TMF in our region. Finally, it is possible to find which of the sides, above or below, was directed towards magnetic north. These last details are used in determining the manufacture.

## APPLICATION OF MEASUREMENTS

The statistical treatment of the measurements in general requires at least 100 values of the pair $(I, \Delta)$ from 100 different fragments. This has been found to be necessary in order to obtain the signal from a background noise due amongst other things to the imperfection of the parallelepiped form of the material, unevenness of kiln floors, and partial or total deviation of the firing positions from the theoretical horizontal, on-edge, and upright positions.

The inclination-deviation pairs $(I, \Delta)$ of the retained positions are represented on Schmidt nets where the inclination varies from 40° to 80° and the deviations represent the angle between the x axes of the materials and the magnetic north (MN) of the period.

These diagrams show the pairs $(I, \Delta)$ each representing a unit vector, distributed over the surface of a part of the sphere. An iso-density chart of the points is obtained using the sliding window technique. This consists of sweeping the sphere along a regular grid with a cone of given aperture. The vectors whose direction is situated in the cone are counted for each point in the grid. The irregular distribution of points is transformed into a regular grid of density values, such that agglomerations appear. From these diagrams the mean values of inclination are obtained which allow dating. The different values of the deviation correspond to the directions in which the objects were placed with respect to magnetic north at the time of firing.

In the case of a rectangular kiln, a common form during the Romano-Gallic period (McWhirr, 1979, Le Ny, 1986), the tiles or bricks were arranged mostly upright parallel to the two sides of the kiln. The flat planes of the objects were thus statistically distributed about two perpendicular directions, whence the two complementary agglomerations of mean deviation $\Delta$ and $\Delta'$ in the diagram $(I, \Delta)$.

## APPLICATION EXAMPLE : LE MANS - CHAPPE

As an illustration, we may cite the results of an archaeomagnetic study (Goulpeau, 1981) concerned with the dating of a group of 600 tiles from the baths of a Romano-Gallic building excavated in the courtyard of the Chappe School at Le Mans (France). Ninety-two percent of the tiles had been fired in the upright position, which is consonant with results already obtained from a number of other Romano-Gallic sites. Examination of the Schmidt diagrams in Fig. 3 and 4 reveals two mean values of inclination $\overline{I}_1 = 60°$ and $\overline{I}_2 = 66°$. After a slight correction for latitude of +0.5° to normalize for Paris, and taking into account data from the excavation (pottery, coins), the date obtained was A.D. 45 $\pm$15 years for $\overline{I}_1$ and A.D. 175 $\pm$15 years for $\overline{I}_2$.

The existence at first approximation of a single deviation pair $\overline{\Delta} = +12°$ and $\overline{\Delta}' = -85°$ for the two inclinations $\overline{I}_1$ and $\overline{I}_2$, added to a particularly regular arrangement of the tiles (Fig. 4b) would lead us to suppose that the tiles had been manufactured in the same kiln. This is not however sufficient proof since these nearly North-South or more probably East-West orientations of the principal axis of the kilns is very common in

western France (Le Ny, 1986). It is more likely here that there are two groups of tiles from two different kilns which were used at different dates. The similarity in the arrangement of tiles in these two kilns would be simply coincidence. It does however underline the great regularity with which Romano-Gallic tilemakers stocked their kilns.

## THE SHAPE EFFECT : OUTLINE OF THE PROBLEM

The archaeomagnetic dating method depends on the colinearity between the TRM measured and the TMF which was present at its creation. Now this colinearity may be modified, sometimes to a considerable extent, by the form effect, otherwise known as the effect of the demagnetizing field or anisotropy of form or magnetic refraction. The form effect is linked both with the form and the magnetic susceptibility of the object. Measurements made on Romano-Gallic tiles and bricks have allowed us to conclude that there exists a very strong volumic magnetization often reaching 2 to 20 A/m which may be behind important demagnetizing effects.

The calculation of the demagnetizing field was made for an ellipsoid by Osborn (1945) and Stoner (1945). Proof of magnetic refraction in baked clay structures has been advanced by Aitken and Hawley (1971) with regard to kilns studied by Harold (1960) and Weaver (1961, 1962). More recently, the calculation of the demagnetizing field for finite hollow cylinders was applied by Schurr, Becker and Soffel (1984) to the correction of magnetization direction measured on samples taken in the floor and walls of kilns and hearths in South Germany. The case of parallelepiped objects was studied by Lanos (1983). Calculation for all interior points of a finite parallelepiped has allowed evaluation of the effect of form on the direction of the TRM acquired by materials such as tiles and bricks.

## THEORY OF DEMAGNETIZING FIELD

The theory of the demagnetizing field is founded on the hypothesis that the magnetization at any point in the body is colinear with the total field present at that point. The body is therefore presumed to be magnetically isotropic. Taking a magnetic field $H_o$ which is presumed uniform and constant in the space surrounding a parallelepiped object, this field $H_o$ induces in the parallelepiped a uniform magnetization $M_o$ which is colinear and in the same direction such that $M_o = k H_o$ with $k = k_{TRM} = Q k_i$

Q is the Koenigsberger ratio and $k_i$ is the induced volumic susceptibility. k is a scalar representing the intrinsic susceptibility of thermoremanent magnetization for a magnetically isotropic material. The magnetization $M_o$ of the material creates around and within the material a magnetic field $H_1$ which is superimposed on $H_o$ such that $H_1 = F(M_o)$

This field $H_1$, which is no longer uniform, is the cause of the magnetization $M_1$ such that $M_1 = k H_1$. Just as $H_o$ is at the origin of $J_o$ and $H_1$ at that of $M_1$, so the magnetization $M_1$ creates in its turn a field $H_2$ which is at the origin of a new magnetization $M_2$ such that $M_2 = k H_2$. This process is repeated until equilibrium is reached, giving the final expression of the resulting magnetization :

$$\vec{M}_t = \vec{M}_o + \vec{M}_1 + \vec{M}_2 + \ldots = k(\vec{H}_o + \vec{H}_1 + \vec{H}_2 + \ldots) = k \cdot \vec{H}_t \qquad (I)$$

with $$\vec{H}_i = F(\vec{M}_{i-1}) = -\frac{1}{4\pi} \vec{\text{grad}} \left| \iint_S \frac{\vec{M}_{i-1} \cdot \vec{n}}{r} dS - \iiint_V \frac{\text{div}(\vec{M}_{i-1})}{r} dv \right| \qquad (II)$$

for $i \geq 1$

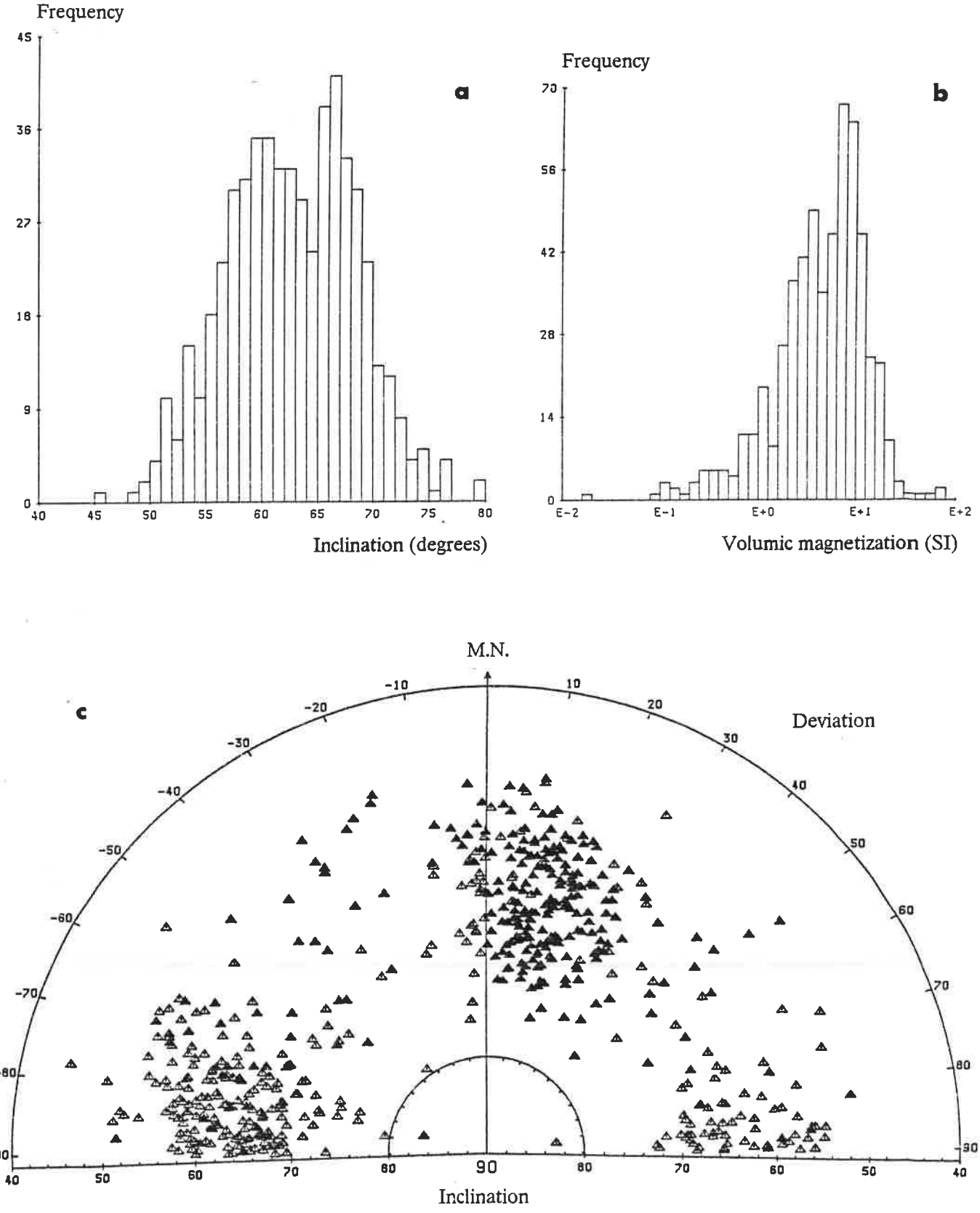
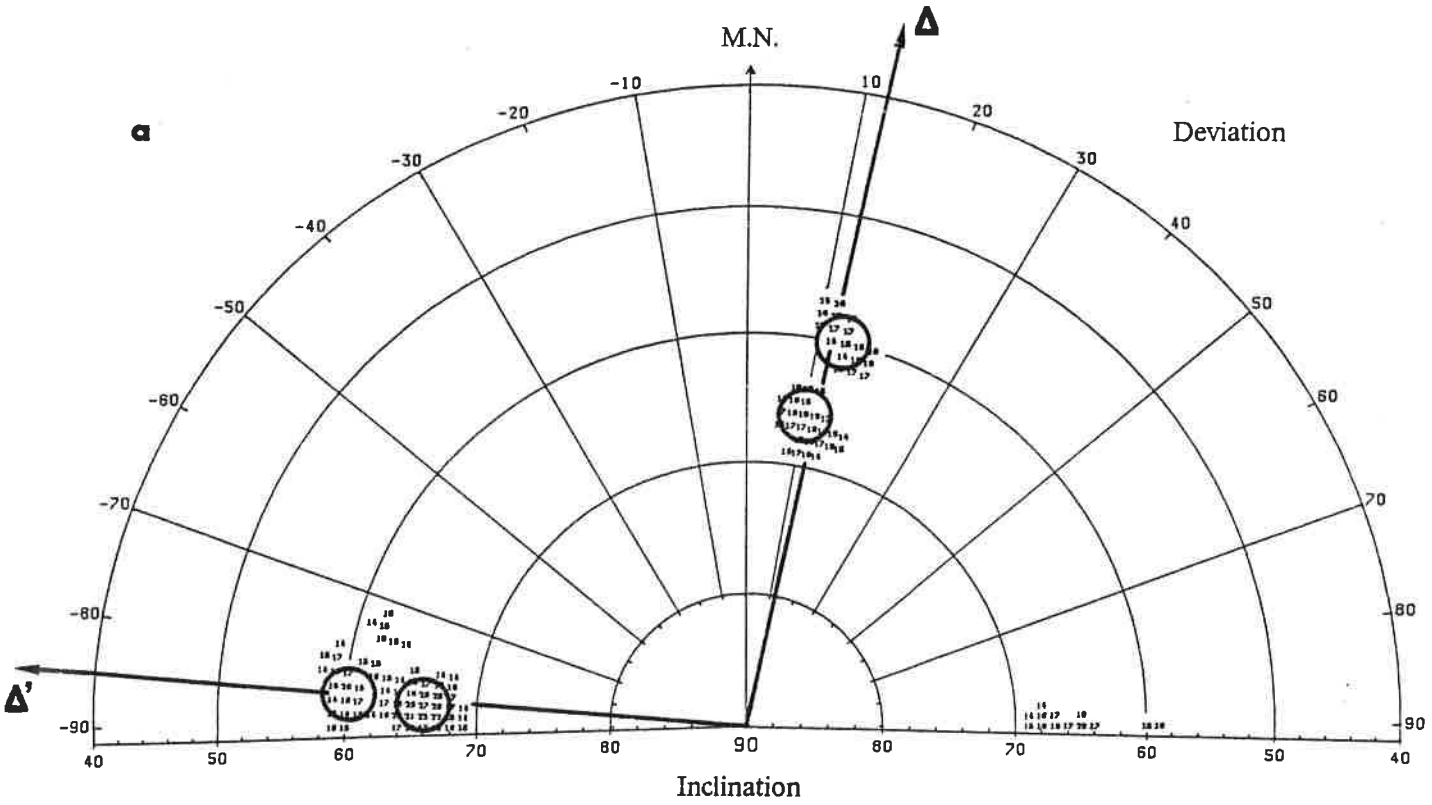
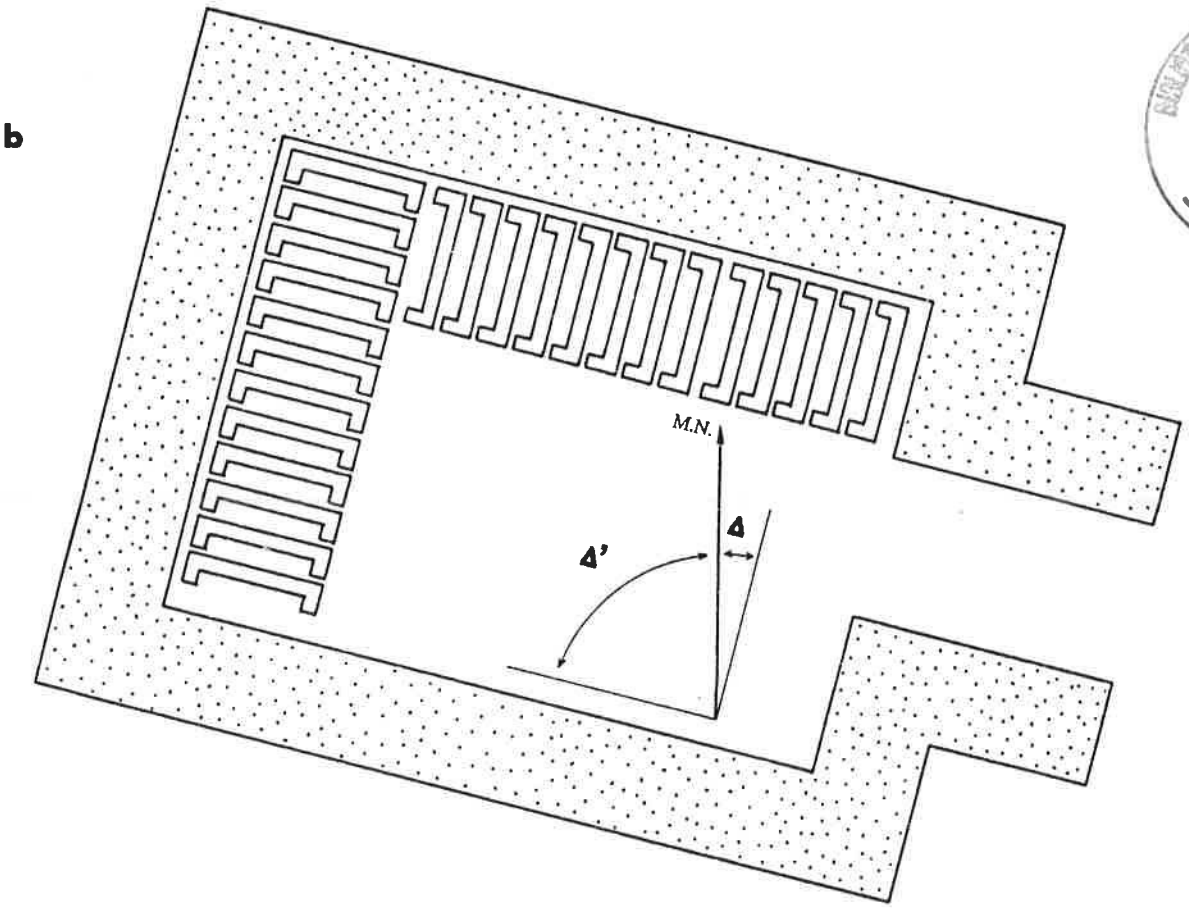



**Fig. 3a, b and c.** Le Mans , Chappe. a) histogram of inclinations for tiles fired in upright position. b) histogram of volumic magnetizations (SI). c) equal-area (Schmidt net) showing results obtained from tiles fired upright. Solid triangles : top side oriented towards magnetic north ; open triangles : under side oriented towards magnetic north.




SCIENCES
RENNES

**Fig. 4a. and b.** Le Mans , Chappe . **a)** density on Schmidt net from points shown in Fig. 3c, with a cone of 4° (±2°) aperture. The circles indicates the area of maximum density values. **b)** schematic representation of the orientation of kiln and positions of tiles obtained from Fig. 3c and 4a.

This resultant magnetization $M_t$ is therefore a sum of magnetizations created by fields of decreasing intensity which within the material are alternatively magnetizing and demagnetizing. The term :

$$\vec{H}_1 = -\frac{1}{4\pi}\,\vec{\text{grad}}\left[\iint_S \frac{\vec{M}_o \cdot \vec{n}}{r}\,dS\right]$$

may be resolved analytically at any point x, y, z in space when the object is of parallelepiped form (Lanos, 1983). Let

$$\vec{H}_1 = F(\vec{M}_o) = [N_1] \cdot \vec{M}_o$$

with
$$[N_1] = \begin{bmatrix} N_{1xx} & N_{1xy} & N_{1xz} \\ N_{1yx} & N_{1yy} & N_{1yz} \\ N_{1zx} & N_{1zy} & N_{1zz} \end{bmatrix}$$

$[N_1]$ is dependant on the spatial coordinates x, y, z and the dimensions a, b, c of the parallelepiped. In the material, the tensor $[N_1]$ is said to be demagnetizing because it acts such that the magnetization $M_1$ is opposed to the magnetization $M_o$. The other terms of the series $H_2$, $H_3$, etc. are very complex and therefore difficult to evaluate. A means of approaching the exact solution is to use the induction expression. In SI, the magnetic induction field is expressed by the formulae :

in vacuum : $\vec{B}_t = \mu_o \cdot \vec{H}_t$

in matter : $\vec{B}_t = \mu_o \cdot (\vec{H}_t + \vec{M}_t)$

The induction $B_t$ is colinear with the magnetization $M_t$, thus :

$$\vec{B}_t = \mu_o \cdot \frac{1+k}{k} \cdot \vec{M}_t$$

The effect of form on the lines of flux of the induction field $B_t$ is identical to that on the lines of the magnetizing field $M_t$. Unfortunately, the exact calculation of $B_t$ remains lied to the knowledge of the terms $M_2$, $H_2$, etc. It is nonetheless possible to evaluate the distortion of the field lines by the formula for the maximum effect of form :

$$\vec{B}_{t\ max} = \mu_o\ (\vec{M}_o + \vec{H}_o + \vec{H}_1) \qquad \text{(III)}$$

and by the formula for the minimum effect of form :

$$\vec{B}_{t\ min} = \mu_o\ (\vec{M}_o + \vec{M}_1 + \vec{H}_o + \vec{H}_1) \qquad \text{(IV)}$$

Figure 6 shows the minimum and maximum values between which the form effect achieves equilibrium for different values of the parameters susceptibility k, dimensions a, b, c, and direction of the external field, defined in Fig. 5. It is thus possible to appreciate the error resulting from use of the formulae (III) or (IV). However this error is reduced by at least a degree when the susceptibility becomes inferior to 0.4 SI. This value is rarely exceeded by the susceptibilities measured on Romano-Gallic material. This is why $B_{t\ min}$ alone will be used during the remainder of this article for evaluation of form effect.

## APPARENT AND INTRINSIC SUSCEPTIBILITY

The expression of the apparent susceptibility $k_a$ as a function of the intrinsic susceptibility k depends on the total acting field $H_t$.

$$\vec{M}_t = [k_a] \cdot \vec{H}_o = k \cdot \vec{H}_t$$

$$\vec{M}_t = k \cdot \vec{H}_o + k^2 F(\vec{H}_o) + k^3 F(F(\vec{H}_o)) + \ldots$$

At the centre of a parallelepiped, of a sphere, ellipsoid, or any other object of central symmetry, in x, y, z = 0 we have :

$$[k_a] = k + [N_1] \cdot k^2 + [N_2] \cdot k^3 + \ldots \qquad (V)$$

with $$[N_1] = \begin{bmatrix} N_{1x} & 0 & 0 \\ 0 & N_{1y} & 0 \\ 0 & 0 & N_{1z} \end{bmatrix}$$

When $k \ll 1$, then $k_a \sim k$.

When $k \gg 1$, the series (V) may appear to diverge, even though the magnetizing and demagnetizing terms $[N_2]$, $[N_3]$, etc. diminish in absolute value. Indeed, in ferromagnetic bodies, the susceptibility k may attain extremely high values of the order of 100, 1000, or even 10000 and more for pure iron and certain alloys such as permalloy. In fact, this susceptibility varies in function of the applied field H such that the series (V) converges towards a finite limit.

The expression of $B_{t\,min}$ in (III) comes back to pose $M_t = M_o$ and $H_t = H_o + H_1$. At the centre of an object of central symmetry we have :

$$\vec{M}_t = [k_a] \cdot \vec{H}_o = k(\vec{H}_o + N_{1i} . \vec{M}_o)$$

Since $M_t = M_o = [k_a]\ H_o$, then :

$$[k_{ai}]_{min} = \frac{k}{1 - N_{1i} . k} \qquad i : x, y, z \qquad (VI)$$

The same reasoning in the case of $B_{t\,max}$ in (IV) brings us to :

$$[k_{ai}]_{max} = k + N_{1i} . k^2 \qquad i : x, y, z \qquad (VII)$$

The formula (VI) is practically equivalent to that for the minimum effect given in (III), whilst the formula (VII) describes exactly the same effect as that in (IV). In all cases, and particularly in the case of a calculation at any point of a parallelepiped, it is more convenient to evaluate the form effect from the induction expressions.

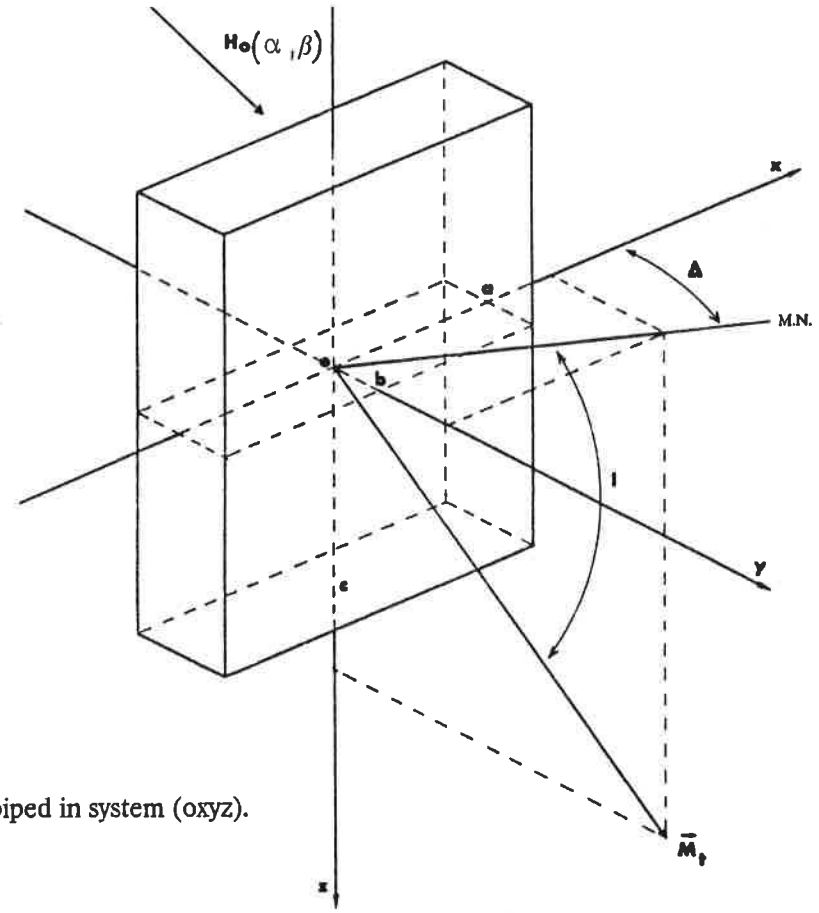



Fig. 5. Upright parallelepiped in system (oxyz).

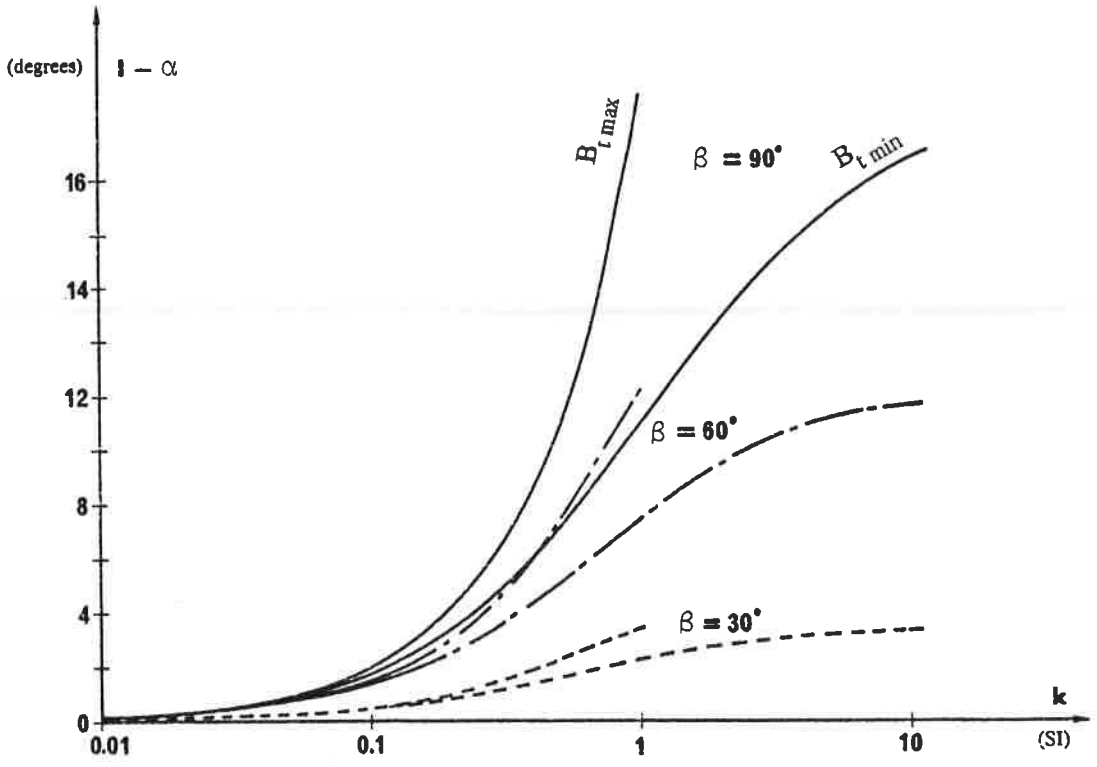



Fig. 6. Maximum and minimum effects of form on inclination I at centre of parallelepiped of dimensions a = 11, b = 1, c = 15, with $\alpha$ =65°.

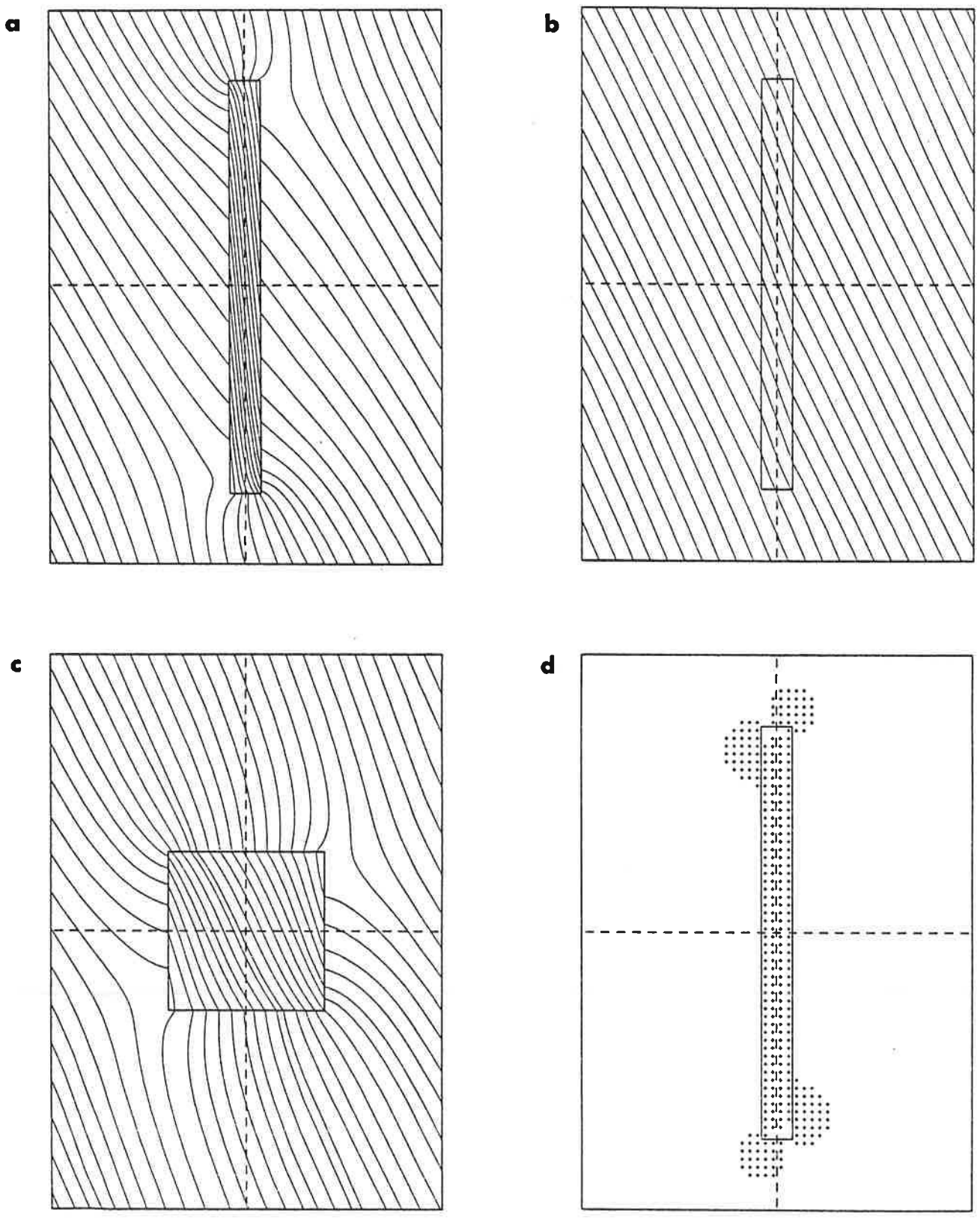



**Fig. 7a, b , c and d.** Examples of induction field line deformation in a parallelepiped seen in section x = 0 for $\alpha = 65^\circ$ and $\beta = 90^\circ$. **a)** k = 5, a = 10, b = 1, c = 13. **b)** k = 0.3, a = 10, b = 1, c = 13. **c)** k = 3, a = 5, b = 5, c = 5. **d)** k = 0.3, a = 10, b = 1, c = 13. Crosses show limit of space where the absolute value of form effect is greater than 1.5°.

## THE DEMAGNETIZING FIELD IN A PARALLELEPIPED

The analytical resolution of the integral given in (III) has allowed us to express the components of the field $H_1$ at all the exterior or interior points of a parallelepiped of finite dimensions a, b, c, susceptibility k and placed in an external constant field $H_o$ whose direction is defined by the angles $\alpha$ and $\beta$ . Computerized applications allow the representation, with the use of a plotter, of the deformation of the induction field lines in and around various parallelepipeds for different values of susceptibility. Four significant examples represent the field lines of the induction $B_{t\ min}$ according to a median plane perpendicular to the (xy) plane of the parallelepiped ( $\beta = 90°$) and according to an inclination of the external field $H_o$ of 65° (Fig. 5).

Figure 7a shows a parallelepiped of relative dimensions comparable to those of Romano-Gallic tiles. The susceptibility is equal to 5 Si. This value has never been encountered in our measurements but allows us to clearly show the distortion of the field lines within and around the material. The differences between $B_{t\ min}$ and $H_o$ attain 19° at the centre. The field lines in the material tend to align themselves according to the flat plane of the object.

Figure 7b presents the same effect for a susceptibility of 0.3 SI, value reached by strongly magnetized Romano-Gallic materials. We observe differences at the centre of the order of 5°.

Figure 7c shows a cube of susceptibility 3 SI. The difference at the centre is reduced to a few degrees only, despite the very strong magnetization. The distortion effect becomes negligible when the relations of the dimensions tend towards unity.

Figure 7d is in connection with Fig. 7b. The + symbol indicates the area where the difference between $B_{t\ min}$ and $H_o$ is greater than 1.5 in absolute terms. We may note an important reduction of the distortion of the field lines when an external distance of the order of the thickness of the object is attained.

These examples show the quasi uniformity of the field lines in the material. In practice, sample coring is carried out near the centre of the objects, precisely in the zone where the form effect is reasonably approximated by the simple formulae giving the demagnetizing field $H_1$ at the centre of the parallelepiped. In any case, the precision brought by a correction of form effect taking into account the position of the core in the object would not be justified bearing in mind the diverse magnetic heterogeneities which are observed in baked clay materials.

## EVALUATION OF THE PARAMETERS

The form effect correction requires determination of the following parameters : dimensions a, b, c, stocking mode, and susceptibility k.

DIMENSIONS : The mean dimensions of the Romano-Gallic tiles recorded by Goulpeau and Langouet (1980) for western France are :

$$34 \leqslant L \leqslant 40 \text{ cm}$$
$$29 \leqslant w \leqslant 30 \text{ cm}$$
$$2.5 \leqslant t \leqslant 3 \text{ cm}$$

Bringing these values to a thickness of unity, the relative mean dimensions of the Romano-Gallic tiles are, in the system of Fig. 5 :

$$a = 11 \qquad b = 1 \qquad c = 15$$

Figure 8 shows the slight variation of the form effect as a function of the degree of flatness of the object as soon as the relation a/b (a = c) attains 10. An error of one unit in the evaluation of the parameters a, b, c thus results in only a small error in the evaluation of the form effect.

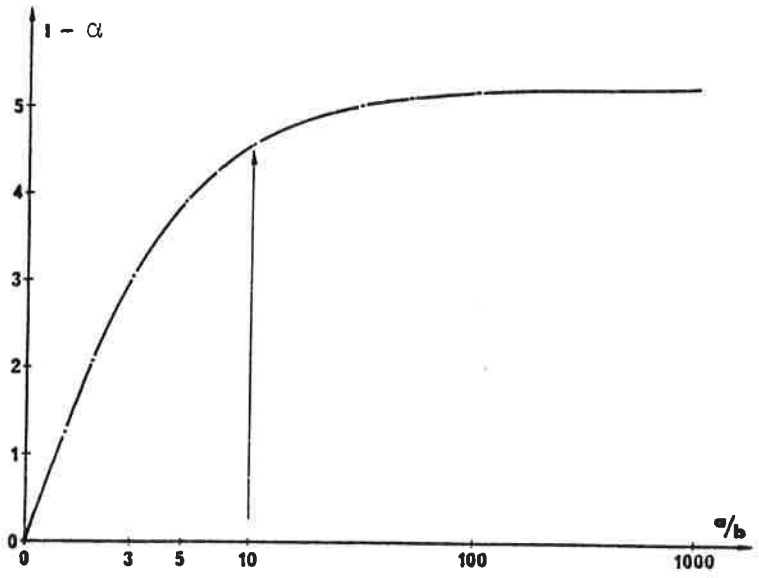



Fig. 8. Variation of the difference $(I-\alpha)$ between inclination of the TRM and that of the field outside, at the centre of a parallelepiped of susceptibility k = 0.3 SI placed upright in coordinate system of Fig. 5 with $\alpha = 65°$ and $\beta = 90°$.

STOCKING MODE : In the hypothesis where the materials would be arranged one against another in the kiln, the shape effect should be minimized. In reality, stocking required some ventilation between the materials to improve the airflow. Furthermore, the example of Le Mans cited above (fig. 4b), as well as other studies, shows that very often the tiles were stocked so that the edges had the same orientation for a given direction. The separation which naturally arose between the tiles thus allows the existence of a shape effect and diminishes the interaction of the magnetic fields from one tile to another.

SUSCEPTIBILITY : The susceptibility $k_a$ is evaluated from the relation $k_a = M_t / H_o$ where $M_t = Q\, M_i$ is the intensity of thermoremanent magnetization per unit volume measured in SI at room temperature. According to the Hopkinson effect, $M_i$ increases with temperature by a factor which does not exceed 1.5 to 3 (Collinson, 1983).

$H_o$ is the intensity of the TMF present at the time of firing. For the Romano-Gallic period, we have taken for $H_o$ a mean value of 60 micro T (Thellier, 1959), or 47.7 A/m.

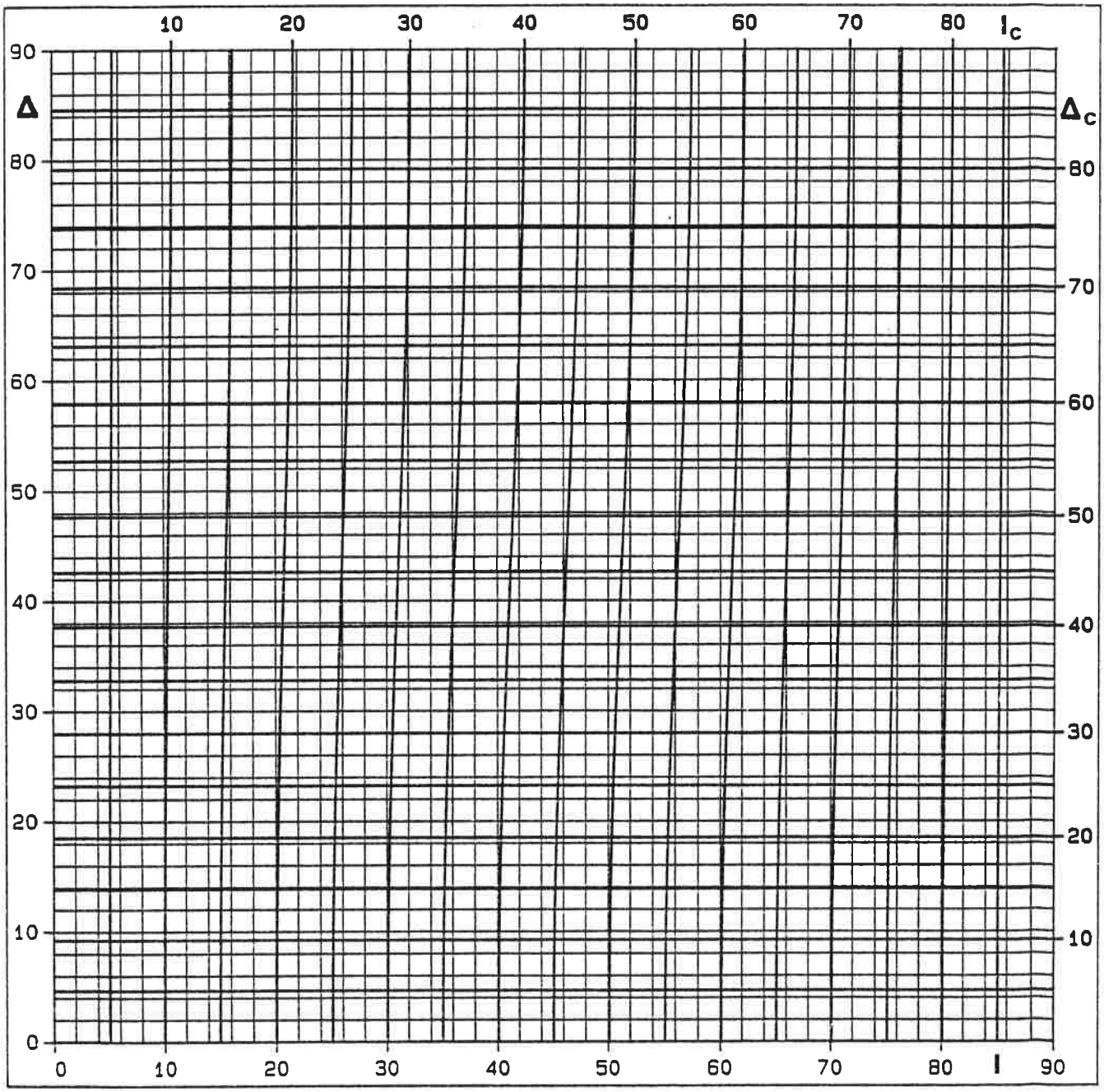
The firing atmosphere conditions are unknown. In particular, Schurr, Becker and Soffel (1984) have shown that susceptibility could increase of a factor 2 to 20 by heating in a reducing atmosphere. But archaeological observations lead us towards a rather oxydizing firing of the Romano-Gallic materials. For lack of direct data, a first evaluation of susceptibility is given by the ratio : $k_a = M_t / 47.7$

From the relation :

$$k_a^2 = k_{ax}^2 \cdot \cos^2\alpha \cdot \cos^2\beta + k_{ay}^2 \cdot \cos^2\alpha \cdot \sin^2\beta + k_{az}^2 \cdot \sin^2\alpha$$

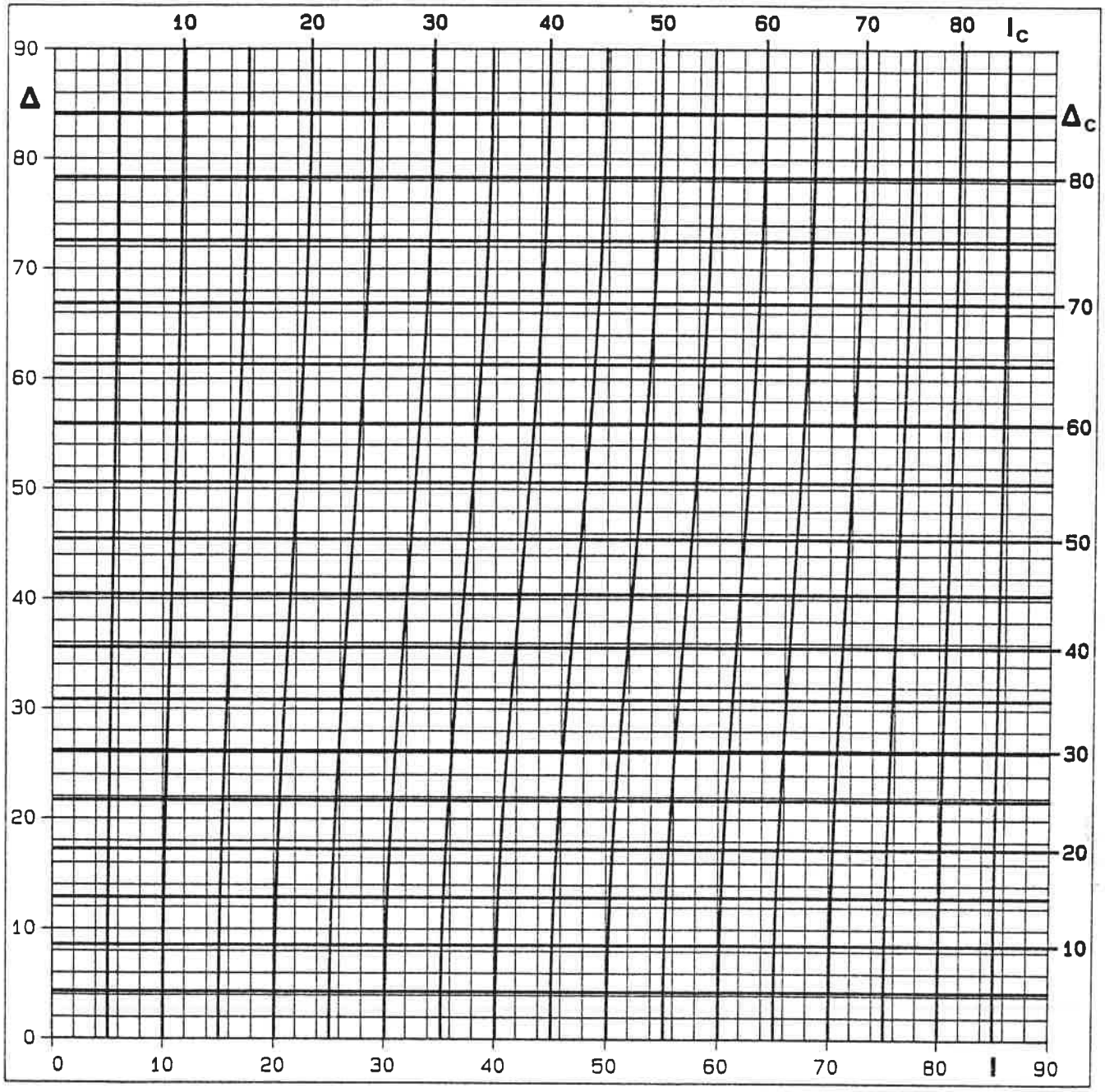
we obtain : $k_a \leqslant k \leqslant 1.2\, k_a$

for a TMF inclination lying between 50° and 80°, for all $\beta$ values, and for intrinsic susceptibility k values inferior to 0.6 SI. The susceptibility k can thus be likened to $k_a$ with a very slight error.

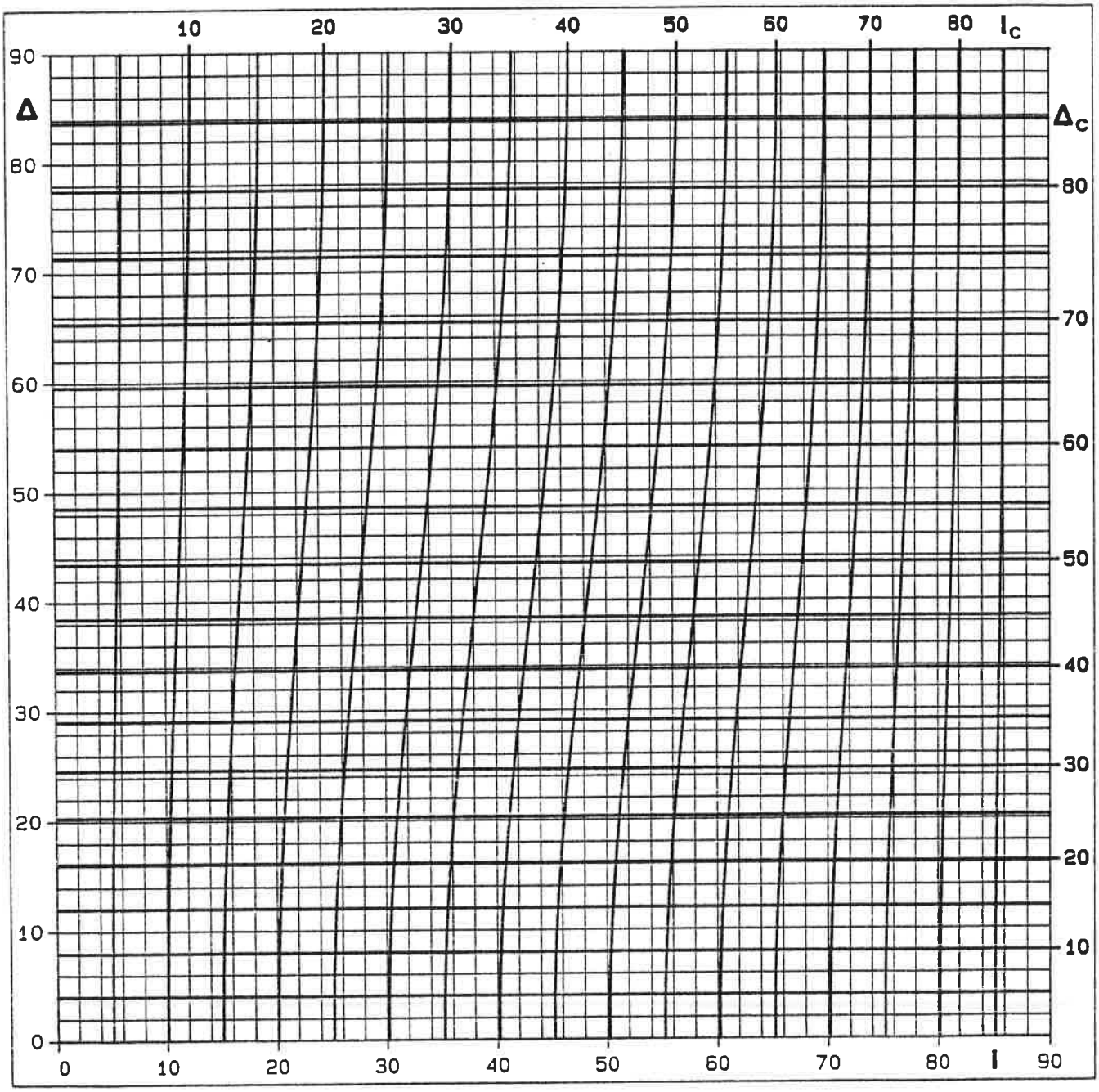



a) k = 0.1 SI

**Fig. 9a and b.** Charts for correction of the form effect at centre of a parallelepiped a = 11, b = 1, c = 15 (mean relative dimensions of Romano-Gallic tiles). **a)** k = 0.1 SI **b)** k = 0.2 SI.

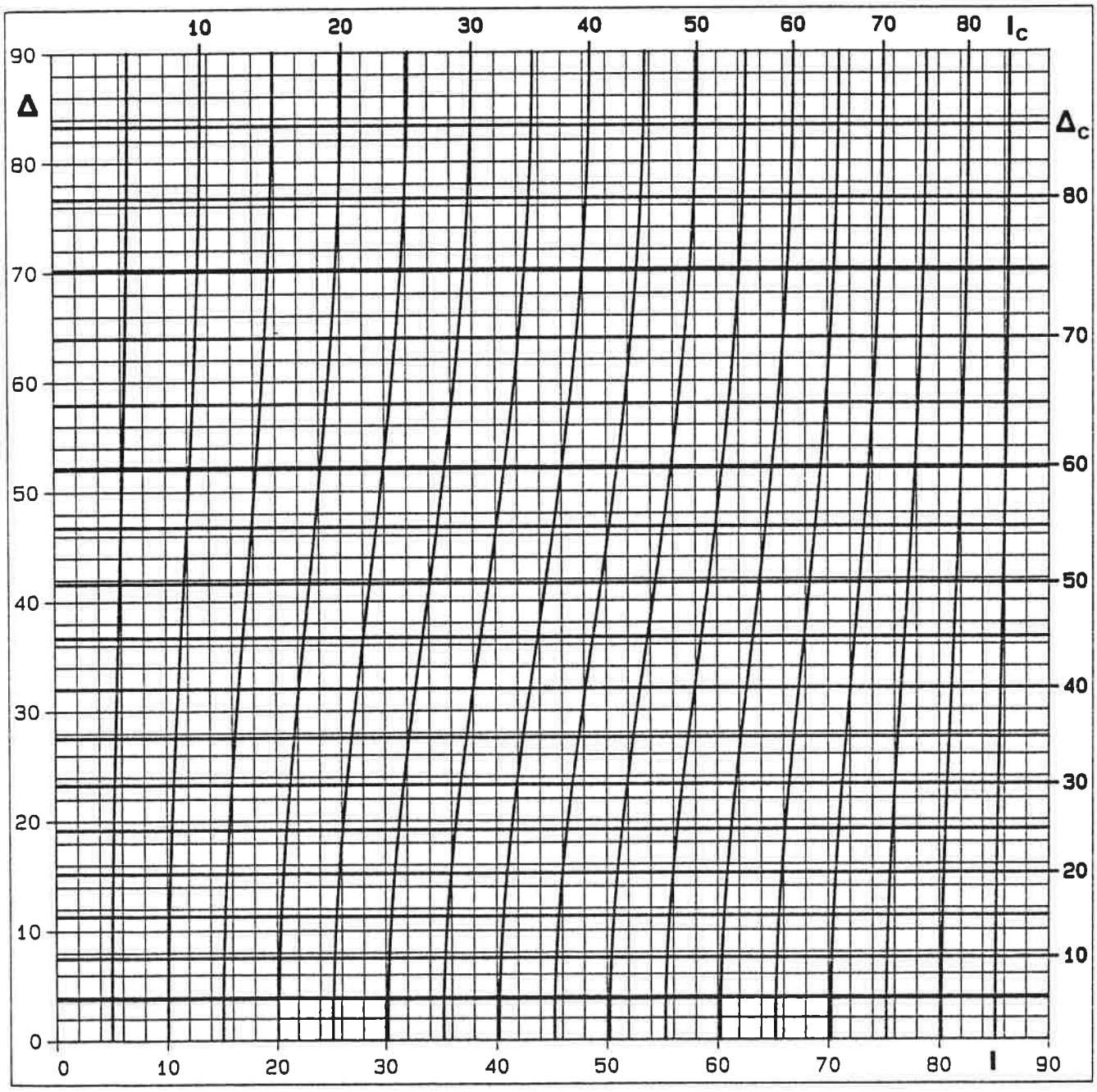

10
20
30
40
50
60
70
80
$I_c$
90
Δ
80
70
60
50
40
30
20
10
0
$\Delta_c$
80
70
60
50
40
30
20
10
0
10
20
30
40
50
60
70
80
I
90

**b) k = 0.2 SI**




**c) k = 0.3 SI**

**Fig. 9c and d.** Charts for correction of the form effect at centre of a parallelepiped a = 11, b = 1, c = 15 (mean relative dimensions of Romano-Gallic tiles). **c)** k = 0.3 SI **d)** k = 0.4 SI.


10
20
30
40
50
60
70
80
$I_c$
90
Δ
80
70
60
50
40
30
20
10
0
$\Delta_c$
80
70
60
50
40
30
20
10
0
10
20
30
40
50
60
70
80
I
90

d) k = 0.4 SI

## Appendix 1 : Formulae for correcting the form effect.

$$\vec{B}_{t\ max} = \left|1 + k(1 + N_{1i})\right| \vec{M}_o \qquad i : x, y, z$$

$$N_{1x} = -\frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \left|\frac{c(D^2-1)}{a(D^2+1)}\right| \qquad D = \frac{b}{\sqrt{a^2+c^2}} + \sqrt{1 + \frac{b^2}{a^2+c^2}}$$

$$N_{1y} = -\frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \left|\frac{c(D^2-1)}{b(D^2+1)}\right| \qquad \text{with} \qquad D = \frac{a}{\sqrt{b^2+c^2}} + \sqrt{1 + \frac{a^2}{b^2+c^2}}$$

$$N_{1z} = -\frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \left|\frac{a(D^2-1)}{c(D^2+1)}\right| \qquad D = \frac{b}{\sqrt{a^2+c^2}} + \sqrt{1 + \frac{b^2}{a^2+c^2}}$$

Then :

$$\Delta c = \beta = \operatorname{arctg} \left|\frac{1+k(1+N_{1x})}{1+k(1+N_{1y})} \cdot \operatorname{tg} \Delta\right| \qquad \text{(VIII)}$$

$$I_c = \alpha = \operatorname{arctg} \left|\frac{\sqrt{(1+k(1+N_{1x}))^2 . \cos^2\beta + (1+k(1+N_{1y}))^2 . \sin^2\beta}}{1 + k(1+N_{1z})} \cdot \operatorname{tg} I\right| \qquad \text{(IX)}$$

Taking $a = 11$ we have $N_{1x} = -0,0465$

$b = 1$ $N_{1y} = -0,9284$

$c = 15$ $N_{1z} = -0,0251$

with $\left|N_{1x} + N_{1y} + N_{1z}\right| = 1$

## CORRECTION OF SHAPE EFFECT

The induction formula $B_{t\ min}$ at the center of a parallelepiped allows the calculation of the initial direction (inclination $\alpha$ , deviation $\beta$ ) of the TMF present at the time of firing, from measured values of inclination I, deviation $\Delta$ , susceptibility k and relatives mean dimensions a, b, c (see correction formulae in Appendix 1).

In these formulae, the expressions (VIII) and (IX) give respectively the corrected inclination $I_c$ ( $\alpha$ ) and the corrected deviation $\Delta_c$ ( $\beta$ ). This allows the plotting of charts for correcting the form effect, for different susceptibility values (0.1 to 0.4) reached by the Romano-Gallic materials (Fig. 9).

In the present archaeomagnetic study, correction of form effect is carried out for each sample. According to Figure 1, a becomes length, b width and c thickness. Corrected values of inclination $I_c$ and deviation $\Delta_c$ are then treated with the statistical method explained in first part. Comparison between before and after results allows the estimation of the validity of such a correction.

## CORRECTION EXAMPLES

Here are two applications of form effect corrections to two groups of tiles having high magnetizations.

The first group comprises 86 tiles coming from the Ville-Chérel Romano-Gallic site surveyed in Pléchatel, about 30 km south of Rennes (France) (Gautier, 1982). The statistical treatment indicates that 92% of the tiles have been fired in upright position. The thermal demagnetization in a zero field (Fig. 10a) for 11 samples shows the existence of only one magnetization, slightly overprinted between 20°C and 150°C. The histogram of remanence intensities in Figure 10b gives a mean value of about 10 A/M, and therefore a high volumic mean susceptibility of 0.2 SI.

In order to improve the quality of the results, the 86 samples have been demagnetized at 250°C. The histogram of inclinations in Figure 11a shows some dispersion with a maxima at 68°-70°. The Schmidt diagram in figure 12a reveals two groups with mean values :

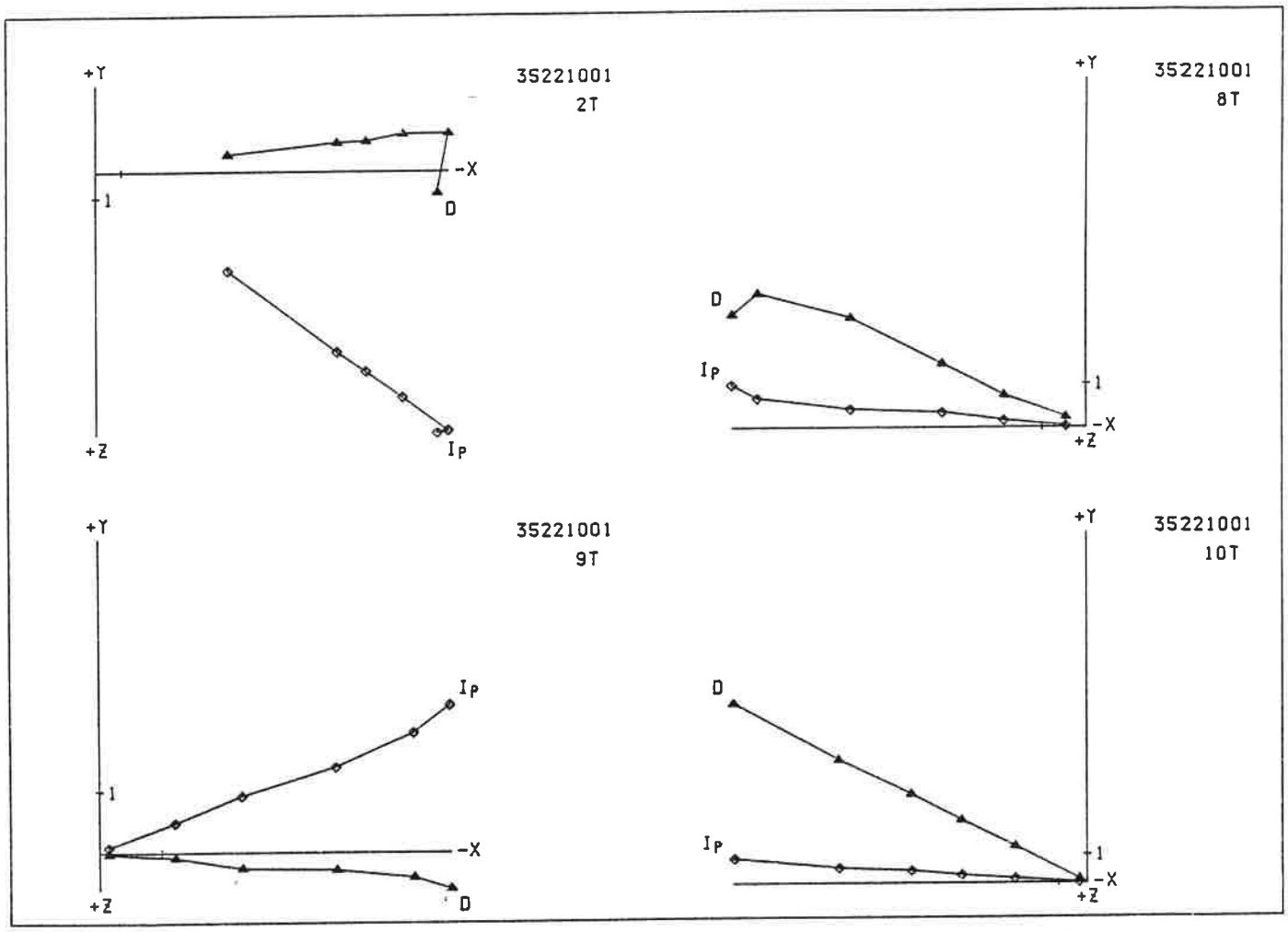
$$\bar{I} = 62^\circ \pm 2^\circ \quad , \quad \bar{\Delta} = 0^\circ \pm 5^\circ$$
$$\bar{I}' = 71^\circ \pm 2^\circ \quad , \quad \bar{\Delta}' = -80^\circ \pm 5^\circ$$

The inclination and deviation accuracy is deduced from the Fisher's statistic (1953) applied to each of the two groups of points. It appears an inclination difference of +9° between tiles fired in upright position perpendicular to magnetic north and those fired parallel to magnetic north. Because of the high magnetization measured at 20°C, a shape effect correction is carried out for each sample. The histogram of corrected inclinations in figure 11b shows a clear improvement, with a maxima around 64°, whereas Schmidt diagram in figure 12b reveals two groups of mean values :

$$\bar{I}_c = 62^\circ \pm 2^\circ \quad , \quad \bar{\Delta}_c = +2^\circ \pm 5^\circ$$
$$\bar{I}'_c = 67^\circ \pm 2^\circ \quad , \quad \bar{\Delta}'_c = -85^\circ \pm 5^\circ$$

An inclination difference of +5° remains between the two groups $\Delta_c$ and $\Delta'_c$. The shape effect seems not to be the single cause of disturbance of the magnetization direction, in particular for the tiles baked upright, perpendicularly to the magnetic North. However, the two groups $\Delta$ and $\Delta_c$ in figure 12a and b show the same mean inclination of 62°, which can be used for dating this set of tiles. After a correction of 1° for the latitude difference between Pléchatel and Paris, the mean inclination normalized at Paris becomes 63°. The curves of inclination variation at Paris during Romano-Gallic period are given in figures 16a and 16b. According to the curve published by the Laboratoire d'Archéométrie at Rennes and the Laboratoire de Géomagnétisme at Saint-Maur (Langouet, Bucur, Goulpeau, 1983), four dates are possible :

70, 190, 285 or 400 A.D.



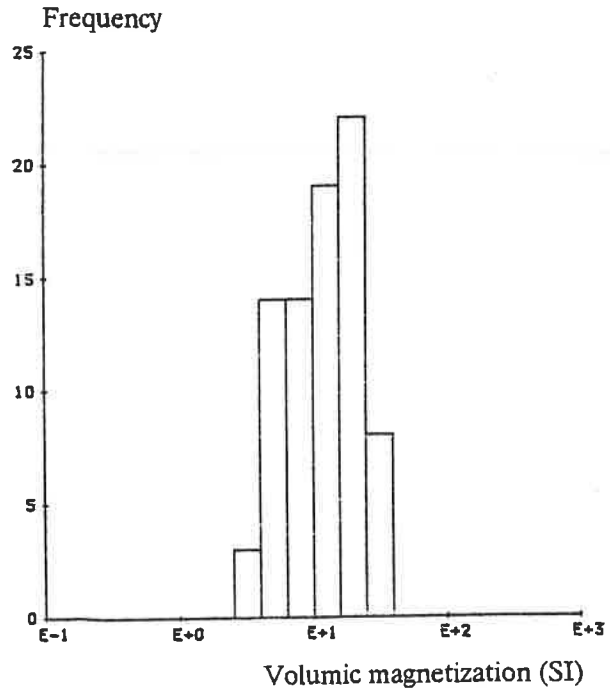
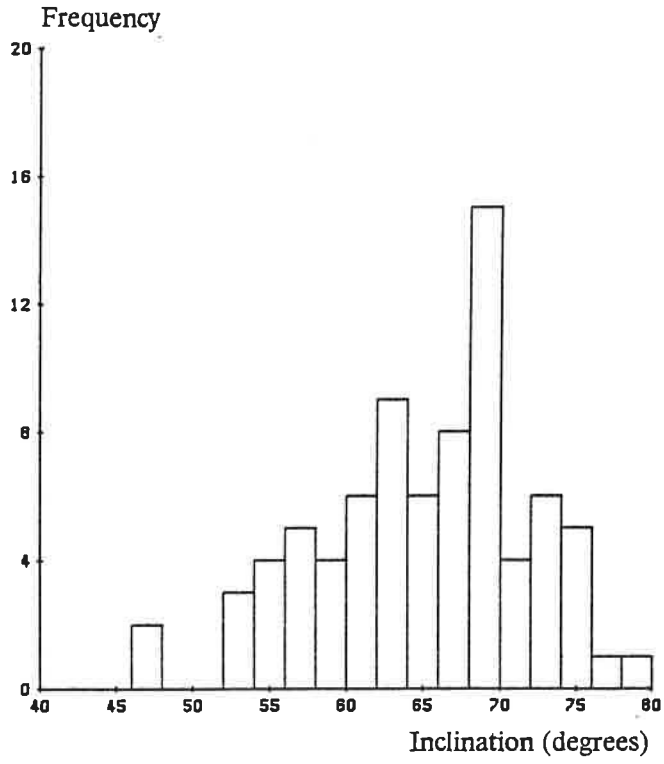




**Fig. 10a and b.** Pléchâtel , La Ville Chérel.

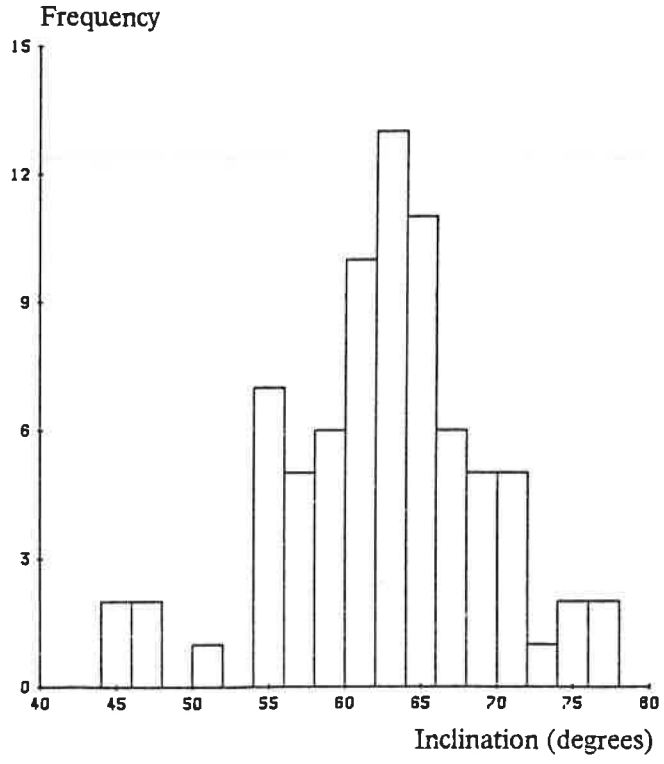
a) thermal demagnetization in zero field at 20°, 150°, 250°, 350°, 425° and 500°C.

b) histogram of volumic magnetizations measured at ambient temperature.

Choice of one of the dates is determined by the archaeological artefacts. Specifically, the presence of Samian ceramics which were manufactured only during the second century A.D. and for the most part around 180 A.D. indicates that the most probable date for the tiles of this site is A.D. 190 ± 15 years. This interval of ±15 years integrates at the same time the error on the curve $\bar{I} = f(t)$ and the error on the mean inclination.




a




b

**Fig. 11a and b.** Pléchâtel , La Ville Chérel.

a) histogram of inclinations after thermal demagnetization at 250°C.

b) histogram of inclinations after demagnetization at 250°C and shape effect correction.

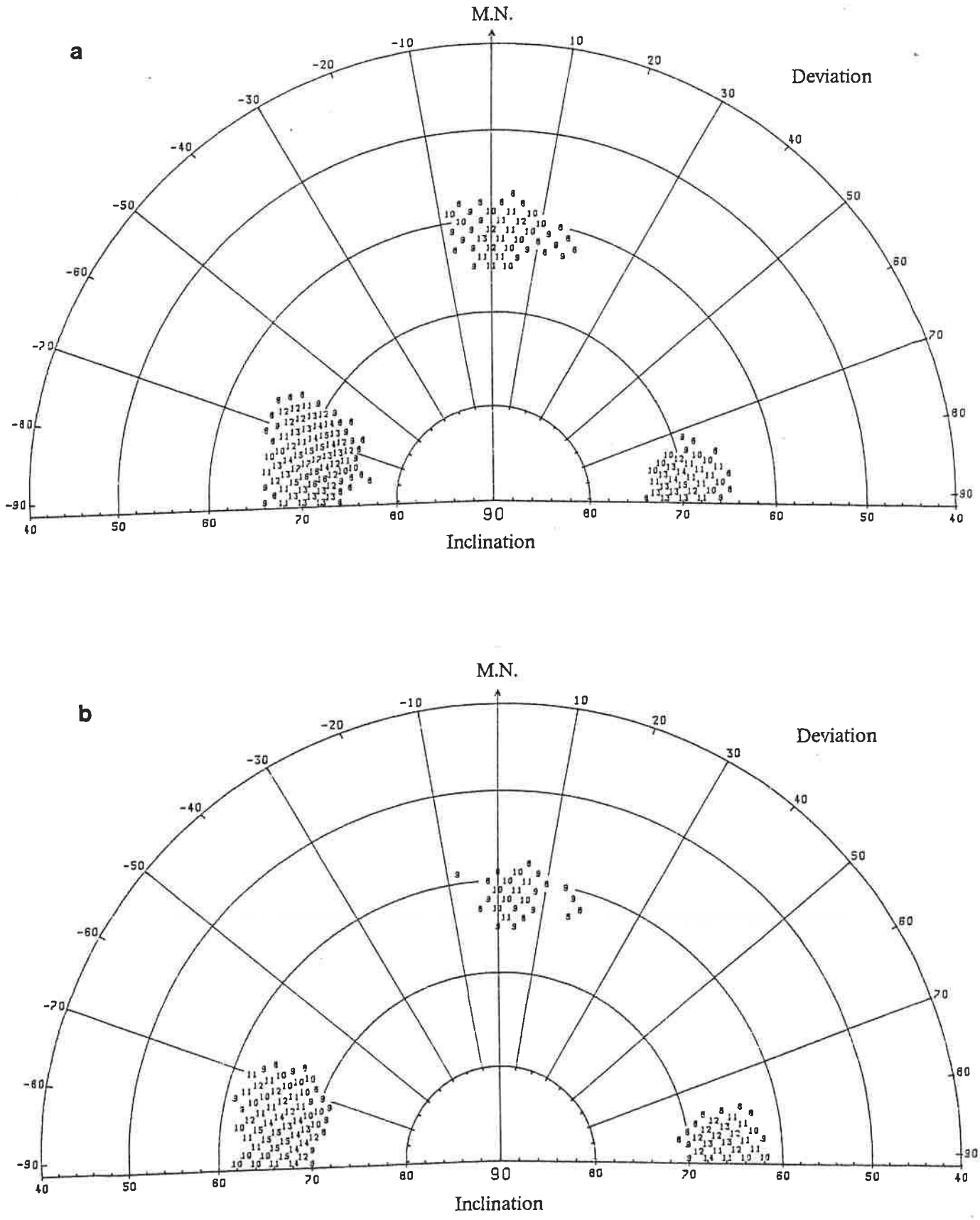
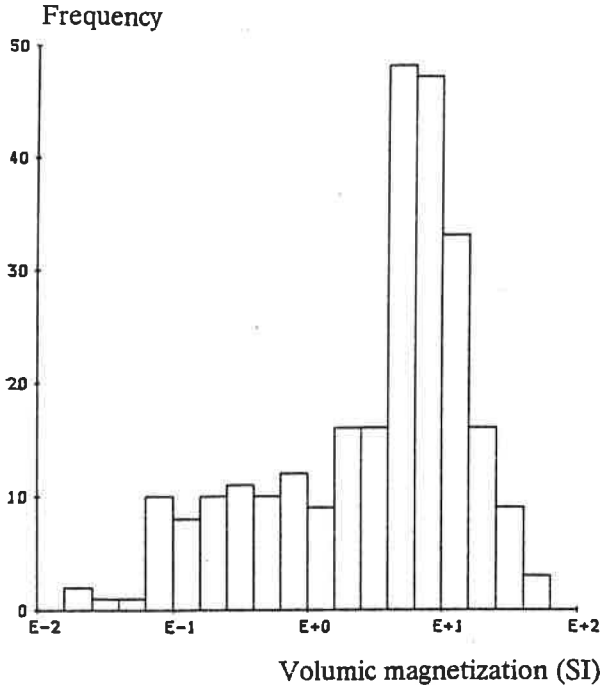



**Fig. 12a and b.** Pléchâtel , La Ville Chérel. **a)** densities on Schmidt net (I,$\Delta$) from data of thermal demagnetization at 250°C. **b)** densities from data of demagnetization after shape effect correction.



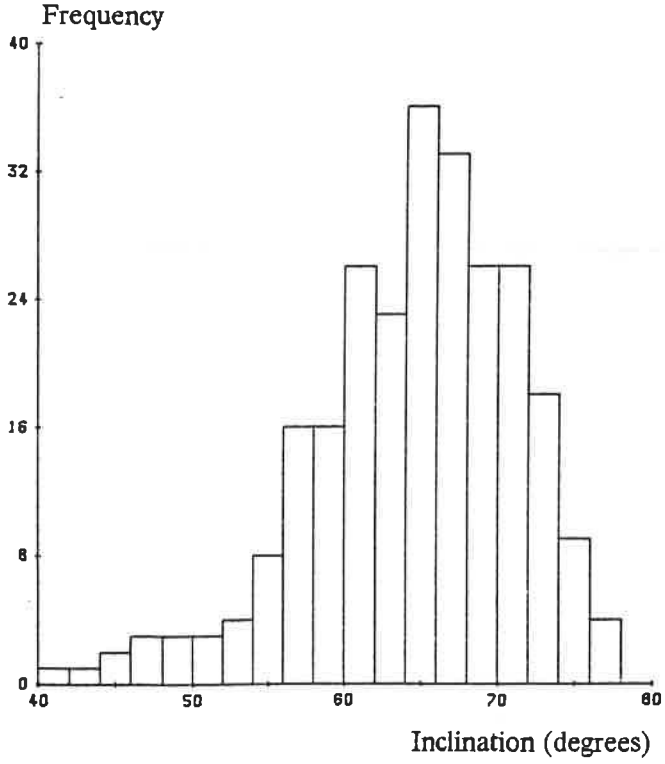

a

**Fig. 13a, b and c.** Antrain , La Bertinière.

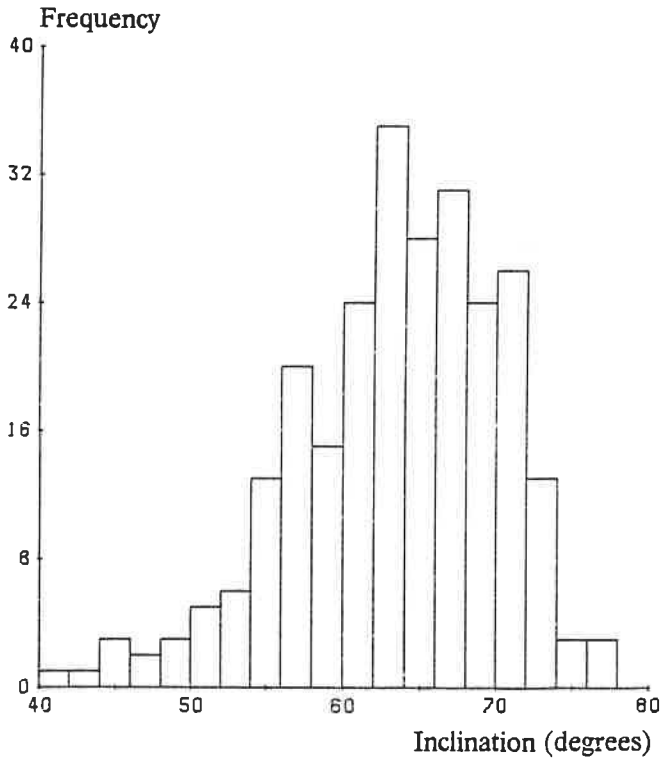
a) Histogram of magnetizations measured at room temperature.

b) Histogram of inclinations.

c) Histogram of inclinations after form effect correction .




b




c

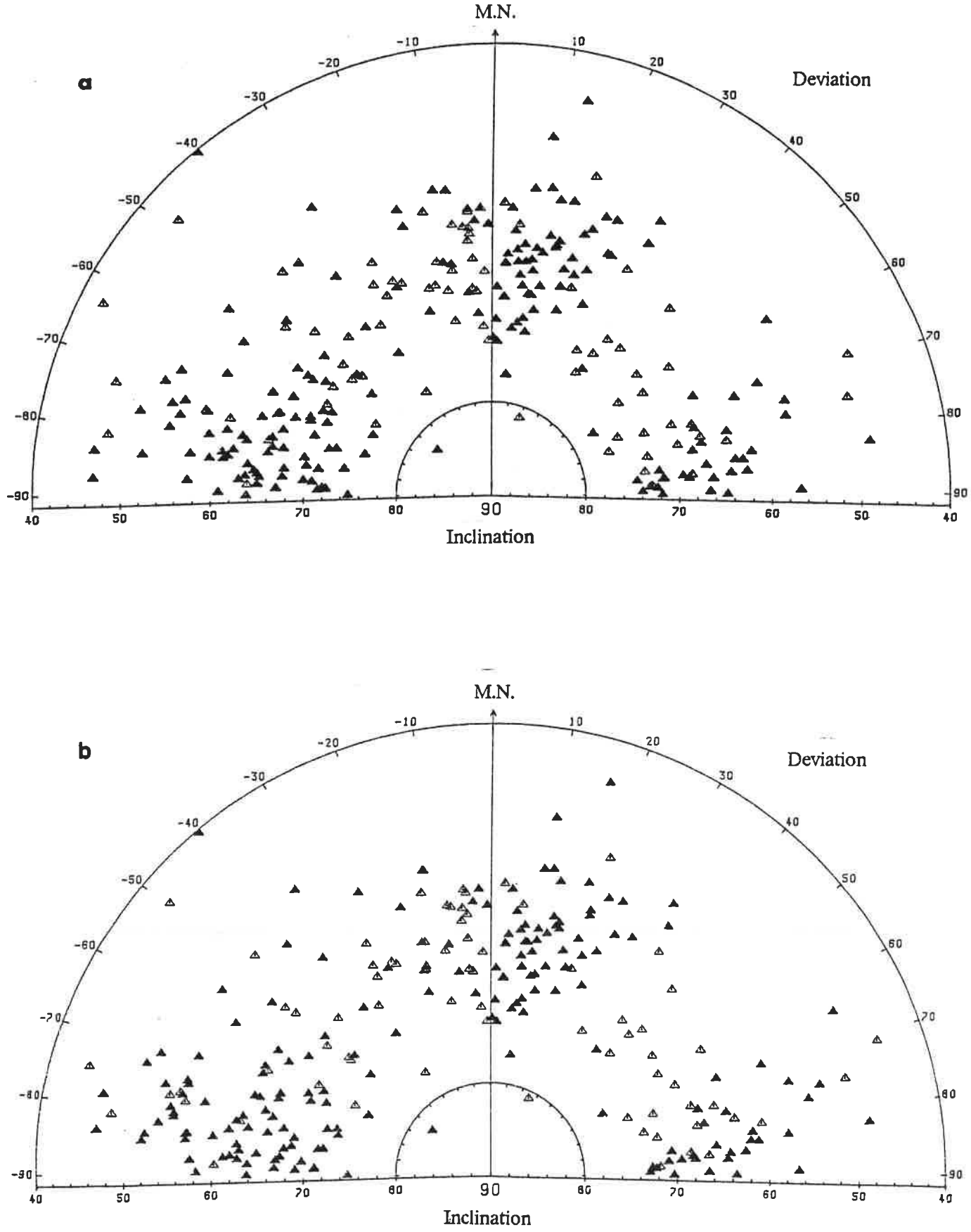
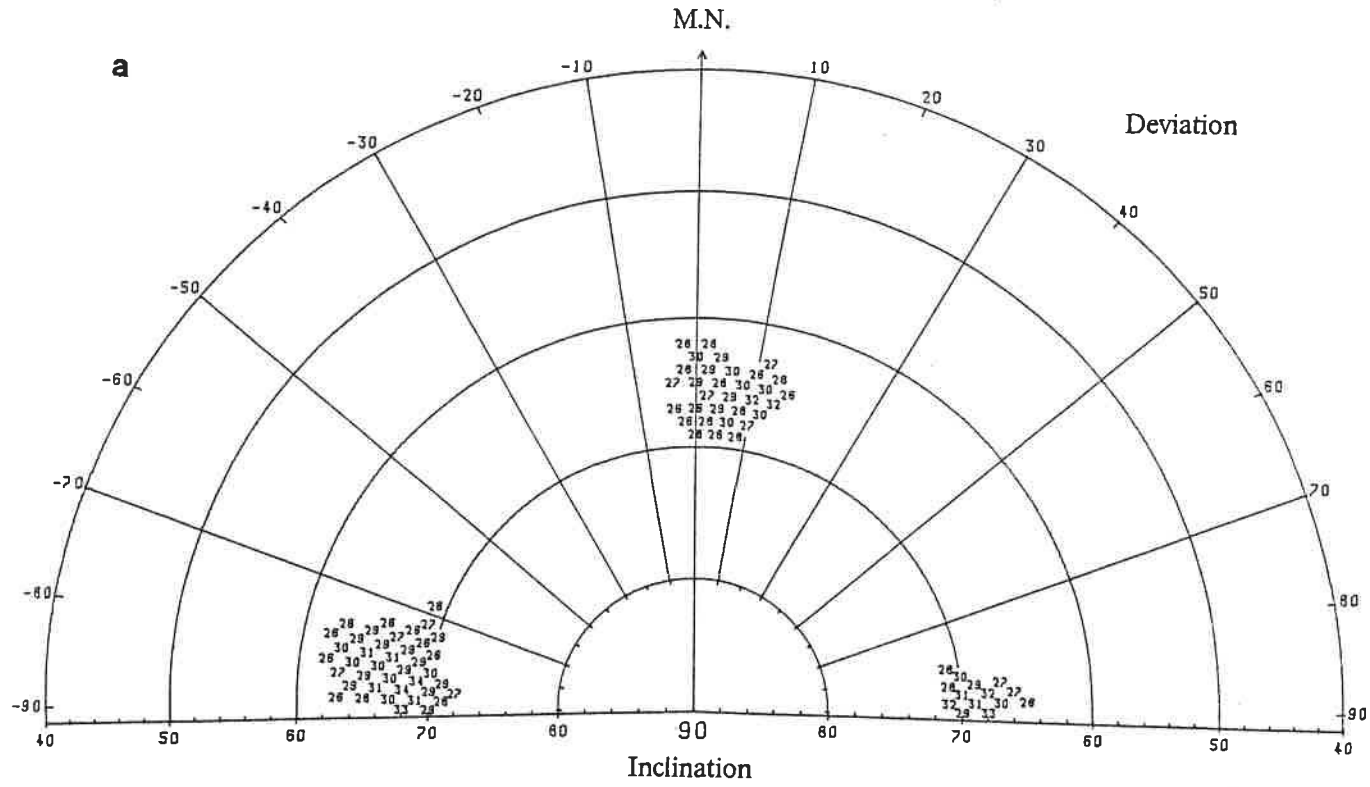



**Fig. 14a and b.** Antrain , La Bertinière. **a)** Representation of raw data (I,$\Delta$). **b)** Representation of data after shape effect correction.



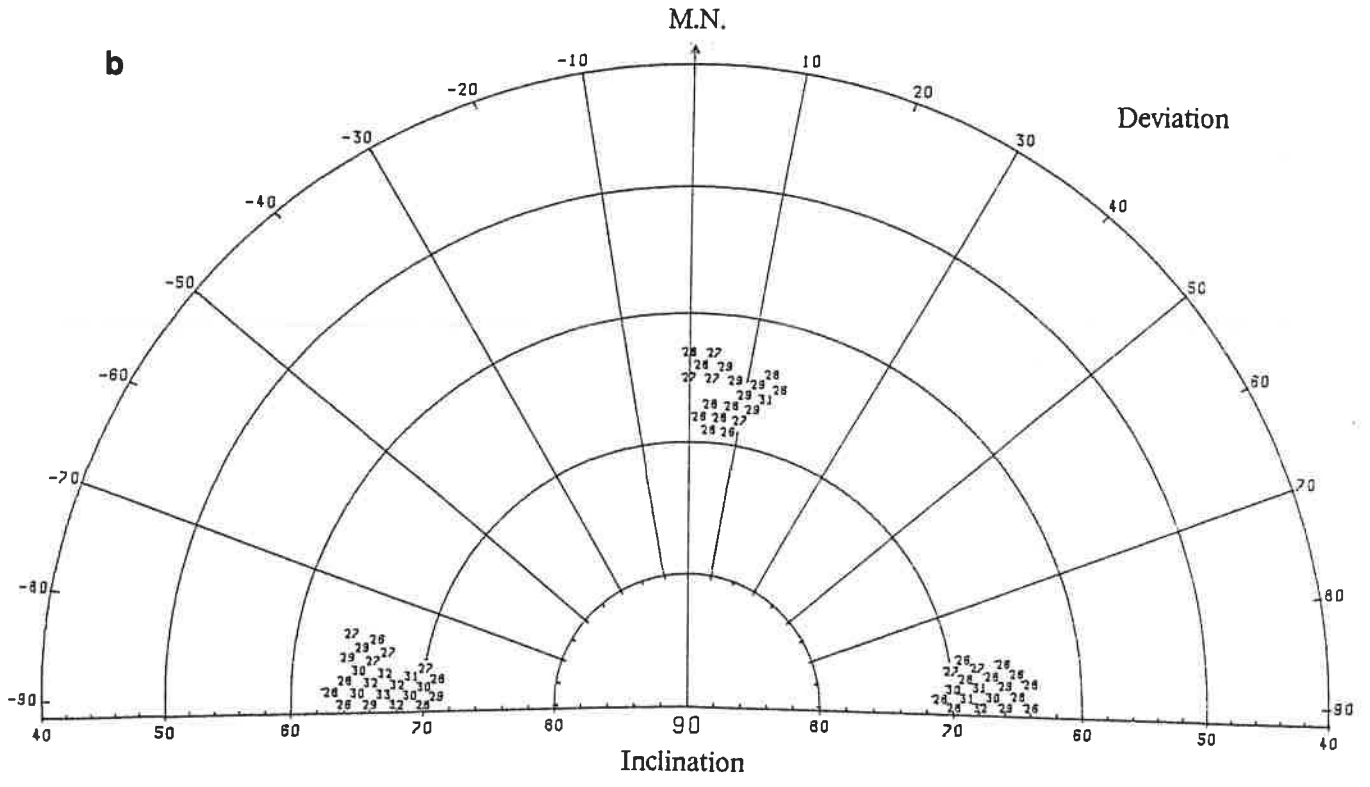




**Fig. 15a and b.** Antrain , La Bertinière. **a)** Density from raw data. **b)** Density from values after shape effect correction.

The second group comprises 290 tiles from the Bertinière Romano-Gallic site surveyed in Antrain, 30 km north of Rennes (France). Eighty nine percent of the tiles have been fired in an upright position. The histogram of remanence intensities in figure 13 shows a maxima around 7 A/m, and therefore a mean susceptibility of about 0.15 SI. Figures 14a and 14b show the remanence direction $(I, \Delta)$ of the 290 tiles. Maximum densities in figure 15a give :

$$\bar{I} = 65^\circ \pm 1^\circ \quad , \quad \bar{\Delta} = +5^\circ \pm 3^\circ$$
$$\bar{I}' = 68^\circ \pm 1^\circ \quad , \quad \bar{\Delta}' = -86^\circ \pm 3^\circ$$

and after shape effect correction, in figure 15b :

$$\bar{I}_c = 65^\circ \pm 1^\circ \quad , \quad \bar{\Delta}_c = +4^\circ \pm 3^\circ$$
$$\bar{I}'_c = 66^\circ \pm 1^\circ \quad , \quad \bar{\Delta}'_c = -87^\circ \pm 3^\circ$$

As in the previous example, the mean value of inclination $\bar{I} = 65^\circ$ can be taken into account to date this group of tiles. After a correction of $+0.4^\circ$ for the latitude difference between Antrain and Paris, the mean inclination normalized at Paris becomes $65^\circ$-$66^\circ$, so four dates are possible according to the 16b curve :

50, 200, 275 or 450 A.D.

The present state of the archaeological data for this site doesn't allow the selection of a specific date among the four possible ones.

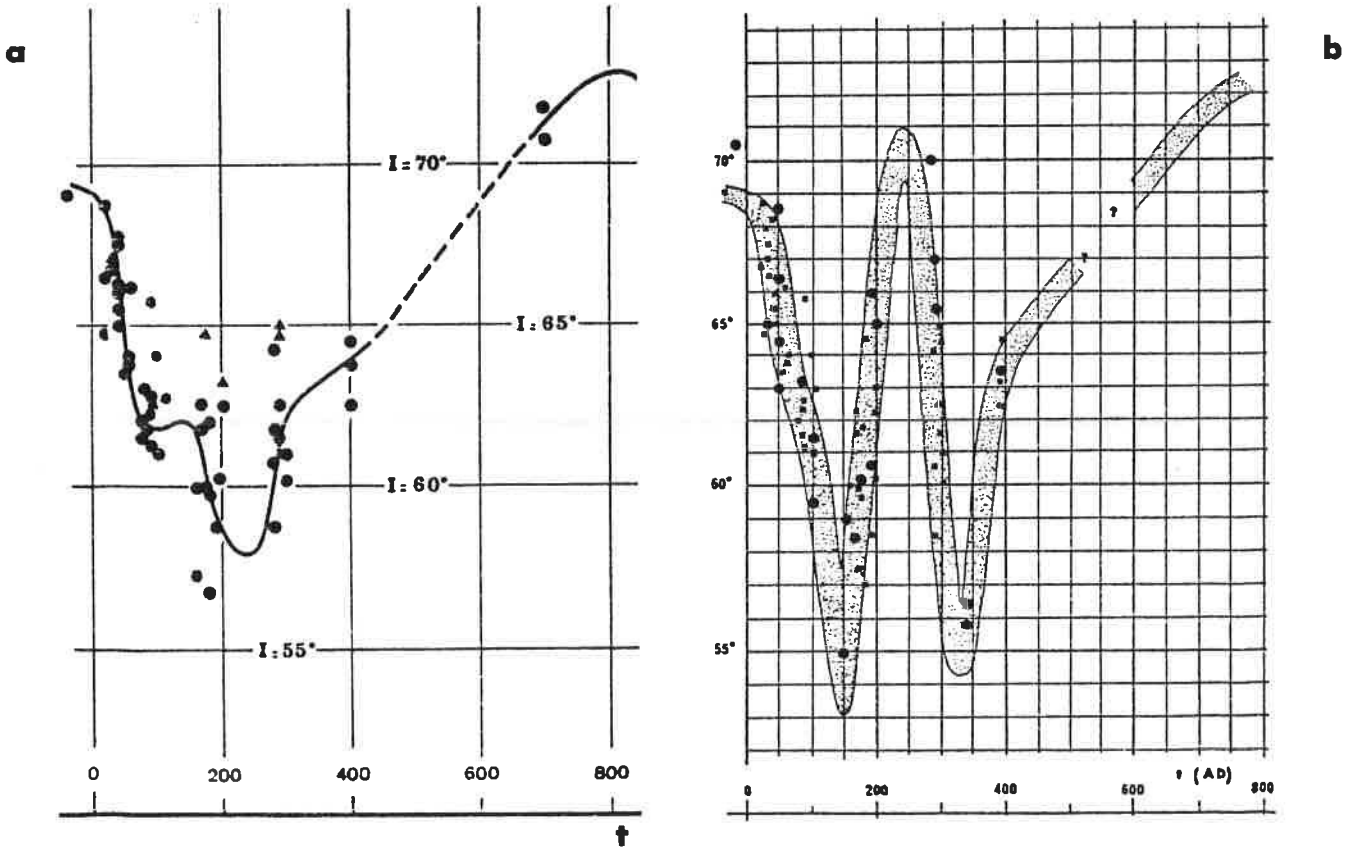



**Fig. 16a and b.** Curve of the secular variation of the inclination of the terrestrial magnetic field at Paris. a) Curve proposed by Thellier (1981). Only the section of the curve 0 - 800 A.D. is shown here. b) Curve as recently suggested by Langouet, Bucur, and Goulpeau (1983). The dates proposed by the Laboratoire d'Archéométrie at Rennes were obtained from this curve which shows a double oscillation for the Romano-Gallic period.

The two examples are in a way a test for the correction method used here. In the case of tiles fired in upright position, correct results are obtained by only taking into account the data groups whose mean deviation lies between around -20° and +20°. Indeed, the flat plane of the tiles is then quasi-parallel to the magnetic north with a dimension ratio close to one. Therefore, the shape effect on the inclination I becomes negligible. If $\Delta$ was greater than 20°, the shape effect would modify at one and the same time I and I'. In this case, the correction becomes important since an a priori knowledge of the result remains impossible.

In the two examples studied here, in spite of shape effect correction, there is a non negligible inclination difference between before and after correction for tiles fired in upright position, perpendicular to the magnetic North. The problem is whether this difference is due to an insufficient evaluation for k, or whether it is due to another physical property having the same qualitative effects as the shape effect.

We propose two possible solutions to this problem. A first explanation would be the Hopkinson effect which shows an increase of susceptibility with temperature. The other explanation appeals to magnetic anisotropy. Recent studies performed by L. Goulpeau, P. Lanos and L. Langouet (International symposium on Archeometry, Athens, may 1986) have shown the possible existence in bricks and tiles of a mean TRM anisotropy of the order of 0 to 50%, which leads to the same qualitative effects than those of shape effect. In order to determine the effective part of both these explanations, and with the purpose of showing the validity of the shape effect correction proposed here, an experimental study has been carried out with entire tiles the magnetic properties of which were known and which were fired in a known magnetic field.

## EXPERIMENTAL VERIFICATION

This study focuses on five entire intact Romano-Gallic tiles showing a pronounced flattening and mean volumic magnetizations of 0.8 to 7 A/m, that is to say TRM susceptibilities of 0.02 to 0.15 SI (table I, column (3) and (5)). The experiments have been carried out at the Laboratoire de Géomagnétisme de Saint-Maur-des-Fossés, in an a-magnetic kiln with an interior volume corresponding to a 40 cm edged cube. Each tile was separately fired at 700°C for two hours and a half, and then was let cool for a day in the ambiant terrestrial magnetic field without being perturbated by the kiln structures. The TMF inclination at the time of the experiments was 64° ± 0°5. The 1E, 2E and 4E tiles were fired in upright position perpendicular to the magnetic meridian. The 3E tile was fired in upright position, while the 7E was fired in horizontal position (table I, column (2)). The four tiles in upright position had their greatest length lined up on the vertical. The one in horizontal position had its greatest length lined up on the South-North axis.

Between 8 and 10 cores were taken from each tile as regularly as possible (table I, column (4)). The magnetization measures were carried out at the Laboratoire de Géophysique de Rennes I. A thermal demagnetization in a zero field at 250°C was first performed in order to eliminate the viscous remanent magnetization acquired by the samples during their staying in the TMF, between firing and measurement. The inclination and deviation averages found for each one of the five experiments are collected in columns (2) and (3) of table II.

High inclinations values (I > 64°) correspond to upright positions, while low values (I < 64°) correspond to horizontal positions. Besides, we can note that the strongest the mean magnetization is (table I and fig. 17), the greatest the difference with 64° is. Linked to the high flattening degree of the materials, these rates obviously display the effect of the demagnetizing field. Shape effect correction, as described above, was applied to each core of the five experiments, according to the relative dimensions of the tiles, and to the individual volumic magnetizations of the cores. The corrected values of the inclination (table II, column (4)) become far more coherent and approach the 64° value. However, the differences with this value are still considerable. We suggested in the previous paragraph that they could be due either to an underestimation of the magnetization intensity to be taken into account, or to the effect of the thermoremanent magnetization anisotropy. In the present case, we tried to fix the part possibly played by this last effect in the dispersion of the inclinations obtained after shape effect correction.

The disturbances caused by the TRM anisotropy have been studied by J. Rogers *et al.* (1979), M.J. Aitken *et al.* (1981) and R.J. Veitch *et al.* (1984), about the intensity of the magnetizations acquired by baked clay materials. The problem is to know what effect can this anisotropy have on the orientation of the TRM acquired by Romano-Gallic tiles. Checking the proportionality between the thermoremanent magnetization and the applied field when this one is lower than 1 Oe, allows us to assert the tensorial character of the TRM anisotropy. This tensor is determined in this way : the cores (4 per tile, that is 20 in the whole) are fired at 700°C for an hour and a half, then is let cool in a magnetic field, the intensity and the direction of which are known. This procedure is repeated in an identical way (field intensity, cooling rate) in a field applied successively with respect to the x, y, z axis and to the xy, yz and zx diagonals of the cores (fig. 1). The diagonalization of the symmetrical tensor obtained shows that the principal directions correspond to the x, y, z axis of the core marks jointed to the tiles. The ratio $F_{xz} = M_x / M_z$ between the $M_x$ magnetization acquired with respect to the x axis, and the $M_z$ magnetization acquired with respect to the z axis perpendicular to the flattening plane is on average 1.10 (between 1.06 and 1.13) (table I, column (6)). On the other hand, the ratio $F_{xy} = M_x / M_y$ is always almost close to 1.00 (table I, column (7)).

These results show the existence, in the tiles used for these experiments, of a significant TRM anisotropy characterized by a mean tensor following a flattened revolution ellipsoïd, which equatorial plane corresponds to the flattening plane of the materials. The correction of these anisotropy effects was carried out according to the model of "easy plane of magnetization", by supposing the independance between the disturbances due to shape effect and those due to anisotropy. Lastly, it is logical for shape effect correction to intervene before anisotropy correction, insofar as the $H_1$ demagnetization field is the result of a $M_o$ magnetization which is no longer colinear to $H_o$.

TABLE 1

| (1) N° | (2) Firing position | (3) Dimensions L . w . t (cm) | (4) samples number | (5) $\overline{M}$ (A/m) | (6) $\overline{F}_{xz}$ 4 cores/tile | (7) $\overline{F}_{xy}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1E | upright 90°/MN | 27 x 27 x 2 | 10 | 6.888 | 1.11 ± 0.01 | 1.02 ± 0.03 |
| 4E | upright 90°/MN | 27 x 27 x 2.5 | 9 | 3.989 | 1.07 ± 0.01 | 1.00 ± 0.01 |
| 2E | upright 90°/MN | 27 x 27 x 3 | 10 | 1.348 | 1.06 ± 0.03 | 0.98 ± 0.03 |
| 3E | upright 50°/MN | 27 x 24 x 3 | 8 | 0.791 | 1.09 ± 0.02 | 1.00 ± 0.01 |
| 7E | flat | 27 x 19 x 3 | 9 | 1.279 | 1.13 ± 0.07 | 0.99 ± 0.01 |

TABLE II

| (1) | (2) | (3) | (4) | (5) | (6) | (7) | (8) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 250°C | | Shape corr. | | Anis. corr. | | precision factor |
| N° | Inc. | Dev. | Inc. | Dev. | Inc. | Dev. | k |
| 1E | 69°3 | -88° | 66°4 | -88°2 | 64° ± 1° | -88° ± 2° | 1846 |
| 4E | 67°3 | -86°1 | 65°5 | -86°4 | 64° ± 0°9 | -86°7 ± 2° | 2509 |
| 2E | 66°4 | -84° | 65°7 | -84°1 | 64°1 ± 1°3 | -84°5 ± 3° | 1188 |
| 3E | 65°9 | 45°8 | 65°7 | 46°3 | 63°1 ± 1°1 | 51°5 ± 2° | 2194 |
| 7E | 59° | 0°4 | 59°6 | 0°4 | 62°7 ± 1°6 | 0°4 ± 3°4 | 887 |
| | | | | | $\overline{I}_c$ = 63°6 | | |

The corrected values of the inclination are collected in column (6) of table II. We can note then that they gather between 63° and 64°, according to a mean value 63°6 which coincides almost perfectly with the value of the TMF inclination that prevailed in the kiln during these experiments. Figure 18 sums up in superimposed histograms, the different improvements entailed by these corrections, and allows us to visualize immediately the plain correlation between the magnetization amplitude (fig. 17) and the inclination difference, in fonction of the position.

This quite spectacular result shows two things : on the one hand the validity of the shape effect correction that we suggested, and on the other hand the possibility of a simultaneous interference of TRM anisotropy. These two disturbances by themselves account for the differences noticed on measures. Consequently, the hypothesis of an underestimation of the magnetization intensity is not to be taken in account, at least in the case of these experiments.

The effects of the demagnetizing field and of the anisotropy are able to cause very important disturbances in the TRM direction acquired by the flat baked clay materials, which are strongly magnetized and anisotropical. So, the perfection of reliable methods of correction seems to be fundamental for the improvement of archaeomagnetic datations based on the use of the TMF direction. At present, the study of these phenomenons constitutes one of the main lines of research of the Laboratoire d'Archéométrie de Rennes I.

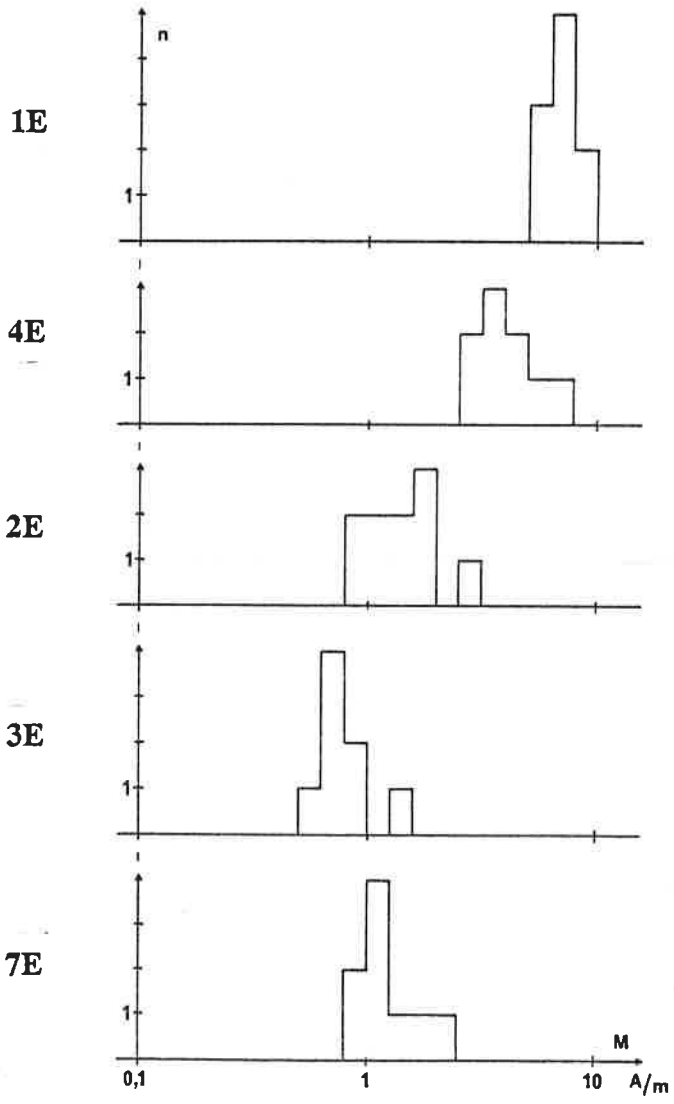



Fig. 17 : Experimental study. Histograms of volumic magnetizations.

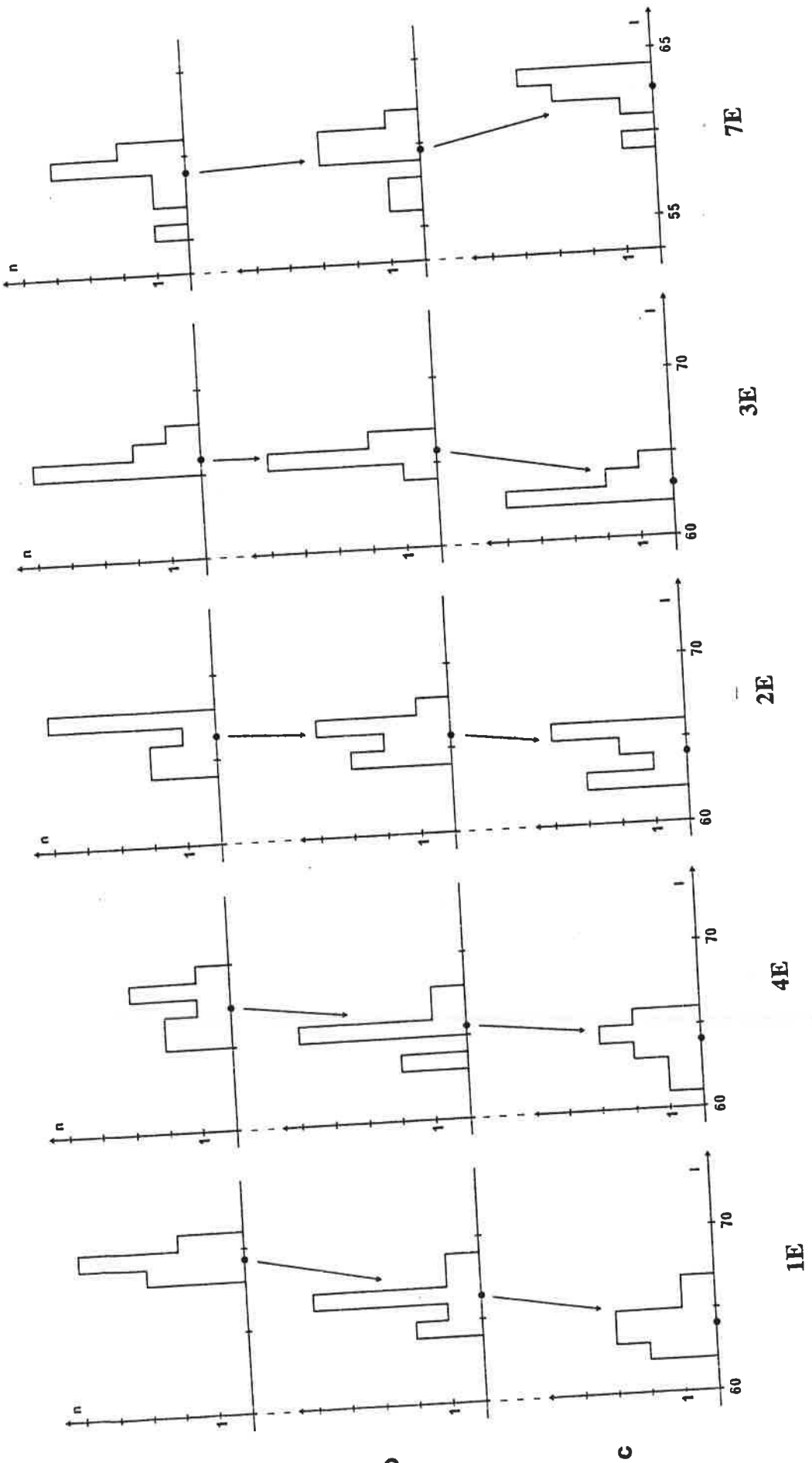



Fig. 18 : Experimental study. Histograms of inclinations.

a) After thermal demagnetization at 250 °C.
b) After shape effect correction.
c) After shape effect and TRM anisotropy correction.

## CONCLUSION

In conclusion to this study, tiles of Romano-Gallic period provides convincing examples of the deflection of thermoremanent magnetization due to the demagnetizing field. The shape effect theory allows the correction of this disturbing action and thus appreciably improves the quality of archaeomagnetic dating of flat strongly magnetized baked clay materials.

## ACKNOWLEDGEMENTS

I thank Professor N. Bonhommet for access to the Schonstedt spinner magnetometer at the Laboratoire de Géophysique de l'Université de Rennes I. I am appreciative of stimulating discussion of shape effect problems with Drs L. Langouet and L. Goulpeau from the Laboratoire d'Archéométrie de Rennes I. I also thank Mr J. Thompson and M. Marshall for their precious help in translating this paper into english.

## REFERENCES

**AITKEN M.J. et HAWLEY H.N. , 1971,** Archaeomagnetism : evidence for magnetic refraction in kiln structure, *Archaeometry*, 13, 83-85.

**AITKEN M.J. , ALCOCK P.A. , BUSSELL G.D. and SHAW C.J. , 1981,** Archaeomagnetic determination of the past geomagnetic intensity using ancient ceramics : allowance for anisotropy, *Archaeometry*, 23, 1, 53-64.

**BRUHAT G. , 1959,** *Cours de physique générale : Electricité*, Masson et Cie, Paris.

**COLLINSON D.W. , 1983,** *Methods in rocks magnetism and paleomagnetism, techniques and instrumentation*, Chapman and Hall, London.

**FISHER R.A. , 1953,** Dispersion on a sphere, *Proc. R. Soc. London*, A, 217, 295-305.

**GAUTIER M. , 1982,** La villa gallo-romaine de la Ville-Chérel en Pléchâtel (Ille-et-Vilaine), *Dossiers du Centre Régional Archéologique d'Alet (Ce.R.A.A.),* 10, 47-58.

**GOULPEAU L. et LANGOUET L. , 1980,** Exploitation archéomagnétique de grands échantillonnages de tuiles et briques gallo-romaines récupérées en fouille ou en prospection au sol, *Rapport Interne.*

**GOULPEAU L. et LANGOUET L. , 1980,** Datations d'apports de tuiles et briques sur des sites gallo-romains à l'aide de mesures archéomagnétiques opérées sur d'abondants échantillonnages, *Revue d'Archéométrie,* 4, 153-164.

**GOULPEAU L. et LANGOUET L. , 1980,** Fouille, datation et étude de l'édifice gallo-romain des Sables d'Or. Annexe III : Datation des tuiles et des briques par l'archéomagnétisme, *Dossiers du Ce.R.A.A.* , 8, 29-31.

**GOULPEAU L. , 1981,** Résultats de l'étude archéomagnétique entreprise en vue de la datation d'une partie des édifices mis au jour lors des fouilles de l'école maternelle "Chappe" au Mans - *Rapport interne d'expertise.*

**GOULPEAU L. et LANGOUET L. , 1982,** Problems of interpretation of different graphs (I, ) obtained through an archaeomagnetic study of displaced materials, *Proceedings of the 22nd Symposium on Archaeometry*, Bradford, U.K. , 30th march - 3rd april 1982, 112-121.

**GOULPEAU L. , LANGOUET L. , BARDEL J.P. et BUCUR I. , 1982,** Possibilités de l'archéomagnétisme dans l'étude d'un four de tuilier, *Revue d'Archéométrie*, 6, 13-25.

**GOULPEAU L. , LANGOUET L. et LANOS P. , 1984,** Datation archéomagnétique des établissements gallo-romains à partir des matériaux de construction d'argile cuite, *Bull. soc. sc. Bretagne*, 56, 107-116.

**HAROLD M.R. , 1960,** Magnetic dating : Kiln wall fall-out, *Archaeometry*, 3, 47-49.

**JACKSON I.D. , 1975,** *Classical electrodynamics*, Wiley and Sons, London.

**LANGOUET L. , BUCUR I. et GOULPEAU L. , 1983,** Les problèmes de l'allure de la courbe de variation séculaire du champ magnétique terrestre en France, nouveaux résultats archéomagnétiques, *Revue d'Archéométrie*, 7, 37-43.

**LANOS P. , 1983,** *Etude méthodologique de l'archéomagnétisme des tuiles et des briques*, Mémoire de D.E.A. , Université de Rennes I.

**LE NY F. , 1986,** Les fours de tuiliers gallo-romains (en France), *Documents d'Archéologie Française*, 12?, Paris.

**McWHIRR A. , 1979 ,** Roman brick and tile , *B.A.R. International Series*, 68, 411.

**OSBORN J.A. , 1945,** Demagnetizing factors of the general ellipsoid, *Physical Review*, 67, 351-357.

**ROGERS J. , FOX J.M.W. and AITKEN M.J. , 1979,** Magnetic anisotropy in ancient pottery, *Nature*, 277, 644-646.

**SCHURR K. , BECKER H. and SOFFEL H.C. , 1984,** Archaeomagnetic study of medieval fireplaces at Mannheim-Wallstadt and ovens from Herrenchiemsee (southern Germany) and the problem of magnetic refraction, *Journal of Geophysics*, 56, 1-8.

**STONER E.C. , 1945,** The demagnetizing factors for ellipsoids, *Phil. Mag.* , 36, 803-821.

**THELLIER E. , 1938,** Sur l'aimantation des terres cuites et ses applications géophysiques, *Thèse de doctorat, Paris ; Ann. Inst. Phys. Globe Paris*, 16, 157-302.

**THELLIER E. et THELLIER O. , 1959,** Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique, *Ann. Geophys.* , 15, 285-376.

**THELLIER E. , 1966,** Le champ magnétique fossile, *Nucleus*, 7, n° 1, 2 et 3.

**THELLIER E. , 1971,** Magnétisme interne, *in : Encyclopédie de la Pléïade, Géophysique*, 235-376.

**THELLIER E. , 1981,** Sur la direction du champ magnétique terrestre en France durant les deux derniers millénaires, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 24, 89-132.

**VEITCH R.J. , HEDLEY I.G. and WAGNER J.-J. , 1984,** An investigation of the intensity of the geomagnetic field during roman times using magnetically anisotropic bricks and tiles, *Arch. Sc. Geneve*, vol. 37, fasc. 3, 359-373.

**WEAVER G.H. , 1961,** The firing of a pottery kiln of a romano-british type at Boston, Lincs, Appendix III, *Archaeometry*, 4, 23-27.

**WEAVER G.H. , 1962,** Archaeomagnetic measurements on the second Boston experimental kiln, *Archaeometry*, 5, 93-107.

# V - L'ANISOTROPIE D'AIMANTATION THERMOREMANENTE

## INTRODUCTION

L'anisotropie d'aimantation thermorémanente a été étudiée récemment par J. Rogers *et al.* (1979), M.J. Aitken *et al.* (1981) et R.J. Veitch *et al.* (1984) à propos des effets de cette dernière sur l'intensité de l'ATR acquise par les matériaux d'argile cuite (céramiques, tuiles et briques anciennes). Les principales conclusions auxquelles ont abouti ces auteurs sont les suivantes :

- L'anisotropie d'ATR des argiles cuites est caractérisée par un tenseur symétrique (aux erreurs près) dont les axes principaux sont généralement confondus avec les axes de symétrie des matériaux (fig. V-I). Le plan (Oxy) définit presque toujours un plan isotrope de facile aimantation tandis que l'axe z, perpendiculaire au plan d'aplatissement des matériaux, correspond à une direction de difficile aimantation.

- En conséquence, tous ces auteurs introduisent le facteur d'anisotropie $f = M_h / M_z$ qui est le rapport entre l'aimantation acquise pour un champ agissant dans le plan d'aplatissement et l'aimantation acquise pour un champ de même intensité agissant perpendiculairement à ce plan. Les valeurs observées de ce facteur vont de 1,2 à 1,7 pour des poteries antiques et récentes (Rogers *et al.* , 1979) et de 0,98 à 1,4 (Rogers *et al.* , 1979 ; Veitch *et al.* , 1984) pour des tuiles et des briques.

- D'après deux échantillons étudiés par J. Rogers *et al.*, le facteur d'anisotropie f reste sensiblement constant pour des ATR partielles acquises sur des intervalles de température différents. Cependant, M.J. Aitken *et al.* ont pu montrer l'existence d'échantillons présentant une dépendance de ce facteur vis à vis des températures de blocage.

- L'origine de cette anisotropie est attribuée à un alignement préférentiel des grains magnétiques provoqué par le moulage et le tournage de la pâte argileuse. Les transformations minéralogiques survenant pendant la cuisson doivent aussi contribuer au renforcement de cette anisotropie, par exemple par croissance des minéraux selon des directions privilégiées.

Du fait que les recherches archéomagnétiques se soient axées plus spécialement, durant ces dernières années, sur l'intensité du CMT (Shaw, 1985), aucune publication n'a fait récemment état de recherches sur les effets de l'anisotropie sur la direction des ATR acquises par les matériaux d'argile cuite. En paléomagnétisme, les premières recherches sur des roches fortement anisotropes (quartzites à lits de magnétite) ont mis en évidence des courbes d'ARI et d'ATR différentes selon les directions d'application du champ (Grabovsky et Brodskaya, 1958). Cependant, pour des raisons d'appareillage et surtout d'instabilité minéralogique des roches lorsqu'elles sont soumises à des températures élevées, ces recherches se sont orientées essentiellement vers l'anisotropie de susceptibilité et d'aimantation rémanente isotherme.

L'étude de l'anisotropie de rémanence semble fondamentale, en archéomagnétisme comme en paléomagnétisme, si l'on veut retrouver la direction d'action du champ à partir de la direction de l'aimantation rémanente. L'anisotropie peut varier plus ou moins fortement en fonction des types de porteurs magnétiques présents, généralement à l'état de grains fins, dans l'argile. Les différents processus d'acquisition d'une aimantation

n'affectent pas tous les mêmes porteurs, c'est pourquoi l'anisotropie est différente selon qu'il s'agit d'une aimantation induite, rémanente isotherme ou thermorémanente. L'ARN des argiles cuites étant presque toujours d'origine thermorémanente, il convient d'étudier l'anisotropie en rapport avec ce processus d'aimantation.

La détermination de l'anisotropie d'aimantation thermorémanente ne semble poser aucun problème particulier de méthode (Daly, 1970 ; Daly et Zinsser, 1973) puisque E. Thellier (1938) a montré que l'ATR des terres cuites était proportionnelle au champ dans le cas où ce dernier est de l'ordre de grandeur du champ terrestre. De plus, contrairement aux roches, les terres cuites présentent la plupart du temps une très grande stabilité magnétique vis à vis des traitements thermiques. Cela provient de ce qu'elles ont été chauffées à des températures extrêmement élevées, de l'ordre de 1000°C et plus, lors de leur fabrication. Les minéraux ainsi formés sont très stables vis à vis des températures des désaimantations thermiques, qui n'excédent pas les 700°C.

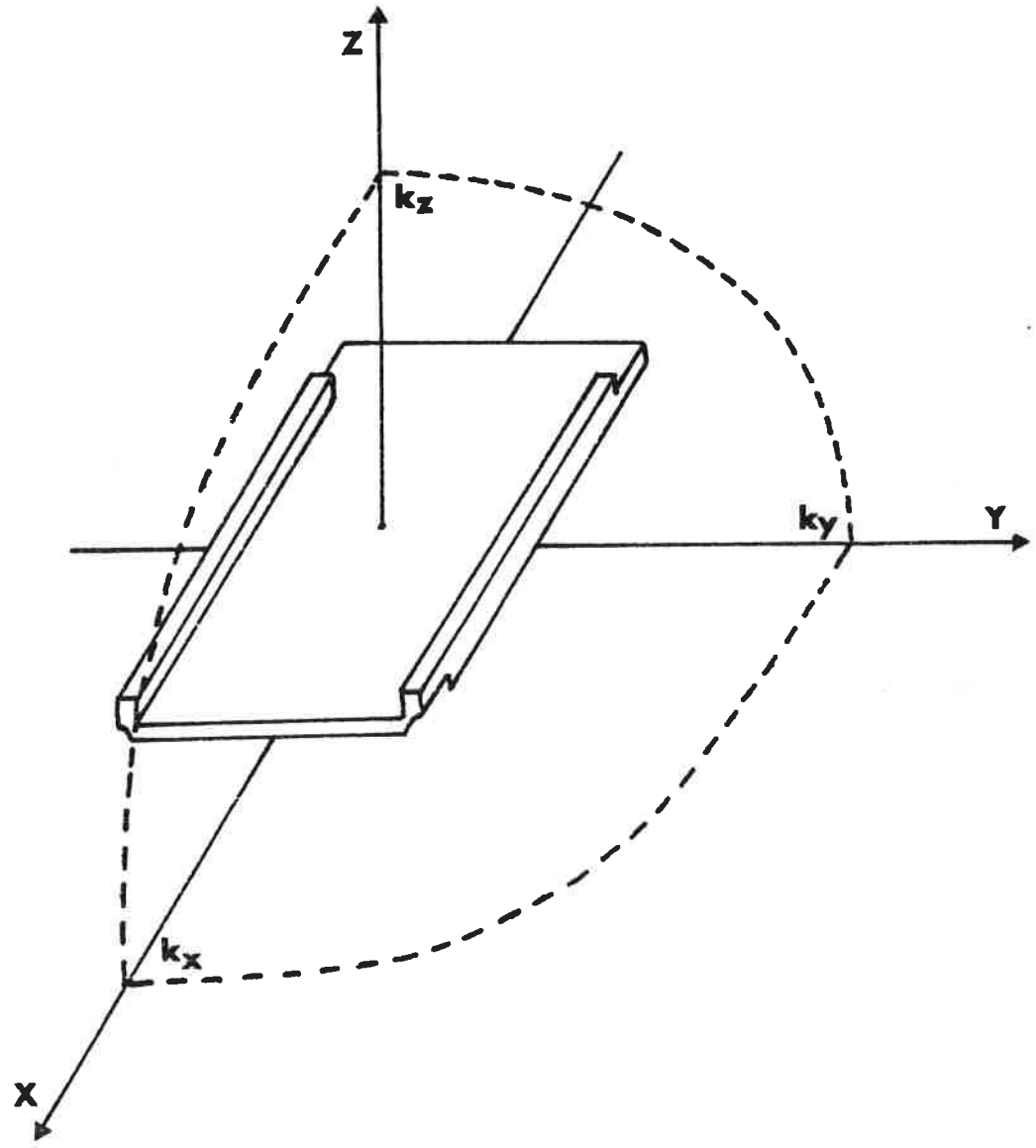



**Fig. V-1** : Anisotropie d'ATR. Ellipsoïde des grandeurs. Les directions principales coïncident avec celles du repère de carottage.

# A - L'ANISOTROPIE D'ATR

## NOTION DE TENSEUR

Les problèmes théoriques relatifs à l'anisotropie magnétique des roches, en général, ont été abordés en détail par L. Daly en 1970. Cet auteur a montré que le caractère tensoriel de l'anisotropie n'est vérifié que lorsqu'il y a proportionnalité entre l'aimantation et le champ appliqué. Par souci de cohérence avec les notations utilisées dans la publication en anglais sur l'effet de forme (*cf.* chapitre précédent), l'aimantation volumique sera notée M et la susceptibilité volumique k.

Dans un repère (Oxyz) lié à un matériau anisotrope, les composantes $M_x$, $M_y$ et $M_z$ de l'aimantation se déduisent des composantes du champ agissant H par la relation :

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yx} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} \qquad (I)$$

ou encore :

$$M_i = \left[k_{ij}\right] H_j \qquad i,j = x, y, z$$

Un terme $k_{ij}$ représente la susceptibilité apparente dans la direction i pour un champ agissant dans la direction j. Ces termes sont des fonctions des directions principales et des susceptibilités selon ces directions (Daly, 1970). Dans le cas général, $\left[k_{ij}\right]$ est une matrice non symétrique, de directions propres particulières. Le choix d'un autre repère conduirait à une autre matrice non symétrique et de directions propres distinctes. Ces matrices n'ont donc pas un caractère tensoriel.

Si les susceptibilités principales sont constantes, c'est-à-dire s'il y a proportionnalité entre l'aimantation acquise et le champ appliqué, alors la matrice devient symétrique :

$$k_{ij} = k_{ji}$$

L'anisotropie présente alors un caractère tensoriel. La diagonalisation du tenseur permet d'obtenir les trois directions principales K, L, M rapportées à (Oxyz) et les susceptibilités principales k, l et m. Le tenseur est directement lié à l'existence de la surface de l'ellipsoïde des grandeurs. Cette surface correspond au lieu des extrémités des vecteurs aimantation quand un champ agissant unitaire décrit toutes les directions de l'espace. On peut lui associer d'autres surfaces telle celle des susceptibilités ou des aimantations apparentes.

## SURFACE DES AIMANTATIONS APPARENTES

"C'est le lieu des extrémités des vecteurs aimantation rapportés à un champ unitaire, dans la direction du champ inducteur, quand celui-ci décrit toutes les directions de l'espace." (Daly, 1970).

Dans le plan (OKL) de la figure V-2, l'aimantation M décrit l'ellipse des grandeurs tandis que $M_a$ décrit la courbe des aimantations apparentes. Les axes K et L correspondent aux directions principales des susceptibilités k et l. L'aimantation dans la direction d'un champ unitaire h appliqué selon une direction oh faisant un angle $\theta$ avec K est telle que :

$$\cos(\theta - \theta') = M_a / M$$

d'où :

$$M_a = (k \cdot \cos^2\theta + l \cdot \sin^2\theta)\, h$$

$$k_a = \frac{(k+l)}{2} + \frac{(k-l)}{2} \cdot \cos 2\theta \qquad \text{(II)}$$

La courbe représentative de cette fonction est la courbe des susceptibilités apparentes dans le plan (OKL). Cette représentation graphique permet de déterminer immédiatement l'aimantation induite connaissant le champ appliqué.

Le but de ce travail n'est pas d'étudier l'origine minéralogique de l'anisotropie ni d'en faire la théorie. Pour cela, on se reportera en particulier à la thèse de L. Daly (1970). Il s'agit avant tout de montrer la possibilité de corriger les effets de l'anisotropie d'ATR sur les argiles cuites. Il convient donc, dans un premier temps, de vérifier expérimentalement le caractère tensoriel de cette anisotropie. A la suite de quoi, on verra comment déterminer les termes du tenseur ainsi que les directions et susceptibilités principales. Enfin, un certain nombre de tests d'invariance seront effectués concernant la stabilité minéralogique des argiles cuites d'une chauffe à l'autre, l'indépendance du tenseur vis à vis des vitesses de refroidissement et vis à vis des températures de blocage.

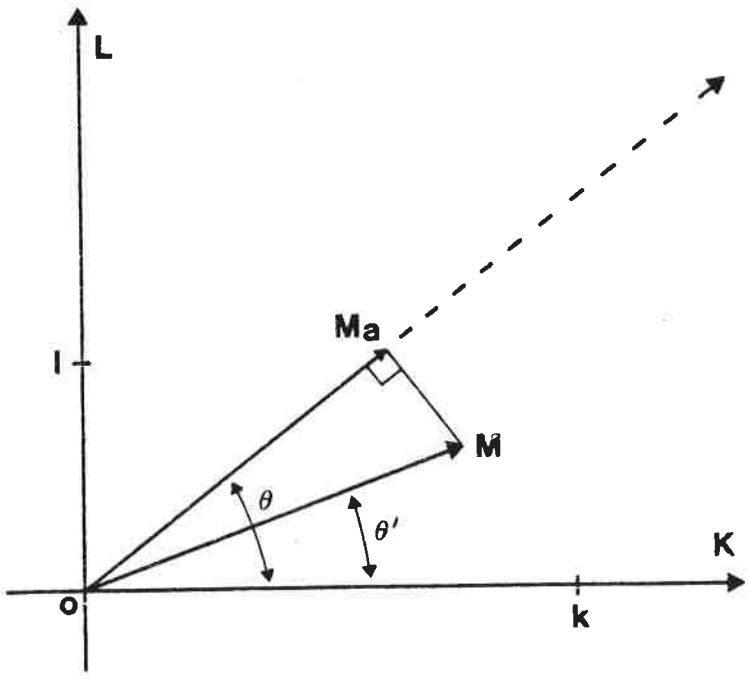



**Fig. V-2** : Aimantation induite M et aimantation apparente $M_a$ selon la direction du champ appliqué h (dans le plan OKL).

## B - L'ANISOTROPIE D'ATR DANS LES MATERIAUX DEPLACES

### CONDITIONS EXPERIMENTALES

Les études d'anisotropie ont été effectuées au Laboratoire d'Archéométrie, dans un four construit en 1985 par M. Le Goff, du Laboratoire de Géomagnétisme de Saint-Maur. Ce four, servant aussi à la désaimantation thermique, est équipé d'une bobine de champ permettant de créer un champ magnétique entre 0 et 1 Oe, dirigé selon l'axe du four et uniforme dans la zone de chauffe des échantillons. Trois types de bateaux de quartz sont utilisés pour placer les échantillons (entre 8 et 10 à la fois) dans le four. Un premier bateau permet de positionner les carottes avec l'axe z parallèle à l'axe du four. Un deuxième bateau consiste en une plaque de quartz sur laquelle les carottes sont posées l'un des axes x ou y, ou la diagonale (xy), parallèle au champ appliqué. Le troisième permet d'incliner les carottes à 45° par rapport à l'axe du four, c'est-à-dire d'effectuer des aimantations selon les diagonales des faces (xz) et (yz).

La procédure standard utilisée pour l'étude des anisotropies est la suivante. Une chauffe à 700°C pendant 1 h 30 mn est effectuée dans un champ d'intensité de l'ordre du CMT, appliqué selon l'une des directions x, y, z, xy, yz ou zx des carottes. Le refroidissement est effectué sous ventilation en 1/2 h, mais les carottes ne sont retirées du four qu'au bout d'une heure afin que le coeur soit bien refroidi. Les échantillons sont éloignés les uns des autres de la distance de leur épaisseur, ceci afin d'éviter toute interaction entre les champs magnétiques dégagés par chacun d'eux. De plus, ils sont placés au même endroit d'une chauffe à l'autre, dans le but d'obtenir des résultats indépendants des légères inhomogénéités du champ dans le four. Le champ est appliqué depuis le début de la chauffe jusqu'à la fin du refroidissement, à l'instar des conditions réelles où les matériaux sont soumis en permanence au CMT. La chauffe à 700°C permet d'effacer toutes les aimantations antérieures acquises par les argiles cuites, puisque la température de Curie maximale des oxydes de fer est de 680°C (hématite). En fait, pratiquement tous les matériaux étudiés perdent leur aimantation entre 500° et 600°C. Les conditions de refroidissement sont reproduites de façon strictement identiques d'une expérience à l'autre.

Pour chaque échantillon et pour un champ agissant donné, on peut déterminer les termes $k_{xx}$, $k_{yy}$, $k_{zz}$, $k_{xy}$, $k_{xz}$ et $k_{yz}$ du tenseur d'anisotropie d'ATR. Ces déterminations ont été effectuées sur 12 lots différents de matériaux déplacés. Afin de faciliter les renvois au sein même de ce chapitre, nous donnons ici la liste de ces lots ainsi que le nombre d'échantillons étudiés.

- Etude expérimentale sur 7 tuiles entières gallo-romaines. Les expériences sont notées 1E à 7E. L'ansotropie a été étudiée sur les tuiles 1E à 6E, à raison de 4 échantillons par tuiles, soit 24 déterminations. (*cf.* tabl. 1 à 6)

- Etude expérimentale sur un lot de carreaux de pavage fabriqués en janvier 1986 et provenant de la briqueterie Cailleau aux Rairies (Maine-et-Loire). 10 échantillons (*cf.* tabl. 7 à 10).

- Pléchâtel, La Ville-Chérel (Ille-et-Vilaine), tuiles gallo-romaines, 9 échantillons (*cf.* tabl. 11).

- Châtillon/Seiche, Bât. I, (Ille-et-Vilaine), tuiles gallo-romaines, 9 échantillons (*cf.* tabl. 12).

- La Chayla (Corrèze), tuiles gallo-romaines, 9 échantillons (*cf.* tabl. 13).

- Baguer-Pican, La Moignerais (Ille-et-Vilaine), tuiles gallo-romaines, 7 échantillons (*cf.* tabl. 14).

- Rennes, La Bintinais (Ille-et-Vilaine), carreaux de pavage :
  Lot G (35238G), 4 échantillons (*cf.* tabl. 15)
  Lot E (35238E), 6 échantillons (*cf.* tabl. 16)
  Lot F (35238F), 11 échantillons (*cf.* tabl. 17)

- Fontevrault, Abb. St-Lazare, Cloître (Maine-et-Loire), carreaux de pavage, 9 échantillons (*cf.* tabl. 18)

- Broualan, Le Bois de Buzot (Ille-et-Vilaine), tuiles plates médiévales, 10 échantillons (*cf.* tabl. 19)

- Guignen, Le Biffoué (Ille-et-Vilaine), briques gallo-romaines, 6 échantillons (*cf.* tabl. 20)

La détermination du tenseur d'anisotropie a ainsi été effectuée sur 114 échantillons différents.

## PROPORTIONNALITE ENTRE L'ATR ET LE CHAMP

Bien que la proportionnalité entre l'ATR et le champ (inférieur à 1 Oe) ait été déjà établie par E. Thellier (1938), il a paru utile de s'en assurer à propos des matériaux étudiés ici. Les courbes d'aimantation ont été déterminées pour 8 échantillons ( 4 sur chacune des tuiles 5E et 6E), selon les axes x et z et pour un champ de 0,46 et 0,8 Oe. Les figures V-3a et b rassemblent les résultats obtenus (tabl. 5 et 6) et montrent la parfaite proportionnalité de L'ATR au champ quand celui est de l'ordre du CMT. Cette propriété est généralisée à l'ensemble des matériaux étudiés et confirme le caractère tensoriel de l'anisotropie d'ATR.

## DETERMINATION EXPERIMENTALE DES TERMES DU TENSEUR

Les termes du tenseur sont déterminés par application d'un champ donné successivement selon les axes x, y, z, xy, yz, et zx du repère de carottage. En fait, la simple application du champ selon les trois directions x, y et z est à même de fournir toutes les composantes du tenseur. Par exemple, pour un champ agissant selon x, la mesure $M_{xx}$ selon x détermine le terme $k_{xx}$ tandis que les mesures $M_{yx}$ et $M_{zx}$ selon y et z détermine les termes symétriques $k_{yx}$ et $k_{zx}$.

Pour les 12 lots étudiés, les termes symétriques sont très voisins de 0. Les aimantations sont acquises presque totalement dans la direction d'application du champ, selon les x, y et z. En effet, les aimantations transversales, perpendiculaires à la direction d'application du champ, ne dépassent jamais 5% de l'aimantation acquise selon le champ. La plupart du temps elles sont inférieures à 2%. Cela signifie que le repère de carottage (Oxyz) est implanté, à 1 ou 2° près, selon les directions principales K, L et M de l'ellipsoïde des grandeurs. On a donc $k_{xx} = k$ , $k_{yy} = l$ et $k_{zz} = m$. Pour simplifier, on notera $k_{xx} = k_x$ , $k_{yy} = k_y$ et $k_{zz} = k_z$.

Cette coïncidence n'est pas le fruit du hasard. Elle résulte de ce que l'anisotropie est directement liée à la forme même des matériaux. En effet, le couchage de la pâte selon le plan d'aplatissement des matériaux entraîne très probablement une orientation préférentielle, soit des formes, soit des axes cristallographiques des grains magnétiques dans l'argile. De plus, le couchage de la pâte peut se faire dans une seule direction, d'où un étirement souvent matérialisé en surface par les stries de lissage. C'est le cas des matériaux extrudés à travers une fente. Les directions principales de l'anisotropie sont donc confondues, à 1 ou 2 degrés près, avec les axes du repère de carottage des matériaux. Cela explique que les tenseurs déterminés soient directement diagonalisés.

En principe, il est plus précis de déterminer les termes du tenseur en effectuant des aimantations supplémentaires selon les diagonales des faces. Soit un champ unitaire h agissant selon x, on obtient $k_{xx} = M_{xx} / h$. De même, selon y, on obtient $k_{yy} = M_{yy} / h$.

Si l'on fait agir ce champ h selon la diagonale (xy), on a :

$$M_{xx} = k_{xx} \cdot h \cdot \cos 45^\circ \quad \text{et} \quad M_{yy} = k_{yy} \cdot h \cdot \cos 45^\circ$$
$$M_{yx} = k_{yx} \cdot h \cdot \cos 45^\circ \qquad M_{xy} = k_{xy} \cdot h \cdot \cos 45^\circ$$

d'où $$M(xy) = (M_{xx} + M_{xy}) \cos 45^\circ + (M_{yy} + M_{yx}) \cos 45^\circ$$

Puisque $k_{xy} = k_{yx}$, on en déduit :

$$k_{xy} = M(xy) / h - (k_{xx} + k_{yy}) / 2$$

En résumé, la mesure de

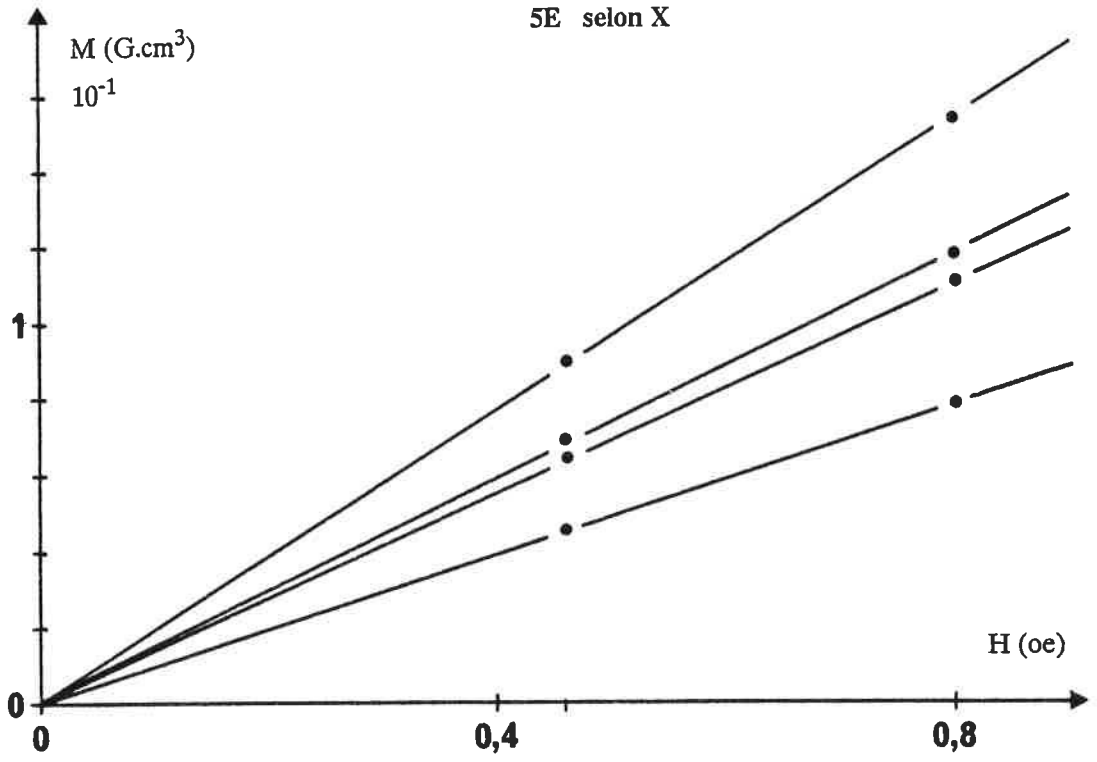
| | donne | |
|---|---|---|
| $M_x$ | | $k_{xx} = M_x / h$ |
| $M_y$ | | $k_{yy} = M_y / h$ |
| $M_z$ | | $k_{zz} = M_z / h$ |
| M(xy) | | $k_{xy} = M(xy)/h - (k_{xx} + k_{yy})/2$ |
| M(yz) | | $k_{yz} = M(yz)/h - (k_{yy} + k_{zz})/2$ |
| M(zx) | | $k_{zx} = M(zx)/h - (k_{zz} + k_{xx})/2$ |

Pour vérifier la colinéarité entre les directions principales et les axes x, y et z liés aux matériaux, des mesures d'aimantation ont été effectuées sur les échantillons de la tuile 1E et des Rairies, pour un champ h appliqué selon la diagonale (zx), c'est-à-dire à 45° par rapport à l'axe x. L'inclinaison de l'aimantation théoriquement attendue, en présence d'une anisotropie caractérisée par $k_x$ et $k_z$, est donnée par :

$$I_t = \arctan (k_z / k_x)$$

Les deux tableaux ci-dessous permettent de comparer les valeurs mesurées de l'inclinaison $I_m$ aux valeurs attendues $I_t$, déterminées à partir des facteurs $F_{xz} = k_x / k_z$ donnés dans les tableaux 1 et 7 :

| TUILE 1E | | | | |
|---|---|---|---|---|
| N° | $I_t$ | $I_m$ | $\Delta_m$ | $\lvert I_t - I_m \rvert$ |
| 35T | 41°9 | 38°6 | 3°3 | 3°3 |
| 43T | 41°5 | 40°3 | 3°5 | 0°8 |
| 51T | 42°4 | 41°6 | -0°3 | 0°8 |
| 56T | 42°3 | 40°1 | -2° | 2°2 |
| RAIRIES | | | | |
| 3C | 35°7 | 36°5 | 1°8 | 0°8 |
| 4C+ | 37°6 | 37°1 | 1° | 0°5 |
| 5C+ | 37°6 | 38°5 | 0°7 | 0°9 |
| 6C+ | 37°6 | 38°6 | 5°5 | 1° |




a

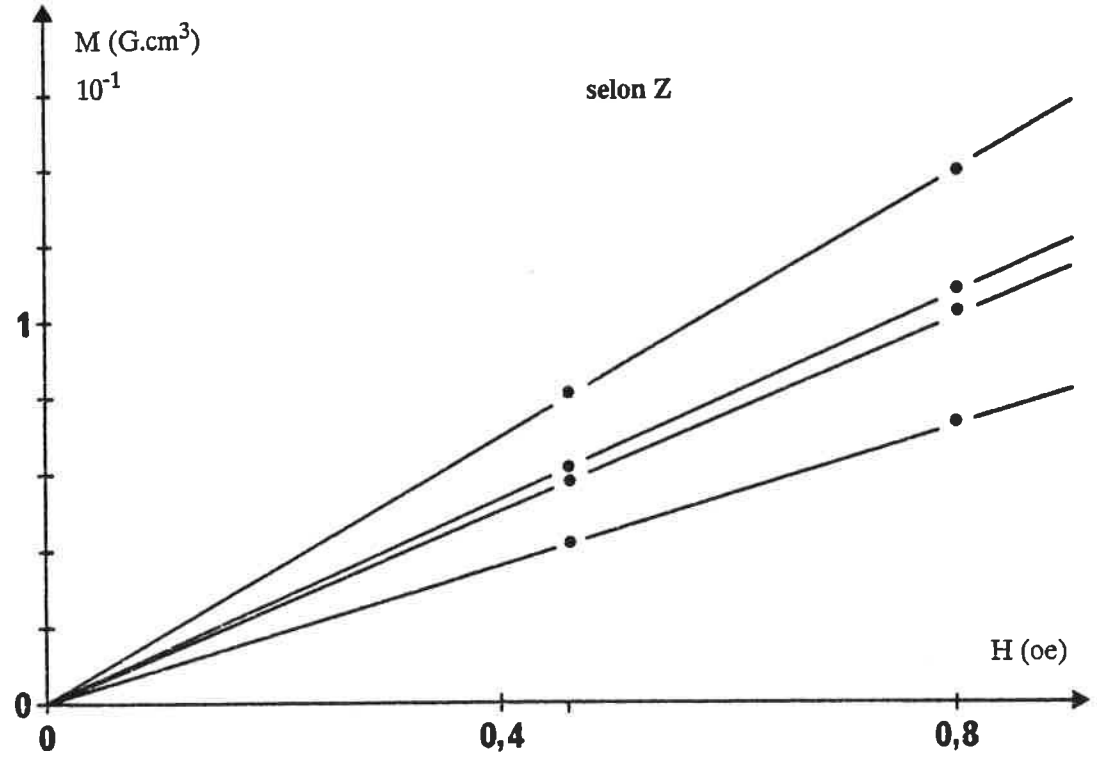
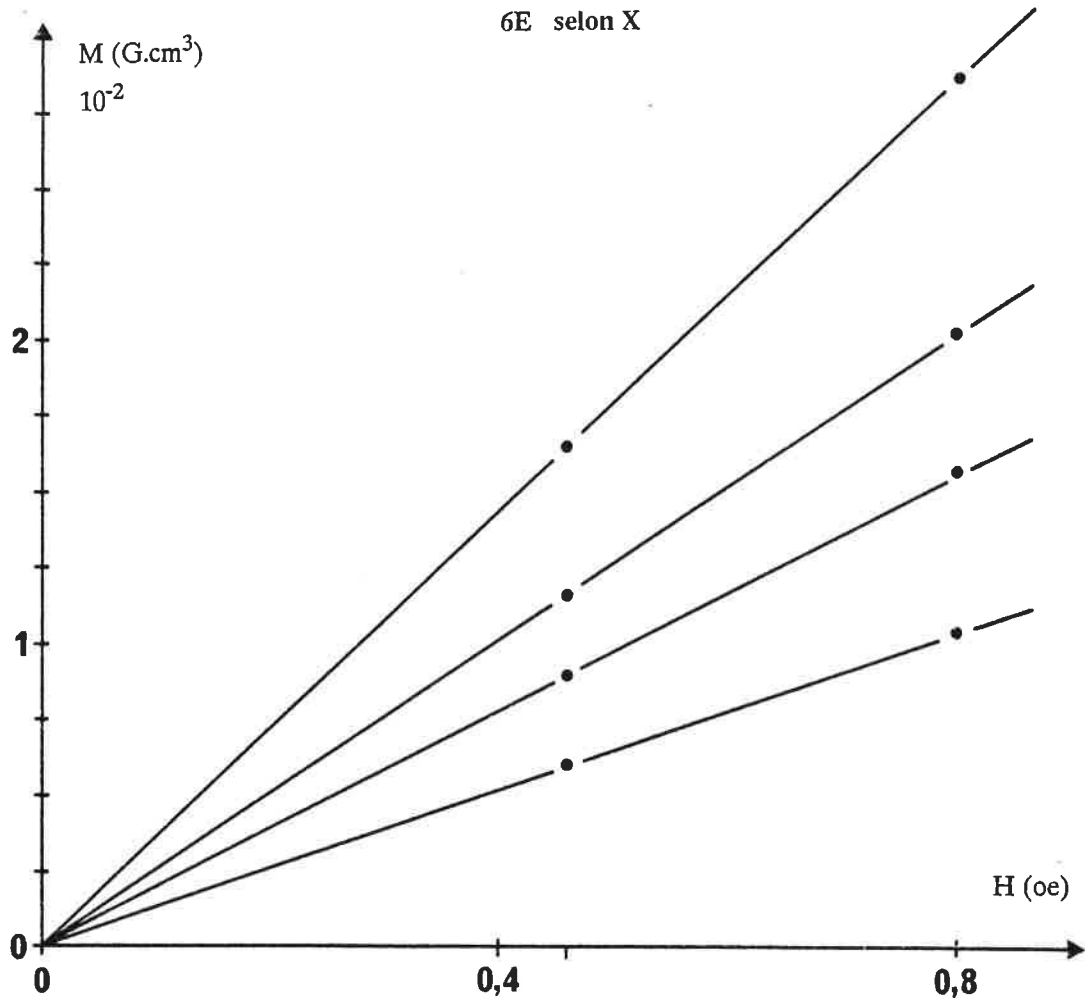
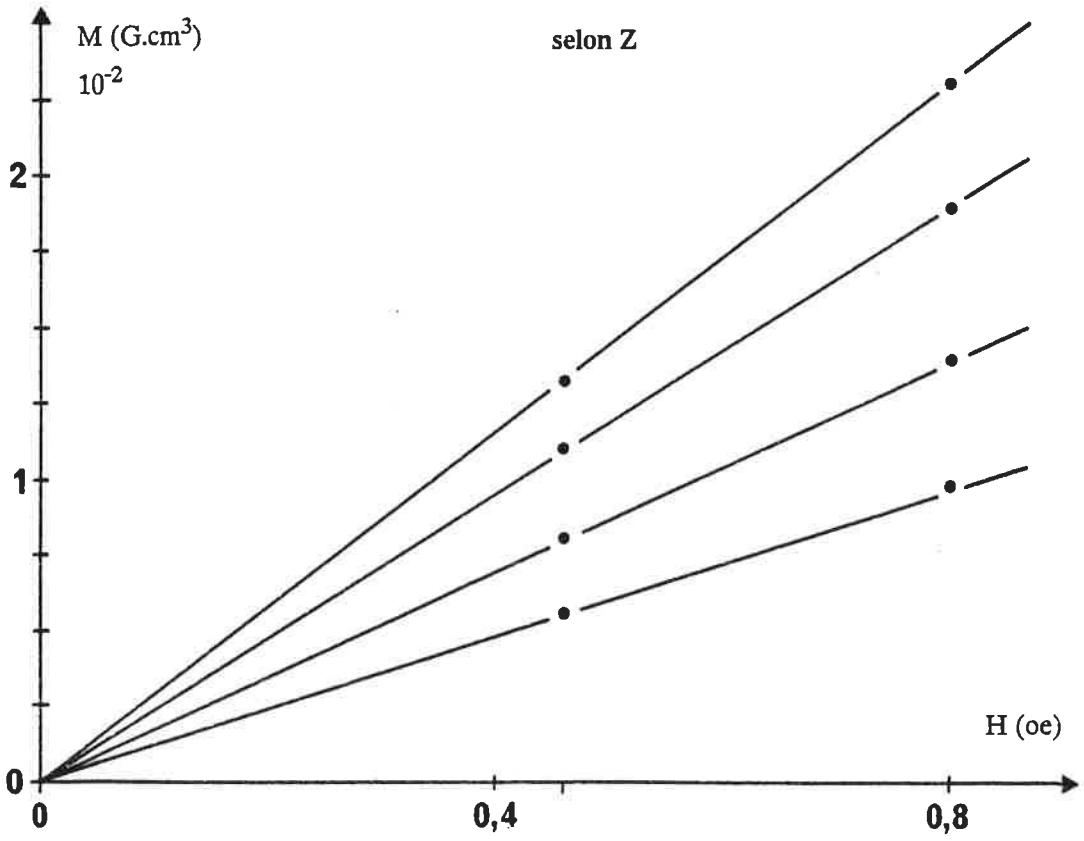



**Fig. V-3a et b :** Proportionnalité entre l'ATR et le champ appliqué ($H_e$ < 1 Oe).


6E selon X
M (G.cm$^3$)
$10^{-2}$
2
1
0
0
0,4
0,8
H (oe)

b


M (G.cm$^3$)
$10^{-2}$
selon Z
2
1
0
0
0,4
0,8
H (oe)

Les échantillons des Rairies notés + avaient l'axe x de carottage pris perpendiculairement aux stries de lissage. Dans ce cas, la susceptibilité principale selon x correspond à la suscepbilité intermédiaire ky. Il faut donc changer kz/kx de la formule ci-dessus en kz/ky. Les résultats de ces deux exemples confirment que les directions principales des tenseurs d'anisotropie d'ATR sont bien confondues, à 1 ou 2° degrés près, avec les axes x, y et z du repère de carottage. La très faible dispersion des résultats montre que le positionnement des échantillons dans le four est effectué au degré près.

## STABILITE DE L'AIMANTATION D'UNE CHAUFFE A L'AUTRE

Les aimantations sont déterminées selon la séquence $M_z$, $M_x$ et $M_z$. Une chauffe de vérification de la dérive de l'aimantation est refaite selon z, d'où $M_{zb}$. Cette vérification a été effectuée pour les tuiles 5E et 6E (tabl. 5 et 6), les Rairies (tabl. 9), Pléchâtel (tabl. 11), Châtillon/Seiche (tabl. 12) et La Chayla (tabl. 13). Elle est exprimée sous la forme du pourcentage $dM_z\% = (M_{zb} - M_z) / M_z$.

Les 10 échantillons des Rairies ont subi huit chauffes successives à 700°C, soit :

$M_{z1}$, $M_{x1}$ et $M_{y1}$ en refroidissement lent
$M_{z1a}$ pour vérification (lent)
$M_{z2}$, $M_{x2}$ et $M_{y2}$ en refroidissement rapide
$M_{z1b}$ pour vérification (lent)

Dans le tableau 9, on a : $dM_{z1a}\% = (M_{z1a} - M_{z1}) / M_{z1} \sim 1\%$
$dM_{z1b}\% = (M_{z1b} - M_{z1}) / M_{z1} \sim 1\%$

L'erreur sur l'intensité est extrêmement faible. Les échantillons présentent une très grande stabilité magnétique, même après huit chauffes consécutives à 700°C. De la même façon, les tableaux 5, 6, 11 à 13 montrent une dérive très faible de -0,1 à 0,5% entre la première et la dernière chauffe. En conséquence, il apparaît que les facteurs d'anisotropie $F_{xz} = M_x / M_z$ et $F_{xy} = M_x / M_y$ peuvent être déterminés au pourcent près, ce qui est excellent pour une correction d'anisotropie.

## INVARIANCE DES FACTEURS D'ANISOTROPIE VIS A VIS DES VITESSES DE REFROIDISSEMENT

J.M.W. Fox et M.J. Aitken (1980) ont montré que l'intensité des ATR dépendait des vitesses de refroidissement des matériaux. Selon ces auteurs, des échantillons refroidis lentement, en 7 h, de 720°C à 20°C ont une aimantation de 6 à 12% plus forte que celle acquise après un refroidissement très rapide, en 30 mn. La question est donc de savoir si les facteurs d'anisotropie dépendent des vitesses de refroidissement utilisées dans les expériences. Un test a été effectué sur les 10 échantillons des Rairies (tabl. 7 et 8). Il est décrit en détail dans l'article donné en annexe de ce chapitre et intitulé "The anisotropy as a disturbance of the archaeomagnetic dating method". On constate que les susceptibilités principales varient dans les mêmes proportions en fonction de la vitesse, ce qui laisse inchangés les facteurs $F_{xz}$ et $F_{xy}$. L'effet des vitesses sur l'intensité de l'ATR (tabl. 10) montre l'absolue nécessité de conditions expérimentales strictement identiques d'une chauffe à l'autre. La très faible dérive de l'ATR, mise en évidence au paragraphe précédent, apporte la preuve que ces conditions expérimentales sont bien vérifiées. L'invariance des facteurs d'anisotropie étant établie, c'est la procédure avec refroidissement rapide qui a été choisie pour déterminer les tenseurs des lots étudiés ici.

### INDEPENDANCE DES FACTEURS $F_{xz}$ ET $F_{xy}$ VIS A VIS DES TEMPERATURES DE BLOCAGE

M.J. Aitken *et al.* (1981) a pu montrer l'existence, pour certains échantillons, d'une variation des facteurs d'anisotropie en fonction des ATR partielles acquises dans des intervalles de température différents. Au cours du refroidissement dans un champ magnétique donné, l'argile cuite acquiert une ATR dont la direction varie en même temps que l'anisotropie des porteurs magnétiques. L'absence d'un tel effet est vérifié lorsque les courbes de désaimantation dans les diagrammes de Zijderveld sont des droites alignées sur l'origine. C'est en particulier le cas des expériences 1E et 2E (fig. V-6) et des Rairies (fig. V-16).

## C - CORRECTION DES EFFETS DE L'ANISOTROPIE D'ATR

### FORMULES DE CORRECTION

La relation entre l'aimantation acquise M et le champ agissant $H_o$ (CMT), dans le repère des directions principales du tenseur d'anisotropie, est donnée par :

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & 0 \\ 0 & k_y & 0 \\ 0 & 0 & k_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_{ox} \\ H_{oy} \\ H_{oz} \end{bmatrix}$$

Les composantes du champ agissant Ho, d'inclinaison $\propto$ et de déviation $\beta$ , sont :

$$H_{ox} = H_o \cos \propto \cos \beta$$
$$H_{oy} = H_o \cos \propto \sin \beta$$
$$H_{oz} = H_o \sin \propto$$

L'inclinaison I et la déviation $\Delta$ mesurées sont telles que :

$$\tan \Delta = M_y / M_x \qquad \text{et} \qquad \tan I = M_z / \sqrt{M_x^2 + M_y^2}$$

D'où :

$$\beta = \arctan ( F_{xz} . \tan \Delta ) \qquad \text{(III)}$$

$$\propto = \arctan ( F_{xz} . \sqrt{\cos^2 \beta + (\sin \beta / F_{xy})^2} . \tan I) \qquad \text{(IV)}$$

La correction de l'effet d'anisotropie repose sur la connaissance des facteurs $F_{xz}$ et $F_{xy}$. A partir de l'inclinaison I et de la déviation $\Delta$ mesurées dans le repère de carottage, on peut remonter à la direction qu'aurait eu l'aimantation en l'absence d'anisotropie. C'est à partir des nouvelles valeurs ($\propto$, $\beta$) que sont calculées les directions d'aimantation pour les positions théoriques à plat, de chant et debout.

## MODELE DU PLAN DE FACILE AIMANTATION

Dans le cas particulier d'une anisotropie répondant au modèle du plan de facile aimantation, confondu avec le plan d'aplatissement des matériaux, on a : $F_{xy} = 1$.

D'où $\beta = \Delta$

et $\alpha = \arctan (F_{xz} . \tan I)$

On peut aussi exprimer l'écart angulaire $e = \alpha - I$ entre la direction de l'aimantation acquise et sa projection sur la direction du champ appliqué (aimantation apparente) par :

$$\tan e = ((F_{xz} - 1) \tan \alpha) / (F_{xz} + \tan^2 \alpha) \qquad (V)$$

Si $\alpha = 0$ ou $90°$, alors $e = 0$. Lorsque le champ est appliqué selon les directions principales, l'aimantation est colinéaire au champ. La dérivation de la formule (V) montre que l'écart e est maximum lorsque l'inclinaison $\alpha$ du champ est égale à $\arctan \sqrt{F_{xz}}$

D'où : $$\tan e_{max} = (F_{xz} - 1) / 2 \sqrt{F_{xz}}$$

Cette dernière formule permet d'évaluer l'écart maximum possible entre l'inclinaison de l'aimantation induite et celle du champ appliqué, pour différentes valeurs du facteur d'anisotropie $F_{xz}$. On a ainsi :

| $F_{xz}$ | $e_{max}$ |
|---|---|
| 1,05 | 1°4 |
| 1,10 | 2°7 |
| 1,20 | 5°2 |
| 1,30 | 7°5 |
| 1,40 | 9°6 |
| 1,50 | 11°5 |

## INTERACTION AVEC L'EFFET DE FORME

D'après ce qui a été établi au chapitre précédent, le champ démagnétisant $H_1$ est tel que :

$$H_1 = [N_1] M_o = [N_1] k H_o$$

$M_o$ est l'aimantation volumique induite par le champ extérieur $H_o$. k est la susceptibilité volumique intrinsèque. $[N1]$ est donné dans l'article sur l'effet de forme (*cf.* chapitre IV).

Dans l'hypothèse d'un corps anisotrope dont les directions principales sont confondues avec les axes x, y et z, on a :

$$M_{oi} = [k_i] H_{oi} \qquad \text{avec } i = x, y, z$$

D'où : $$H_1 = [N_1] [k] H_o$$

On a montré au chapitre précédent que l'aimantation résultante $M_r$ est colinéaire à la somme $H_r$ des champs alternativement magnétisants et démagnétisants $H_o$, $H_1$, $H_2$ ... En présence d'anisotropie, on a :

$$M_r = [k] (H_o + H_1 + H_2 + ...) = [k] H_r$$

Le champ d'induction résultant s'exprime par :

$$B_r = \mu o (M_r + H_r) = \mu o ( 1 + [k] ) H_r$$

On voit immédiatement que le champ d'induction n'est plus colinéaire ni à $M_r$, ni à $H_r$. La correction ne peut donc être fondée sur l'utilisation des formules de l'induction, comme pour l'effet de forme. Il faut revenir à l'expression de l'aimantation. Le calcul analytique des termes $H_2$, $H_3$, ... étant quasiment impossible, on se limitera aux deux premiers termes $H_o$ et $H_1$. D'où :

$$M_r = ( [k] + N_1 [k]^2 ) H_o$$

Cette expression permet de calculer l'inclinaison $\alpha$ et la déviation $\beta$ du champ appliqué $H_o$ à partir de la mesure de l'inclinaison I, de la déviation $\Delta$ et de la détermination de $[N_1]$ et $[k]$. On obtient :

$$\beta = \arctan \left[ \frac{k_x (1 + N_{1x} k_x)}{k_y (1 + N_{1y} k_y)} \cdot \tan \Delta \right] \qquad \text{(VI)}$$

$$\alpha = \arctan \left[ \frac{\sqrt{(k_x + N_{1x} k^2_x)^2 \cos^2\beta + (k_y + N_{1y} k^2_y)^2 \sin^2\beta}}{k_x + N_{1x} k^2_x} \cdot \tan I \right] \qquad \text{(VII)}$$

S'il n'y a pas d'effet de forme, c'est-à-dire si $H_1 = 0$, on retrouve les formules de correction de l'effet d'anisotropie seul. S'il n'y a pas d'anisotropie, c'est-à-dire si $[k] = k$, on retrouve les formules de correction de l'effet de forme maximum donné par $B_{rmax}$ (*cf.* chapitre IV). La correction ainsi proposée est valable tant que la susceptibilité volumique moyenne de l'ATR ne dépasse pas 0,4 SI. Cela est pratiquement toujours le cas des matériaux déplacés étudiés ici.

Les formules (VI) et (VII) nécessitent la détermination des susceptibilités $k_x$, $k_y$ et $k_z$ pour chaque échantillon étudié. Ceci revient, pour un lot d'une centaine de tuiles, à faire cent déterminations de tenseurs d'ATR. Ce travail ne peut être envisagé dans l'état actuel des choses. En fait, les applications numériques montrent que les résultats donnés par ces formules sont pratiquement les mêmes, au degré près, que ceux fournis par une correction séparée, de l'effet de forme d'abord, de l'effet d'anisotropie ensuite.

## MODALITES D'APPLICATION DES CORRECTIONS

Pour l'effet de forme, on évalue une susceptibilité intrinsèque moyenne, comme s'il n'y avait pas d'anisotropie, par le rapport entre l'intensité de l'aimantation mesurée et l'intensité du champ terrestre ayant régné lors de la cuisson.

Pour l'anisotropie magnétique, il suffit de connaître les facteurs $F_{xz}$ et $F_{xy}$. Ceux-ci sont déterminés sur une dizaine d'échantillons pour un lot de cent éléments. Si la dispersion des valeurs est très faible, de l'ordre de 1 à 3%, alors on en déduit les facteurs moyens $F_{xz}$ et $F_{xy}$ qui serviront à corriger l'ensemble des mesures.

L'ordre dans lequel sont appliquées ces deux corrections est commandé par des considérations physiques. En effet, l'action du champ démagnétisant $H_1$ ne peut intervenir que lorsque le corps a acquis l'aimantation $M_o$. Or, cette aimantation est d'emblée non colinéaire au champ agissant dans le cas d'un corps anisotrope, d'où l'antériorité de l'effet de l'anisotropie par rapport à l'effet de forme. L'anisotropie est d'origine microscopique et résulte de l'anisotropie de forme ou magnétocristalline des porteurs magnétiques. Par contre, le champ démagnétisant envisagé ici a une origine macroscopique. C'est le champ magnétique créé par l'aimantation globale propre de l'objet.

Les corrections sont effectuées dans le repère de carottage (Oxyz). Cela signifie que les dimensions relatives longueur, largeur et épaisseur, servant au calcul des facteurs démagnétisant $N_{1x}$, $N_{1y}$ et $N_{1z}$, et que les facteurs d'anisotropie $F_{xz}$ et $F_{xy}$, doivent être déterminés par rapport à ce repère. Finalement, la séquence des corrections des effets perturbateurs se résume ainsi :

Séparation des ARN multi-vectorielles. Elimination des aimantations parasites.

↓

Correction de l'effet de forme.

↓

Correction d'anisotropie d'ATR.

↓

Calcul des directions pour les trois positions théoriques à plat, de chant et debout.

## D - VERIFICATIONS EXPERIMENTALES

### EXPERIENCES SUR DES TUILES ENTIERES

Afin de tester l'existence réelle de ces effets perturbateurs et la validité des formules de correction proposées, 7 expériences ont été menées sur des tuiles entières gallo-romaines fournies par la Direction des Antiquités Historiques de Bretagne. Cette vérification expérimentale fait l'objet d'une présentation dans l'article sur l'effet de forme (*cf.* chapitre précédent). Les tuiles ont été cuites debout ou à plat dans un four amagnétique du Laboratoire de Géomagnétisme de Saint-Maur (fig. V-4 et 5). La température de cuisson a été maintenue à 700°C pendant 2 h 30 mn. Le refroidissement a eu lieu en une journée, dans le CMT ambiant, non perturbé par les structures du four. L'inclinaison de ce champ était de 64° ± 0°5.

Entre 8 et 10 carottes ont été prélevées, le plus uniformément possible, sur chaque tuile. Les courbes de désaimantation (fig. V-6) révèlent un parfaitement alignement des points sur l'origine. En conséquence, le facteur d'anisotropie semble indépendant de la température de blocage. On constate sur la tuile 2E la présence d'une légère aimantation visqueuse acquise lors du séjour dans le Laboratoire. C'est pourquoi un nettoyage thermique en champ nul à 250°C a été effectué sur l'ensemble des échantillons prélevés.

Les directions d'aimantation mesurées sur les tuiles 5E et 6E n'ont pas été exploitées pour la simple raison que les positions de ces dernières dans le four ont été mal controlées. Par contre, ces tuiles ont fait l'objet d'un certain nombre de mesures : facteurs $F_{xz}$ et $F_{xy}$, proportionnalité au champ et stabilité des aimantations, qui sont présentées dans les tableaux 5 et 6, et la figure V-7.

Les résultats concernant la détermination des facteurs d'anisotropie sont donnés dans les tableaux 1 à 6 et la figure V-7. $F_{xy}$ est sensiblement égal à 1 tandis que $F_{xz}$ varie entre 1,06 (2E) et 1,13 (7E). Les histogrammes des aimantations volumiques sont présentés en figure 17 du chapitre IV. Dans ce même chapitre, le tableau I résume les conditions expérimentales ainsi que les aimantations moyennes et les facteurs moyens d'anisotropie pour les tuiles 1E, 2E, 3E, 4E et 7E. Les tuiles 6E et 7E proviennent d'une même grande tuile entière coupée en deux. Les facteurs d'anisotropie de ces deux expériences sont donc égaux en principe. Le tableau II présente les directions moyennes des aimantations, obtenues après application des corrections : désaimantation, effet de forme et effet d'anisotropie.

Toujours au chapitre IV, la figure 18 visualise sous forme d'histogrammes superposés les améliorations apportées. On passe d'une dispersion de 10° (59° à 69°3) à une dispersion de 1°4. La moyenne 63°6 ± 0°6 obtenue après toutes ces corrections coïncide, au degré près, avec la valeur de 64° de l'inclinaison du CMT ayant régné lors des expériences. Ce parfait accord montre que les corrections proposées, bien qu'approchées et effectuées de façon statistique (facteurs moyens, dimensions relatives moyennes, ...), permettent de retrouver la direction du champ à partir des mesures des ATR des matériaux déplacés.

Ces expériences montrent à la fois l'existence de l'effet de forme, variable en fonction de l'intensité d'aimantation, et l'existence de l'anisotropie d'ATR. Les valeurs $F_{xz} \sim 1{,}1$ et $F_{xy} \sim 1$ indiquent une anisotropie caractérisée par un plan de facile aimantation confondu avec le plan d'aplatissement des matériaux. Les facteurs varient peu au sein d'une même tuile. Seule la tuile 6E présente une assez grande dispersion du facteur $F_{xz}$ avec des valeurs allant de 1,06 à 1,24. Cette dispersion est très nettement corrélée avec celle des inclinaisons mesurées après désaimantation thermique à 250°C et correction d'effet de forme :

| N° | I 250°C | I E.F. | $F_{xz}$ | I Anis. | M A/m |
|---|---|---|---|---|---|
| 21T | 58°6 | 59°3 | 1,07 | 61°1 | 1,509 |
| 33T | 58°1 | 58°4 | 1,07 | 60°2 | 0,731 |
| 44T | 56°1 | 56°6 | 1,14 | 59°8 | 1,009 |
| 51T | 54°7 | 55°6 | 1,24 | 61°2 | 1,836 |
| | | | | 60°6 ± 0°6 | |

En outre, mais sans que cela soit lié, l'intensité d'aimantation peut varier du simple au double d'un échantillon à l'autre. L'hétérogénéité magnétique des pâtes apparaît ainsi comme un facteur important de la dispersion des résultats.

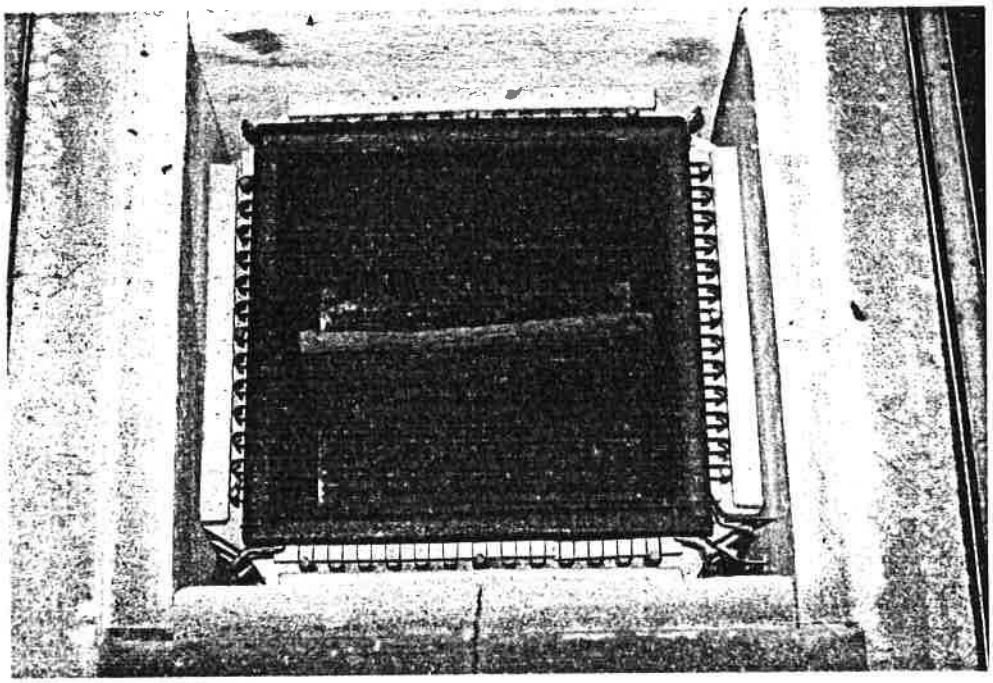
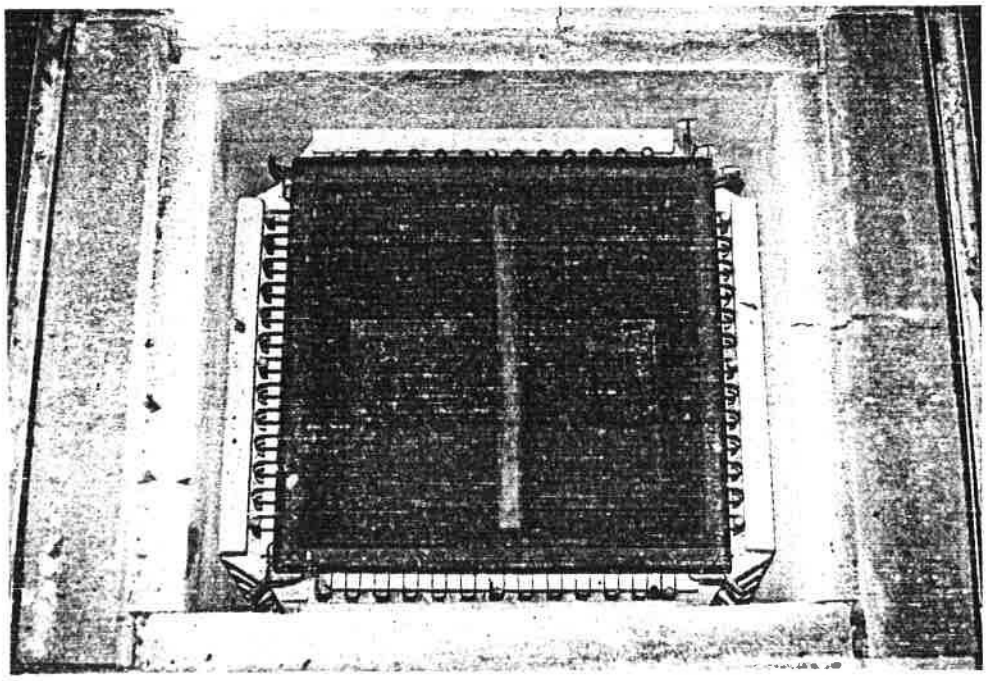


**Fig. V-4** : Etude expérimentale. Tuile en position debout dans le four amagnétique du Laboratoire de Géomagnétisme de Saint-Maur-des-Fossés (vue de dessus).



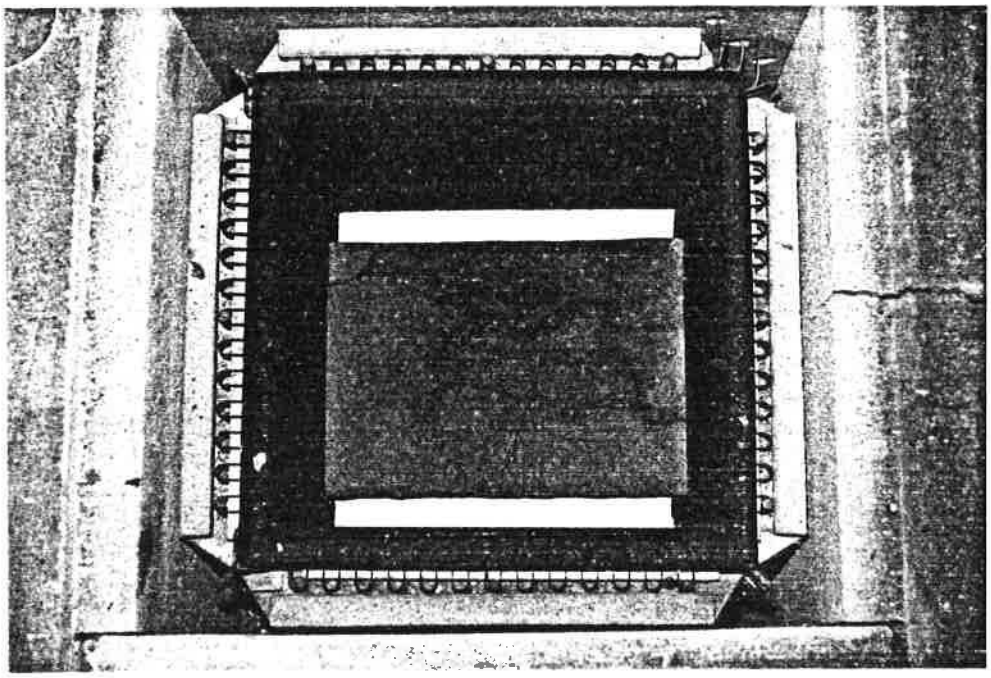
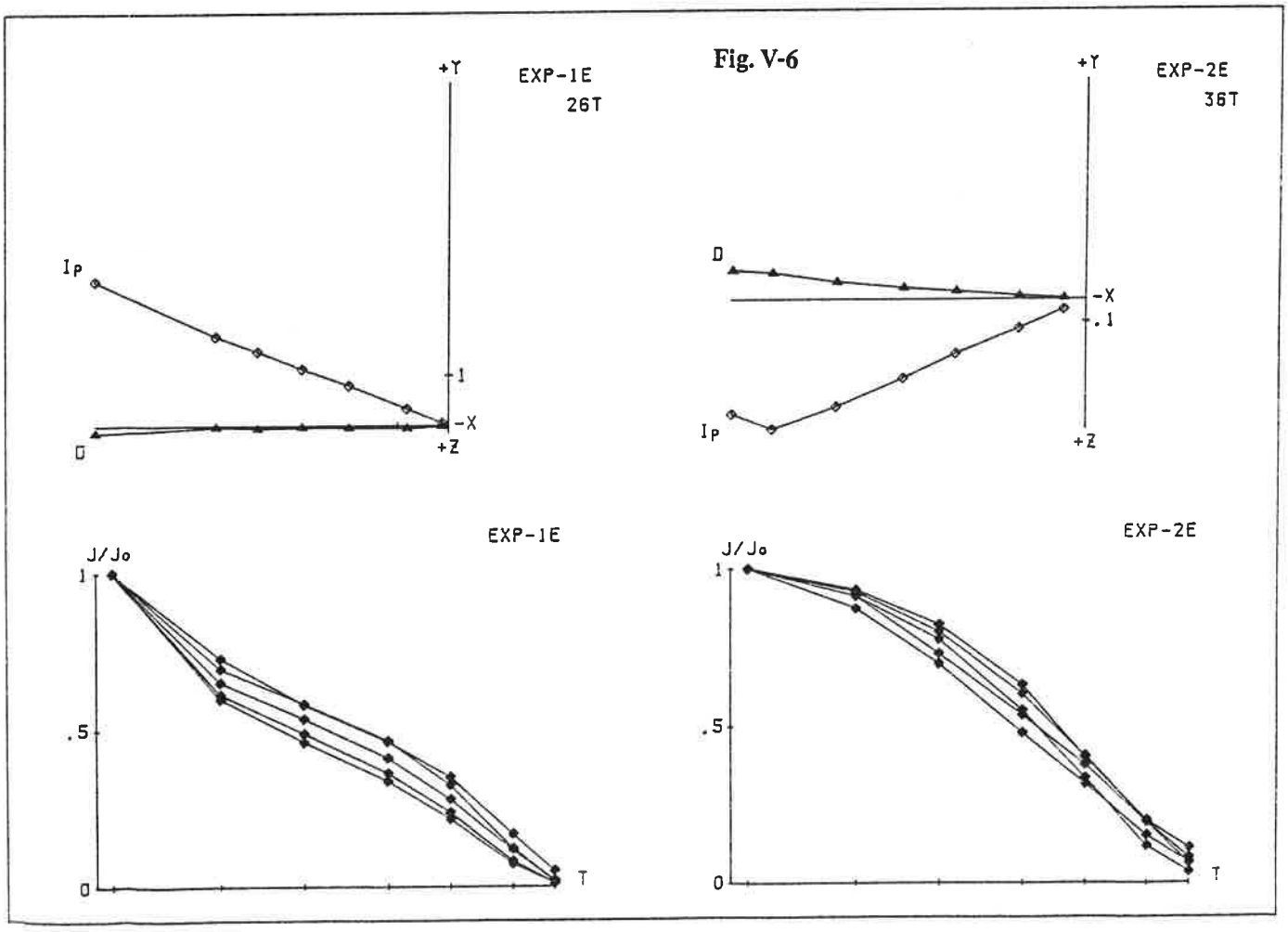


**Fig. V-5** : Etude expérimentale. Tuile en position à plat. Un bloc de béton cellulaire amagnétique isole la tuile du fond du four.

**Fig. V-6**



**TUILE ENTIERE 1E** **TABLEAU 1**

Chauffe à 700 °C pendant 1h30 et refroidissement rapide en 1/2h sous 46000 $\gamma$

| N° | $10^{-4}$ Am$^2$ $M_z$ | $M_x$ | $M_y$ | $F_{xz}$ | $F_{xy}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 35T | 0,516 | 0,576 | 0,562 | 1,115 | 1,025 |
| 43T | 0,681 | 0,770 | 0,750 | 1,132 | 1,027 |
| 51T | 0,528 | 0,579 | 0,594 | 1,097 | 0,975 |
| 56T | 0,533 | 0,586 | 0,549 | 1,098 | 1,067 |

**Fxz = 1,11 ± 0,01**
**Fxy = 1,02 ± 0,03**

**TUILE ENTIERE 2E** **TABLEAU 2**

Chauffe à 700 °C pendant 1h30 et refroidissement rapide en 1/2h sous 46000 $\gamma$

| N° | $10^{-4}$ Am$^2$ $M_z$ | $M_x$ | $M_y$ | $F_{xz}$ | $F_{xy}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 14T | 0,0991 | 0,1040 | 0,1120 | 1,050 | 0,929 |
| 36T | 0,159 | 0,171 | 0,172 | 1,072 | 0,994 |
| 43T | 0,0978 | 0,1000 | 0,1000 | 1,022 | 1,000 |
| 65T | 0,127 | 0,139 | 0,141 | 1,094 | 0,986 |

**Fxz = 1,06 ± 0,03**
**Fxy = 0,98 ± 0,03**

**TUILE ENTIERE 3E** **TABLEAU 3**

Chauffe à 700 °C pendant 1h30 et refroidissement rapide en 1/2h sous 46000 $\gamma$

| N° | $10^{-5}$ Am$^2$ $M_z$ | $M_x$ | $M_y$ | $F_{xz}$ | $F_{xy}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 12T | 0,463 | 0,511 | 0,506 | 1,105 | 1,010 |
| 27T | 0,805 | 0,878 | 0,901 | 1,090 | 0,974 |
| 34T | 0,347 | 0,364 | 0,366 | 1,049 | 0,995 |
| 65T | 0,730 | 0,813 | 0,804 | 1,114 | 1,011 |

**Fxz = 1,09 ± 0,02**
**Fxy = 1,00 ± 0,01**

**TUILE ENTIERE 4E** **TABLEAU 4**

Chauffe à 700°C pendant 1h30 et refroidissement rapide en 1/2h sous 46000 $\gamma$

| N° | $10^{-4}$ Am$^2$ $M_z$ | $M_x$ | $M_y$ | $F_{xz}$ | $F_{xy}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 24T | 0,246 | 0,261 | 0,261 | 1,061 | 1,000 |
| 41T | 0,308 | 0,329 | 0,335 | 1,068 | 0,982 |
| 56T | 0,270 | 0,284 | 0,284 | 1,052 | 1,000 |
| 63T | 0,471 | 0,507 | 0,501 | 1,078 | 1,012 |

**Fxz = 1,07 ± 0,01**
**Fxy = 1,00 ± 0,01**

**TUILE ENTIERE 5E** **TABLEAU 5**

Chauffe à 700°C pendant 1h30 et refroidissement rapide en 1/2h sous 80000 $\gamma$

| N° | $10^{-4}$ Am$^2$ $M_z$ | $M_x$ | $M_y$ | $F_{xz}$ | $F_{xy}$ | $M_{zb}$ | $dM_z$% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 15T | 1,03 | 1,12 | 1,11 | 1,087 | 1,009 | 1,02 | -1% |
| 44T | 0,742 | 0,786 | 0,780 | 1,059 | 1,008 | 0,736 | -0,8% |
| 57T | 1,40 | 1,54 | 1,50 | 1,100 | 1,027 | 1,38 | -1,4% |
| 62T | 1,09 | 1,19 | 1,20 | 1,092 | 0,992 | 1,08 | -0,9% |

**Fxz = 1,09 ± 0,02** **-1%**
**Fxy = 1,01 ± 0,01**

Chauffe à 700°C pendant 1h30 et refroidissement rapide en 1/2h sous 46000 $\gamma$

| N° | $10^{-4}$ Am$^2$ $M_z$ | $M_x$ | $F_{xz}$ |
|---|---|---|---|
| 15T | 0,594 | 0,654 | 1,102 |
| 44T | 0,420 | 0,458 | 1,089 |
| 57T | 0,816 | 0,905 | 1,110 |
| 62T | 0,625 | 0,694 | 1,111 |

**Fxz = 1,10 ± 0,01**

**TUILE ENTIERE 6E** **TABLEAU 6**

Chauffe à 700°C pendant 1h30 et refroidissement rapide en 1/2h sous 80000 $\gamma$

| N° | $10^{-4}$ Am$^2$ $M_z$ | $M_x$ | $M_y$ | $F_{xz}$ | $F_{xy}$ | $M_{zb}$ | $dM_z$% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 21T | 0,189 | 0,203 | 0,203 | 1,071 | 1,000 | 0,190 | +0,3% |
| 33T | 0,0984 | 0,105 | 0,106 | 1,067 | 0,991 | 0,0996 | +1,2% |
| 44T | 0,139 | 0,158 | 0,163 | 1,137 | 0,969 | 0,140 | +0,7% |
| 51T | 0,232 | 0,288 | 0,288 | 1,241 | 1,000 | 0,235 | +1,3% |

**Fxz = 1,13 ± 0,07** **0,9%**
**Fxy = 0,99 ± 0,01**

Chauffe à 700°C pendant 1h30 et refroidissement rapide en 1/2h sous 46000 $\gamma$

| N° | $10^{-4}$ Am$^2$ $M_z$ | $M_x$ | $F_{xz}$ |
|---|---|---|---|
| 21T | 0,110 | 0,116 | 1,055 |
| 33T | 0,0567 | 0,0601 | 1,059 |
| 44T | 0,0809 | 0,0906 | 1,120 |
| 51T | 0,134 | 0,166 | 1,243 |

**Fxz = 1,12 ± 0,08**

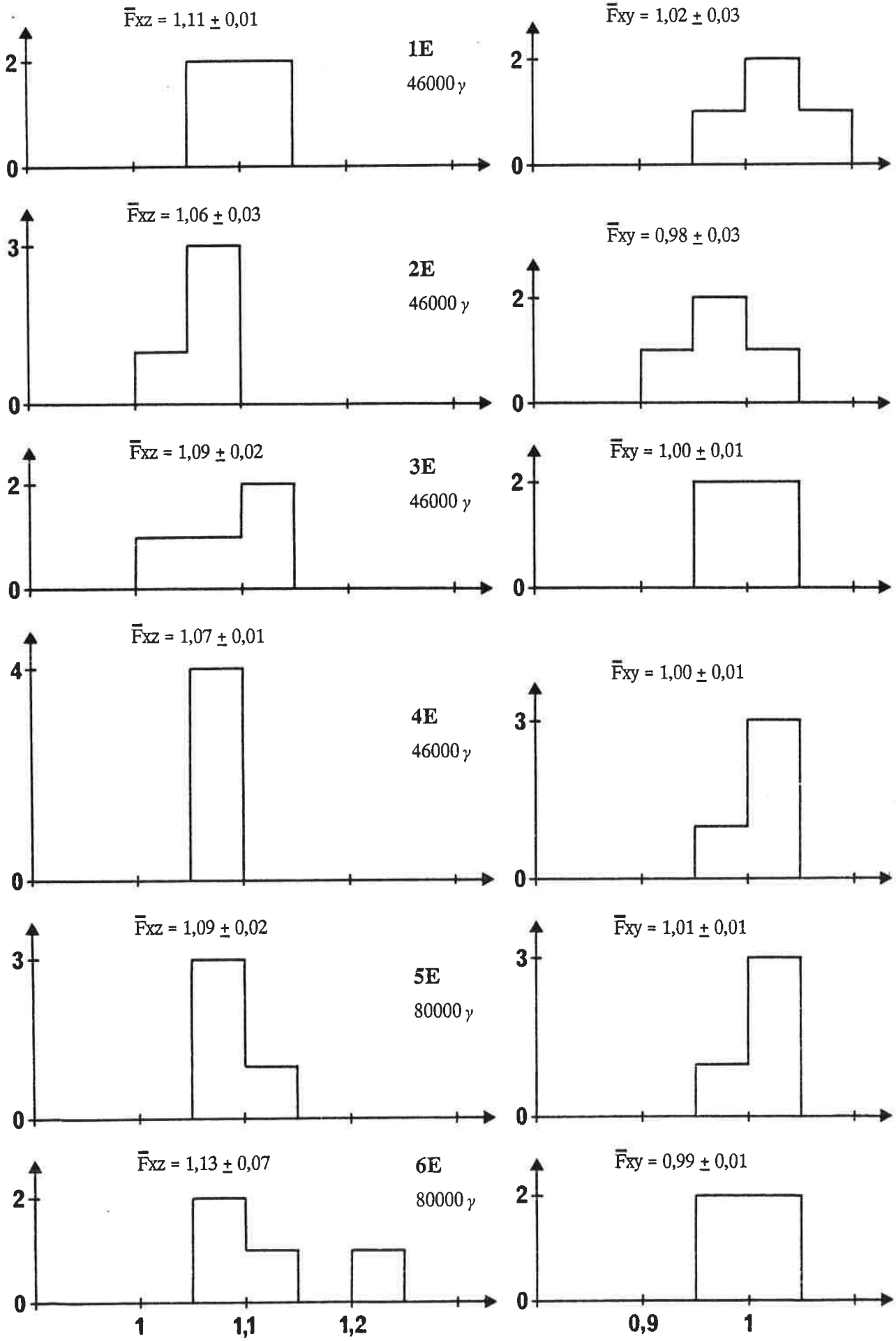



**Fig. V-7** ETUDE EXPERIMENTALE SUR TUILES ENTIERES.

## ETUDE EXPERIMENTALE SUR UN LOT DE CARREAUX DE PAVAGE

Le but de cette étude est double. Il s'agit d'une part de vérifier l'efficacité des traitements statistiques présentés dans la première partie de ce mémoire et d'autre part de montrer qu'il est effectivement possible de retrouver la direction du CMT grâce aux méthodes de correction des effets perturbateurs décrites dans cette deuxième partie.

L'étude expérimentale porte sur 76 carreaux de pavage fabriqués à la briqueterie Cailleau (Les Rairies, Maine-et-Loire) en janvier 1986. Cette briqueterie comprend quatre fours à tirage oblique avec sol incliné fonctionnant de façon artisanale au feu de bois. (fig. V-8, 9 et 10). Les carreaux étudiés ont été cuits dans le four 1 (fig. V-9).

*Observations sur le terrain*

Dans un premier temps, des observations directes sur le terrain ont été effectuées concernant la direction du CMT local, l'orientation de l'axe du four 1 par rapport au N.M. local, la pente du sol du fond du four, le mode de fabrication des carreaux ainsi que le mode de chargement utilisé pour la cuisson. Les résultats sont les suivants :

- L'inclinaison mesurée à l'extérieur et à l'intérieur du four avec l'aide d'un inclinomètre oscille entre 62 et 63°. La déviation de l'axe du four par rapport au N.M. est d'environ 20° est (fig. V-8b).

- La pente du fond du four est de 8° vers le Nord (fig. V-8c).

- Les carreaux sont fabriqués mécaniquement à l'aide d'une extrudeuse (fig. V-11). L'extrusion de la pâte à travers une fente provoque un feuilletage et un étirement de la pâte argileuse qui, comme on le verra plus loin, est à l'origine d'une très forte anisotropie magnétique. L'étirement est matérialisé en surface par les stries de lissage, très visibles. Les dimensions moyennes des carreaux étudiés ici sont de 14 x 14 x 2 cm en moyenne.

- Le chargement du four est constitué par des couches de carreaux de chant séparées deux à deux par une couche de carreaux à plat (fig. V-8c). Le plan d'aplatissement des carreaux de chant est orienté parallèlement à la direction de pente, c'est-à-dire parallèlement à l'axe du four. Les carreaux à plat sont rangés de telle sorte que les bords soient parallèles (respectivement perpendiculaires) à cet axe. On peut voir en figure V-12 un chargement de ce type en cours de cuisson. La température régnant dans le four est supérieure à 1000°C. Selon cette figure, 25% environ des carreaux sont à plat et 75% sont sur tranche.

*Etude archéomagnétique*

Un lot de 76 carreaux a été prélevé dans la partie centrale du four 1, lors du déchargement. L'étude archéomagnétique a été effectuée au Laboratoire indépendamment des observations faites sur le terrain, sauf en ce qui concerne la pente.

Les résultats des mesures brutes sont présentés en figures V-13, 14 et 15. Les statistiques montrent que 28% des carreaux ont été cuits à plat et que 72% l'ont été sur tranche. Les positions de chant et debout indiquées dans les diagrammes de pointage viennent de ce que l'axe x est placé indifféremment selon l'un des quatre côtés d'égale longueur des carreaux. Le positionnement au hasard de l'axe x par rapport à l'un des quatre

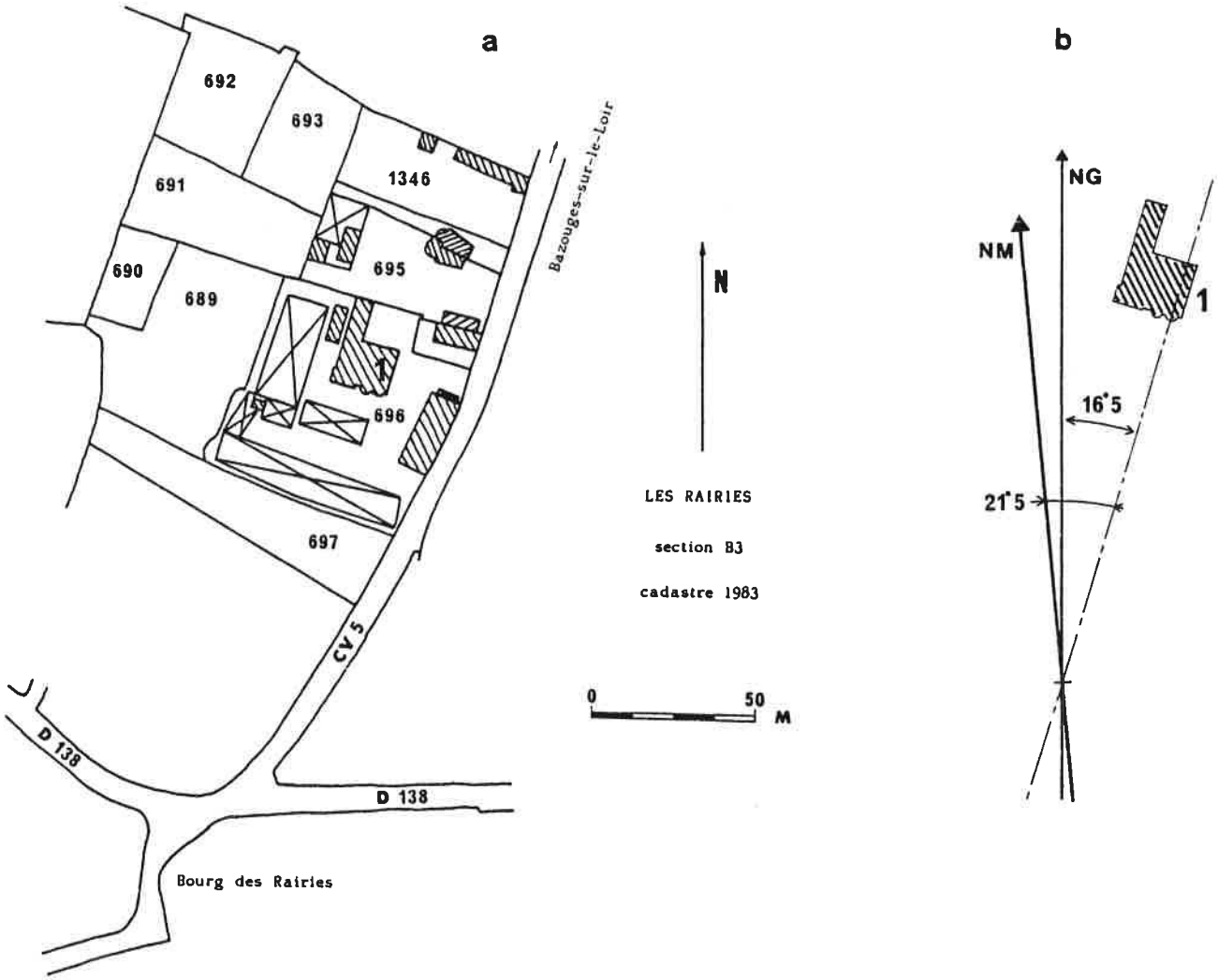
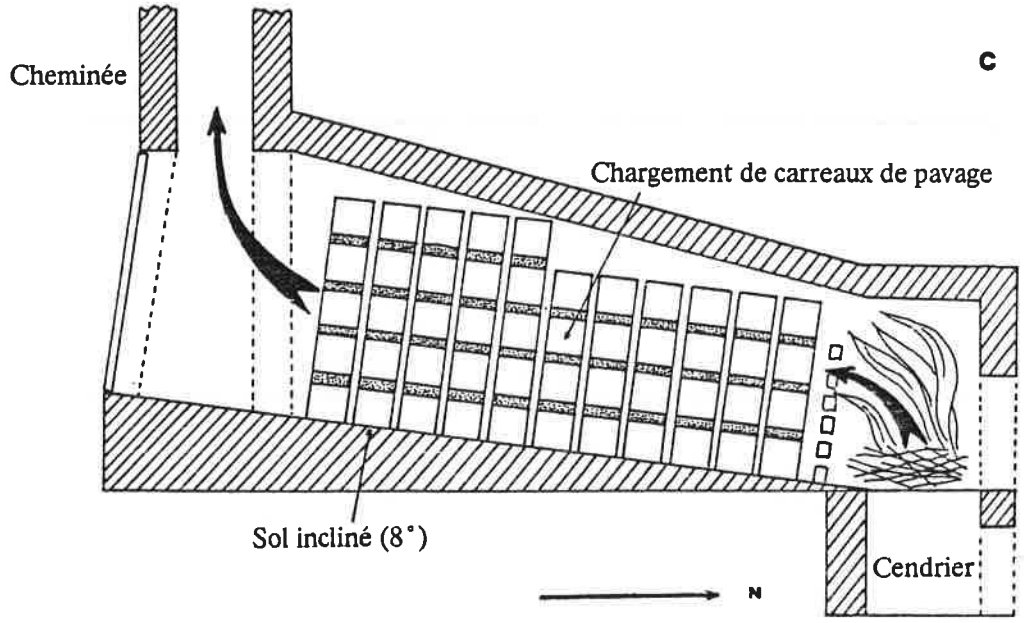



**Fig. V-8** : Les Rairies (Maine-et-Loire), briqueterie Cailleau. **a)** Plan de l'atelier. **b)** Orientation du four 1 par rapport au N.G. et au N.M. **c)** Vue en coupe du four 1 et de son chargement.



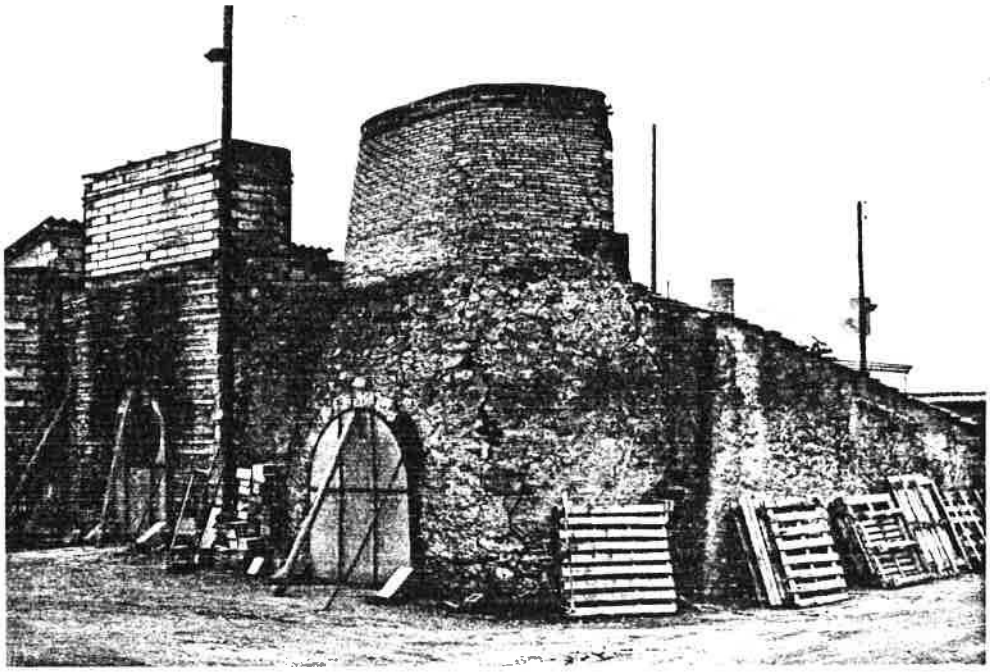


**Fig. V-9** : Les Rairies (Maine-et-Loire), briqueterie Cailleau.Les carreaux étudiés ont été cuits dans le four 1 visible au premier plan.

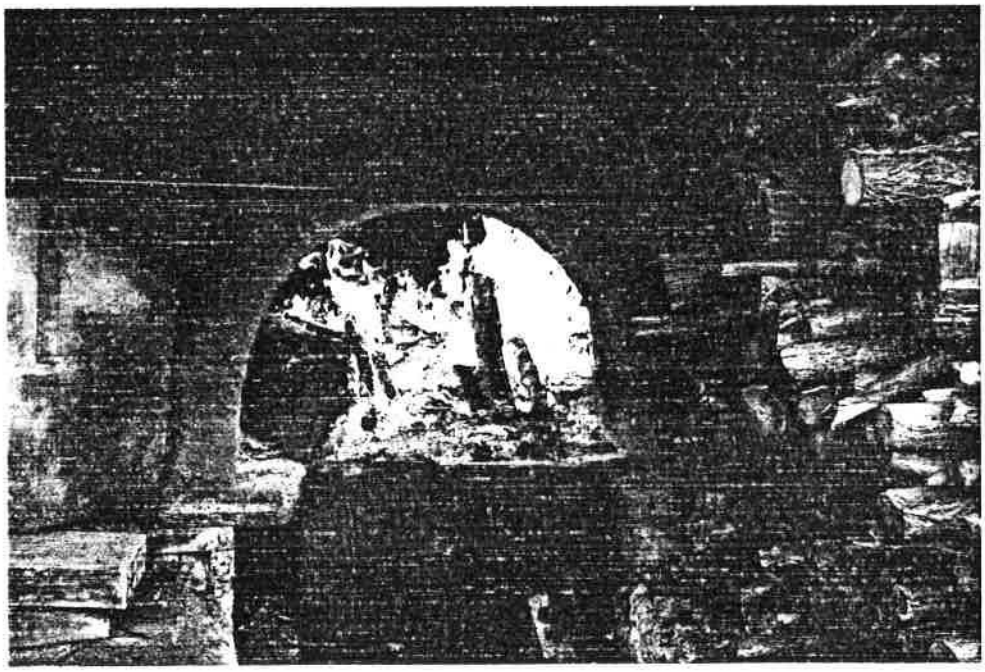


**Fig. V-10** : Les Rairies. Cuisson au feu de bois.

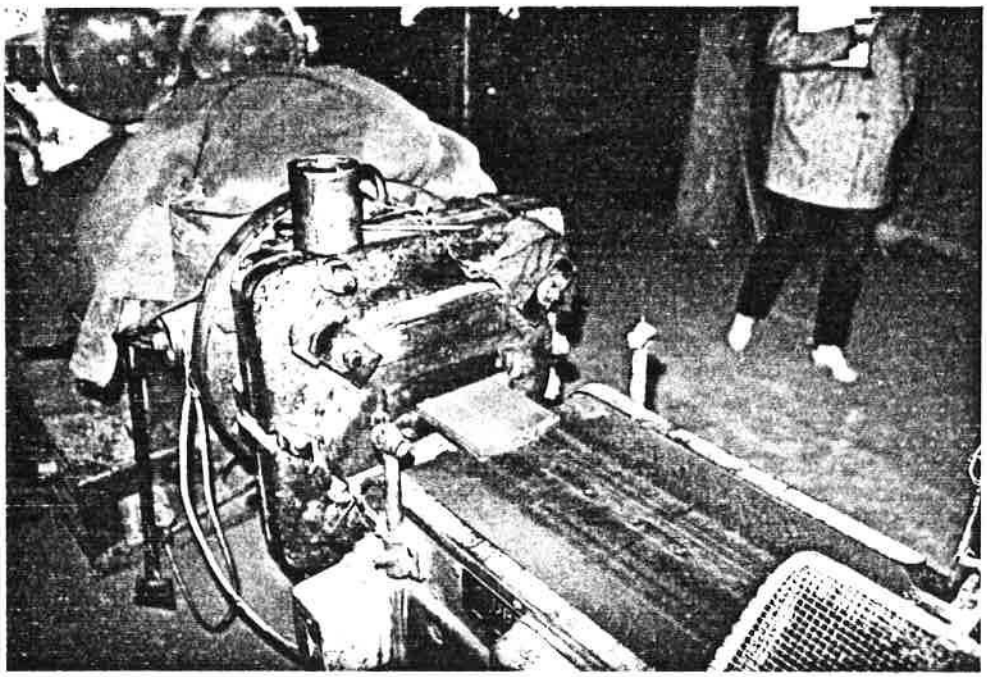


**Fig. V-11** : Les Rairies. Fabrication mécanique des carreaux de pavage par extrusion de la pâte à travers une fente ayant la forme de l'objet désiré.

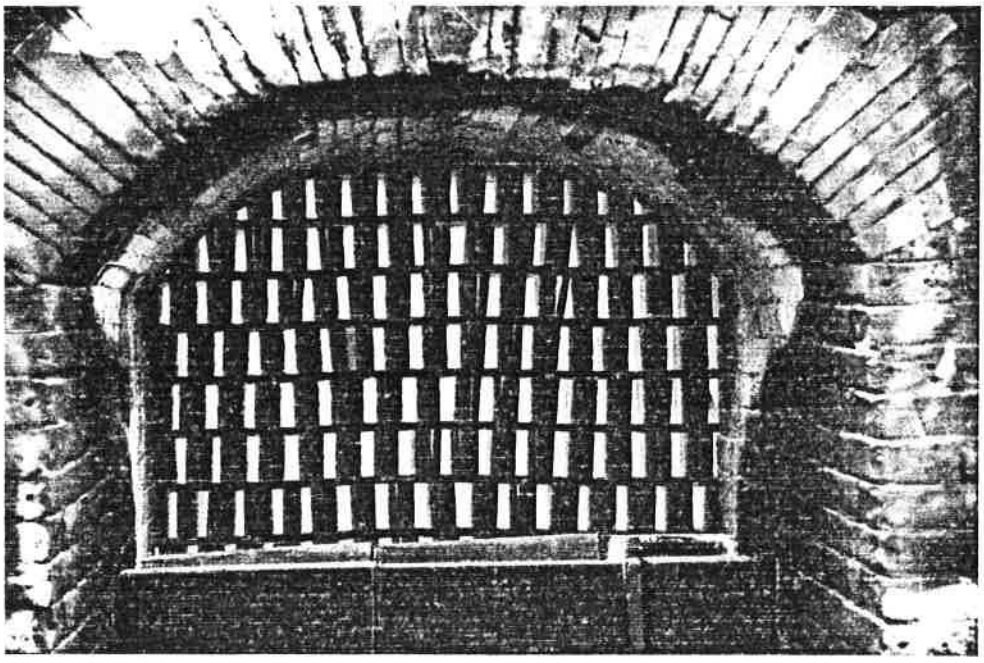


**Fig. V-12** : Les Rairies. Chargement de carreaux de pavage en cours de cuisson (T > 1000°C). On distingue très nettement le mode de remplissage du four.

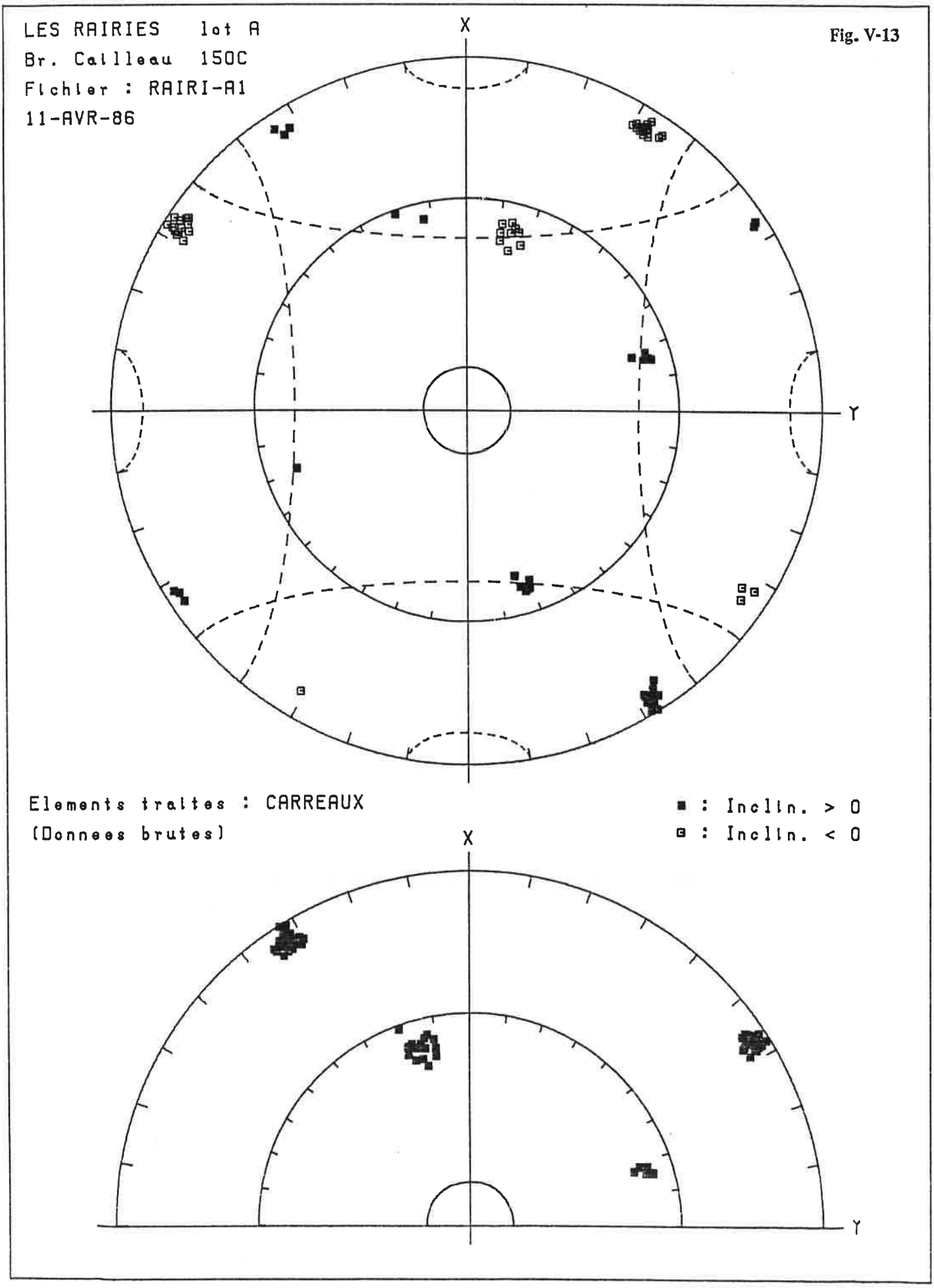

LES RAIRIES lot A
Br. Cailleau 150C
Fichier : RAIRI-A1
11-AVR-86
X
Y
Elements traites : CARREAUX
(Donnees brutes)
■ : Inclin. > 0
□ : Inclin. < 0
X
Y

Fig. V-13

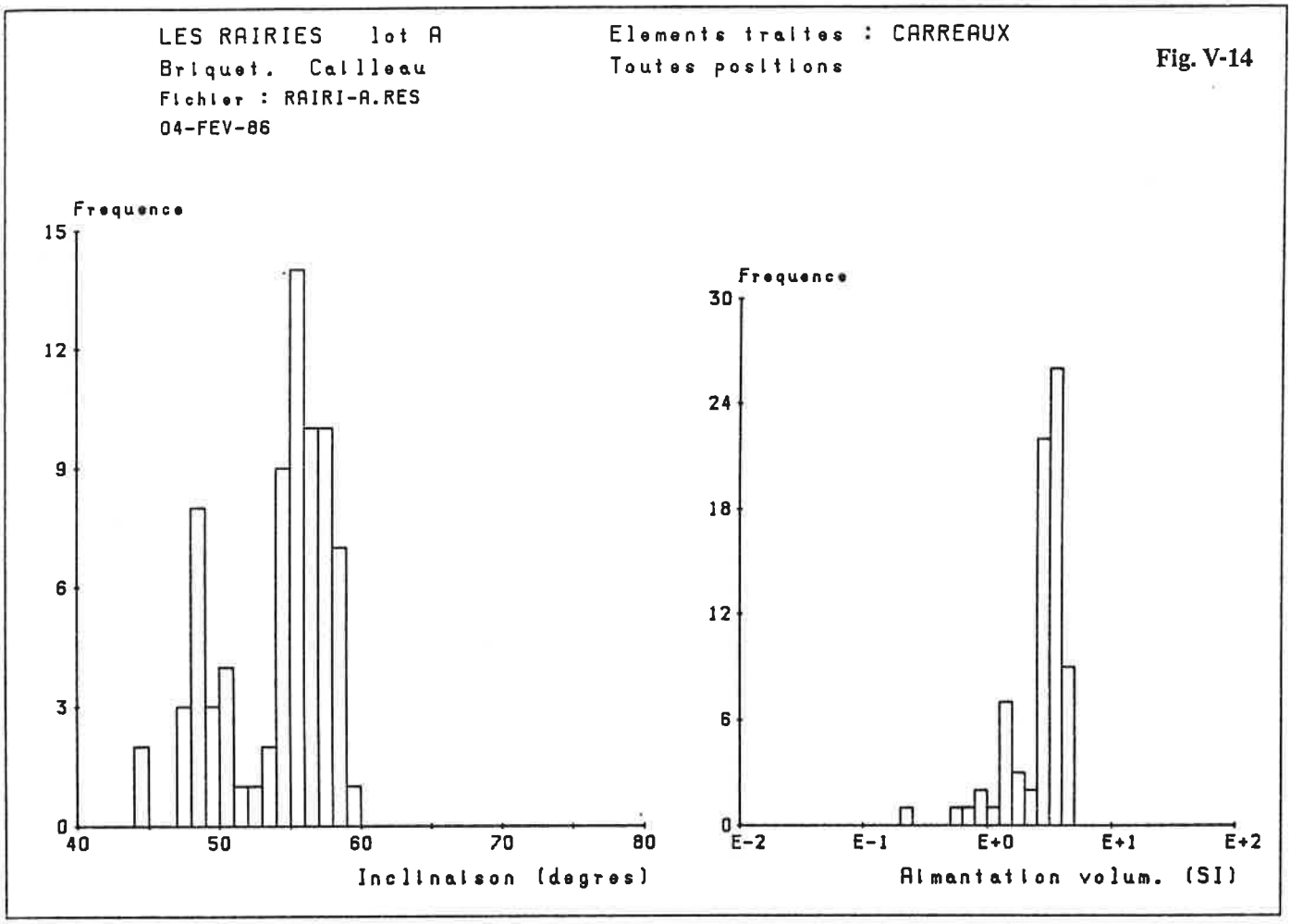



Fig. V-14

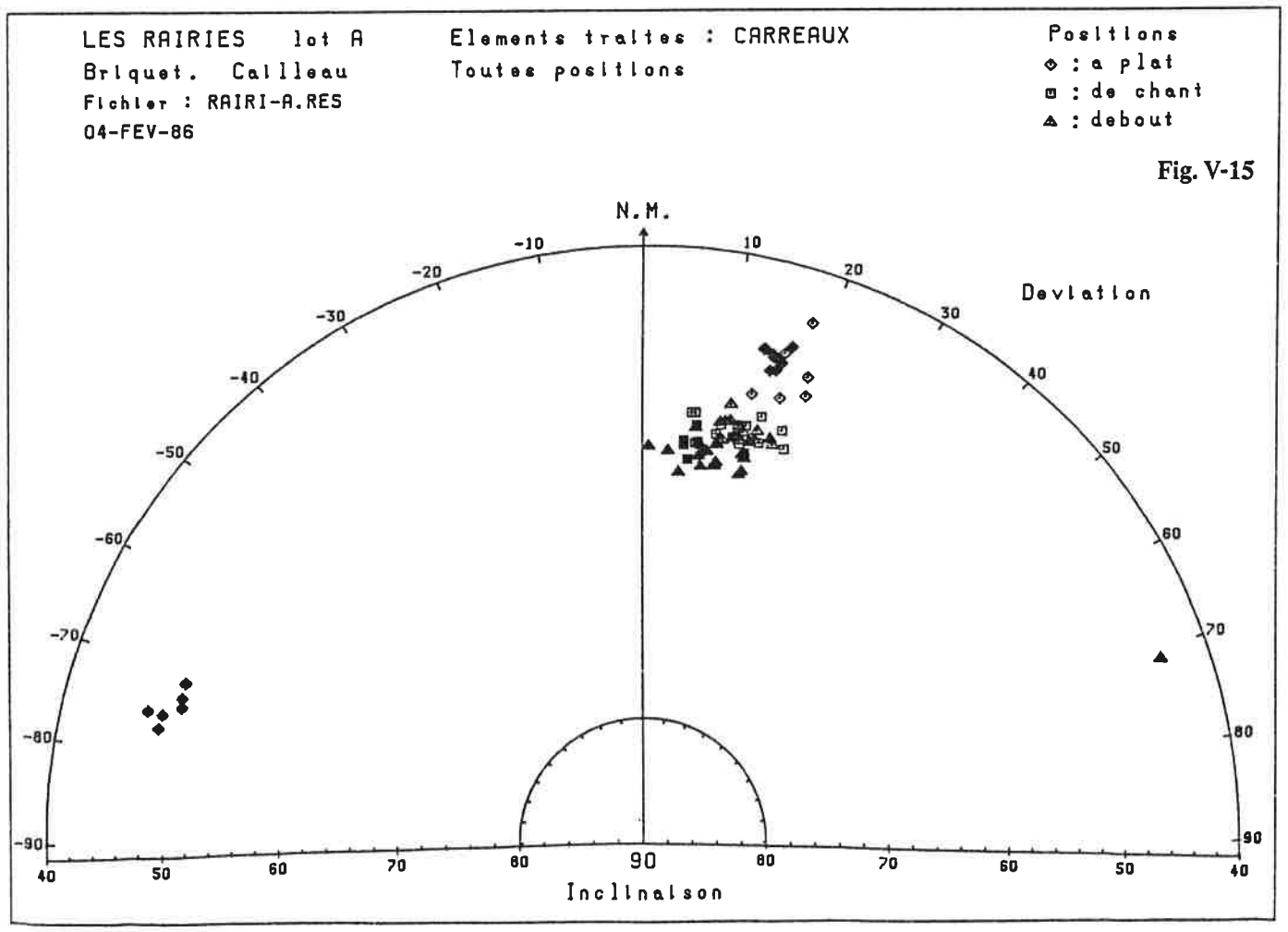



Fig. V-15

côtés n'entraîne aucun effet sur la direction de l'aimantation déterminée pour les éléments cuits sur tranche. Par contre, la déviation des positions à plat est définie à 90° près. Cela vient de ce que les carreaux posés à plat présentent exactement la même disposition par rapport au N.M. modulo 90°. En conséquence, les déviations proches de -90° ont été transformées en leur complément.

L'histogramme des aimantations volumiques en figure V-14 souligne la grande homogénéité de ce lot de matériaux. M = 2,644 A/m. L'examen de l'histogramme des inclinaisons et du diagramme de pointage en figures V-14 et 15 révèle une très nette différence (9°) entre l'inclinaison des matériaux cuits sur tranche et celle des matériaux cuits à plat.

*Les corrections*

- Une désaimantation thermique complète a été menée sur 10 échantillons. Les résultats sont présentés en figures V-16 et 17. Ils montrent le comportement magnétique extrêmement régulier et homogène des argiles en question. Une désaimantation thermique en champ nul à 150°C a été rendue nécessaire par la présence d'une légère aimantation visqueuse.

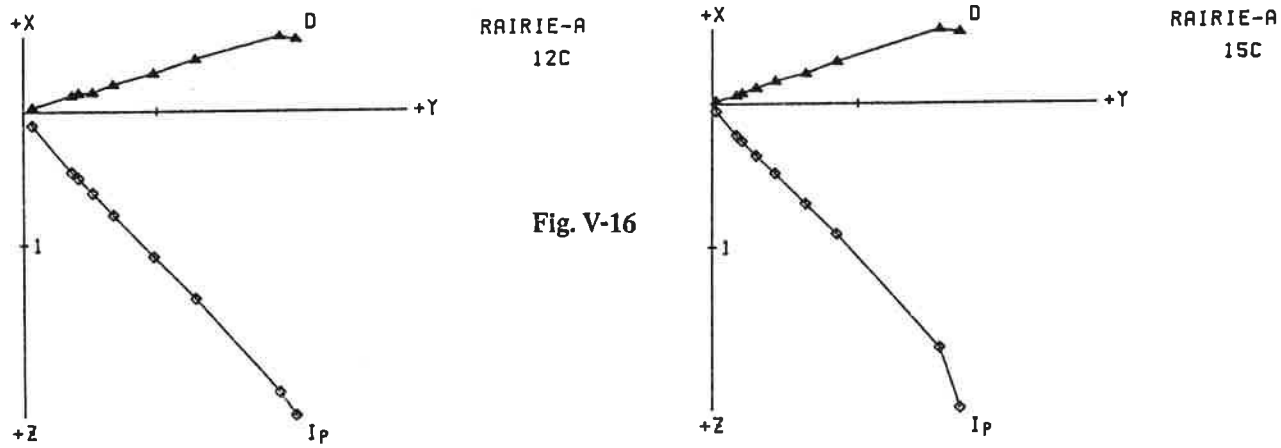



Fig. V-16

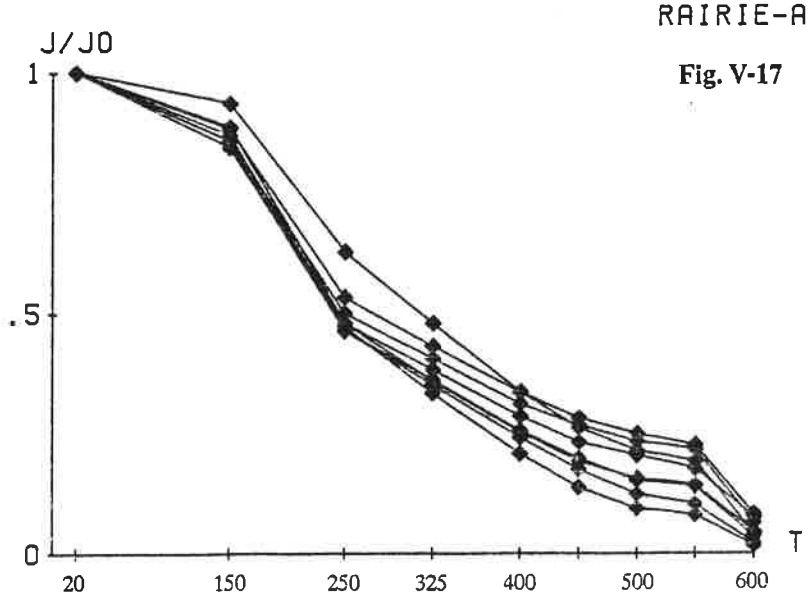



Fig. V-17

- La correction d'effet de forme a été appliquée selon les modalités définies au chapitre IV. Les dimensions relatives moyennes des matériaux sont : a=7 , b=7 , c=1 . L'intensité du CMT prise en compte est de 0,47 Oe. En fait, l'aimantation volumique (2,6 A/m) des carreaux est trop faible pour provoquer une action importante du champ démagnétisant.

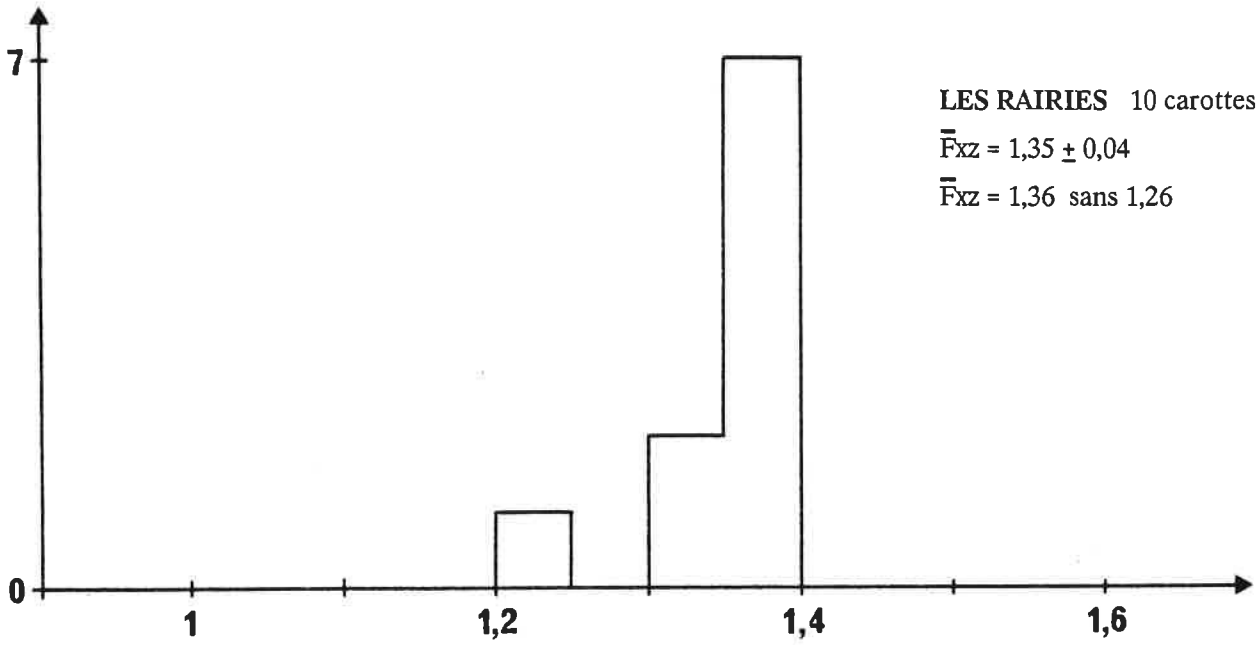
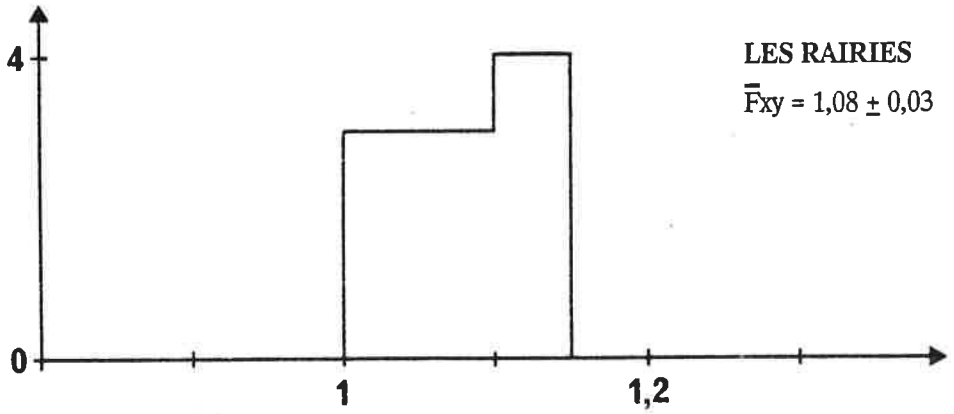



**Fig. V-18** : Histogrammes des facteurs d'anisotropie $F_{xz}$ et $F_{xy}$.




- Le tenseur d'anisotropie d'ATR a été déterminé sur 10 échantillons. Les résultats sont consignés dans les tableaux 7 et 8 ainsi qu'en figure V-18a et b. On constate la présence d'une très forte anisotropie avec $F_{xz}$ = 1,35 et $F_{xy}$ = 1,08. La susceptibilité maximale est toujours dirigée parallèlement à la direction des stries de lissage. Elle marque l'étirement de la pâte provoqué par l'extrusion. La susceptibilité minimale est perpendiculaire au plan d'aplatissement des carreaux. Elle marque le feuilletage de l'argile selon ce plan. La correction d'anisotropie a été effectuée sur l'ensemble des mesures. Elle tient compte en particulier du fait que l'axe x est tantôt parallèle, tantôt perpendiculaire aux stries.

- D'après la figure V-8c, une correction de pente est nécessaire. Elle consiste en une rotation de 8° autour de l'axe y des matériaux (*cf.* chapitre VI).

**LES RAIRIES Briqueterie Cailleau 10 échantillons** **TABLEAU 7**

Chauffe à 700 °C pendant 2h30 et refroidissement lent en 5 h sous 47000 $\gamma$

| N° | x 1,5 . $10^{-5}$ $Am^2$ $M_{z1}$ | $M_{x1}$ | $M_{y1}$ | $F_{xz}$ | $F_{xy}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1C | 1,875 | 2,472 | 2,258 | 1,318 | 1,095 |
| 2C | 2,024 | 2,766 | 2,572 | 1,367 | 1,075 |
| 3C | 1,530 | 2,129 | 1,884 | 1,392 | 1,130 |
| 4C | 2,050 | 2,671 | 2,731 | 1,332 | 1,022 |
| 5C | 2,020 | 2,639 | 2,747 | 1,360 | 1,041 |
| 6C | 1,888 | 2,458 | 2,584 | 1,369 | 1,051 |
| 7C | 1,959 | 2,706 | 2,429 | 1,381 | 1,114 |
| 8C | 0,372 | 0,446 | 0,469 | 1,261 | 1,052 |
| 9C | 2,263 | 2,876 | 3,086 | 1,364 | 1,073 |
| 10C | 2,007 | 2,656 | 2,400 | 1,323 | 1,107 |

**Fxz = 1,35 ± 0,04**
**Fxy = 1,08 ± 0,03**

**LES RAIRIES Briqueterie Cailleau 10 échantillons** **TABLEAU 8**

Chauffe à 700 °C pendant 2h30 et refroidissement rapide en 1/2 h sous 47000 $\gamma$

| N° | x 1,5 . $10^{-5}$ $Am^2$ $M_{z2}$ | $M_{x2}$ | $M_{y2}$ | $F_{xz}$ | $F_{xy}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1C | 1,726 | 2,314 | 2,101 | 1,341 | 1,101 |
| 2C | 1,833 | 2,562 | 2,359 | 1,398 | 1,086 |
| 3C | 1,377 | 1,907 | 1,713 | 1,385 | 1,113 |
| 4C | 1,844 | 2,390 | 2,505 | 1,358 | 1,048 |
| 5C | 1,821 | 2,358 | 2,473 | 1,358 | 1,049 |
| 6C | 1,703 | 2,205 | 2,319 | 1,362 | 1,052 |
| 7C | 1,763 | 2,430 | 2,202 | 1,378 | 1,104 |
| 8C | 0,325 | 0,399 | 0,404 | 1,243 | 1,012 |
| 9C | 2,061 | 2,645 | 2,820 | 1,368 | 1,066 |
| 10C | 1,826 | 2,448 | 2,187 | 1,341 | 1,119 |

**Fxz = 1,35 ± 0,04**
**Fxy = 1,08 ± 0,03**

**LES RAIRIES Briqueterie Cailleau 10 échantillons** **TABLEAU 9**

Vérification de la stabilité de l'aimantation par refroidissement lent selon l'axe z

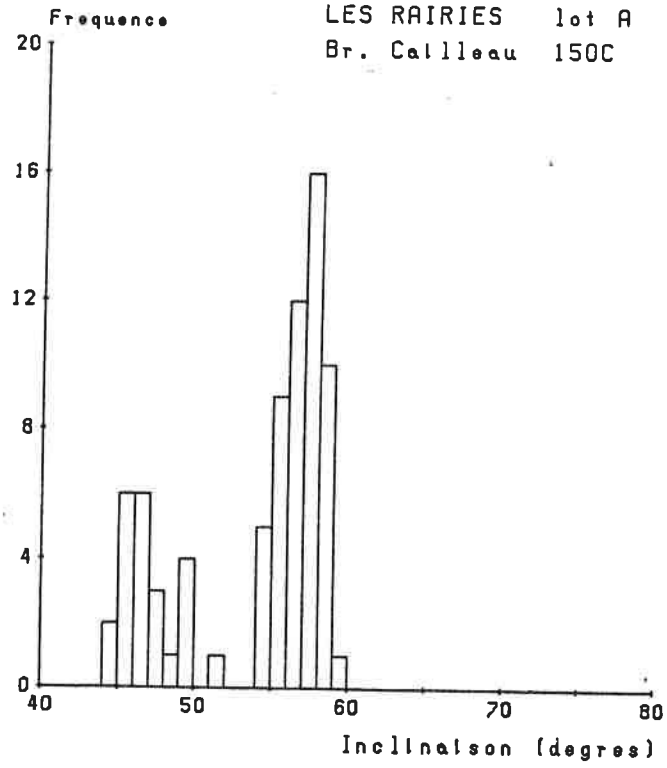
$M_{z1}$ : Première chauffe
$M_{z1a}$ : Chauffe après expériences $M_{z1}$, $M_{x1}$ et $M_{y1}$
$M_{z1b}$ : Chauffe après expériences $M_{z2}$, $M_{x2}$ et $M_{y2}$

| N° | $M_{z1}$ | $M_{z1a}$ | $M_{z1b}$ | $dM_{za}$% | $dM_{zb}$% |
|---|---|---|---|---|---|
| 1C | 1,875 | 1,853 | 1,841 | -1,2% | -1,8% |
| 2C | 2,024 | 1,984 | 1,983 | -2% | -2% |
| 3C | 1,530 | 1,508 | 1,516 | -1,4% | -0,9% |
| 4C | 2,050 | 2,017 | 2,028 | -1,6% | -1% |
| 5C | 2,020 | 1,978 | 1,990 | -2,1% | -1,5% |
| 6C | 1,888 | 1,846 | 1,862 | -2,2% | -1,4% |
| 7C | 1,959 | 1,937 | 1,931 | -1,1% | -1,4% |
| 8C | 0,372 | 0,365 | 0,387 | -1,9% | 4% |
| 9C | 2,263 | 2,270 | 2,246 | 0,3% | -0,8% |
| 10C | 2,007 | 2,011 | 1,995 | 0,2% | -0,6% |
| | | | | **-1,3%** | **-1,3%** sans 8C |

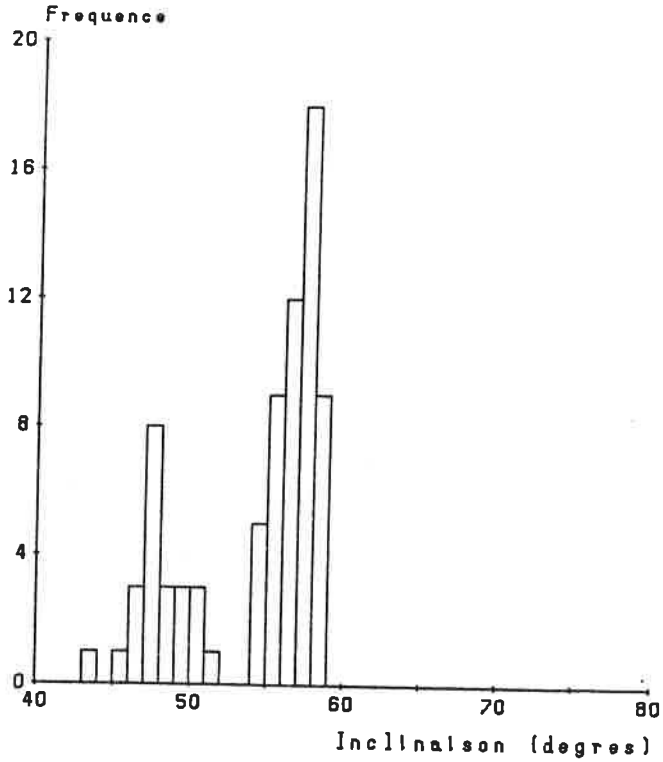
**LES RAIRIES Briqueterie Cailleau 10 échantillons** **TABLEAU 10**

Différence entre l'intensité d'aimantation acquise par refroidissement rapide et celle acquise par refroidissement lent

| N° | $dM_{z12}$ | $dM_{x12}$ | $dM_{y12}$ |
|---|---|---|---|
| 1C | -8,6% | -6,8% | -7,5% |
| 2C | -10,4% | -8,0% | -9,0% |
| 3C | -11,1% | -11,6% | -10,0% |
| 4C | -11,2% | -11,8% | -9,0% |
| 5C | -10,9% | -11,9% | -11,1% |
| 6C | -10,9% | -11,5% | -11,4% |
| 7C | -11,1% | -11,4% | -10,3% |
| 8C | -14,5% | -11,8 | -16,1% |
| 9C | -9,8% | -8,7% | -9,4% |
| 10C | -9,9% | -8,5% | -9,7% |
| | **-10,8%** | **-10,2%** | **-10,4%** |

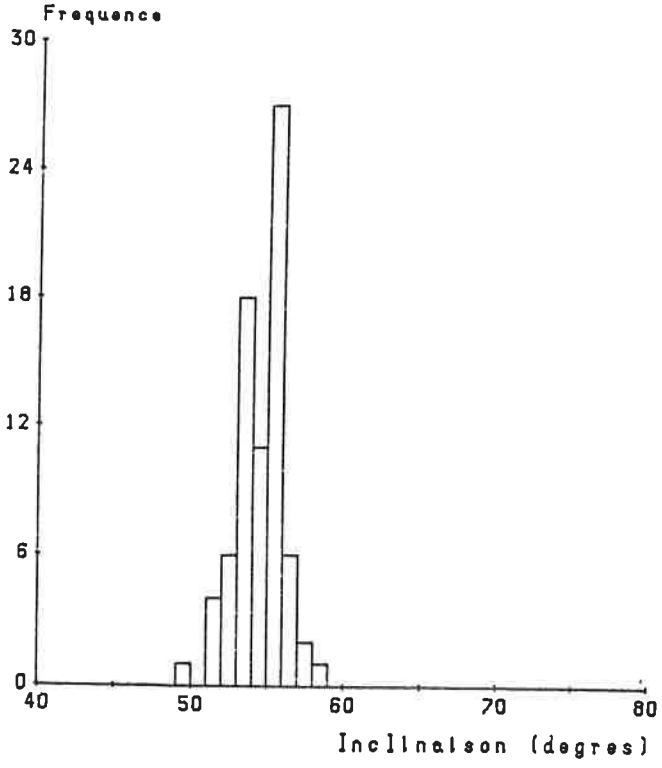



Elements traites : CARREAUX
Toutes positions

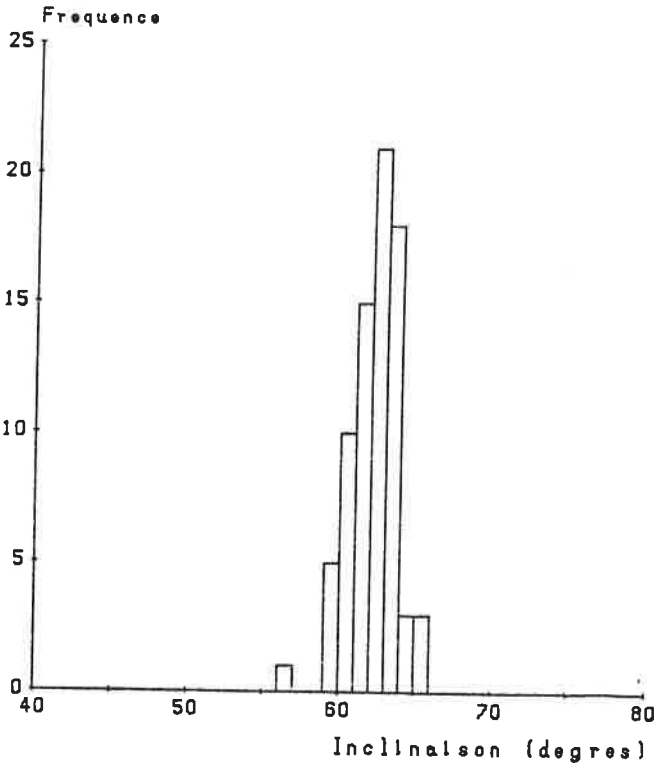



Elements traites : CARREAUX
Toutes positions
Corr. E-F : L=7 l=7 e=1

Fig. V-19




Elements traites : CARREAUX
Toutes positions
Corr. E-F : L=7 l=7 e=1
Corr. d'anisotropie : Fxz=1.35 Fxy=1.08




Elements traites : CARREAUX
Toutes positions
Corr. E-F : L=7 l=7 e=1
Corr. d'anisotropie : Fxz=1.35 Fxy=1.08
Corr. de pente : P=8 deg.

Les résultats de toutes ces corrections sont regroupés dans le tableau suivant ainsi qu'en figures V-19 à

| | à plat | | sur tranche | |
|---|---|---|---|---|
| | Inc. | Dev. | Inc. | Dev. |
| mesures brutes | 49° | - | 56°1 | 12°6 |
| Désaim. therm. | 47°3 | 16° | 56°5 | 12°5 |
| Corr. d'E. de F. | 48°1 | 15°8 | 56°6 | 12°8 |
| Corr. d'anis. | 54°8 | 15°3 | 54°5 | 13°3 |
| Corr. de pente | 62°4 | 19°2 | 62°3 | 16°6 |

L'effet d'anisotropie joue essentiellement sur la direction d'aimantation des carreaux à plat. L'écart avant et après correction est dans ce cas de 7°. Par contre, l'effet joue peu sur les carreaux cuits sur tranche puisque l'écart est de 2° seulement. Cela vient de ce que le plan d'aplatissement des carreaux est très proche de la direction du N.M. de l'époque et de ce que le facteur $F_{xy}$ n'est pas trop différent de 1 (1,08).

Selon la statistique de Fisher, la direction moyenne de l'aimantation obtenues après application de toutes les corrections est :

$$\overline{I} = 62°4 \pm 0°6 \qquad \overline{\Delta} = 17°5 \pm 1°3 \qquad k = 733$$

La valeur élevée du facteur de précision k souligne la forte concentration des directions d'aimantation observée dans les diagrammes de pointage en figures V-20 à 23. Ce fait confirme entre autres la grande régularité statistique du rangement des carreaux selon les positions théoriques à plat et sur tranche (fig. V-12).

Après une correction de latitude de 1°2 pour normalisation à Paris, l'inclinaison moyenne devient :

$$\overline{I} = 63°6 \pm 0°6$$

Cette valeur, déterminée pour le mois de janvier 1986, correspond remarquablement bien, au demi-degré près, à celle de 64° observée à Paris pour la même époque.

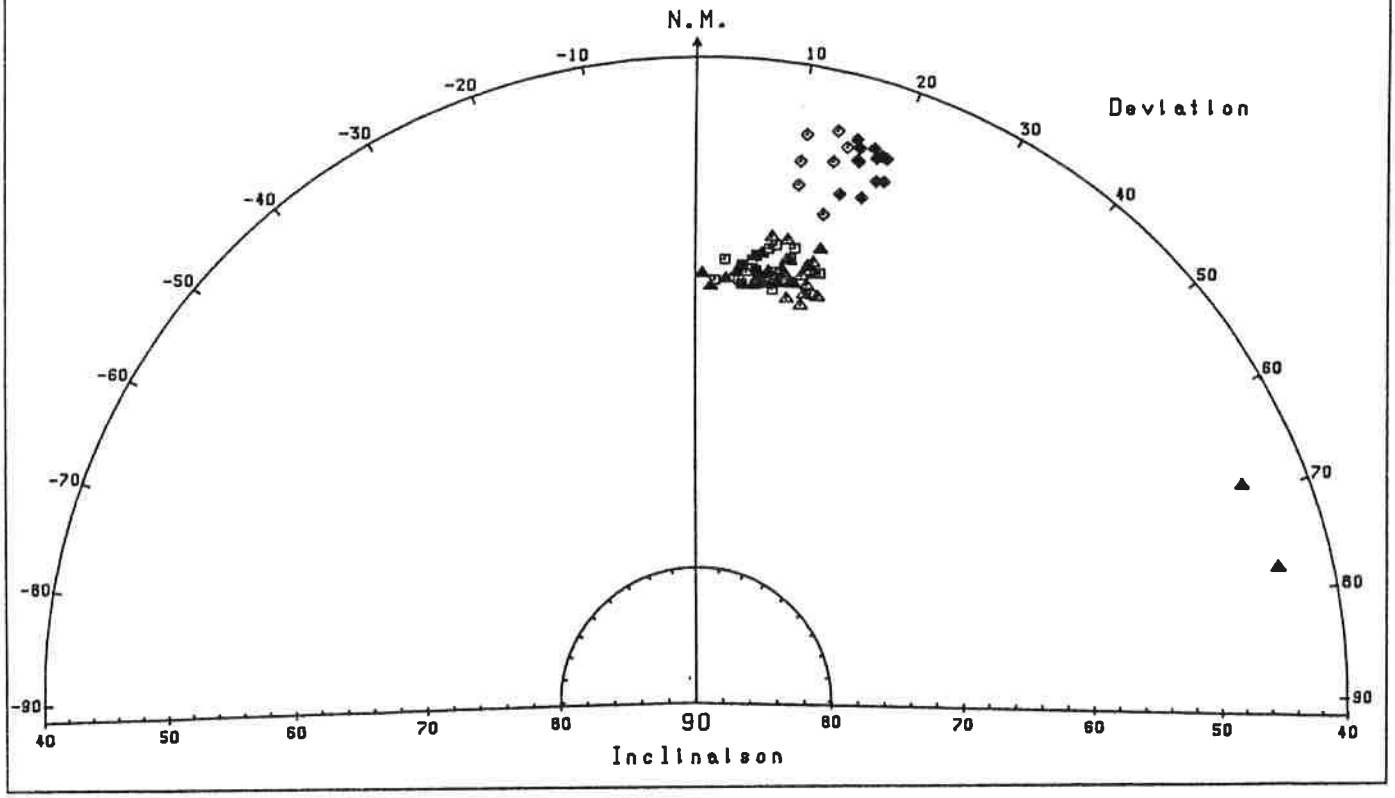
Cette expérience constitue une excellente vérification de la véracité des déductions archéologiques tirées des mesures archéomagnétiques, tant en ce qui concerne l'orientation de l'axe du four par rapport au N.M. régnant lors de la cuisson, qu'en ce qui concerne le mode de rangement des matériaux. De plus, les corrections d'effet de forme, d'anisotropie d'ATR et de pente, bien qu'effectuées de façon statistique, permettent de retrouver très précisemment la direction du CMT ayant régné lors de la cuisson des matériaux. Il ressort de cette étude que l'anisotropie d'ATR peut être à l'origine de perturbations très importantes des directions d'aimantation dans les argiles cuites. L'évaluation et la correction de cet effet perturbateur apparait donc comme une tâche primordiale en matière de datation archéomagnétique.

LES RAIRIES lot A
Br. Callleau 150C
Fichier : RAIRI-A1.RES
11-AVR-86

Elements traites : CARREAUX
Toutes positions

Positions
◇ : a plat
□ : de chant
△ : debout

Fig. V-20

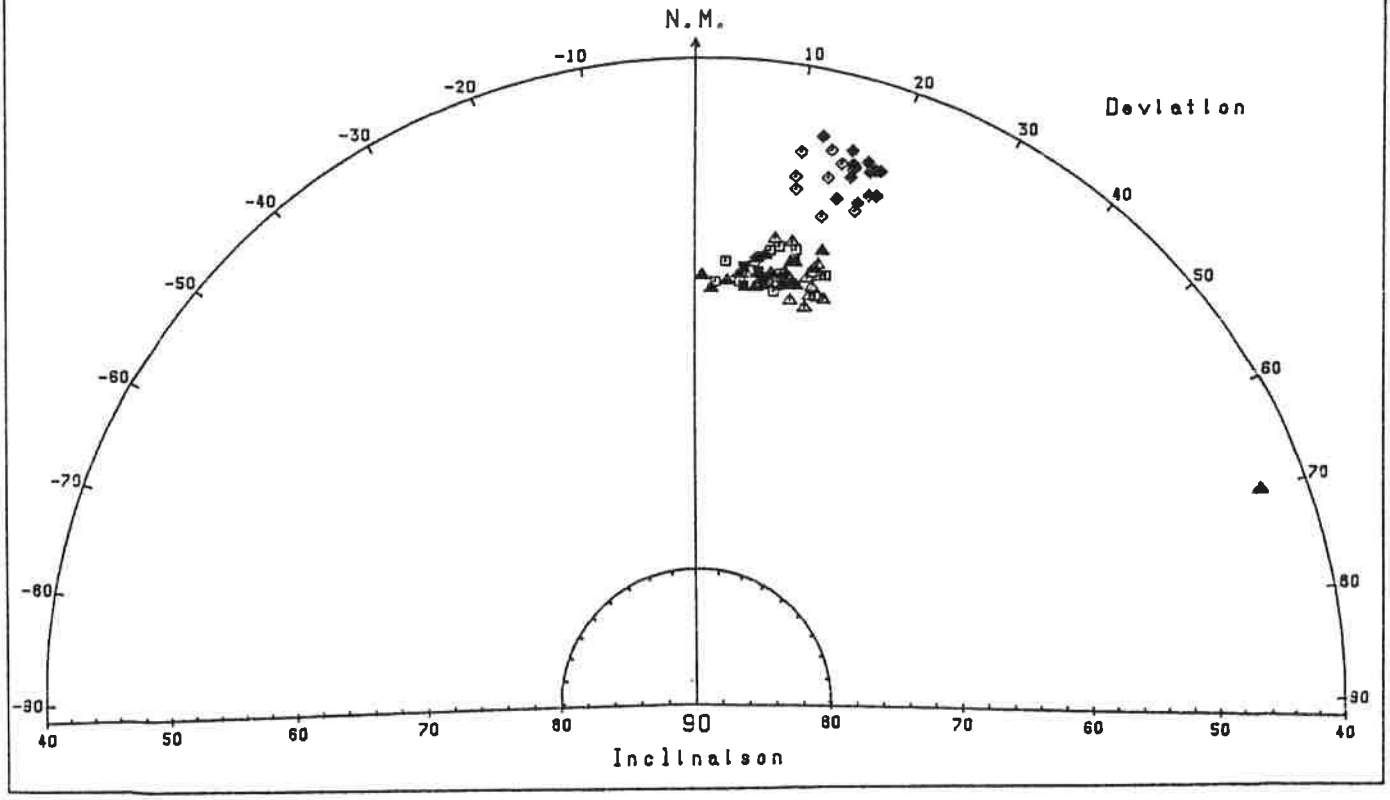



LES RAIRIES lot A
Br. Callleau 150C
Fichier : RAIRI-A1.RES
11-AVR-86

Elements traites : CARREAUX
Toutes positions
Corr. E-F : L=7 l=7 e=1

Positions
◇ : a plat
□ : de chant
△ : debout

Fig. V-21

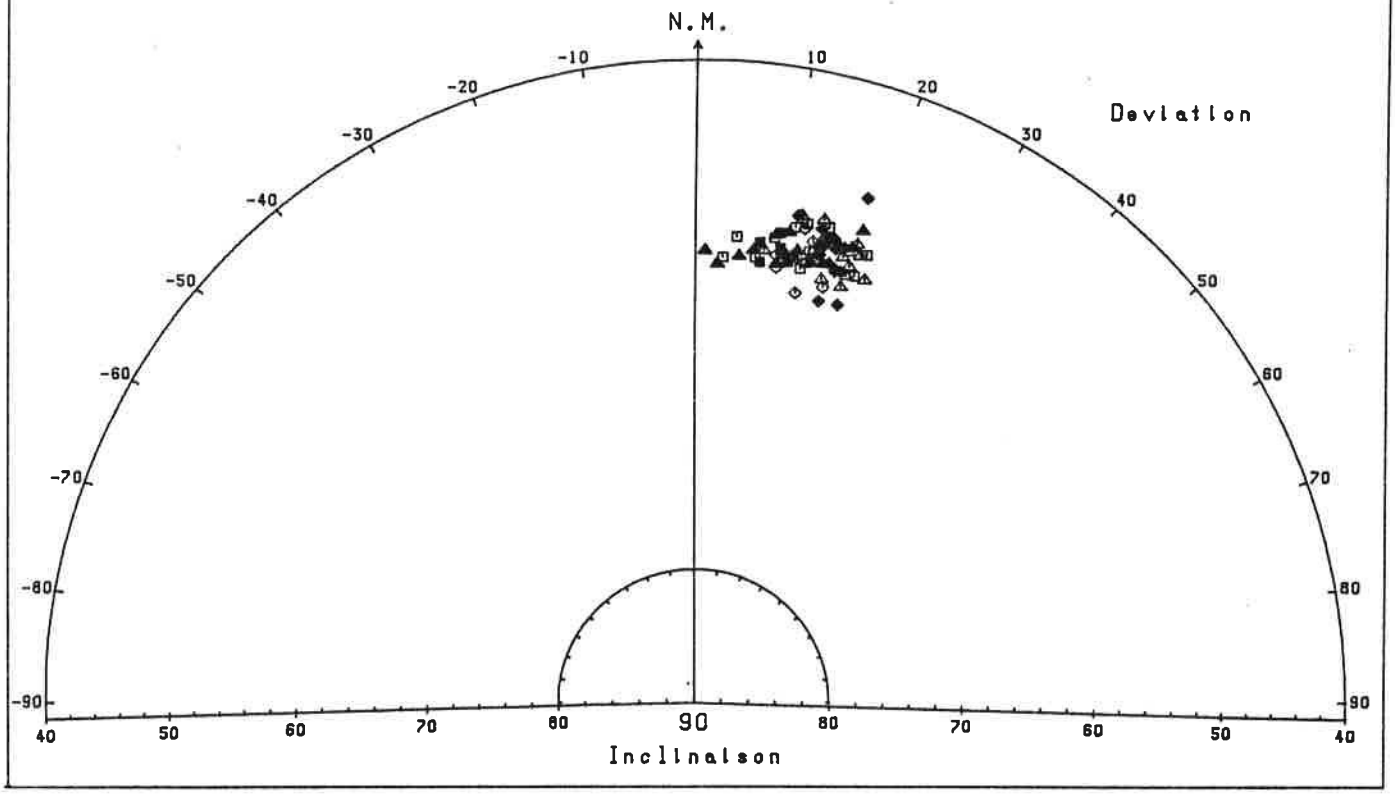


LES RAIRIES lot A
Br. Caillleau 150C
Fichier : RAIRI-A1.RES
11-AVR-86

Elements traites : CARREAUX
Toutes positions
Corr. E-F : L=7 l=7 e=1
Corr. d'anisotropie : Fxz=1.35 Fxy=1.08

Positions
◇ : a plat
□ : de chant
△ : debout

Fig. V-22

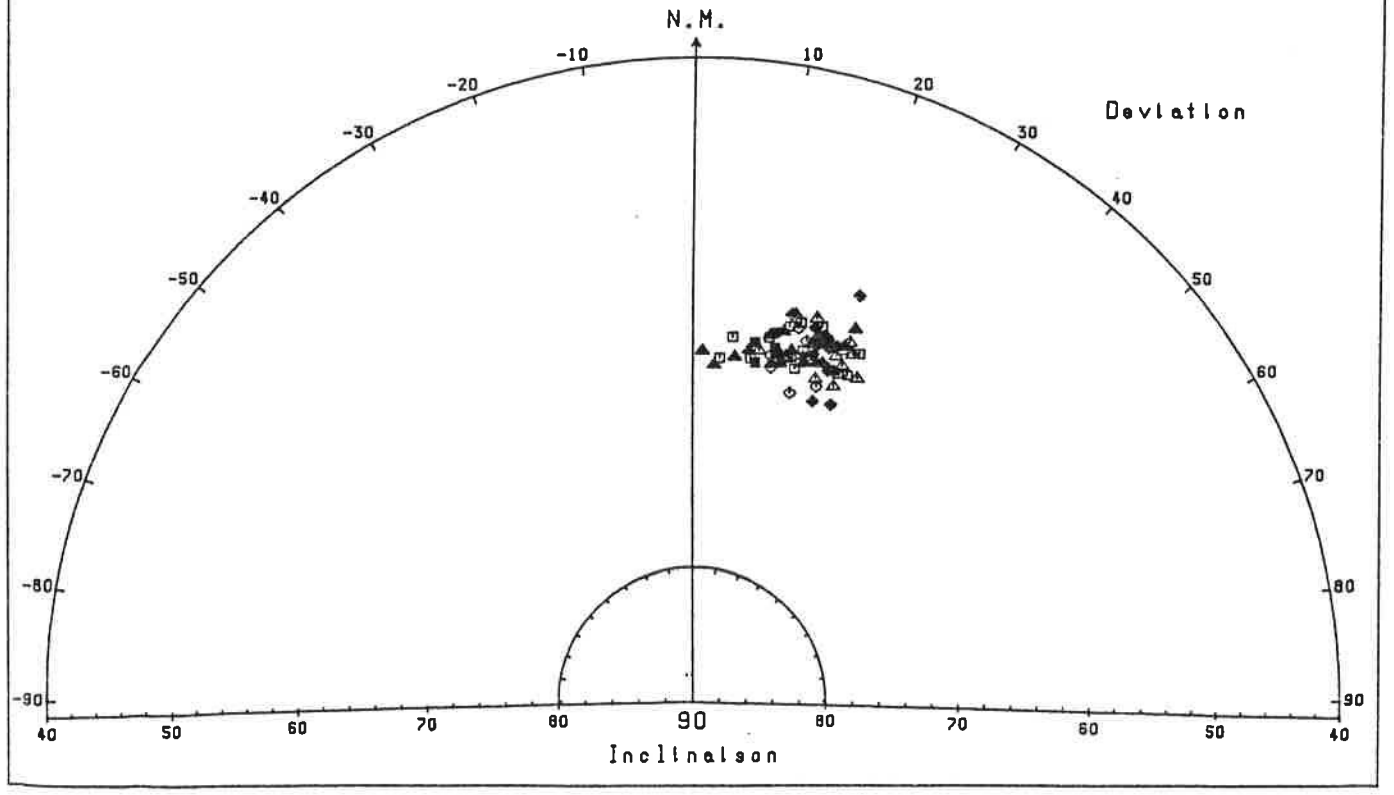



LES RAIRIES lot A
Br. Caillleau 150C
Fichier : RAIRI-A1.RES
11-AVR-86

Elements traites : CARREAUX
Toutes positions
Corr. E-F : L=7 l=7 e=1
Corr. d'anisotropie : Fxz=1.35 Fxy=1.08
Corr. de pente : P=8 deg.

Positions
◇ : a plat
□ : de chant
△ : debout

Fig. V-23



# CONCLUSION

Afin d'évaluer la fréquence et l'amplitude de l'anisotropie d'ATR sur les matériaux de construction, une détermination des facteurs $F_{xz}$ et $F_{xy}$ a été effectuée sur 10 lots différents :

- 4 lots de tuiles gallo-romaines (tabl. 11 à 14).
- 4 lots de carreaux de pavage médiévaux (tabl. 15 à 18).
- 1 lot de tuiles plates médiévales (tabl. 19).
- 1 lot de briques gallo-romaines (tabl. 20).

Ces résultats sont rassemblés sous la forme d'histogrammes en figures V-24 à 26. Seules les tuiles médiévales du Bois-de-Buzot en Broualan (tabl. 19) présentent un facteur $F_{xy}$ différent de 1 (1,15). Ce facteur trahit un étirement de la pâte dans le sens de la longueur. Ce qui correspond sans doute à un mode particulier de moulage de l'argile. Pour tous les autres lots, le facteur $F_{xy}$ est égal à 1, à quelques pourcents près. L'anisotropie d'ATR est donc caractérisée, dans la majeure partie des cas, et en particulier pour l'époque gallo-romaine, par un plan isotrope de facile aimantation parallèle au plan d'aplatissement des matériaux.

Pour un même lot, on constate généralement une plus grande concentration des valeurs de $F_{xy}$ que de $F_{xz}$. D'autre part, les facteurs $F_{xz}$ semblent assez caractéristiques de l'anisotropie moyenne d'un lot donné (fig. V-24a). L'amplitude du facteur $F_{xz}$ peut varier considérablement d'un lot à un autre. Ainsi, on observe sur les tuiles gallo-romaines des valeurs de 1,09 , 1,18 , 1,26 et 1,35. L'existence d'anisotropies aussi importantes est lourde de conséquence pour les datations archéomagnétiques. Il apparaît désormais impossible de faire l'impasse sur un tel phénomène. Si ce dernier affecte principalement les matériaux déplacés, il semblerait qu'il affecte également, peut-être à un degré moindre, les structures en place. D'ailleurs, certains prélèvements en place sont effectués sur des fragments de matériaux de construction réutilisés dans les structures des fours. Il se pose donc là un problème important quant à la fiabilité des datations archéomagnétiques obtenues sans vérification de l'éventuelle présence de l'anisotropie d'ATR.

L'avantage de l'archéomagnétisme des matériaux déplacés, dans le domaine de la correction de l'effet de l'anisotropie, repose sur le fait que les objets d'un même lot sont cuits généralement selon des positions variées à plat et sur tranche. Or, les matériaux cuits sur tranche parallèlement au N.M. sont quasiment vierges de toute perturbation. Ceci constitue un moyen de vérification de la justesse des corrections apportées aux directions d'aimantation des autres positions. Cette possibilité de contrôle n'est pas toujours offerte par les prélèvements en place puisque ces derniers sont souvent effectués sur le fond, horizontal, des fours. Quoiqu'il en soit, toute étude archéomagnétique se doit de contrôler l'existence d'une telle perturbation et de la corriger si nécessaire.

**PLECHATEL La Ville Chérel (35221001) 9 échantillons** **TABLEAU 11**

Chauffe à 700 °C pendant 1h30 et refroidissement rapide en 1/2h sous 46000 $\gamma$

| N° | $10^{-4}$ Am² $M_z$ | $M_x$ | $M_y$ | $F_{xz}$ | $F_{xy}$ | $M_{zb}$ | $dM_z$% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10T | 0,757 | 0,809 | 0,798 | 1,069 | 1,014 | 0,758 | +0,1% |
| 21T | 0,666 | 0,752 | 0,739 | 1,129 | 1,017 | 0,669 | +0,5% |
| 23T | 1,450 | 1,560 | 1,560 | 1,079 | 1,003 | 1,450 | 0% |
| 35T | 0,535 | 0,585 | 0,579 | 1,093 | 1,010 | 0,539 | +0,7% |
| 56T | 1,160 | 1,250 | 1,240 | 1,078 | 1,008 | 1,180 | +1,7% |
| 66T | 0,220 | 0,307 | 0,276 | 1,395 | 1,112 | 0,221 | +0,4% |
| 74T | 1,490 | 1,580 | 1,590 | 1,064 | 0,994 | 1,480 | -0,7% |
| 82T | 1,100 | 1,220 | 1,220 | 1,109 | 1,000 | 1,110 | +0,9% |
| 85T | 0,184 | 0,200 | 0,203 | 1,087 | 0,985 | 0,186 | +1,1% |

**Fxz = 1,09 ± 0,02** sans 66T **0,52%**
**Fxy = 1,00 ± 0,01** sans 66T

**CHATILLON-SUR-SEICHE Fouilles (35073 11) 9 échantillons** **TABLEAU 12**

Chauffe à 700 °C pendant 1h30 et refroidissement rapide en 1/2h sous 47000 $\gamma$

| N° | $10^{-4}$ Am² $M_z$ | $M_x$ | $M_y$ | $F_{xz}$ | $F_{xy}$ | $M_z b$ | $dM_z$% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2T | 0,5996 | 0,8564 | 0,8627 | 1,428 | 0,993 | 0,5893 | -1,7% |
| 5T | 0,7671 | 0,9246 | 0,9344 | 1,205 | 0,990 | 0,7648 | -0,3% |
| 11T | 0,1968 | 0,2366 | 0,2324 | 1,202 | 1,018 | 0,1960 | -0,4% |
| 27T | 0,1033 | 0,1206 | 0,1231 | 1,167 | 0,980 | 0,1046 | +1,2% |
| 29T | 0,0924 | 0,1021 | 0,1033 | 1,105 | 0,988 | 0,0939 | +1,6% |
| 30T | 1,5888 | 1,7160 | 1,7220 | 1,080 | 0,997 | 1,5480 | -2,6% |
| 36T | 1,0643 | 1,1680 | 1,1770 | 1,098 | 0,992 | 1,0690 | +0,5% |
| 41T | 0,2799 | 0,3404 | 0,3331 | 1,216 | 1,022 | 0,2665 | -4,8% |
| 57T | 0,0108 | 0,0119 | 0,0121 | 1,106 | 0,984 | 0,0109 | +0,9% |

**Fxz = 1,18 ± 0,10** **-0,1%**
**Fxy = 1,00 ± 0,01** sans 41T

**LA CHAYLA (CHAYLA) 9 échantillons** **TABLEAU 13**

Chauffe à 700°C pendant 1h30 et refroidissement rapide en 1/2h sous 46000 $\gamma$

| N° | $10^{-5}$ Am$^2$ $M_z$ | $M_x$ | $M_y$ | $F_{xz}$ | $F_{xy}$ | $M_z b$ | $dM_z$% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 8T | 1,460 | 1,800 | 1,780 | 1,233 | 1,011 | 1,470 | +0,7% |
| 11T | 4,060 | 5,310 | 4,980 | 1,306 | 1,066 | - | - |
| 17T | 1,230 | 1,610 | 1,500 | 1,304 | 1,073 | 1,230 | 0% |
| 19T | 2,970 | 3,790 | 3,670 | 1,276 | 1,033 | 2,950 | -0,7% |
| 6S | 0,604 | 0,762 | 0,732 | 1,261 | 1,041 | 0,607 | +0,5% |
| 10S | 1,750 | 2,070 | 1,950 | 1,183 | 1,062 | 1,750 | 0% |
| 12S | 0,382 | 0,523 | 0,503 | 1,367 | 1,040 | 0,384 | +0,5% |
| 27S | 0,0953 | 0,116 | 0,116 | 1,217 | 1,000 | 0,0956 | +0,3% |
| 29S | 3,020 | 3,670 | 3,460 | 1,215 | 1,061 | 3,010 | -0,3% |

**Fxz = 1,26 ± 0,05** **0,1%**
**Fxy = 1,04 ± 0,02**

**BAGUER-PICAN La Moignerais (35010 007) 7 échantillons** **TABLEAU 14**

Chauffe à 700°C pendant 1h30 et refroidissement rapide en 1/2h sous 46000 $\gamma$

| N° | $10^{-4}$ Am$^2$ $M_z$ | $M_x$ | $M_y$ | $F_{xz}$ | $F_{xy}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 12T | 0,554 | 0,702 | 0,708 | 1,268 | 0,992 |
| 49T | 0,0469 | 0,0575 | 0,0552 | 1,227 | 1,042 |
| 95T | 0,421 | 0,564 | 0,537 | 1,338 | 1,050 |
| 100T | 1,180 | 1,670 | 1,680 | 1,415 | 0,994 |
| 109T | 0,549 | 0,765 | 0,781 | 1,392 | 0,980 |
| 151T | 0,329 | 0,420 | 0,409 | 1,277 | 1,027 |
| 186T | 1,320 | 2,040 | 1,840 | 1,545 | 1,109 |

**Fxz = 1,35 ± 0,10**
**Fxy = 1,03 ± 0,04**

**RENNES La Bintinais (35238G) 4 échantillons** **TABLEAU 15**

Chauffe à 700 °C pendant 1h30 et refroidissement rapide en 1/2h sous 46000 $\gamma$

| N° | $M_z$ ($10^{-5}$ Am$^2$) | $M_x$ | $M_y$ | $F_{xz}$ | $F_{xy}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 13C | 2,310 | 2,520 | 2,530 | 1,093 | 0,996 |
| 27C | 0,341 | 0,401 | 0,391 | 1,174 | 1,026 |
| 43C | 0,495 | 0,588 | 0,577 | 1,187 | 1,019 |
| 50C | 0,295 | 0,368 | 0,368 | 1,247 | 1,000 |

**Fxz = 1,18 ± 0,05**
**Fxy = 1,01 ± 0,01**

Deuxième détermination avec permutation des emplacements des échantillons dans le four.

| N° | $M_z$ | $M_x$ | $F_{xz}$ |
|---|---|---|---|
| 13C | 2,360 | 2,580 | 1,095 |
| 27C | 0,339 | 0,401 | 1,183 |
| 43C | 0,499 | 0,594 | 1,189 |
| 50C | 0,297 | 0,370 | 1,246 |

**Fxz = 1,18 ± 0,05**

**RENNES La Bintinais lot E (35238E) 6 échantillons** **TABLEAU 16**

Chauffe à 700 °C pendant 1h30 et refroidissement rapide en 1/2h sous 50000 $\gamma$

| N° | $M_z$ ($10^{-5}$ Am$^2$) | $M_x$ | $M_y$ | $F_{xz}$ | $F_{xy}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 5C | 0,322 | 0,3879 | 0,3875 | 1,205 | 1,001 |
| 6C | 2,036 | 2,416 | 2,383 | 1,187 | 1,014 |
| 19C | 1,063 | 1,189 | 1,187 | 1,119 | 1,002 |
| 21C | 1,747 | 1,963 | 1,955 | 1,124 | 1,004 |
| 54C | 7,161 | 8,336 | 8,165 | 1,164 | 1,021 |
| 67C | 0,2789 | 0,348 | 0,3347 | 1,248 | 1,040 |

**Fxz = 1,17 ± 0,05**
**Fxy = 1,01 ± 0,01**

**RENNES La Bintinais lot F (35238F) 11 échantillons** **TABLEAU 17**

Chauffe à 700°C pendant 1h30 et refroidissement rapide en 1/2h sous 50000 $\gamma$

| N° | $10^{-6}$ Am$^2$ $M_z$ | $M_x$ | $M_y$ | $F_{xz}$ | $F_{xy}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 4C | 169,89 | 193,33 | 186,36 | 1,138 | 1,037 |
| 5C | 13,900 | 15,570 | 15,830 | 1,120 | 0,984 |
| 6C | 7,059 | 9,114 | 9,146 | 1,291 | 0,997 |
| 13C | 1,052 | 1,736 | 1,738 | 1,650 | 0,999 |
| 20C | 3,252 | 4,819 | 4,884 | 1,482 | 0,987 |
| 30C | 122,77 | 155,44 | 155,28 | 1,266 | 1,001 |
| 33C | 1,956 | 2,327 | 2,418 | 1,190 | 0,962 |
| 57C | 294,13 | 333,48 | 325,89 | 1,134 | 1,023 |
| 73C | 4,525 | 6,552 | 6,426 | 1,448 | 1,020 |
| 78C | 4,913 | 5,984 | 5,860 | 1,218 | 1,021 |
| 82C | 13,950 | 17,150 | 17,410 | 1,229 | 0,985 |

**Fxz = 1,29 ± 0,16**
**Fxy = 1,00 ± 0,02**

**FONTEVRAULT Prieuré Saint-Lazare (49140B) 9 échantillons** **TABLEAU 18**

Chauffe à 700°C pendant 1h30 et refroidissement rapide en 1/2h sous 46000 $\gamma$

| N° | $10^{-5}$ Am$^2$ $M_z$ | $M_x$ | $M_y$ | $F_{xz}$ | $F_{xy}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 6C | 0,349 | 0,372 | 0,374 | 1,066 | 0,995 |
| 29C | 2,510 | 3,210 | 3,170 | 1,281 | 1,013 |
| 35C | 0,489 | 0,529 | 0,562 | 1,081 | 0,941 |
| 60C | 0,194 | 0,246 | 0,243 | 1,271 | 1,012 |
| 69C | 0,473 | 0,532 | 0,551 | 1,124 | 0,966 |
| 74C | 4,520 | 6,580 | 5,980 | 1,454 | 1,100 |
| 77C | 0,311 | 0,331 | 0,333 | 1,063 | 0,994 |
| 88C | 0,178 | 0,199 | 0,200 | 1,118 | 0,995 |
| 99C | 2,770 | 3,480 | 3,720 | 1,254 | 0,935 |

**Fxz = 1,19 ± 0,13**
**Fxy = 1,00 ± 0,05**

**BROUALAN Le Bois de Buzot (35044A) 10 échantillons** **TABLEAU 19**

Chauffe à 700°C pendant 1h30 et refroidissement rapide en 1/2h sous 47000 $\gamma$

| N° | $M_z$ ($10^{-5}$ $Am^2$) | $M_x$ | $M_y$ | $F_{xz}$ | $F_{xy}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 3T | 0,3738 | 0,4316 | 0,3789 | 1,155 | 1,139 |
| 9T | 1,299 | 1,712 | 1,633 | 1,318 | 1,048 |
| 21T | 3,255 | 4,411 | 3,883 | 1,355 | 1,136 |
| 32T | 1,531 | 1,955 | 1,953 | 1,277 | 1,001 |
| 44T | 1,901 | 1,957 | 1,563 | 1,029 | 1,252 |
| 66T | 2,905 | 3,536 | 2,999 | 1,217 | 1,179 |
| 70T | 2,690 | 3,342 | 2,611 | 1,242 | 1,280 |
| 94T | 2,965 | 3,352 | 2,795 | 1,130 | 1,199 |
| 103T | 1,735 | 2,520 | 2,228 | 1,452 | 1,131 |
| 109T | 0,2433 | 0,3751 | 0,3428 | 1,542 | 1,094 |

**Fxz = 1,27 + 0,15**
**Fxy = 1,15 ± 0,08**

**GUIGNEN Le Biffoué (35127A) 6 échantillons** **TABLEAU 20**

Chauffe à 700°C pendant 1h30 et refroidissement rapide en 1/2h sous 46000 $\gamma$

| N° | $M_z$ ($10^{-5}$ $Am^2$) | $M_x$ | $M_y$ | $F_{xz}$ | $F_{xy}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 15B | 14,000 | 14,900 | 14,200 | 1,064 | 1,049 |
| 25B | 2,820 | 3,000 | 2,920 | 1,066 | 1,027 |
| 27B | 5,100 | 5,700 | 5,340 | 1,118 | 1,067 |
| 29B | 5,390 | 5,750 | 5,640 | 1,067 | 1,020 |
| 75B | 1,040 | 1,080 | 1,100 | 1,043 | 0,982 |
| 76B | 0,388 | 0,412 | 0,407 | 1,062 | 1,012 |

**Fxz = 1,07 ± 0,02**
**Fxy = 1,03 ± 0,03**

- Fxz -

Fig. V-24a

TUILES GALLO-ROMAINES.

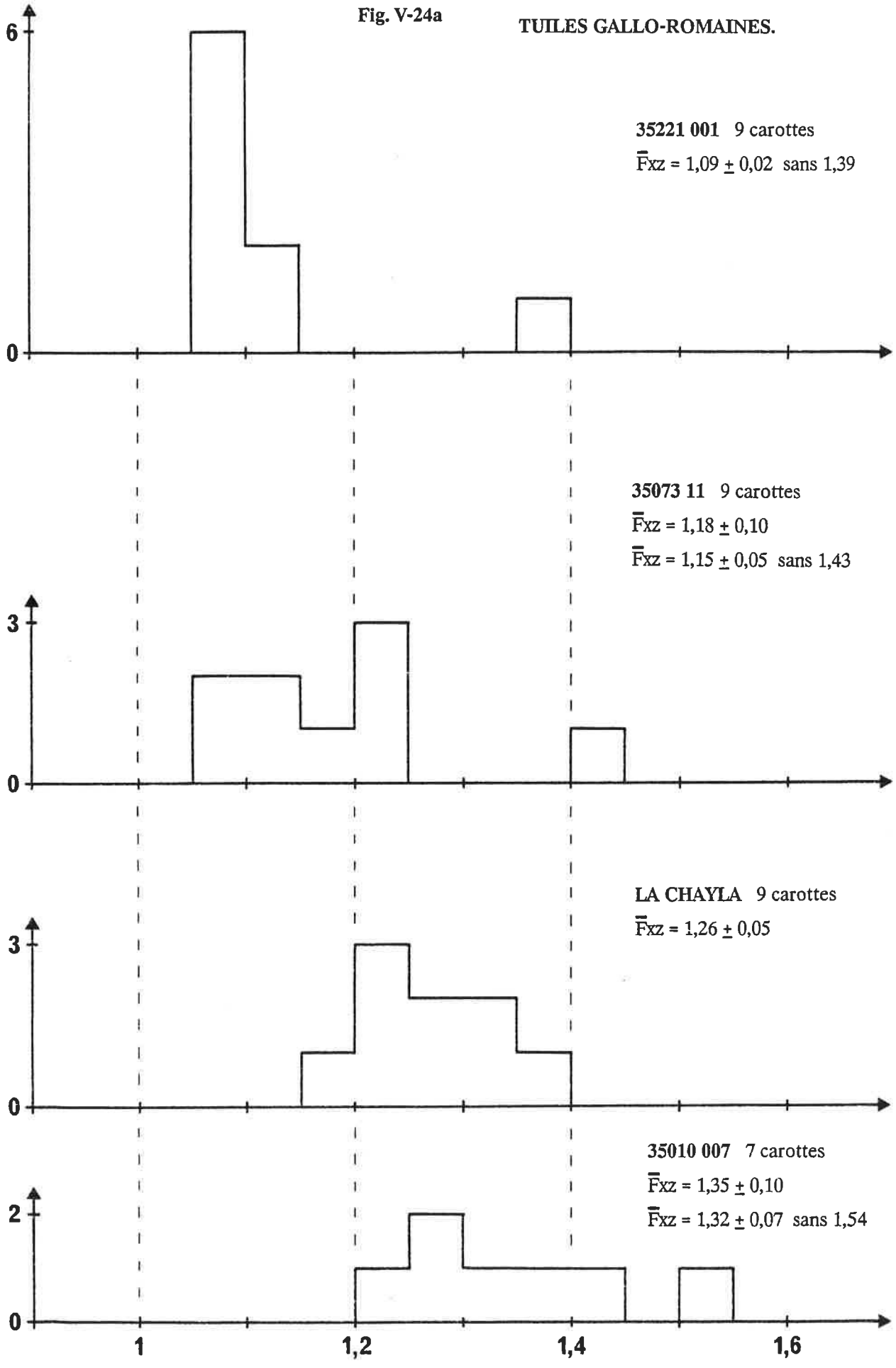


Fig. V-24b - Fxy -

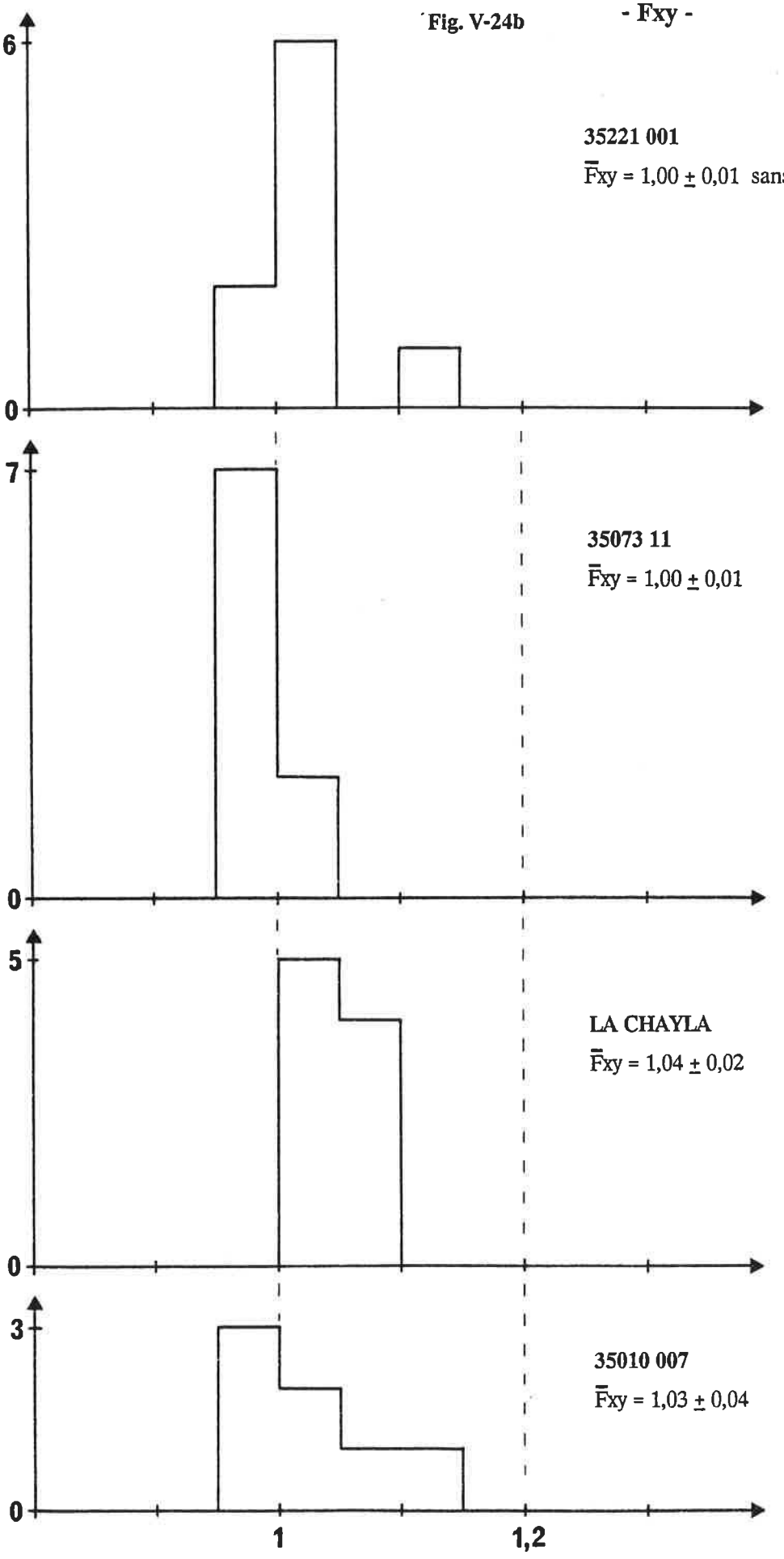

6
0
35221 001
$\bar{F}xy = 1,00 \pm 0,01$ sans 1,11
7
0
35073 11
$\bar{F}xy = 1,00 \pm 0,01$
5
0
LA CHAYLA
$\bar{F}xy = 1,04 \pm 0,02$
3
0
35010 007
$\bar{F}xy = 1,03 \pm 0,04$
1
1,2

Fig. 25a - Fxz -

CARREAUX DE PAVAGE MEDIEVAUX.

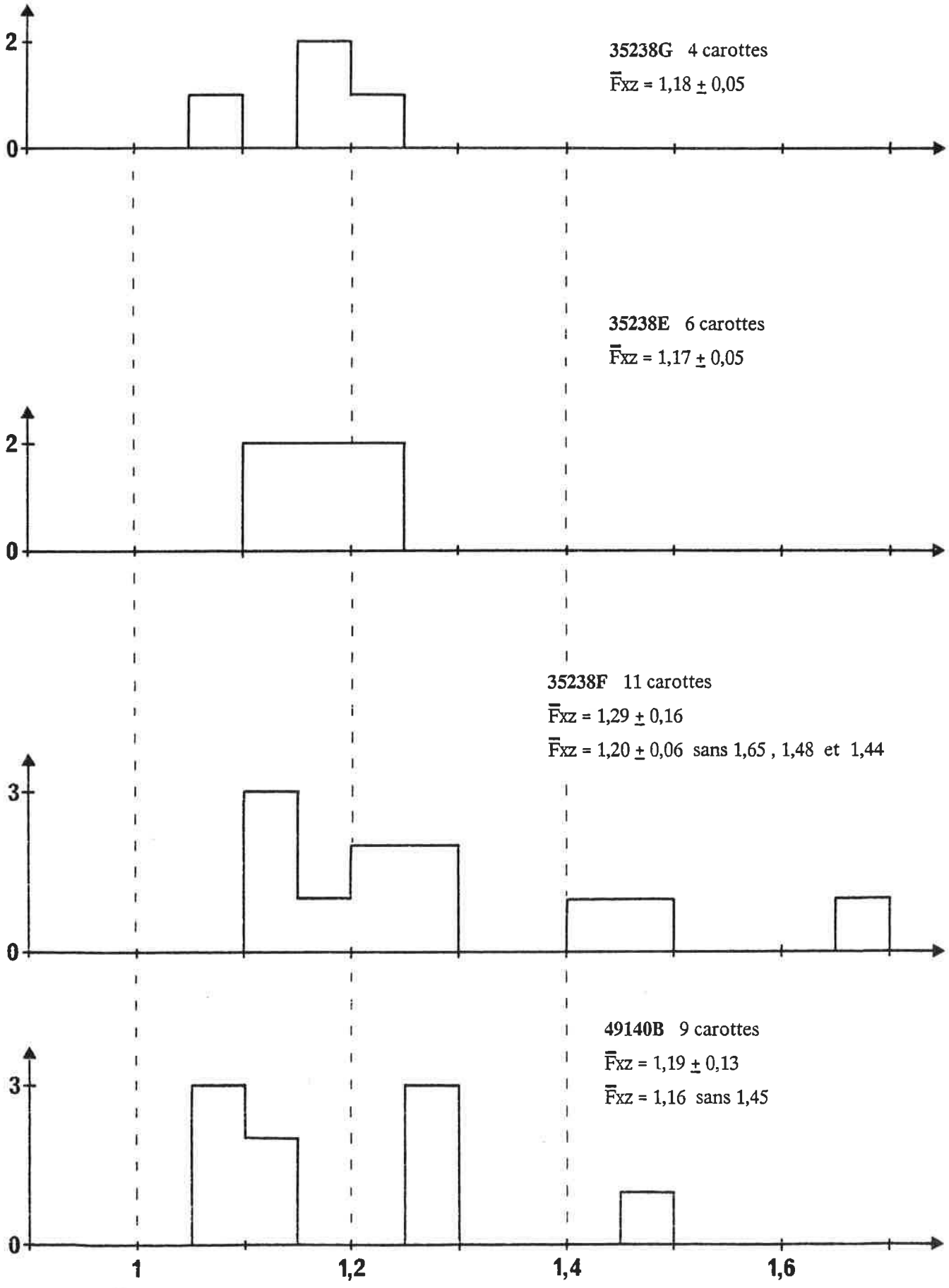
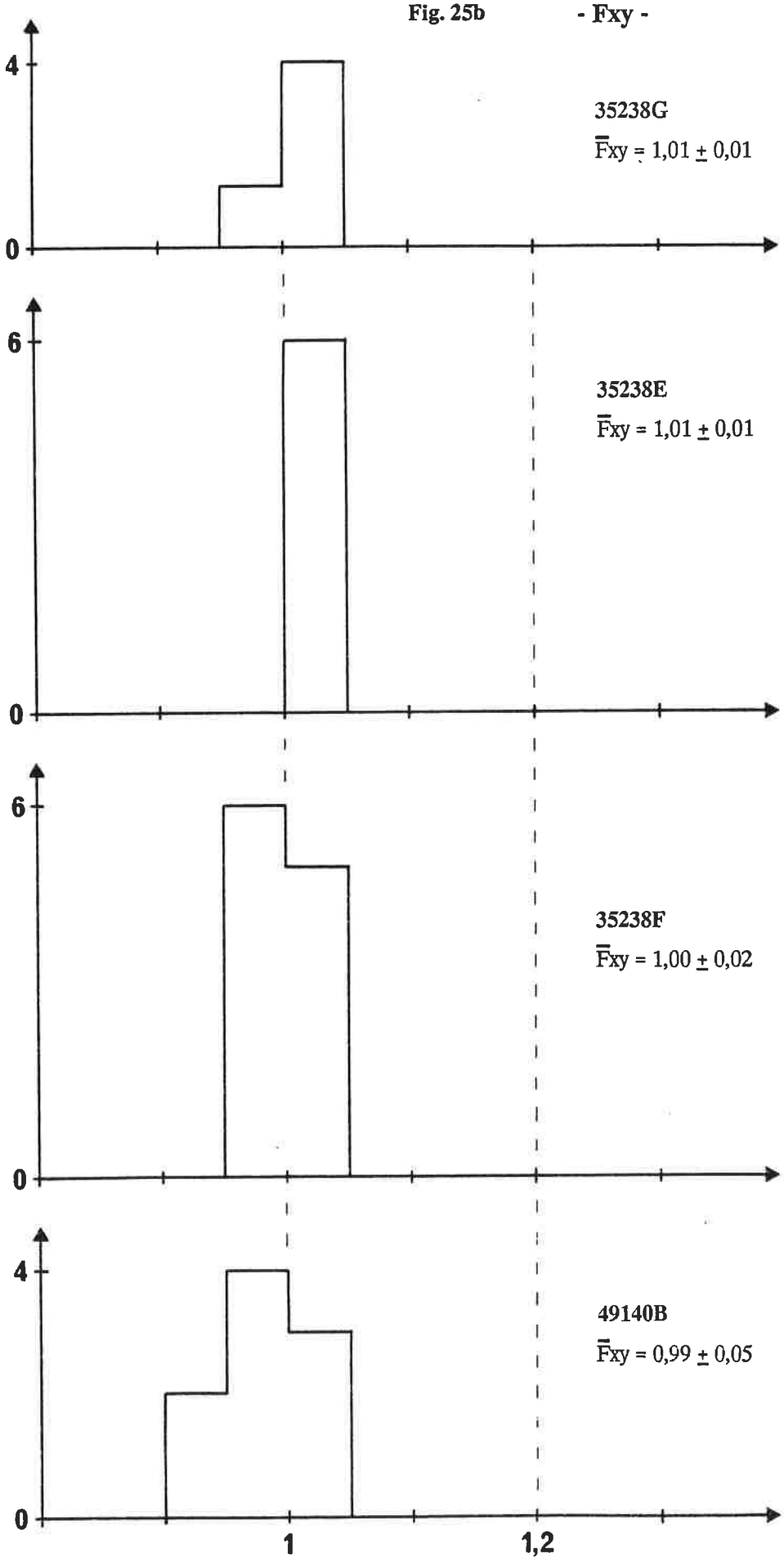


**Fig. 25b** **- Fxy -**


4
0
35238G
$\overline{F}xy = 1,01 \pm 0,01$
6
0
35238E
$\overline{F}xy = 1,01 \pm 0,01$
6
0
35238F
$\overline{F}xy = 1,00 \pm 0,02$
4
0
49140B
$\overline{F}xy = 0,99 \pm 0,05$
1
1,2

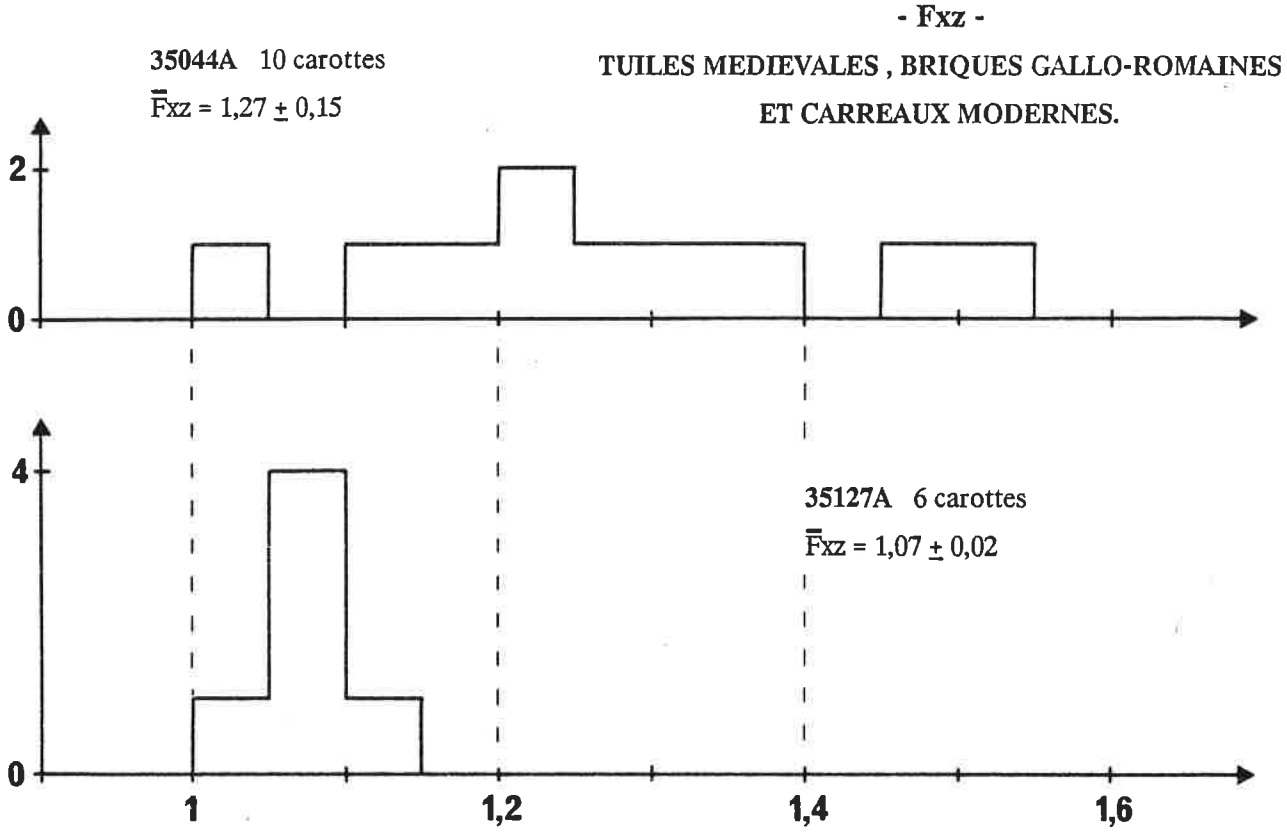
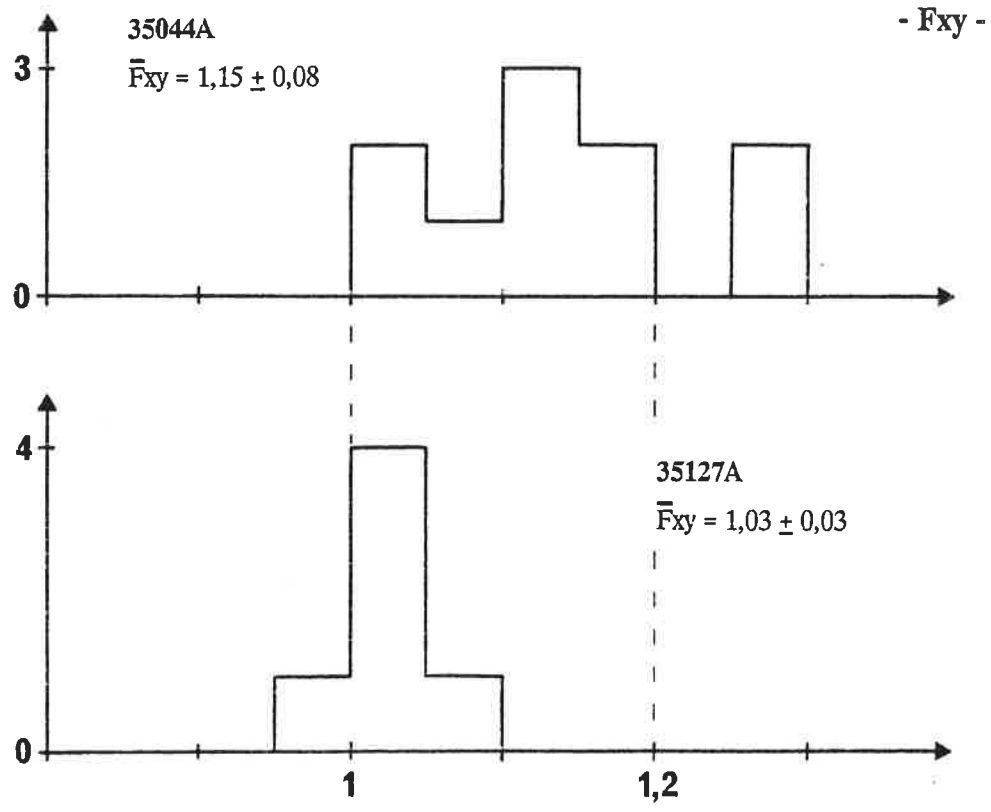

- Fxz -
35044A 10 carottes
$\bar{F}xz = 1,27 \pm 0,15$
TUILES MEDIEVALES , BRIQUES GALLO-ROMAINES
ET CARREAUX MODERNES.
2
0
4
0
35127A 6 carottes
$\bar{F}xz = 1,07 \pm 0,02$
1
1,2
1,4
1,6

Fig. V-26


- Fxy -
35044A
$\bar{F}xy = 1,15 \pm 0,08$
3
0
4
0
35127A
$\bar{F}xy = 1,03 \pm 0,03$
1
1,2

# THE ANISOTROPY AS A DISTURBANCE OF THE ARCHAEOMAGNETIC DATING METHOD

L. P. GOULPEAU, P. LANOS and L. LANGOUET

Laboratoire d'Archéométrie
Université de Rennes (France)

## ABSTRACT

During the earlier times, the bricks and the tiles were moulded in a rectangularily shaped frame mould in scantling. This method of making materials by wire-cut moulding has produced an homogeneous baked clay. Consequently, there is not disturbance and the colinearity between the acting field and the induced magnetization can be insured.

At the end of the Middle Age and at a presently unknown date, the extrusion of the clay through a slot was introduced for making the paving tiles. These ones were cut in a suitable shape after extruding and before drying. But, this new method of making induces in the clay to be baked a foliated texture and consequently an anisotropy during the magnetization process. The existence of an easier plane for the magnetization leads to a non-colinearity of this one with the acting field. The experimental determination of the anisotropy tensor permits to rectify the measured values of the orientation of the remanent magnetization.

## INTRODUCTION

During the last fifty years, taking his inspiration from the geophysical methods of the paleomagnetism and improving them, Thellier progressively established the archaeomagnetic dating method applied to the undisplaced archaeological materials made with baked clay. He laid the foundations of the plotting of the variation curves for the terrestrial magnetic field (TMF) (normalized to Paris) for the last two milleniums (Thellier, 1971 and 1981). Leaning on the basis of these results, the searchers of the *Laboratoire d'Archéométrie* of Rennes and of the *Laboratoire de Géomagnétisme* of St-Maur (both in France) refined this plotting (Langouet et al. , 1983) and began to obtain some reliable datings for the archaeologists. Simultaneously, a new development of the method was elaborated, now applied to the displaced materials and bringing a very large sampling (more than one hundred samples for each archaeological site) and a fitted statistical compute into play ( Goulpeau et al. , 1980 and 1984) (Goulpeau, 1984) . However, studying the displaced materials leads to the loss of a part of the data, since the parallelepiped form of the building materials ( roofing tiles, bricks, paving tiles, ... ) only puts into storage the horizontal plane on which they are baked. The inclination of the TMF can be found again but the declination is irremediably lost.

The potentialities of this variant of the archaeomagnetic dating method, applied to the displaced materials, formed the subject of many application papers (Goulpeau et al. , 1982, 1982a, 1982b, and 1982c) (Bucur et al. , 1984) (Langouet et al. , 1984). The parasitic effects , which may disturb the applications of the method and which progressively appeared during its use, were systematically investigated one after the other. Every time, a theoretical model for their correction was propounded, and its corresponding calculus program was computerized so as to automatize these corrections when necessary : systematic tilt of the materials in the kiln during baking (Goulpeau et al. , 1984) , complexe stacking of the kiln (Goulpeau et al. , 1985) , shape anisotropy or influence of the demagnetizing field (Lanos, 1983 and 1986) , thermal heating taking place later than the baking of the materials as, for example, in heating architectural structures or after conflagration (Goulpeau et al. , 1986) .

Until now, the fabric anisotropy of the thermoremanent magnetization alone formed the subject of a marginal study (Goulpeau et al. , 1985) and it is necessary to take an interest in this problem.

## 1. THEORETICAL ASPECT.

In the course of different theoretical papers describing our method (Goulpeau et al. , 1980 and 1984) (Goulpeau, 1984) , we previously considered a co-linearity between the acting field and the acquired remanent magnetization. However, the acting field can be different from the TMF in case of magnetic refraction. Then, the acting field is the vectorial summation of the TMF and of the demagnetizing field which is not co-linear with it.

The co-linearity between the induced remanent magnetization and the acting field is only insured if the volumic magnetic susceptibility of the material, k, is independent of the orientation. Then, the basic relation can be written : M=k. H. If, this is not such a case, the basic relation must be written : $M_i=k_{ij}. H_j$ (i,j=x, y or z) and the co-linearity between M and H is insured only if the acting field is oriented along one of the three principal axes of the $k_{ij}$ susceptibility tensor. As in most cases, there is no coincidence, the magnetization is not co-linear with the acting field.

In practice, the experiments showed that the principal axes of the susceptibility ellipsoid are the same as those used to mark out the edges of the parallelepipedic materials : Ox (length) , Oy (width) and Oz (depth) like shown on figure 1. So, we may define, $k_x$, $k_y$ and $k_z$, the susceptibilities along each axis and in addition to that : $k_x > k_y > k_z$ for building materials.

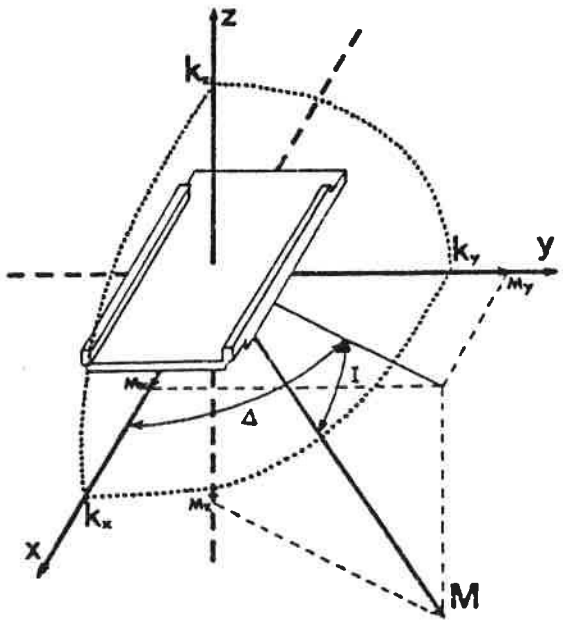



**Figure 1** : Definition of the different parameters.

On figure 1, we also show the inclination I and the deviation $\Delta$ as defined when the materials are drilled in a flat position. If the real baking position is different (on the edge or in upright position) , some trigonometrical relations permit in both cases to compute the corresponding values of these two angles.

Instead of dealing with the general case of the material baked in any orientation under the influence of the TMF (which is an hypothetical case since one of the faces of this parallelepipedic material must coincide with the horizontal plane) , we shall treat three special cases which present the advantage of permitting the suitable characterization of the disturbance induced by the fabric anisotropy to the inclination-deviation graphs.

*1.1. Horizontally baked materials. $k_x=k_y=k'$ and $k_z=k$.*

The magnetic acting field H can be split up into two components according to the principal axes of the susceptibility ellipsoid : $H_h$ in the plane of the material and $H_v$ perpendicularly to this one (figure 2a) with $tgI=H_v/H_h$.

The susceptibility k' being independent of the orientation in the horizontal plane, we can write for each value of the deviation : $M_h=k'.H_h$. Along the vertical axis, the corresponding equation will be : $M_v=k.H_v$.

Then, $tgI_1 = M_v/M_h = (k.H_v)/(k'.H_h) = k/k'.tgI$.

Since we have k'>k, we obtain : $I_1<I$.

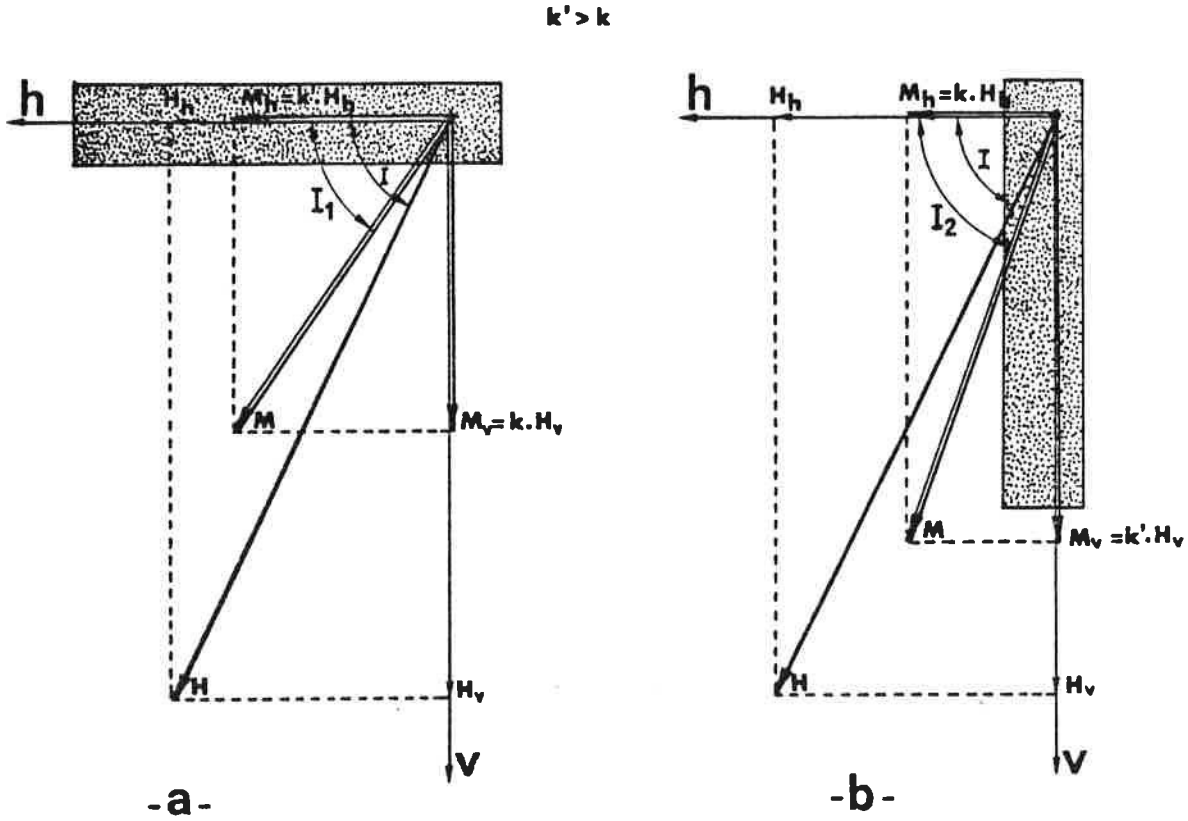



**Figure 2** : Measured inclination versus real inclination in presence of fabric anisotropy.

*1.2. Vertically baked materials in the meridian plane : $\Delta = 0°$.*

Now, the equations linking the components $H_h$ and $H_v$ to the corresponding induced magnetizations when dealing with an upright baked material, must be written : $M_h=k_y.H_h$ and $M_v=k_x.H_v$.

In the special case where $k_x=k_y=k'$ : $tgI_0 = (k'.H_v)/(k'.H_h) = tgI$.

The measured inclination $I_0$ is identical to the real inclination I of the acting field.

*1.3. Vertically baked materials in an E-W plane :* $\Delta = 90°$.

Now,we can write the equations (figure 2b) : $M_h = k_z . H_h$ and $M_v = k_x . H_v$ and with the previous convention ($k_x = k_y = k'$ and $k_z = k$), we obtain : $tgI_2 = M_v/M_h = (k'. H_v)/(k. H_h) = k'/k\ tgI$ , and since $k' > k$, we deduce that : $I_2 > I$.

Let us summarize all these results in the inclination- deviation graph, (figure 3). In the absence of fabric anisotropy, a sampling of materials baked at a same time (same inclination I) in a rectangular kiln,gives results which produce in the cartesian inclination- deviation graph, two groups of points (see clusters on figure 3a) located on a same vertical line and with complementary values of the deviation (Goulpeau et al., 1982).

When there is some fabric anisotropy, in case of horizontally baked materials, the measured value $I_1$ of the inclination will be too slight ($I_1 < I$) independently of the $\Delta$ value (only if $k_x = k_y$ like conventionally admitted above). In case of vertically baked materials, there is neither disturbance of the inclination , ($I_0 = I$) nor of the deviation when baked in a meridian plane ( $\Delta = 0°$), but on the other hand, too high a value of the inclination ($I_2 > I$) will be observed when they are baked in an E-W plane, perpendicularly to the magnetic meridian. In the inclination- deviation graph, there is a splitting of the clusters depending on whether the materials are baked in a flat position or in an upright one. In addition to that, while the clusters corresponding to the horizontally baked materials remain on a vertical line, those corresponding to the vertically baked materials are located on an oblique line (see figure 3b).

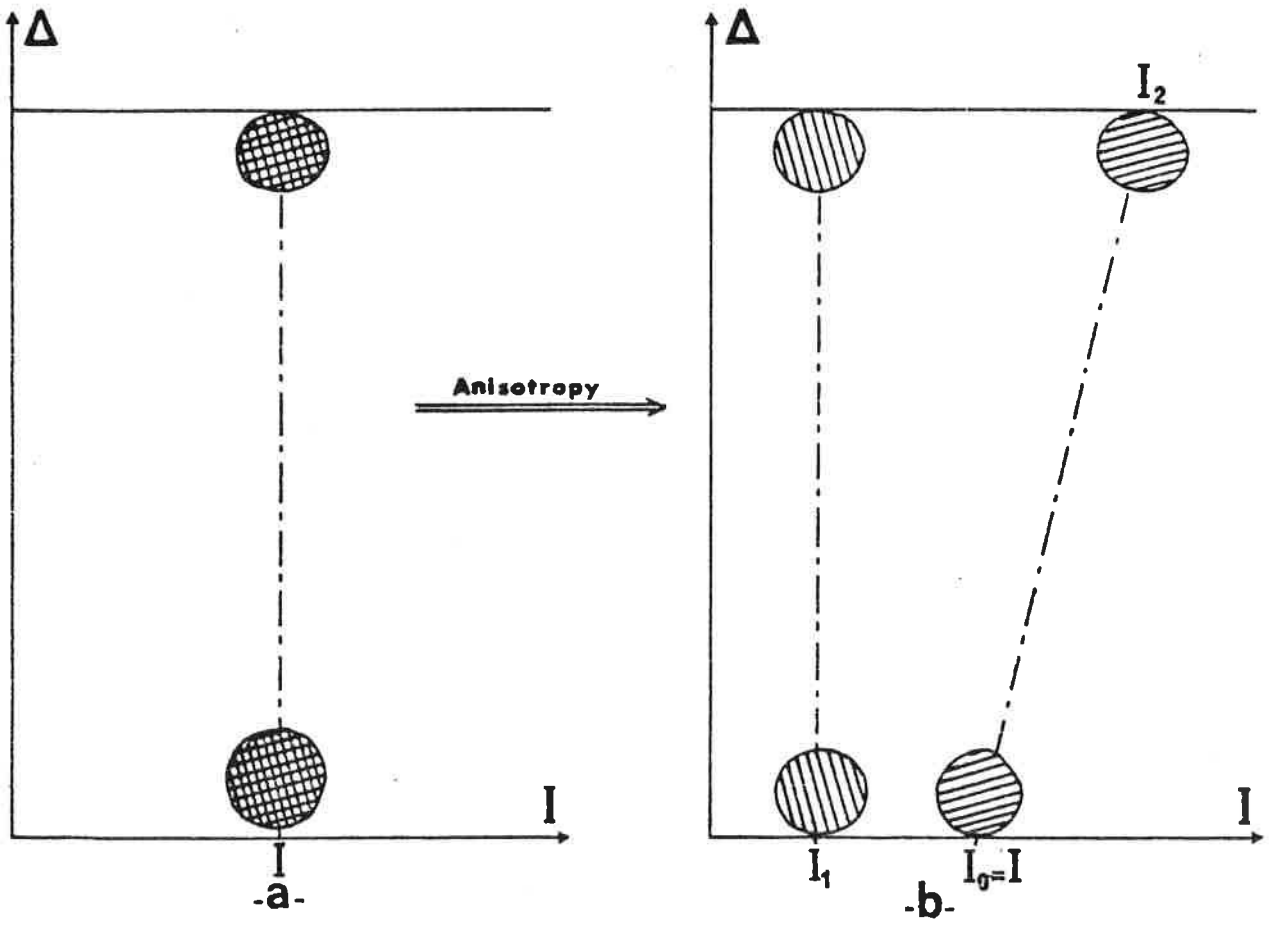



**Figure 3** : Theoritical mapping of the points groups in the inclination-deviation plane :
(a) without fabric anisotropy (b) with fabric anisotropy.

As an immediate example of this theoretical point of view, we give in figure 4 the results obtained from some medieval materials. The plotting of the experimental values is shown in figure 4a, with different conventional signs for, on the one hand the materials baked in a flat position and on the other hand those baked in an upright position.The clusters, visualized in the inclination—deviation graph through the points isodensity contours, can be seen on figure 4b. The result is somewhat more complexe than the one in the theoretical model (owing, in all likelihood, to a composite stacking of the materials in the kiln). However, the clusters regarding the horizontally baked materials are well located on a vertical line,the $I_1$ value being lower than the $I_0$ one,and those regarding the vertically baked materials are located along an oblique line from the $I_0$ value of the inclination when $\Delta=0°$ to the $I_2$ value (with $I_2>I_0$) when $\Delta=90°$.

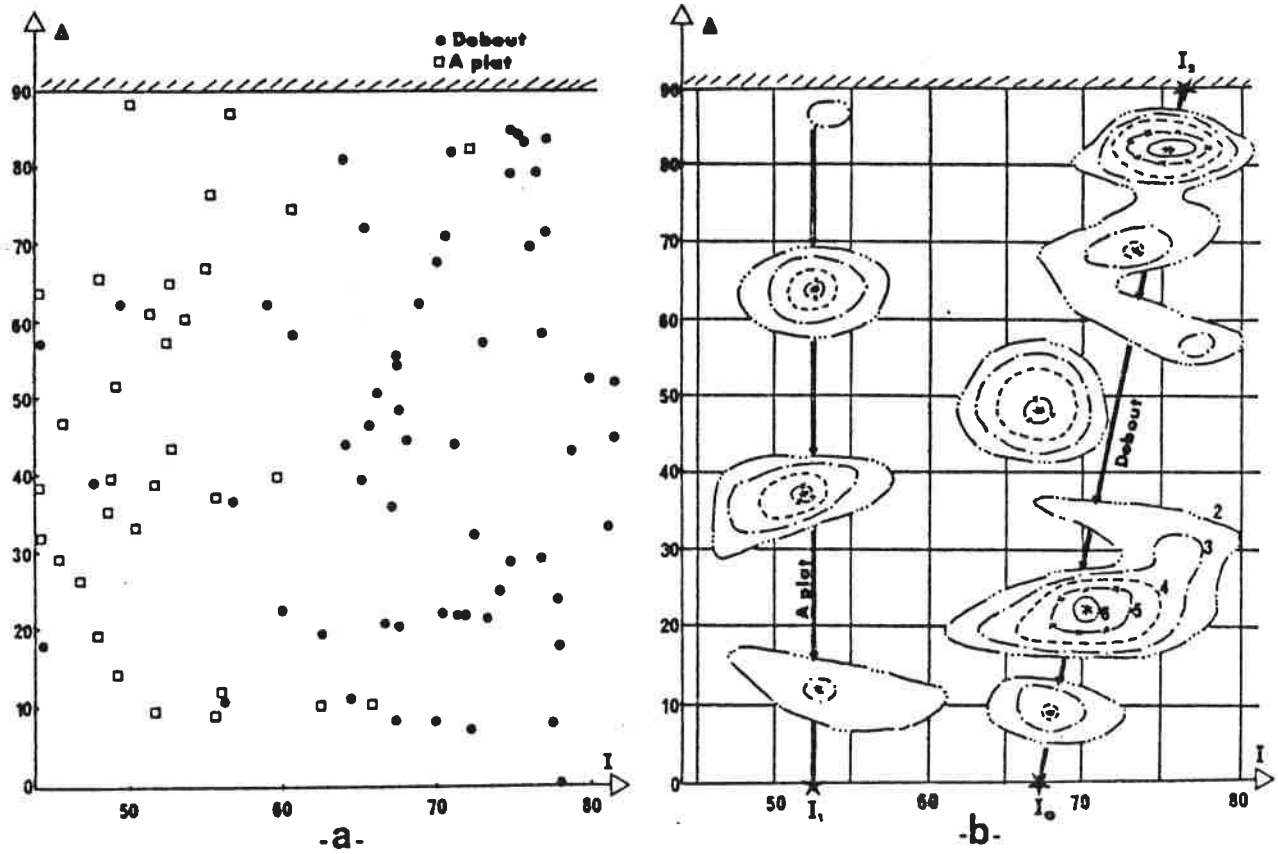
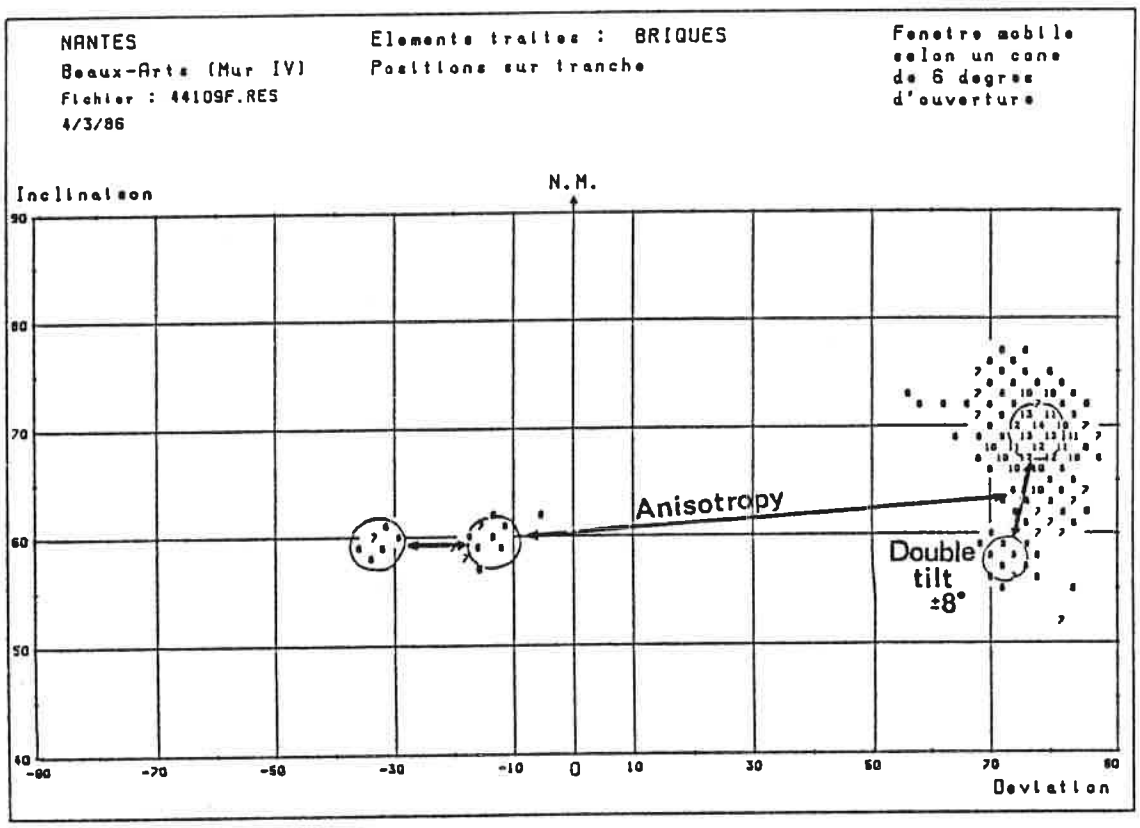



**Figure 4 :** *Rennes-La Bintinais.* An example of points groups in presence of fabric anisotropy.

The fact that the discrepancies $(I_1-I_0)$ and $(I_2-I_0)$ deduced from figure 4, give a ratio k'/k equal to 1.45, higher than the 1.28 value experimentally determined,is one of the reasons which led us to study the problems of the experimental determination of the fabric anisotropy indices in laboratory.

The general equations permitting the determination of the disturbance magnitude, owing to the fabric anisotropy, on the inclination as well as on the deviation, whatever the orientation of the materials during baking may be, were investigated. As for the other disturbing effects previously studied, the corresponding computerized calculus programs were introduced in the Apple II computer of our laboratory where they are available when requested, alone as well as combined with those corresponding to the other disturbances. In this last case, the order in which the corrections must be performed does matter and the subroutines linkage follows a logical order, coherent with the way the disturbing effects are occuring : fabric anisotropy --> shape anisotropy --> geometrical disturbances (tilting or sloped floor) .



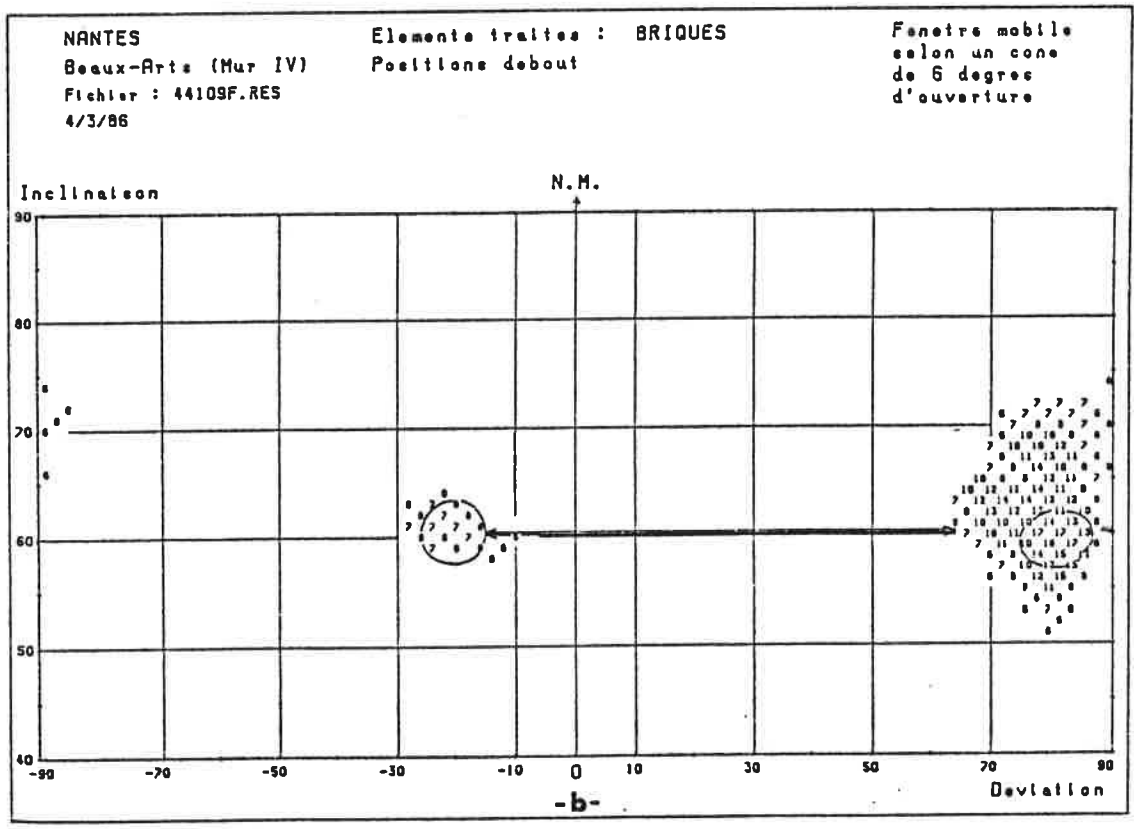




**Figure 5** : *Nantes-Jardin des Beaux-Arts.* An example of points groups in presence of several disturbances : fabric anisotropy and geometric effect.

We show on figure 5 an example of the treatment of combined disturbances, regarding some romano-gallic bricks which come from the wall IV of the *Jardin des Beaux-Arts* excavation in Nantes (*Loire-Atlantique*, France). The inclination- deviation graph (figure 5a) of the untreated results shows quite obviously that there are two superimposed disturbing effects : fabric anisotropy and double tilt (+8°). The correction of these two effects gives a correct mapping of the two clusters (figure 5b) . There are two complementary groupings located on a I-constant line (60° at the baking site then 61°1/2 at Paris) . These results correspond to a single set of bricks with handling-slots, baked at the transition from the Ist to the IInd centuries (105+15AD) in agreement with the archaeological data. The value of the anisotropy index has been experimentally determined as subsequently described and is, on an average, equal to 1.12.

## 2. THE EXPERIMENTAL DETERMINATION OF THE ANISOTROPY INDICES.

In theory, there is no difficulty in determining these anisotropy indices. Indeed, the thermal demagnetizing of the sample by heating up to a temperature higher than the Curie one (c. 700°C), followed by a controlled cooling in the presence of a magnetic field known in magnitude as well as in orientation,is sufficient. The experiment is repeated three times with a same standard field whose magnitude is equal to the one of the TMF (0.47. $10^{-4}$ tesla) and whose orientation is successively along the Ox, Oy and Oz axes. Finally, in order to verify the coincidence between these axes and those of the susceptibility ellipsoid, a fourth experiment is undertaken which consists in applying the magnetic field along a diagonal line.

In practice,several parasitical effects can disturbe this determination. First, during the successive heatings, the baked clay may chemically or mineralogically change, so that the successive experiments only concern magnetically different samples (Thellier et al. , 1959) (Khodair et al. , 1975). The simplest method, in order to make sure that such is not the case,consists in beginning again the first experiment at the end of the series and then in verifying the repeatibility of the results.

In the second place, the influence of the cooling rate upon the magnitude of the remanent magnetization is a well-known phenomena (Fox et al. , 1980) (Walton, 1980). If this influence depends on the orientation of the field applied to the sample, the determination of the anisotropy indices will be marred by mistakes.

So, we performed a systematic research of the influence of the cooling rate upon the magnitude of the acquired magnetization as well as upon the anisotropy indices. This study was undertaken with samples drilled of some modern paving tiles manufactured through an extruding process at the workshop of *Les Rairies* (*Maine-et-Loire*, France) (see further in part 3). During the firing of these paving tiles, the kiln and its content were cooled naturally and without the help of a draught from 1200°C to 30-40°C in 60 hours. The temperature lowered according to an exponential law and consequently the cooling rate can be characterized by a time constant, $\tau$ , in this case close to 720 minutes.

In our laboratory, the samples were heated in a tubular cylindrical kiln shielded with mu-metal and of which the heating coils were wound in order not to create a magnetic field inside. In addition to that, a coil, supplied by a dc, adjustable in intensity, but nevertheless constant during the experiment, produces a static magnetic field, axial in the center of the kiln and uniform on a 20 cm length. The kiln may be cooled from 650°C to the room temperature (figure 6), either naturally (kiln thermally insulated inside, unsupplied heating coils, water circulation for the shield protection at its minimum level) which corresponds to a 6 hours cooling ( $\tau$ =135 minutes), or helped with an axial blower and a high level water circulation which corresponds to a twenty five minutes cooling ( $\tau$ =6 or 7 minutes).

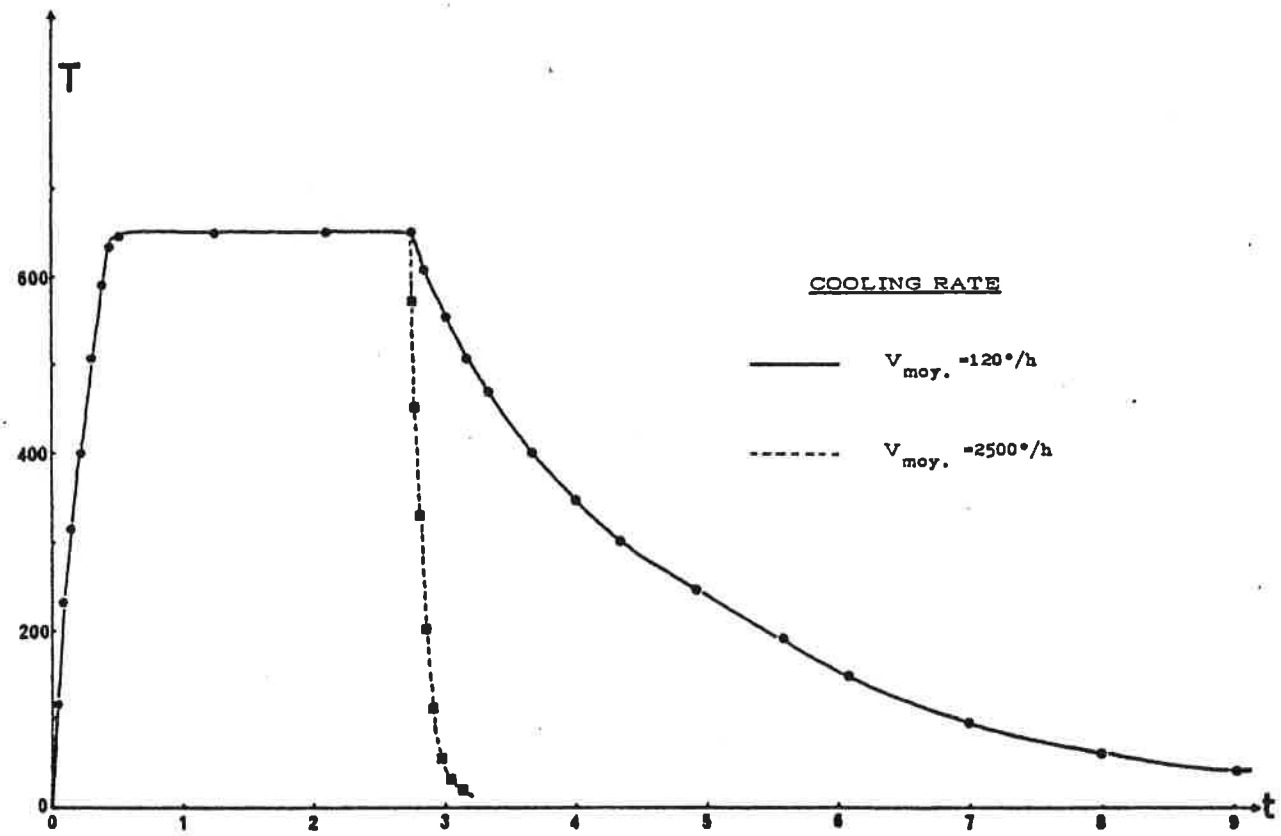



**Figure 6** : Heating and cooling curves for determination of the fabric anisotropy in laboratory.

Under these experimental conditions,10 samples which form the subject of this study, were chosen at random amongst 100 drill-cores and were submitted to the following series of experiments. For each of the two cooling rates and beginning by the lowest one, the magnetic field was applied to the samples during the cooling, successively along the Oz, Ox and Oy axes and then again along the Oz axis with the purpose of checking. Nine samples out of ten did not show some appreciable change (less than 1%) during the complete series of the thermal cycles, proving a noteworthy mineralogical stability.The tenth sample (8C) which possesses an abnormally low magnetization value, was excluded from the later statistics because it shows an appreciable change and then is uncertain.

In the main, the behaviour of these samples towards the cooling rate, are similar along the three principal axes and consequently we give in Table 1, the results only for the acquired magnetization (expressed in gauss) corresponding to the Oz axis. It is understood that the limited discrepancies which can exist along the other axes, have repercussions on the anisotropy indices and then will be estimated in Table 2. The Table 1 gives rise to the next comments.

(i) The magnetization obtained through a rapid cooling in laboratory ( $\tau$ = 6 minutes) is lower than the one really acquired during baking ( $\tau$ = 720 minutes). The average discrepancy is equal to 10.74% (from 8.92% to 13.19%).

TABLE 1

| Ref. | Mz $\tau$ =720 min. | Mz $\tau$ =135 min. | Mz $\tau$ =6 min. | M% slow cooling | M% rapid cooling |
|---|---|---|---|---|---|
| 1C | 0.02844 | 0.02812 | 0.02589 | -1.12% | -8.97% |
| 2C | 0.03033 | 0.03035 | 0.02750 | +0.06% | -9.33% |
| 3C | 0.02830 | 0.02295 | 0.02066 | -3.57% | -13.19% |
| 4C | 0.03104 | 0.03075 | 0.02766 | -0.93% | -10.89% |
| 5C | 0.03122 | 0.03030 | 0.02732 | -2.95% | -12.49% |
| 6C | 0.02921 | 0.02832 | 0.02554 | -3.05% | -12.56% |
| 7C | 0.02903 | 0.02908 | 0.02644 | +0.17% | -8.92% |
| 8C | 0.00597 | 0.00558 | 0.00488 | -6.53% | -18.26% |
| 9C | 0.03455 | 0.03394 | 0.03092 | -1.76% | -10.51% |
| 10C | 0.03037 | 0.03010 | 0.02739 | -0.89% | -9.81% |

**(ii)** The average discrepancy is only equal to 1.56% (from 0% to 3.57%) when obtained through a slow cooling in laboratory ( $\tau$ = 135 minutes).

**(iii)** If we wish to compare our results with the ones obtained by Fox and Aitken (Fox et al. , 1980), the comparison must be made with the results obtained through the two cooling rates in laboratory. When the cooling rate passes from 6 hours to twenty five minutes,the measured values of the acquired magnetization are from 7.9% to 10% too low; those values to be compared with the ones from 6% to 12% given by Fox and Aitken when the cooling rates vary from 7 hours to thirty minutes. The least dispersion observed in our results is only attributable to a better homogeneity of our sample (a coherent industrial product).

The behaviour along each of the three axes being similar, the influence of the cooling rate upon the anisotropy indices is low (see Table 2) and the observed discrepancies are of the order of magnitude corresponding to the expected precision.

TABLE 2

| Ref. | Slow cooling(120°/h) | | | Rapid cooling(2500°/h) | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | kx/kz | ky/kz | kx/ky | kx/kz | ky/kz | kx/ky |
| 1C | 1.318 | 1.204 | 1.095 | 1.341 | 1.217 | 1.101 |
| 2C | 1.367 | 1.271 | 1.075 | 1.398 | 1.287 | 1.086 |
| 3C | 1.392 | 1.231 | 1.130 | 1.385 | 1.244 | 1.113 |
| 4C | 1.332 | 1.303 | 1.022 | 1.358 | 1.296 | 1.048 |
| 5C | 1.360 | 1.306 | 1.041 | 1.358 | 1.295 | 1.049 |
| 6C | 1.369 | 1.302 | 1.051 | 1.362 | 1.295 | 1.052 |
| 7C | 1.381 | 1.240 | 1.114 | 1.378 | 1.249 | 1.104 |
| 8C | 1.261 | 1.199 | 1.052 | 1.243 | 1.228 | 1.012 |
| 9C | 1.364 | 1.271 | 1.073 | 1.368 | 1.283 | 1.066 |
| 10C | 1.323 | 1.196 | 1.107 | 1.341 | 1.198 | 1.119 |
| | **1.347** | **1.252** | **1.076** | **1.353** | **1.259** | **1.075** |

The influence of these discrepancies on the angular corrections, computed as in part 1, is lower than some tenths of a degree and consequently doesn't matter.So, when computing, we use the mean value of the anisotropy indices (determined from ten samples) without taking the scattering of the individual values into account.

## 3.EXAMPLES AND CONCLUSIONS.

To conclude, let us set out some results of measurements of the anisotropy indices for several materials of different ages and draw, for the future, the beginning of some research directions in archaeotechnology.

### *3.1.Les Rairies (Maine-et-Loire, France).*

Today, paving tiles of several sizes are manufactured at *Les Rairies* by extruding with an endless screw through a slot of a suitable shape and size, the clay which has been previously worked. The kiln, in which these materials are baked, burns wood and possesses a sloped floor (a 8° slope towards the north). Its axis is 18°E in relation to the present magnetic north.

The histogram of the anisotropy indices ($k_x/k_z$) is shown in figure 7. The mean value is 1.353 and the standard deviation equal to 0.047 (only 3.5% of the mean value) shows then a low dispersion. The susceptibility ellipsoid is not one of revolution since $k_x = 1.08\ k_y = 1.35\ k_z$. Then, it is flattened according to the material plane and lightly lengthened along the extrusion axis.

Before correction, the data, plotted in the inclination- deviation plane, give two groups of points, respectively :

$\overline{I} = 47°3$ and $\overline{\Delta} = +16°$ for the horizontally baked materials,

$\overline{I} = 56°5$ and $\overline{\Delta} = +12°5$ for the vertically baked materials.

After the corrections of the effects of all the disturbances have been made (fabric and shape anisotropies and sloped floor), we observe only one group of points : $\overline{I} = 62°4$ and $\overline{\Delta} = +17°2$. The Fisher's statistics, applied to this group of points, gives the next results :

$\overline{I} = 62°46$ with $\alpha_{95} = 0°59$ and $\overline{\Delta} = 17°11$ with $\delta = 1°25$, the precision factor being equal to 735.

If we take the latitude difference between *Les Rairies* and Paris into account, the true value of the inclination, 63°6, is to be compared with the 64° value effectively measured today in Paris. The average deviation, 17°2, is in good agreement with the 18° value measured on the site.

### *3.2.Rennes-La Bintinais (Ille-et-Vilaine, France).*

From this farm-house, come paving tiles of the end of the fifteenth century. These paving tiles have a small module and are bevel-edged. As afore-seen in figure 4, the obtained results in the inclination- deviation plane prove the existence of a fabric anisotropy.

The study of the susceptibility ellipsoid shows that it is one of revolution, flattened in the plane of the paving tile ($k_x = k_y = 1.28\ k_z$). The histogram of the anisotropy index ($k_x/k_z$) can be seen in figure 7. The mean value of this index is equal to 1.28 and the standard deviation equal to 0.159 (12.4%) corresponds to a strong dispersion. The combined corrections of both shape and fabric anisotropies are not sufficient enough to explain the magnitude of the observed discrepancies ($I_1$-$I_0$) and ($I_2$-$I_0$). Geometric effects alone (sloped floor associated with a tilting of the materials induced by the bevelled edges) can explain such a discrepancy, but up to the present we have not rediscovered the principle of the complexe stacking of the materials in the kiln permitting to compute the good correction of all the disturbances.

*3.3.Nantes-Le Jardin des Beaux-Arts (Loire-Atlantique, France)*

The romano-gallic bricks with a handling-slot, studied here, come from the clamping of the wall IV in the above mentionned excavation. The study of the results in the inclination- deviation plane, both without and with the fabric anisotropy correction, has been given in figure 5. The susceptibility ellipsoid is one of revolution with a mean value of the anisotropy index equal to 1.12. The dispersion of the experimental values is sufficiently strong (standard deviation equal to 0.1 hence 8.9%). This mean value completly permits to render an account of the observed discrepancies especially since the stacking logic is simple enough to allow the rediscovering of the +8° tilt.

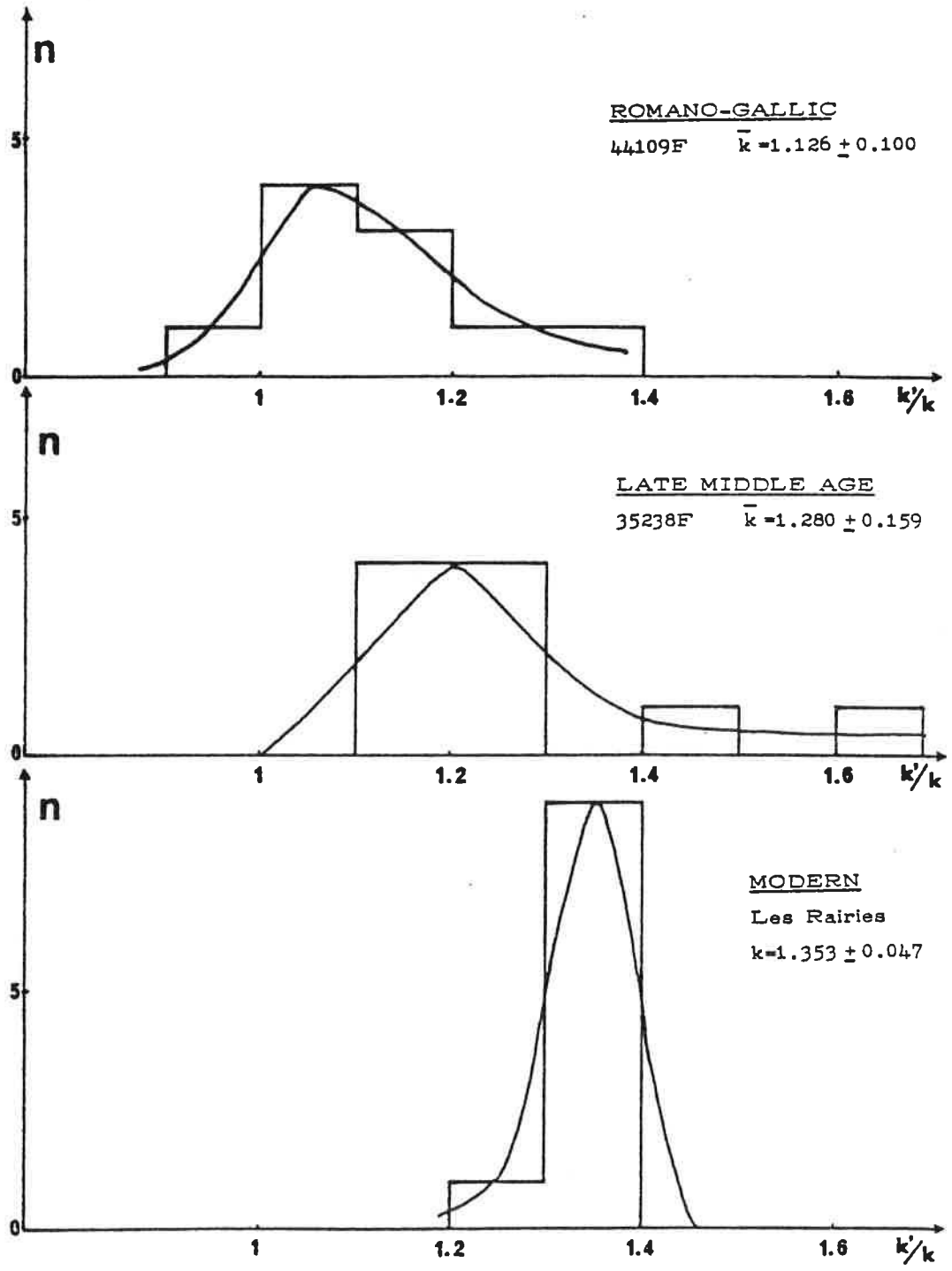



**Figure 7** : Histogram of anisotropy indices for materials of different dates.

*3.4.Conclusions.*

If we only consider the herein given examples, there is a clear increasing of the magnetization anisotropy in the baked clay materials from antiquity up to today, but it will be necessary to increase the number of the experiments to corroborate or to invalidate this apparent trend.

When the drilling of the core-sample was performed, we already noticed that those from the medieval paving tiles frequently possess a foliated texture while those from the romano- gallic bricks and tiles have a fine granular aspect. Has this observation a defenite connection with the increasing of the fabric anisotropy? Is the difference due to a change in the puddling technics (transition from a downtrodden clay to the use of a pug-mill) or is it due to a modification in the moulding methods (use of a vibrating table for example) ? It is too soon to conclude.

However, it is evident that the introducing of the extruding technics will be easier to detect, since its use causes a fabric anisotropy in the plane of the materials. These works are still in their early stages, but they will permit, in the future, to study the technological development of the making of the clay materials more closely.

REFERENCES.

**Bucur, I. , Dufournier, D. , Goulpeau, L. , Langouet, L. , and Naveau, J. , 1984.** La céramique à "oeil de perdrix" et la production de la Hardelière à Laval (Mayenne). *Archéologie Médiévale*, XIV : 169-219.

**Daly, L. and Zinsser, H. , 1973.** Etude comparative des anisotropies de susceptibilité et d'aimantation rémanente isotherme. Conséquence pour l'analyse structurale et le paléomagnétisme. *Ann. Géophys.* , 29/2: 189-200.

**Fox, J. M. W. and Aitken, M. J. , 1980.** Cooling rate dependence of thermoremanent magnetisation. *Nature*, 283 : 462-463.

**Goulpeau, L. and Langouet, L. , 1980.** Datation d'apports de tuiles et briques sur des sites gallo-romains à l'aide de mesures archéomagnétiques opérées sur d'abondants échantillonnages. *Rev. d'Archéométrie*, 4 : 153-163.

**Goulpeau, L. , Langouet, L. , Bardel, J. -P. and Bucur, I. , 1982.** Possibilités de l'archéomagnétisme dans l'étude d'un four de tuilier. *Rev. d'Archéométrie*, 6 : 13-26.

**Goulpeau, L. and Langouet, L. , 1982 (a) .** Problems of interpretation of different graphs I- obtained through an archaeomagnetic study of displaced materials. *Proceedings of the 22nd symposium on Archaeometry*, 1982. Bradford : 112-121.

**Goulpeau, L. and Langouet, L. , 1982 (b) .** Etude archéomagnétique de l'hypocauste du grand caldarium du Champ-Mulon à Corseul. *Dossiers du Ce. R. A. A.* , 10 : 41-46.

**Goulpeau, L. , Langouet, L. and Faguet, G. , 1982 (c) .** Etude archéomagnétique de quelques briquetages du marais de Dol. *Le Rouget de Dol*, 39 : 1-7.

**Goulpeau, L. , 1984.** Les possibilités de l'archéomagnétisme des matériaux déplacés. In : Datation- caractérisation des céramiques anciennes, *PACT*, 10 : 191-202.

**Goulpeau, L. , Langouet, L. and Lanos, P. , 1984.** Datation archéomagnétique des établissements gallo-romains à partir des matériaux de construction d'argile cuite. *Bull. Soc. Sci. Bretagne*, 56 : 107-116.

**Goulpeau, L. , Langouet, L. and Lanos, P. , 1985.** Apport de l'archéomagnétisme à l'étude de l'évolution des technologies de fabrication des matériaux de construction en argile cuite. In : Terres cuites architecturales au moyen-âge, *Actes du Colloque de St-Omer*, 7-9 Juin 1985, D. Deroeux (Editor) Arras, 1986 : 165-173.

**Goulpeau, L. , Lanos, P. and Langouet, L. , 1986.** Les apports de la désaimantation thermique dans les études archéomagnétiques de matériaux déplacés. *Rev. d'Archéométrie*, 10 : in press.

**Khodair, A. and Coe, R. S. , 1975.** Determination of geomagnetic paleo-intensities in vacuum. *Geophys. J. of the Royal Astronomical Society*, 42 : 107-115.

**Langouet, L. , Bucur, I. and Goulpeau,L. , 1983.** Les problèmes de l'allure de la courbe de variation séculaire du champ magnétique terrestre en France : nouveaux résultats archéomagnétiques. *Rev. d'Archéométrie*, 7 : 37-44.

**Langouet, L. and Goulpeau,L. , 1984.** La datation archéomagnétique du temple du Haut-Bécherel à Corseul. *Rev. Archéol. de l'Ouest*, 1 : 85-88.

**Lanos,P. , 1983.** *Etude methodologique de l'archéomagnétisme des tuiles et des briques.* Rapport de Diplôme d'Etudes Approfondies, Rennes, 248p.

**Lanos, P. , 1986.** The effects of demagnetizing field on thermoremanent magnetization acquired by parallel sided baked clay blocks. *Geophys. J. of the Royal Astronomical Society*, submitted for publication.

**Thellier, E. and Thellier, O. , 1959.** Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique. *Ann. Geophys.* , 15 : 285-376.

**Thellier, E. , 1971.** *Magnétisme interne, Geophysique*, La Pléïade, 322p.

**Thellier, E. , 1981.** Sur la direction du champ magnétique terrestre en France durant les deux derniers millénaires. *Physics of the Earth and planetary interiors*, 24 : 89-132.

**Walton, D. , 1980.** Time-temperature relations in the magnetization of assumblies of single domain grains. *Nature*, 286 : 245-247.

# VI - LES EFFETS DES POSITIONS DE CUISSON

## INTRODUCTION

Parallèlement aux perturbations liées aux propriétés magnétiques des argiles cuites peuvent intervenir d'autres perturbations liées à la position des objets lors de la cuisson. Jusqu'ici, on a considéré que l'hypothèse de base de l'archéomagnétisme des matériaux déplacés était toujours vérifiée, à savoir que les objets de forme parallélépipédique étaient posés sur un plan horizontal selon les positions théoriques à plat, de chant ou debout. La direction de l'aimantation mesurée dans le repère de carottage permet de remonter à la direction du CMT s'il est possible de replacer l'objet dans la position qu'il avait lors de la cuisson. Le problème est résolu en supposant que les matériaux sont cuits selon des positions simples, en rapport avec leur forme ou avec leur fonction.

Cependant, il arrive que ces hypothèses sur les positions théoriques et le plan horizontal de cuisson se révèlent fausses, ou tout au moins entachées de fortes erreurs. Les causes de ces erreurs sont la pente, qui affecte l'ensemble d'un chargement, pris dans sa totalité, et le pendage (Abrahamsen, 1973 ; Goulpeau *et al.* , 1984), qui affecte individuellement chaque objet de façon plus ou moins systématique.

## A - LA PENTE

L'origine de la pente des chargements est à rechercher dans l'existence de fours à tirage oblique caractérisés par un sol plan, montant régulièrement de l'alandier vers la cheminée. Le four des Rairies présenté au chapitre précédent (*cf.* fig. V-8) en constitue un exemple type, avec une pente moyenne de 8°. Le rangement d'objets parallélépipédiques dans de tels fours, selon les trois positions théoriques, ne peut être quelconque en azimut. En effet, si la position à plat est d'emblée stable quelle que soit l'orientation des objets sur le sol (fig. VI-1a), il apparaît que la position sur tranche ne peut être envisagée de façon stable que si le plan d'aplatissement est quasi-parallèle à la direction de pente (fig. VI-1b). Les modes de rangement des carreaux de pavage, actuellement pratiqués aux Rairies, et dont la tradition remonte aux siècles précédents, obéissent tout à fait à ces remarques de bon sens. D'ailleurs, ceci est d'autant plus logique qu'un bon tirage nécessite le libre passage de l'air chaud à travers le chargement. Des matériaux placés de chant, perpendiculairement à l'axe du four (fig. VI-1c), auraient pour effet de freiner, voire d'empêcher la circulation de l'air chaud. En résumé, l'orientation des matériaux parallélépipédiques sur un sol en pente est commandée par des considérations d'équilibre et de bon tirage.

D'après ces remarques, l'orientation moyenne des matériaux en position sur tranche (de chant ou debout) permet de restituer la direction de pente. On ne peut se fier aux matériaux cuits à plat puisque leur disposition azimutale peut être quelconque. L'effet de pente sur des matériaux cuits sur tranche parallèlement à l'axe du four se traduit par une rotation d'angle $\beta$ autour de l'axe y (*cf.* fig. II-1). Les formules de passage du repère de mesure au repère de cuisson se déduisent facilement des formules (I) et (II) établies plus loin pour la correction de pendage. Il suffit pour cela de changer $\Delta$ en $(90° - \Delta)$ et $\Delta_c$ en son complément. On peut distinguer deux cas simples :

- Lorsque le N.M. est parallèle à l'axe x, c'est-à-dire à la direction de pente, alors l'inclinaison du CMT est égale à l'inclinaison déterminée sur les matériaux plus ou moins l'angle de pente $\beta$ , selon que l'alandier est orienté au nord ou au sud.

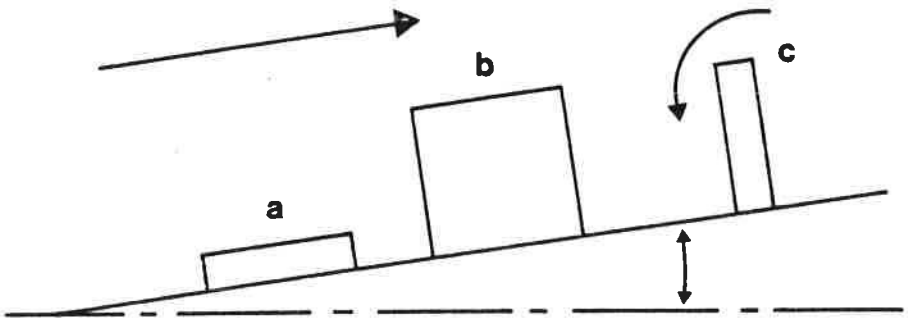



**Fig. VI-1** : Positions théoriques des matériaux parallélépipédiques aplatis sur un sol en pente.

a) Position à plat, stable.
b) Position de chant parallèle à la direction de pente, stable.
c) Position de chant perpendiculaire à la direction de pente, instable.

- Lorsque le N.M. est perpendiculaire à la direction de pente, l'inclinaison est peu affectée. Elle est égale, à un ou deux degrés près, à l'inclinaison du CMT tant que $\beta$ reste inférieur à 10°. Par contre, l'effet sur la déviation devient très important, en plus ou en moins selon que l'alandier est orienté vers l'ouest ou vers l'est "magnétique".

Plus généralement, l'effet de pente joue à la fois sur l'inclinaison et la déviation lorsque le CMT est orienté de façon quelconque par rapport à l'objet. Si l'on peut admettre que l'orientation moyenne des matériaux sur tranche donne la direction de pente, il reste à évaluer l'angle $\beta$ de la rotation à effectuer.

La correction est facile à appliquer lorsque les paramètres pente, direction de pente et orientation des matériaux par rapport à l'axe du four sont connus à l'avance. Dans l'exemple des Rairies, les observations directes sur le terrain indiquent une pente de 8° vers le nord pour des matériaux rangés à plat et de chant respectivement selon les positions a et b de la figure VI-1. La correction de pente fait passer l'inclinaison moyenne des 76 carreaux de pavage étudiés de 54°7 $\pm$ 0°6 à 62°4 $\pm$ 0°6, ce qui donne, après une correction de latitude de 1°2 pour normalisation à Paris, une inclinaison moyenne de 63°6 en quasi-parfaite concordance avec celle du CMT qui est de 64°. Dans cet exemple, la correction joue aussi sur la déviation du fait de l'orientation à environ 20° est de l'axe du four par rapport au N.M. La déviation passe de 13°9 $\pm$ 1° à 17°5 $\pm$ 1°3. Cette dernière valeur correspond assez bien à celle effectivement mesurée sur le terrain à l'aide d'une boussole (*cf.* V-8).

La détection et la correction des effets de pente à partir des seules données archéomagnétiques posent généralement un problème difficile à résoudre. Deux cas sont à considérer : le cas des matériaux déplacés retrouvés en dehors de leur contexte de fabrication, sur les sites de construction, et le cas des matériaux retrouvés lors de la fouille d'un atelier, dans l'environnement immédiat d'un four suffisamment bien conservé pour garder trace du caractère horizontal ou oblique du plan de chauffe.

## MATERIAUX DEPLACES RETROUVES EN DEHORS DU CONTEXTE DE FABRICATION

En l'absence de tout renseignement archéologique concernant le four proprement dit, on ne peut que recourir à l'examen des diagrammes archéomagnétiques pour détecter les effets d'une éventuelle pente du chargement. Malheureusement, si les positions de chant indiquent bien , en principe, l'orientation de la pente, il est impossible de déterminer l'angle $\beta$ à partir de l'existence d'un seul agglomérat. Il faudrait pour cela deux agglomérats symétriques résultant d'une pente alternée $\pm \beta$ . La simple vision de la figure VI-1 montre que cela est impossible. L'exemple des Rairies est tout à fait démonstratif à ce sujet. Après correction d'effet de forme et d'anisotropie, les directions des matériaux cuits de chant se regroupent en un seul agglomérat d'inclinaison moyenne 54°7 et de déviation moyenne 13°9. Mais rien dans cet agglomérat ne permet de détecter l'effet de pente, si ce n'est peut-être la faible inclinaison.

## MATERIAUX RETROUVES DANS OU PRES D'UN FOUR BIEN CONSERVE

S'il s'agit d'un four à tirage oblique bien conservé, alors la pente et la direction de pente peuvent être mesurées directement. D'où une correction possible des mesures archéomagnétiques. Un moyen de vérifier la validité d'une telle correction est de déterminer la direction moyenne de l'aimantation dans la structure même du four, selon la méthode de prélèvement au plâtre mis au point par E. Thellier. La confrontation des résultats est souvent très instructive et permet en principe soit de confirmer soit d'infirmer l'hypothèse d'une cuisson des matériaux sur le sol en pente. Une étude de ce type est présentée au chapitre IX à propos de fonds de pots retrouvés lors de la fouille de l'atelier carolingien de Launay-Margat en Guipel (Ille-et-Vilaine) (Lanos *et al.* , 1986).

Le modèle de rangement des Rairies semble s'appliquer d'une manière générale à tous les matériaux pouvant tenir seuls en équilibre sur la tranche. Par contre, le rangement sur un sol en pente de matériaux instables comme les tuiles plates conduit souvent à des chargements complexes faisant intervenir d'autres effets tels que le pendage. Enfin, toujours d'après des observations effectuées aux Rairies, il existe des chargements constitués de briquettes posées à plat et rangées en épis ou en chevrons de façon statistiquement symétrique autour de la direction de pente. L'axe x de ces matériaux, tel qu'il est défini en figure II-1, n'est alors plus colinéaire à la direction de pente. L'angle $\beta$ de la correction à effectuer devient fonction de l'orientation réelle de l'axe x par rapport à l'axe du four. Il est maximal selon la direction de pente et est nul perpendiculairement à cette direction. En réalité, le problème devient très complexe puisqu'interviennent simultanément la pente et le pendage. La correction des effets de tels positionnements à partir des seules données fournies par les diagrammes archéomagnétiques reste difficile et sujette à caution en l'absence d'observations archéologiques directes concernant le four lui-même.

Les fours à tirage oblique apparaissent dans nos régions à partir du Moyen-Age. Mais leur usage n'a pas supplanté celui des fours à tirage vertical. Ainsi, la quasi-totalité des fours retrouvés lors des fouilles des Tuileries à Paris (Espagnet, 1987) sont basés sur le principe du tirage vertical avec sole horizontale. De la même façon, les fours gallo-romains sont pratiquement tous basés sur ce principe. En conclusion, si l'effet de pente est particulièrement gênant pour la datation archéomagnétique, il n'intervient que rarement sur l'ensemble des lots étudiés. La première hypothèse de base de l'archéomagnétisme des matériaux déplacés, qui suppose l'horizontalité du plan de cuisson, est en conséquence vérifiée dans la très grande majorité des cas.

## B - LE PENDAGE

Le pendage intervient sur les matériaux cuits sur tranche, qu'il s'agisse de tuiles, de briques ou de carreaux de pavage. Il résulte généralement de la nécessité d'assurer la stabilité des rangées d'objets lors du chargement d'un four. Ce pendage est souvent alterné d'une rangée à l'autre (fig. VI-2). Il se traduit par une rotation d'angle $\alpha$ autour de l'axe x. La mesure des composantes de l'aimantation dans le repère (Oxyz) des objets donne :

$$M_x = M \cos I \cos \Delta$$
$$M_y = M \cos I \sin \Delta$$
$$M_z = M \sin I$$

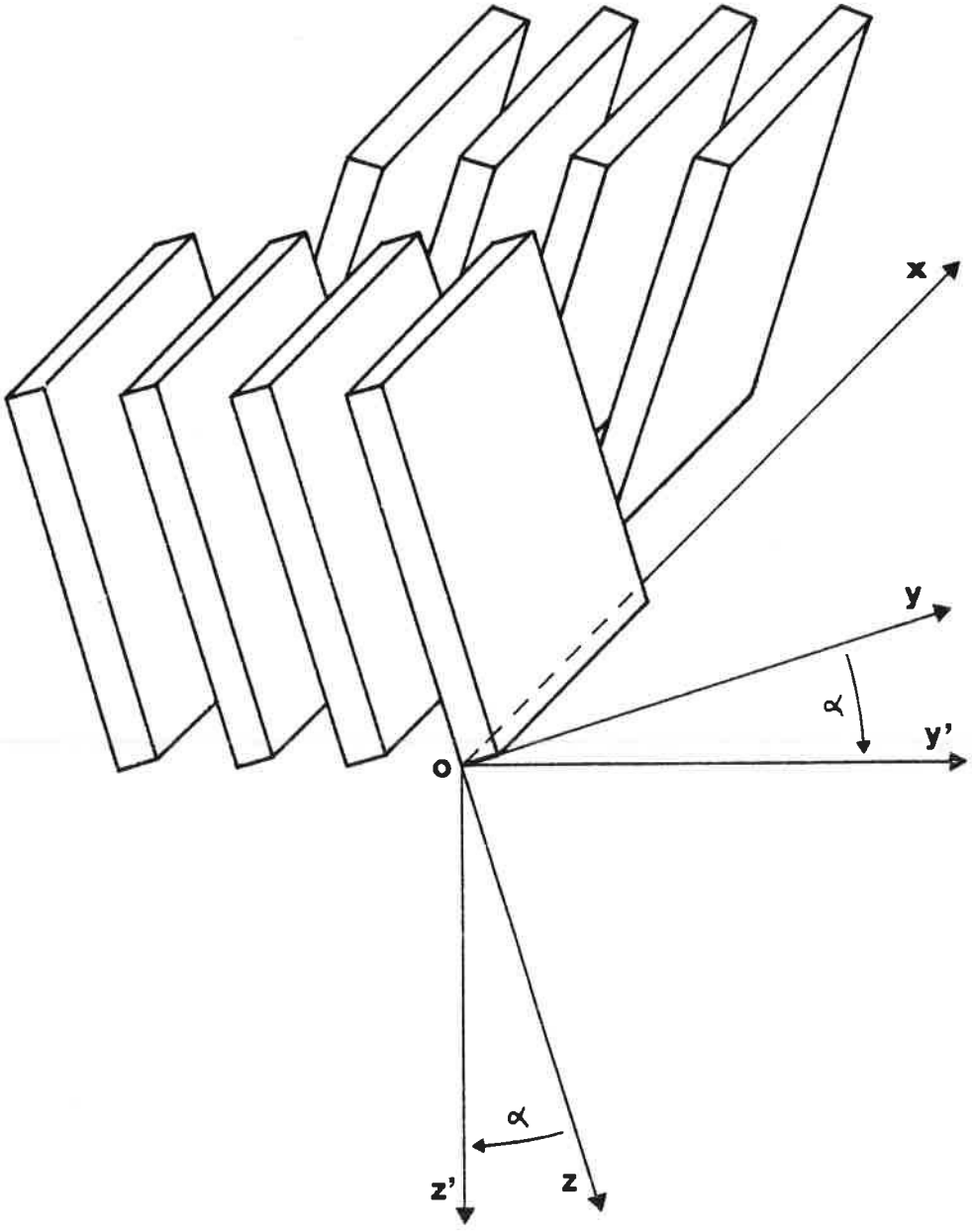



**Fig. VI-2** : Pendage alterné sur des rangées de matériaux debout.

L'expression de ces composantes dans le repère réel de cuisson, c'est-à-dire avec pendage, est obtenue par une rotation d'angle $\alpha$ autour de l'axe x dans le sens trigonométrique (fig. VI-2). On a :

$$\begin{bmatrix} M'_x \\ M'_y \\ M'_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}$$

L'inclinaison corrigée $I_c$ et la déviation corrigée $\Delta_c$ s'obtiennent immédiatement des formules :

$$\sin I_c = M'_z / M \qquad \text{et} \qquad \tan \Delta_c = M'_y / M'_x$$

d'où :

$$\sin I_c = \sin I \cos\alpha - \cos I \sin\Delta \sin\alpha$$

$$\tan \Delta_c = (\cos I \sin\Delta \cos\alpha + \sin I \sin\alpha) / (\cos I \cos\Delta)$$

De la même manière que pour la correction d'effet de pente, deux cas simples se présentent :

**a)** Si la déviation mesurée est nulle, c'est-à-dire si le plan d'aplatissement est parallèle au méridien magnétique, alors :

$$\sin I_c = \sin I \cos\alpha \qquad \text{et} \qquad \tan \Delta_c = \sin\alpha \tan I$$

Dans le cas d'un pendage faible, inférieur à 10°, on a :

$$I_c \sim I \qquad \text{et} \qquad \tan \Delta_c = \alpha \tan I$$

L'effet est négligeable sur l'inclinaison et est maximal sur la déviation.

**b)** Si la déviation est égale à $\pm 90°$, c'est-à-dire si le plan d'aplatissement est perpendiculaire au méridien magnétique, alors :

$$\sin I_c = \sin (I + \alpha) \qquad \text{et} \qquad \Delta_c = 90°$$

ou encore : $I_c = I \pm \alpha$ selon que les objets penchent dans un sens ou dans l'autre.

L'effet est maximal sur l'inclinaison et nul sur la déviation.

Deux exemples d'application montrent les conséquences de ces pendages sur les mesures archéomagnétiques brutes. Il s'agit d'une part d'un lot de 145 briques gallo-romaines provenant de fouilles réalisées dans le jardin des Beaux-Arts à Nantes (Loire-Atlantique) (lot 44109F), et d'autre part d'un lot de 97 carreaux de pavage médiévaux provenant de la ferme de la Bintinais à Rennes (Ille-et-Vilaine) (lot 35238G).

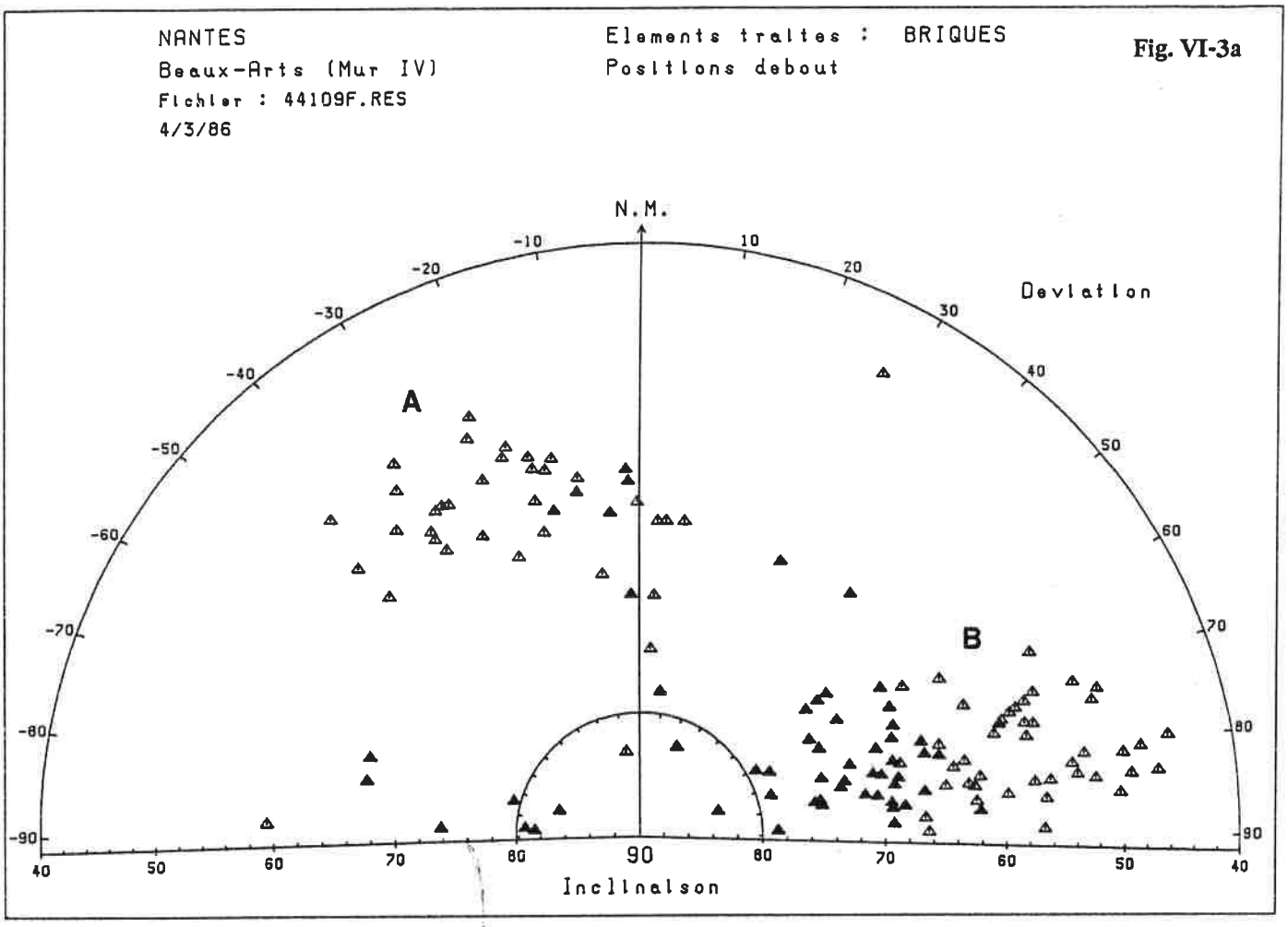



Fig. VI-3a

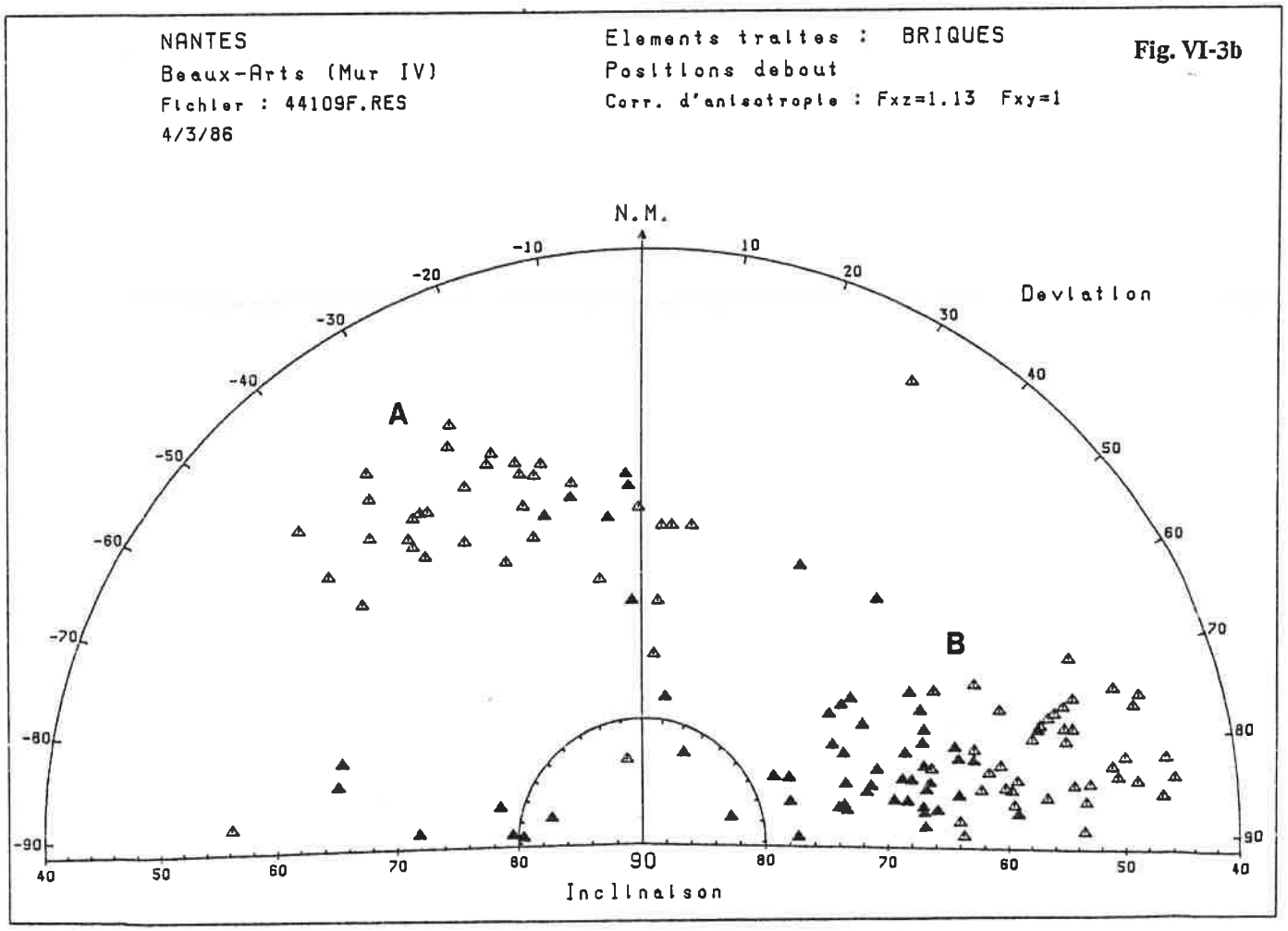
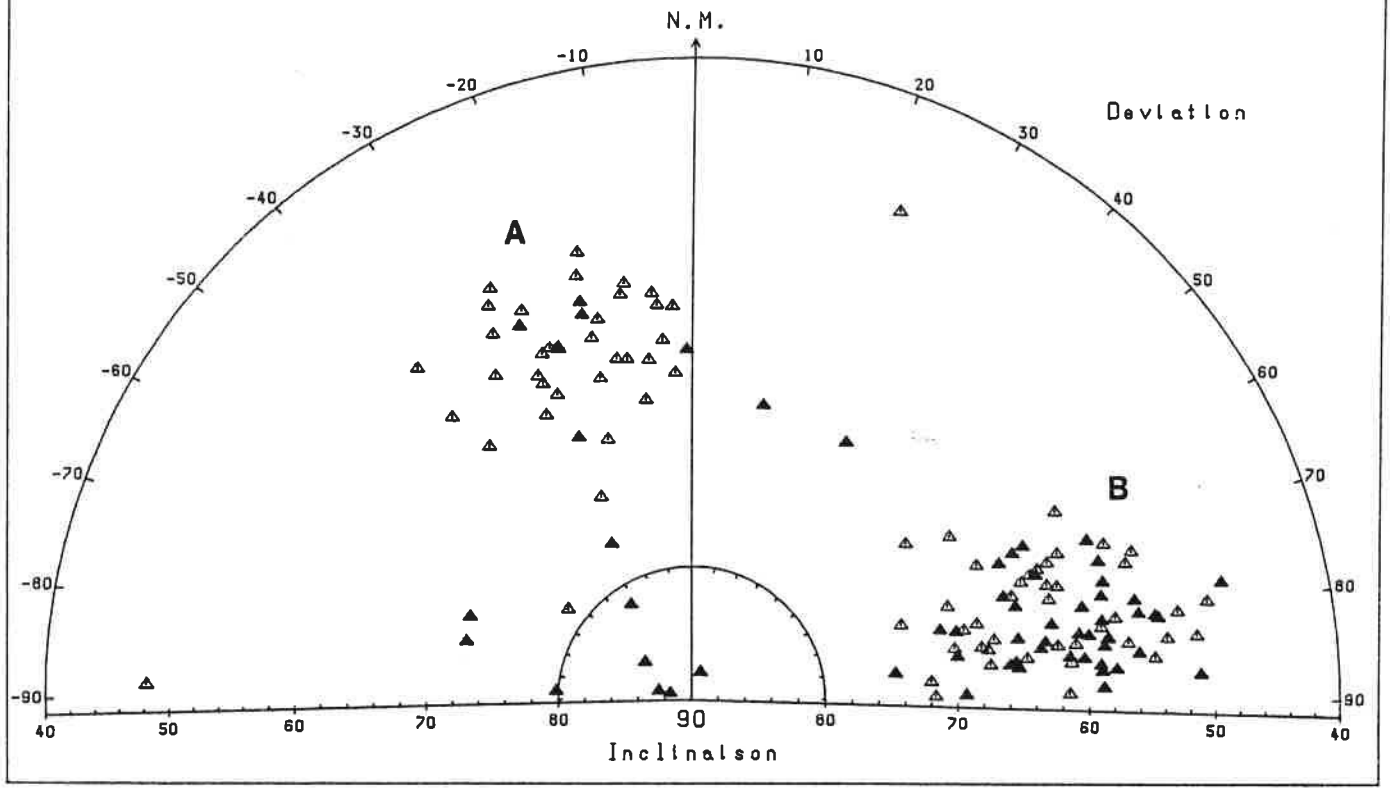



Fig. VI-3b

NANTES
Beaux-Arts (Mur IV)
Fichier : 44109F.RES
4/3/86

Elements traites : BRIQUES
Positions debout
Corr. d'anisotropie : Fxz=1.13 Fxy=1
Corr. de pendage : P=8 deg.

**Fig. VI-4a**

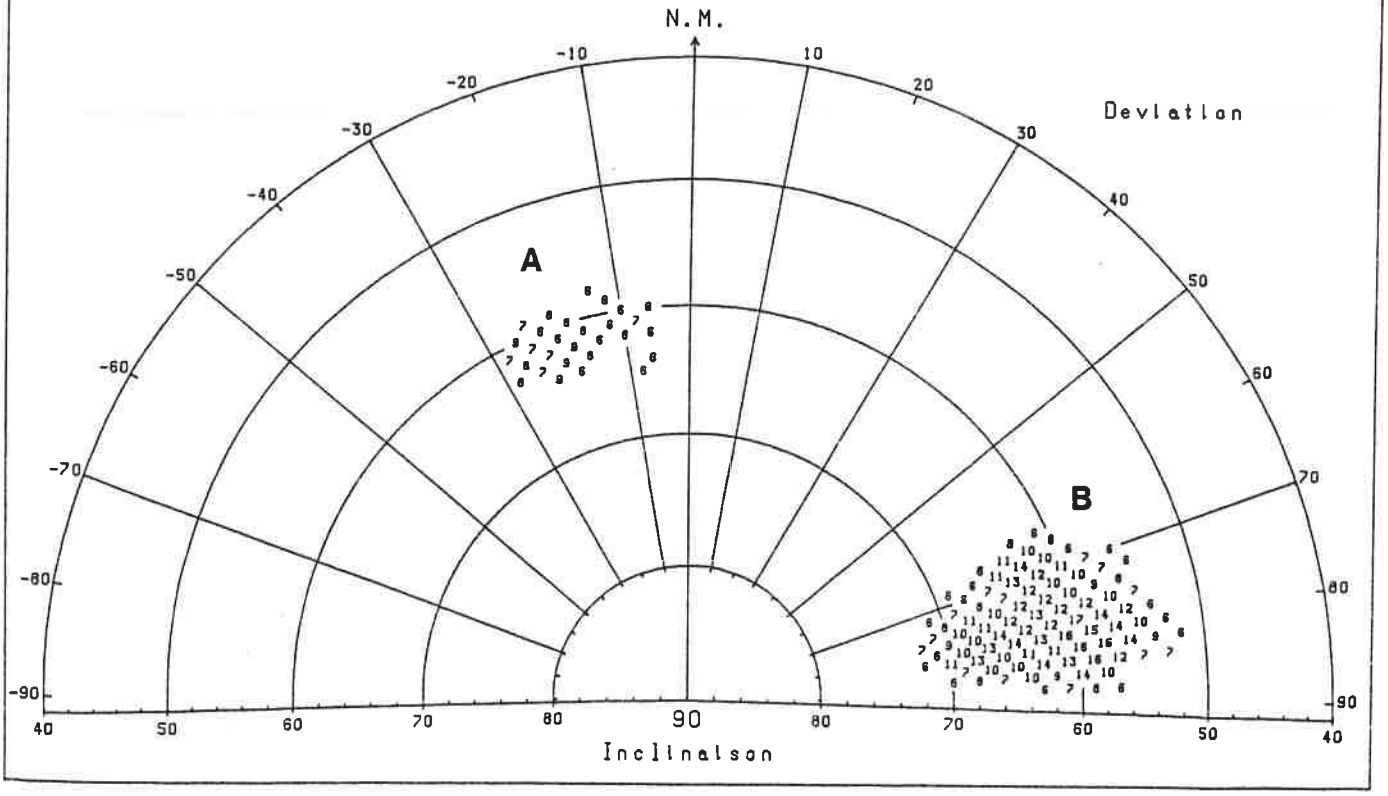



NANTES
Beaux-Arts (Mur IV)
Fichier : 44109F.RES
4/3/86

Elements traites : BRIQUES
Positions debout
Corr. d'anisotropie : Fxz=1.13 Fxy=1
Corr. de pendage : P=8 deg.

Fenetre mobile
selon un cone
de 6 degres
d'ouverture

**Fig. VI-4b**



*LOT 44109F*

Le diagramme de pointage en figure VI-3a montre que les briques ont été cuites debout (à 91% d'après les statistiques), en majorité perpendiculairement au N.M. de l'époque. L'ensemble B est nettement dédoublé selon deux agglomérats mis en évidence par les triangles noirs et blancs. La figure VI-3b donne les résultats après correction de l'effet d'anisotropie d'ATR : $\overline{F}_{xz}$ = 1,13 et $\overline{F}_{xy}$ = 1. La correction d'effet de forme s'avère inutile à cause de la faible aimantation des matériaux. L'interprétation du dédoublement est immédiate. Il s'agit de briques ayant été cuites selon un pendage alterné d'une rangée à l'autre. On observe pour l'agglomérat B une très nette corrélation entre l'orientation des faces supérieures lissées des briques et le sens du pendage. En effet, les faibles inclinaisons correspondent à un pendage vers le nord et à une orientation des faces supérieures lissées des briques vers le sud. Inversement, les fortes inclinaisons correspondent à un pendage vers le sud et à une orientation des faces lissées vers le nord. En supposant un pendage symétrique du type de celui de la figure VI-2, la correction nécessaire à apporter pour regrouper au mieux les directions d'aimantation est de $\pm 8^\circ$. Les figures VI-4a et b montrent l'excellente amélioration des résultats. La datation de ce lot est discutée dans l'article en annexe du chapitre V.

*LOT 35238G*

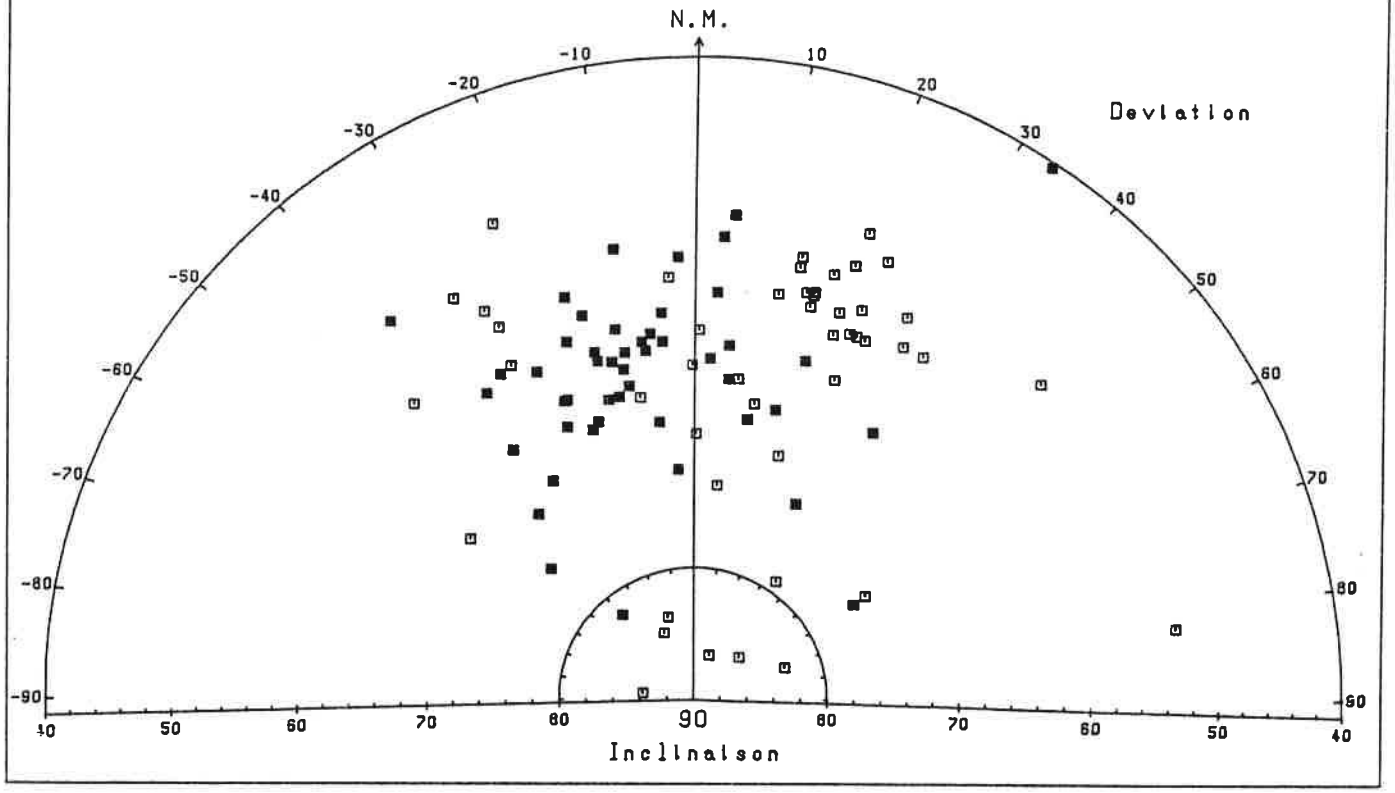
Le diagramme de pointage en figure VI-5a révèle qu'il s'agit de carreaux de pavage cuits sur tranche (à 99% d'après les statistiques), avec un plan d'aplatissement plutôt parallèle, à $\pm 30^\circ$ près, à la direction du N.M. Le diagramme des densités en figure VI-5b fait apparaître très nettement l'existence de deux agglomérats qui peuvent s'interpréter de deux manières. Il s'agit soit d'un rangement en chevron selon deux directions -14° et +18° quasiment symétriques par rapport à la direction du N.M. de l'époque, soit d'un pendage $\pm \alpha$ selon une direction perpendiculaire à celle du N.M. Dans un rangement en chevrons, c'est-à-dire en l'absence de perturbations des positions de cuisson, il ne devrait pas y avoir d'écart entre les inclinaisons moyennes des deux agglomérats A et B. Or, même après correction des effets de l'anisotropie ($\overline{F}_{xz}$ = 1,18 et $\overline{F}_{xy}$ = 1) en figure VI-6a et b, on constate toujours un écart important de 6°. L'effet du champ démagnétisant est nul du fait d'une aimantation moyenne inférieure à 1 A/m. La seule explication de cette différence de 6° est donc à rechercher dans l'effet d'un pendage alterné des carreaux selon une direction est-ouest. D'ailleurs, cette hypothèse semble d'autant plus vraisemblable que les matériaux présentent un biseau systématique, de 4° en moyenne, qui entraîne de fait une certaine instabilité sur tranche. Une correction de pendage a été effectuée selon un angle de $+\alpha$ pour l'agglomérat A et de $-\alpha$ pour l'agglomérat B (*cf.* fig. VI-2).Les résultats obtenus sont présentés en figure VI-7a et b pour $\alpha = \pm 10^\circ$ et en figure VI-8a et b pour $\alpha = \pm 13^\circ$. D'autres essais ont été menés pour d'autres valeurs de pendage. Il en ressort que le regroupement des directions est le meilleur, c'est-à-dire que les densités sont maximales, lorsque l'angle $\alpha$ est égal à $\pm 10^\circ$. L'inclinaison moyenne obtenue est alors de 63°, soit autour de 63°5 après normalisation à Paris. D'après la courbe de variation séculaire de l'inclinaison, en France, durant la période historique (Thellier, 1981) (*cf.* chapitre XI), la date de fabrication de ce lot de carreaux devrait se situer au XV$^e$ siècle.

Les effets du pendage sont décelables lorsque les données archéomagnétiques présentent des dédoublements d'agglomérats facilement identifiables et interprétables, comme c'est le cas pour les deux exemples donnés ci-dessus. Ils sont aussi décelables lorsqu'il existe un écart important entre les inclinaisons moyennes des agglomérats de déviation proche de 90° et ceux de déviation proche de 0°. Dans ce cas, l'absence de dédoublement signifie que les matériaux penchaient tous dans le même sens pour une direction de rangement donnée. De façon analogue à l'effet de forme et à l'effet de l'anisotropie d'ATR, l'effet du pendage est minimal, voire nul, lorsque le plan d'aplatissement des objets (sur tranche) est quasi-parallèle à la direction du N.M. de l'époque.

RENNES
La Bintinais lot G
Fichier : 35238G.RES
25-MAR-86

Elements traites : CARREAUX
Positions de chant

**Fig. VI-5a**

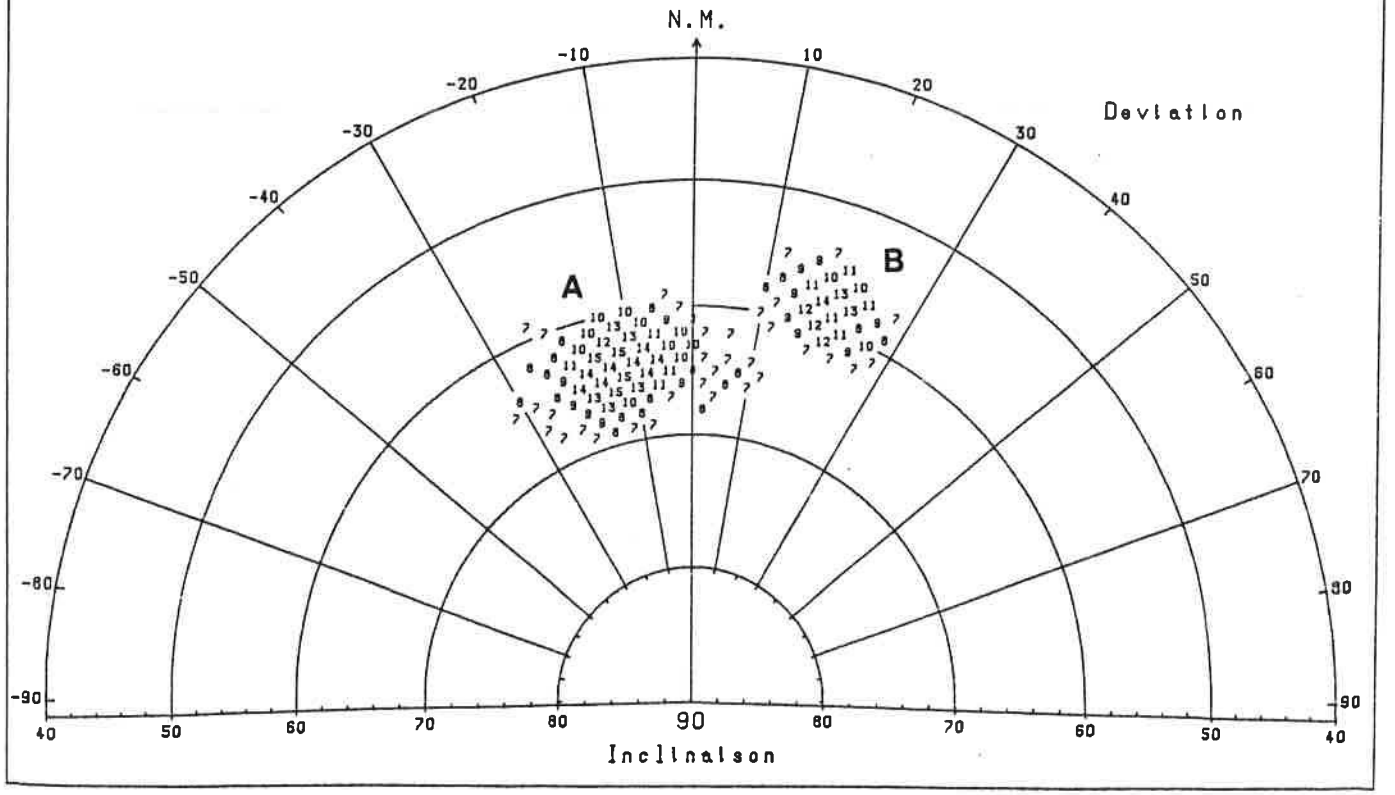



RENNES
La Bintinais lot G
Fichier : 35238G.RES
25-MAR-86

Elements traites : CARREAUX
Positions de chant

Fenetre mobile
selon un cone
de 8 degres
d'ouverture

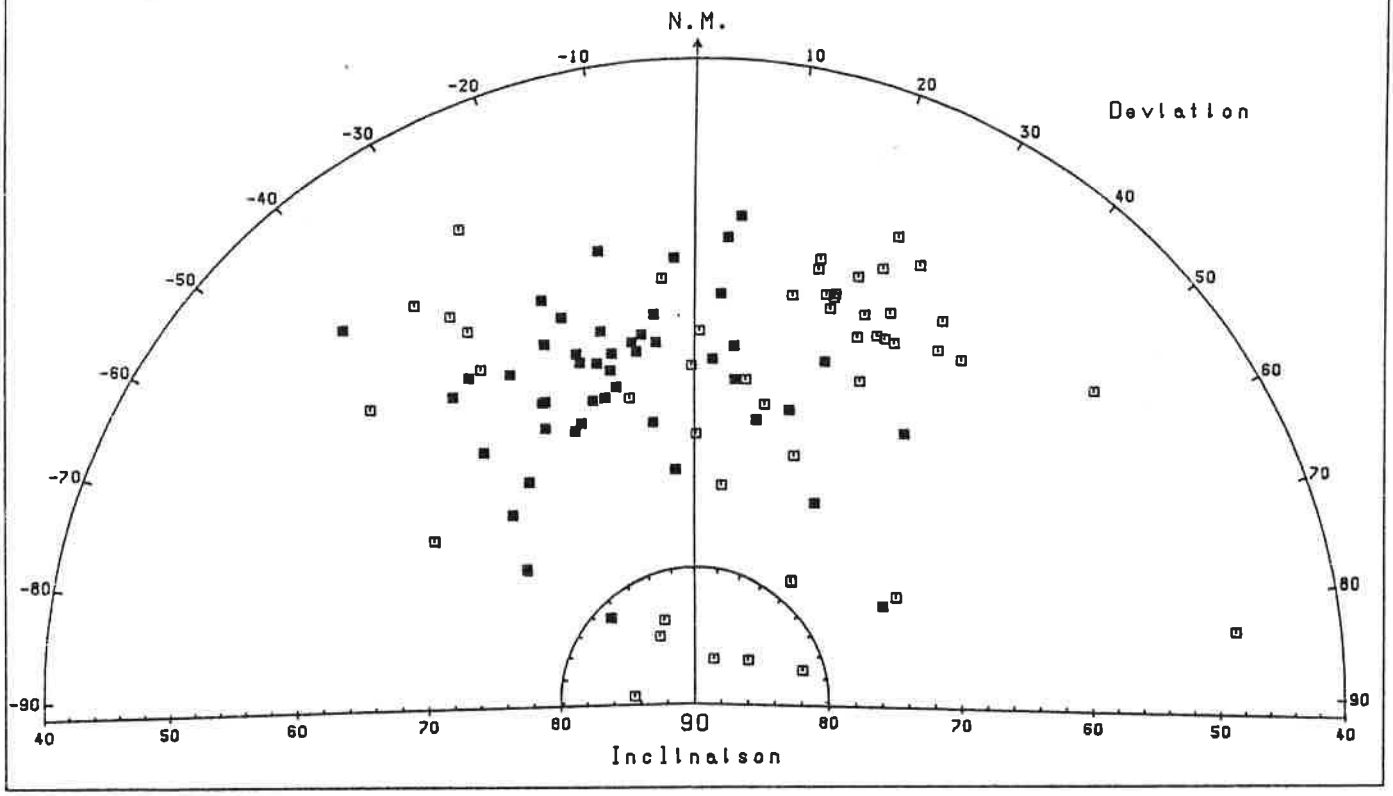
**Fig. VI-5b**



RENNES
La Bintinais lot G
Fichier : 35238G.RES
25-MAR-86

Elements traites : CARREAUX
Positions de chant
Corr. d'anisotropie : Fxz=1.18 Fxy=1

**Fig. VI-6a**

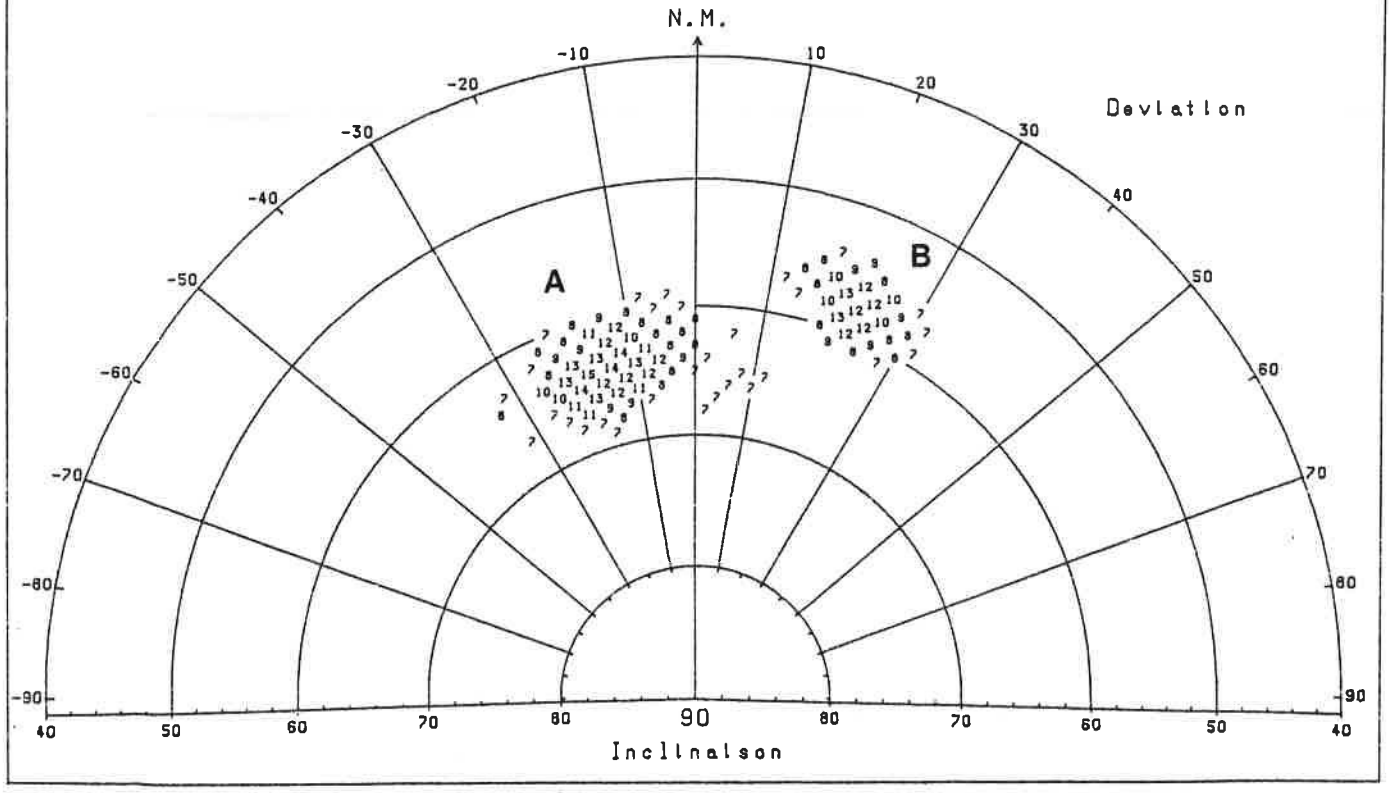



RENNES
La Bintinais lot G
Fichier : 35238G.RES
25-MAR-86

Elements traites : CARREAUX
Positions de chant
Corr. d'anisotropie : Fxz=1.18 Fxy=1

Fenetre mobile
selon un cone
de 8 degres
d'ouverture

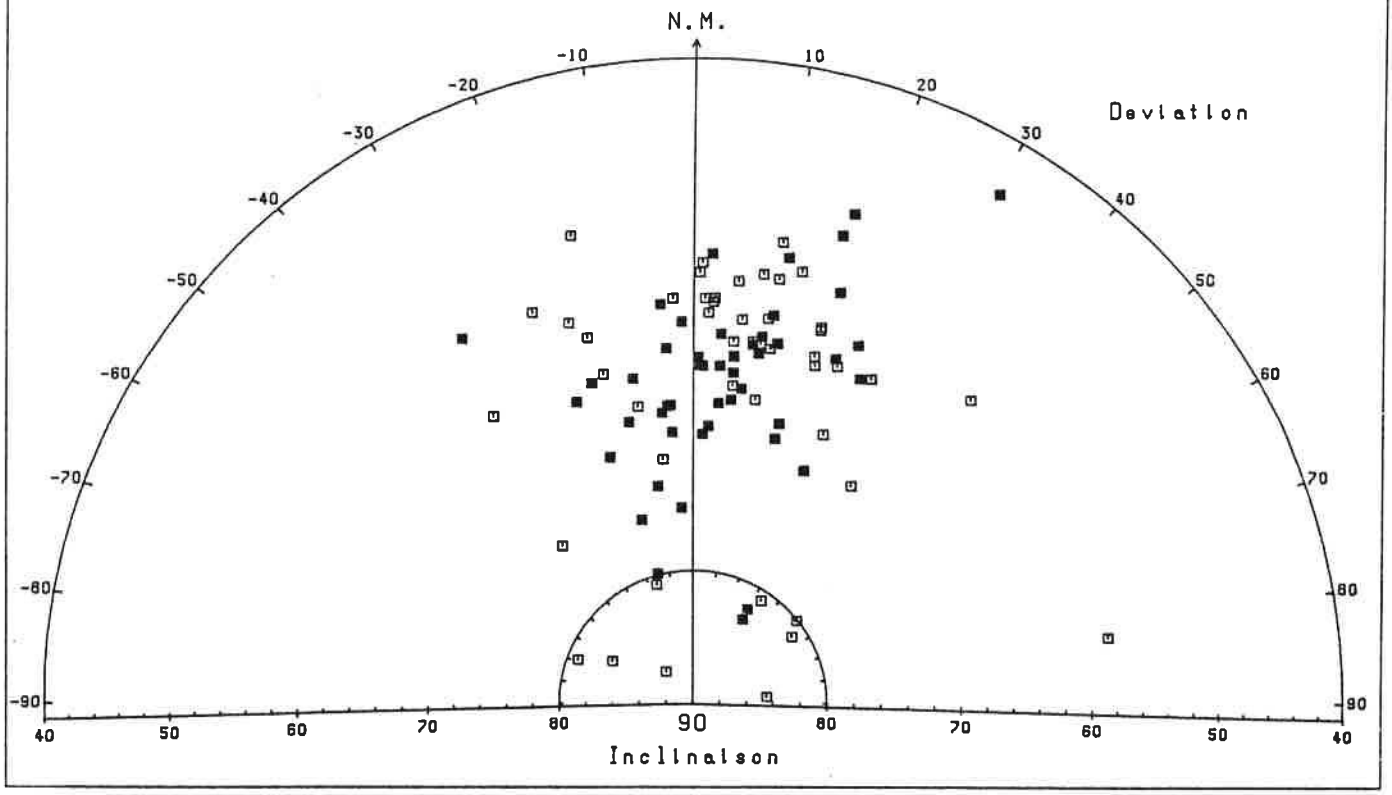
**Fig. VI-6b**



RENNES
La Bintinais lot G
Fichier : 35238G.RES
25-MAR-86

Elements traites : CARREAUX
Positions de chant
Corr. d'anisotropie : Fxz=1.18 Fxy=1
Corr. de pendage : P=10 deg.

**Fig. VI-7a**

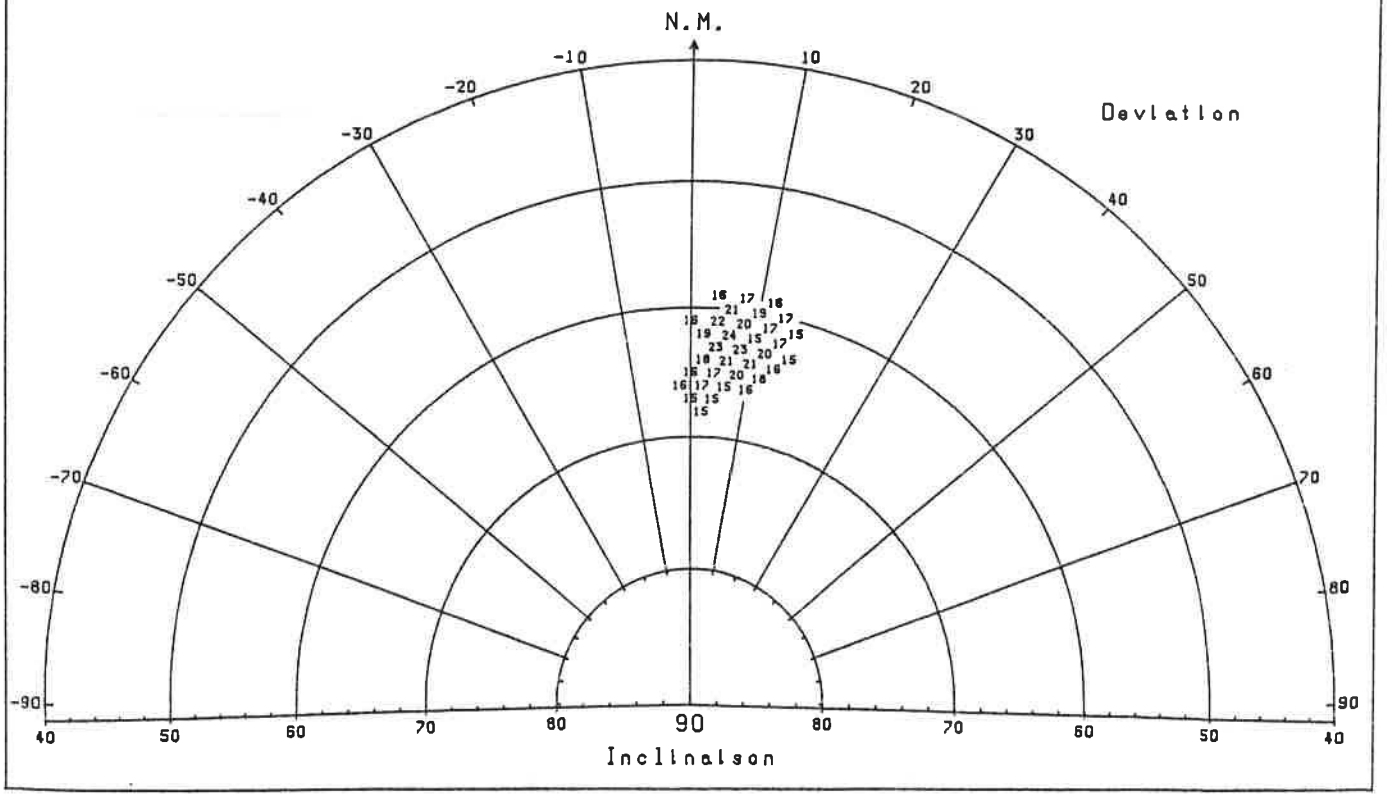



RENNES
La Bintinais lot G
Fichier : 35238G.RES
25-MAR-86

Elements traites : CARREAUX
Positions de chant
Corr. d'anisotropie : Fxz=1.18 Fxy=1
Corr. de pendage : P=10 deg.

Fenetre mobile
selon un cone
de 8 degres
d'ouverture

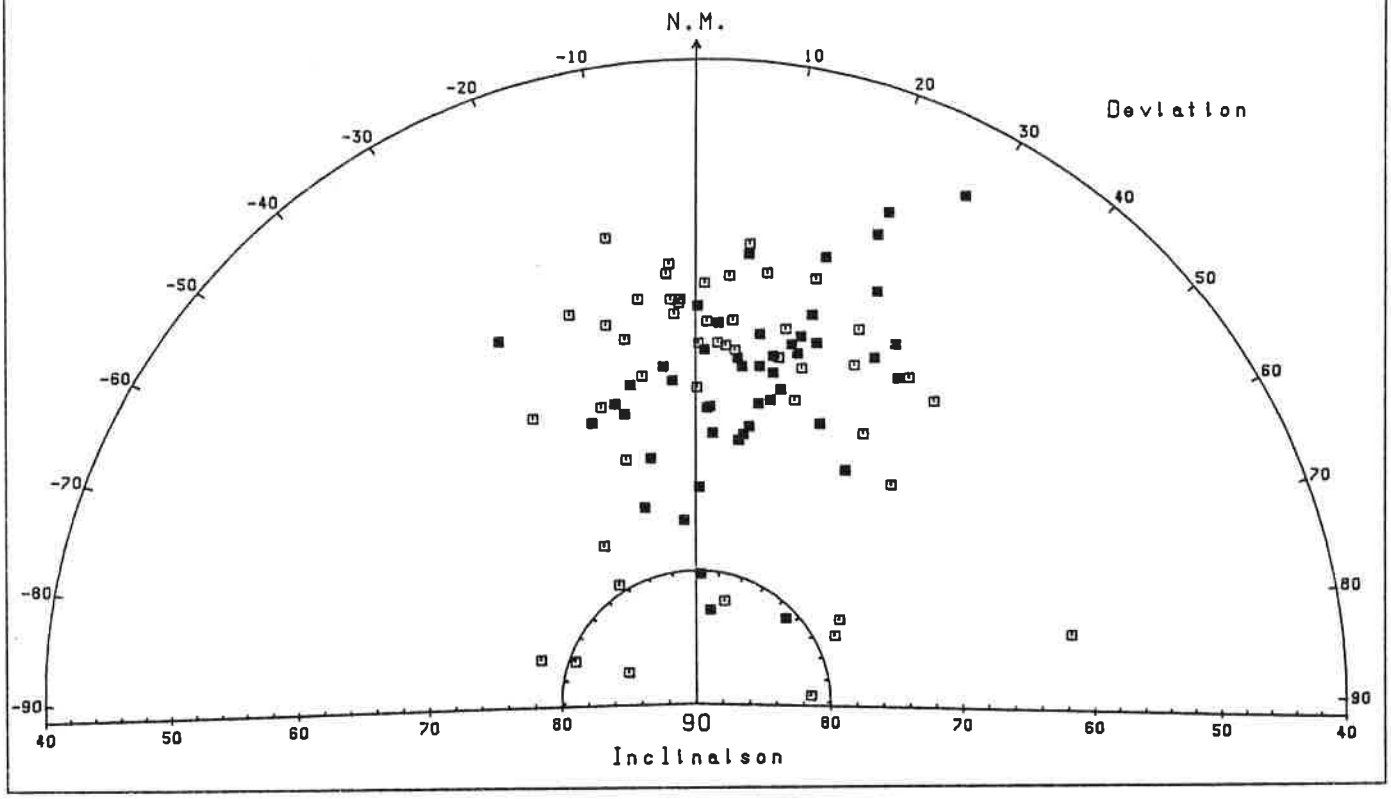
**Fig. VI-7b**



RENNES
La Bintinais lot G
Fichier : 35238G.RES
25-MAR-86

Elements traites : CARREAUX
Positions de chant
Corr. d'anisotropie : Fxz=1.18 Fxy=1
Corr. de pendage : P=13 deg.

**Fig. VI-8a**

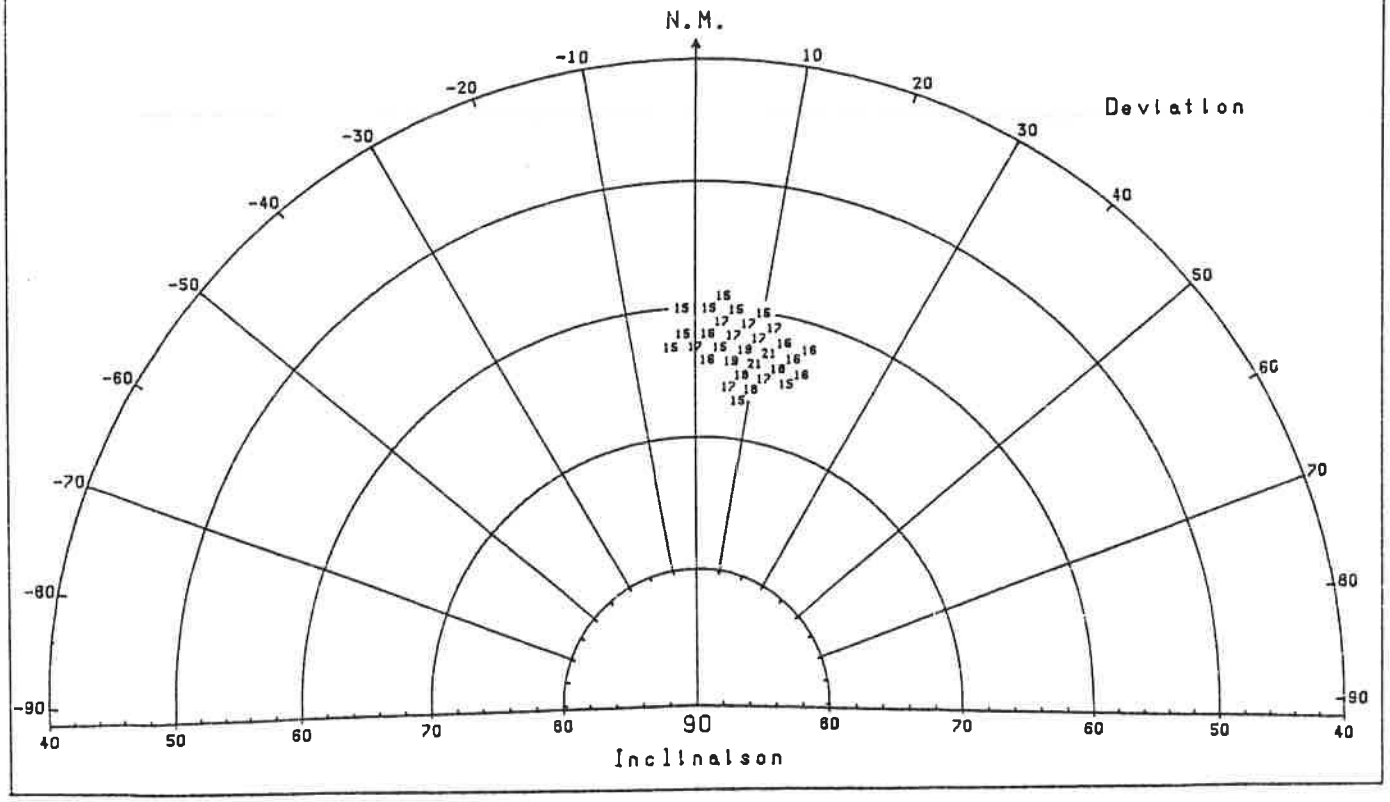



RENNES
La Bintinais lot G
Fichier : 35238G.RES
25-MAR-86

Elements traites : CARREAUX
Positions de chant
Corr. d'anisotropie : Fxz=1.18 Fxy=1
Corr. de pendage : P=13 deg.

Fenetre mobile
selon un cone
de 8 degres
d'ouverture

**Fig. VI-8b**



# CONCLUSION

De tous les effets perturbateurs, ceux du pendage et de la pente sont les plus délicats à corriger pour la raison même qu'ils touchent aux hypothèses de base de l'archéomagnétisme des matériaux déplacés. L'occurrence de ces effets est variable selon les époques. A l'époque gallo-romaine, les soles des fours sont horizontales. Aussi, seul le pendage peut intervenir. Mais l'extrême régularité avec laquelle les matériaux de construction étaient rangés permet la plupart du temps de détecter et de corriger cette perturbation. Durant l'époque médiévale et moderne apparaissent les fours à tirage oblique avec sol incliné. Dans ce cas, on peut craindre les effets combinés de la pente et du pendage. Cependant, l'expérience acquise au cours de ces dernières années en matière de datation archéomagnétique des matériaux déplacés montre que de telles complications restent relativement rares.

# Troisième partie

# ARCHEOMAGNETISME DE MATERIAUX DEPLACES AUTRES QUE LES TUILES, BRIQUES ET CARREAUX DE PAVAGE

# VII - LES TUBULI ET LES IMBRICES

## INTRODUCTION

A côté des tuiles, des briques et des carreaux de pavage qui ont été produits en grande quantité depuis l'époque gallo-romaine jusqu'à nos jours, on rencontre de nombreux matériaux d'argile cuite de formes et de fonctions très diverses servant à la réalisation de parties spécifiques dans les constructions ou les grands travaux. Les boisseaux et les drains en sont des exemples pour l'époque actuelle. Pour l'époque gallo-romaine, il a été recensé une multitude d'objets d'argile cuite qui vont des éléments de couverture aux éléments d'installations de chauffage en passant par les éléments de colonnes, de voûtes et de canalisations. La liste peut s'étendre encore aux éléments de corniches, balustrades, fausses niches, *etc...* Le domaine d'application de l'archéomagnétisme des matériaux déplacés apparaît donc extrêmement vaste et varié. Dans ce chapitre, on s'interessera à deux types particuliers de matériaux d'argile cuite : les *tubuli* et les *imbrices*.

L'étude archéomagnétique de ces éléments est présentée dans le cadre d'une fouille réalisée par C. Bizien en 1984 au lieu-dit La Touche en Créhen (Côtes-du-Nord). Il s'agit d'un site d'habitat gallo-romain, avec thermes, ayant livré entre autre une grande quantité de *tegulae*, d'*imbrices* et de *tubuli*.

## A - LES TUBULI

Les terres cuites conviennent parfaitement à la réalisation d'installations de chauffage à cause de leurs qualités réfractaires, de leur grande capacité calorifique et de leur inertie thermique. Le chauffage par hypocauste (chauffage inférieur), typique de l'époque gallo-romaine, consiste en une circulation d'air chaud dans de doubles parois et sous des sols suspendus (*suspensura*) par des pilettes (fig. VII-1). La montée de l'air chaud dans les doubles parois se faisait par l'intermédiaire des *tubuli* dont la forme ressemble aux briques creuses des conduits de cheminée actuels. Ces *tubuli* étaient scellés au mur grâce à un mortier. Les stries visibles sur leurs faces étaient destinées à favoriser leur fixation et l'application de mortier et d'enduits peints. La juxtaposition des *tubuli* formait de véritables parois chauffantes, en particulier dans les thermes (fig. VII-2) (Adam, 1984 ; Degbomont, 1984).

### ETUDE ARCHEOMAGNETIQUE DES TUBULI

La fouille effectuée à La Touche en Créhen a fourni une très grande quantité de fragments de *tubuli* dont 145 ont pu être carottés. La forme des *tubuli* retrouvés entiers est pratiquement celle d'un parallélépipède rectangle. On peut facilement imaginer que ces matériaux étaient cuits l'une de leur face plane posée à plat sur le plan horizontal de la sole du four. Plus précisemment, la position de cuisson *a priori* la plus vraisemblable paraît être celle donnée en figure VII-3. Ces remarques nous ont déterminé à prélever les carottes parallèlement à l'axe z, c'est-à-dire parallèlement au plan d'aplatissement des parois des matériaux. La mesure des directions d'aimantation montre que cette position de carottage coïncide effectivement avec la position de cuisson pour 82% des échantillons. L'histogramme des inclinaisons en figure VII-4 est d'allure monomodale avec un maximum vers 62°. La valeur moyenne des aimantations est de 1,2 A/m, ce qui est plutôt faible au regard des fortes valeurs de 5 à 20 A/m généralement observées sur les matériaux gallo-romains.

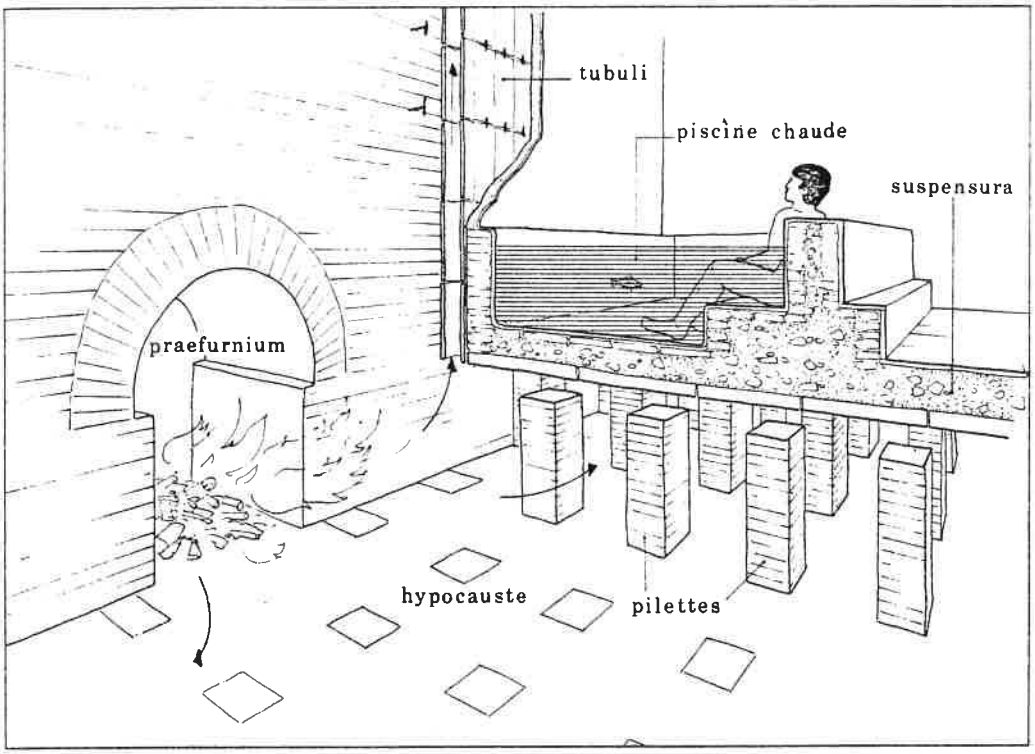



**Fig. VII-1** : Fonctionnement du chauffage au *caldarium* des thermes du Centre à Pompéi. (Adam, 1984).

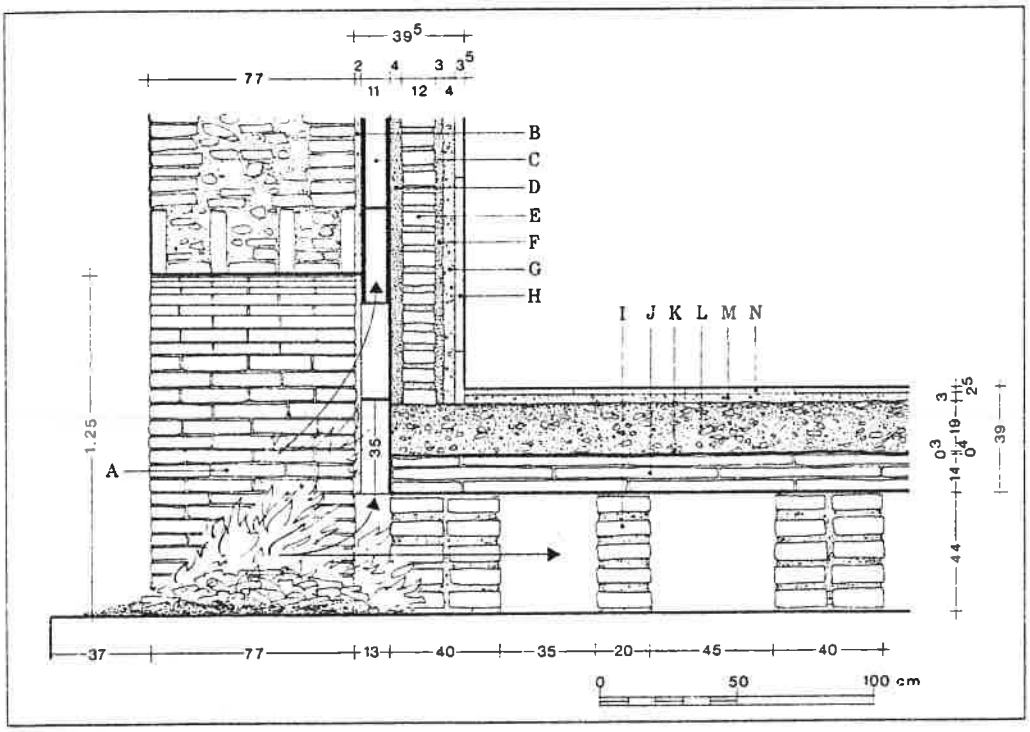



**Fig. VII-2** : Thermes du *Forum* à Ostie, coupe sur l'hypocauste du *caldarium*, sous la piscine. (Adam, 1984).

A : Foyer ou *praefurnium* , B : Mortier gris , C : *Tubuli* , D : Mortier de tuileau , E : Briques , F : Mortier de tuileau , G : Mortier gris , H : Plaques de marbre , I : Pilettes de briques (sous la piscine, alternativement simples et doubles) , J : Briques *bipedales* sur trois assises , K : Feuille de plomb d'étanchéité , L : Béton de tuileau à gros fragments , M : Mortier gris , N : Plaques de marbre

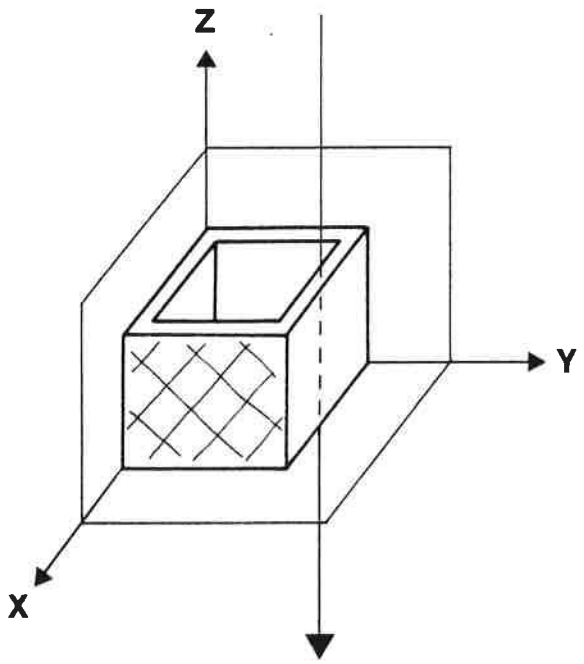



**Fig. VII-3** : Schéma d'un *tubulus* et repère (Oxyz) associé.

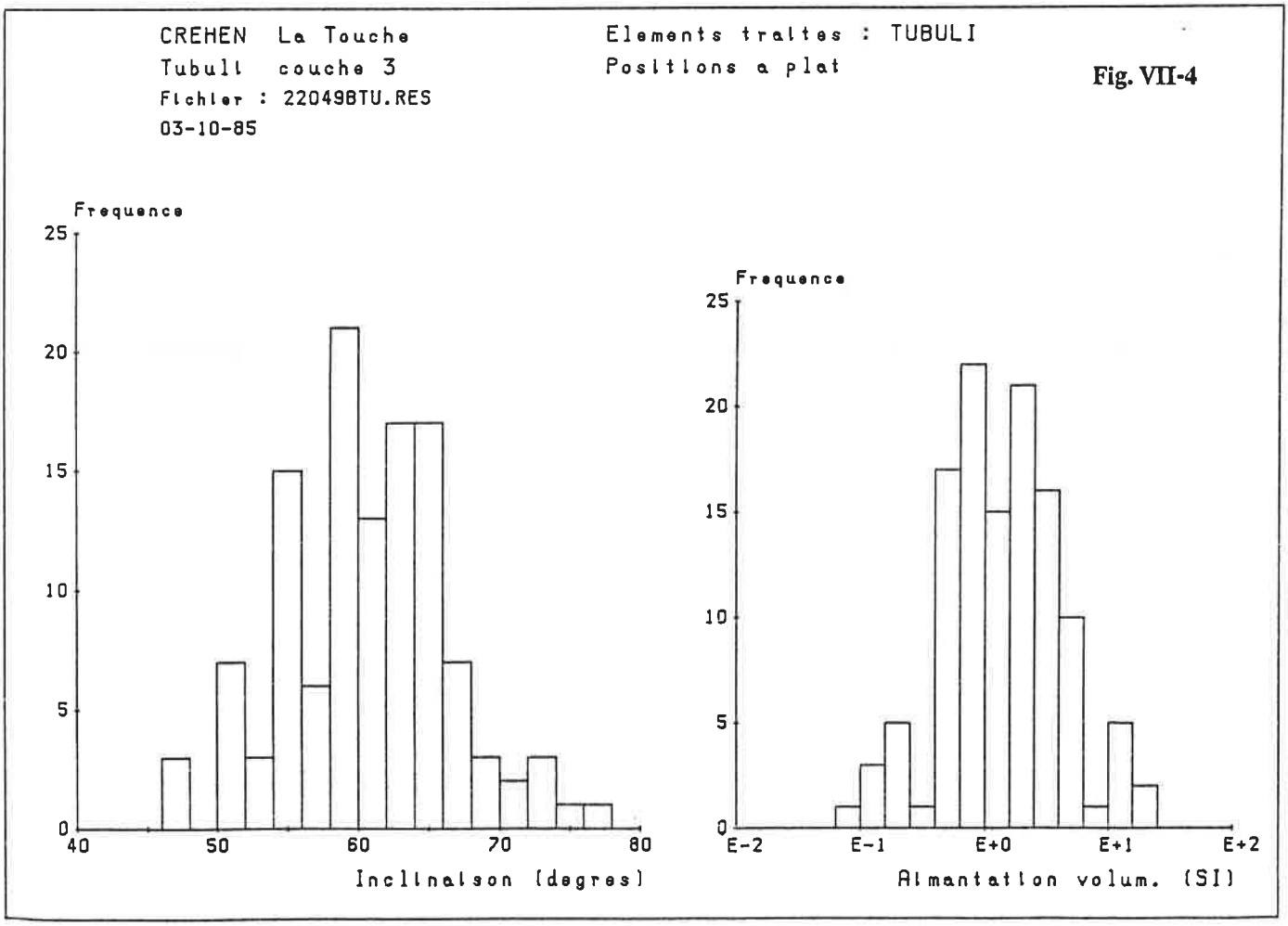



**Fig. VII-4**

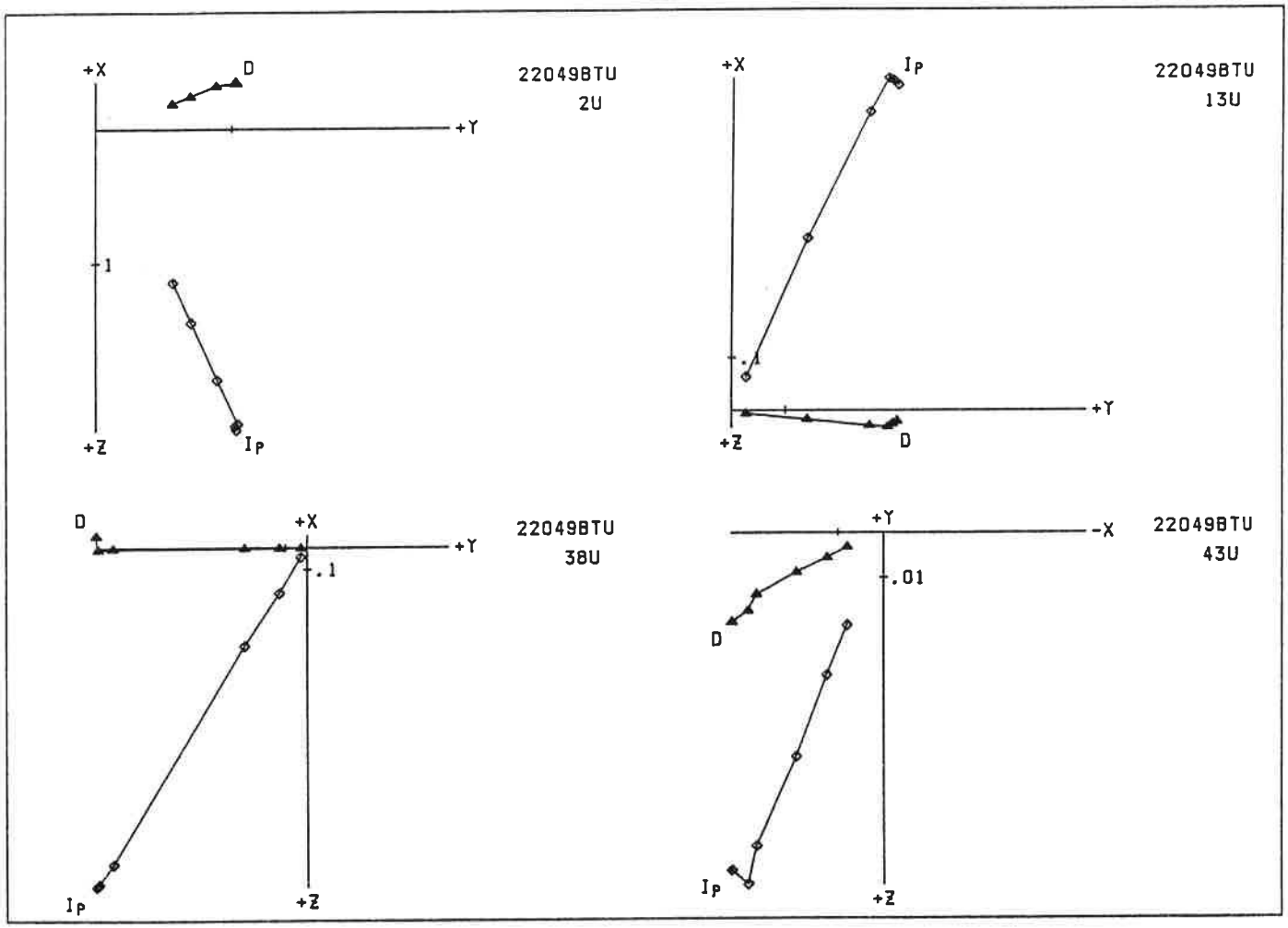
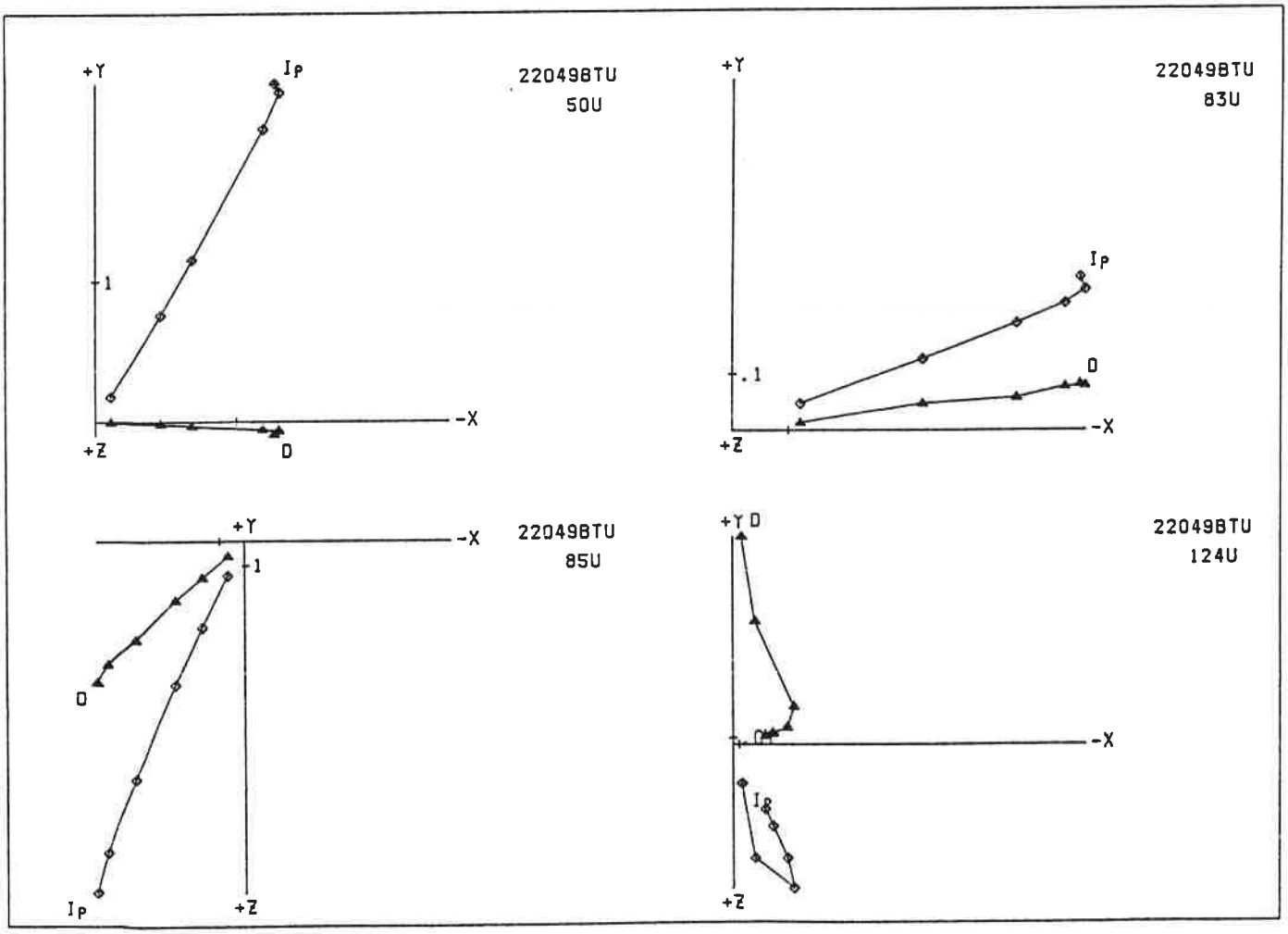

+X
D
+Y
1
+Z
IP
22049BTU
2U
+X
IP
+Y
.1
+Z
D
22049BTU
13U
D
+X
+Y
.1
IP
+Z
22049BTU
38U
+Y
-X
.01
D
IP
+Z
22049BTU
43U

Fig. VII-5


+Y
IP
1
-X
+Z
D
22049BTU
50U
+Y
IP
.1
D
-X
+Z
22049BTU
83U
+Y
-X
1
D
IP
+Z
22049BTU
85U
+Y D
-X
IP
+Z
22049BTU
124U

La chaleur diffusée dans les thermes provoque inévitablement des réchauffements qui peuvent être à l'origine de l'acquisition d'ATR partielles par les différents éléments d'argile cuite constituant les installations de chauffe. L'importance de ces ATR dépend en fait de la température atteinte qui doit varier assez sensiblement en fonction de la distance au foyer (*praefurnium*). Afin de vérifier l'existence éventuelle de ces aimantations secondaires sur les matériaux étudiés, une désaimantation thermique a été effectuée sur 8 échantillons. Les diagrammes de Zijderveld présentés en figure VII-5 montre que 7 échantillons sur 8 ne possèdent pratiquement aucune aimantation secondaire. Ce fait peut paraître étonnant de la part de matériaux forcément exposés à la chaleur. L'explication de ce paradoxe semble donnée par l'allure des courbes de désaimantation J/Jo (fig. VII-6). En effet, sur 7 échantillons non perturbés, 6 n'ont perdu que 10% à peine de leur aimantation initiale après traitement thermique en champ nul à 250°C. Aussi, l'acquisition d'une ATR partielle importante implique que les *tubuli* étudiés aient connus des températures au moins largement supérieures à 250°C., ce qui est par exemple le cas de l'échantillon 124U.

D'après ces constatations, les *tubuli* de Créhen proviennent très probablement de parties des thermes peu exposées à la chaleur. Les directions d'aimantation mesurées correspondent donc en très grande majorité aux directions des aimantations primaires acquises par les matériaux lors de leur cuisson de fabrication.

Le diagramme des densités en figure VII-7b met en évidence l'existence de trois agglomérats bien marqués et caractérisés par les directions moyennes suivantes :

$\overline{I}_1 = 60°$ $\quad \overline{\Delta}_1 = +6°$ $\qquad$ $\overline{I}_2 = 61°$ $\quad \overline{\Delta}_2 = +32°$ $\qquad$ et $\qquad$ $\overline{I'} = 63°$ $\quad \overline{\Delta'} = -86°$

En fait, si l'on se reporte aux données du pointage en figure VII-7a, le dernier agglomérat (I', Δ') semble lui aussi dédoublé .

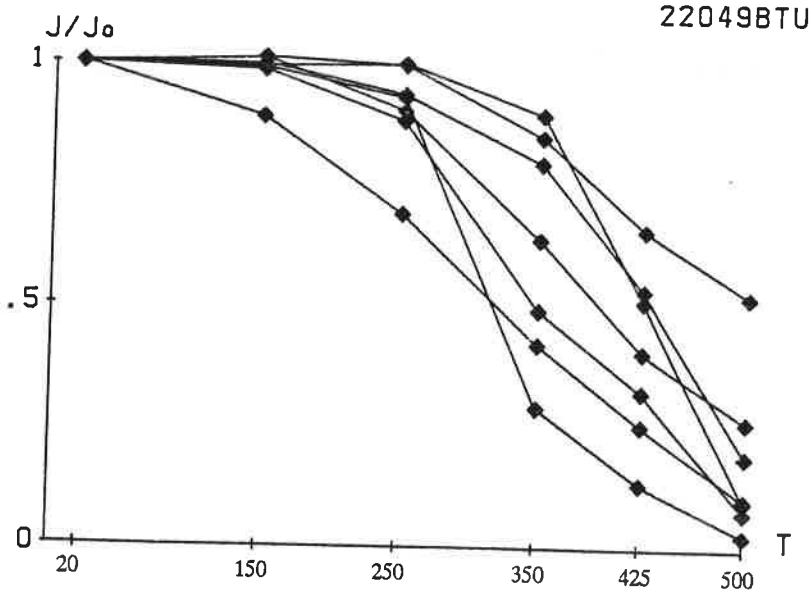
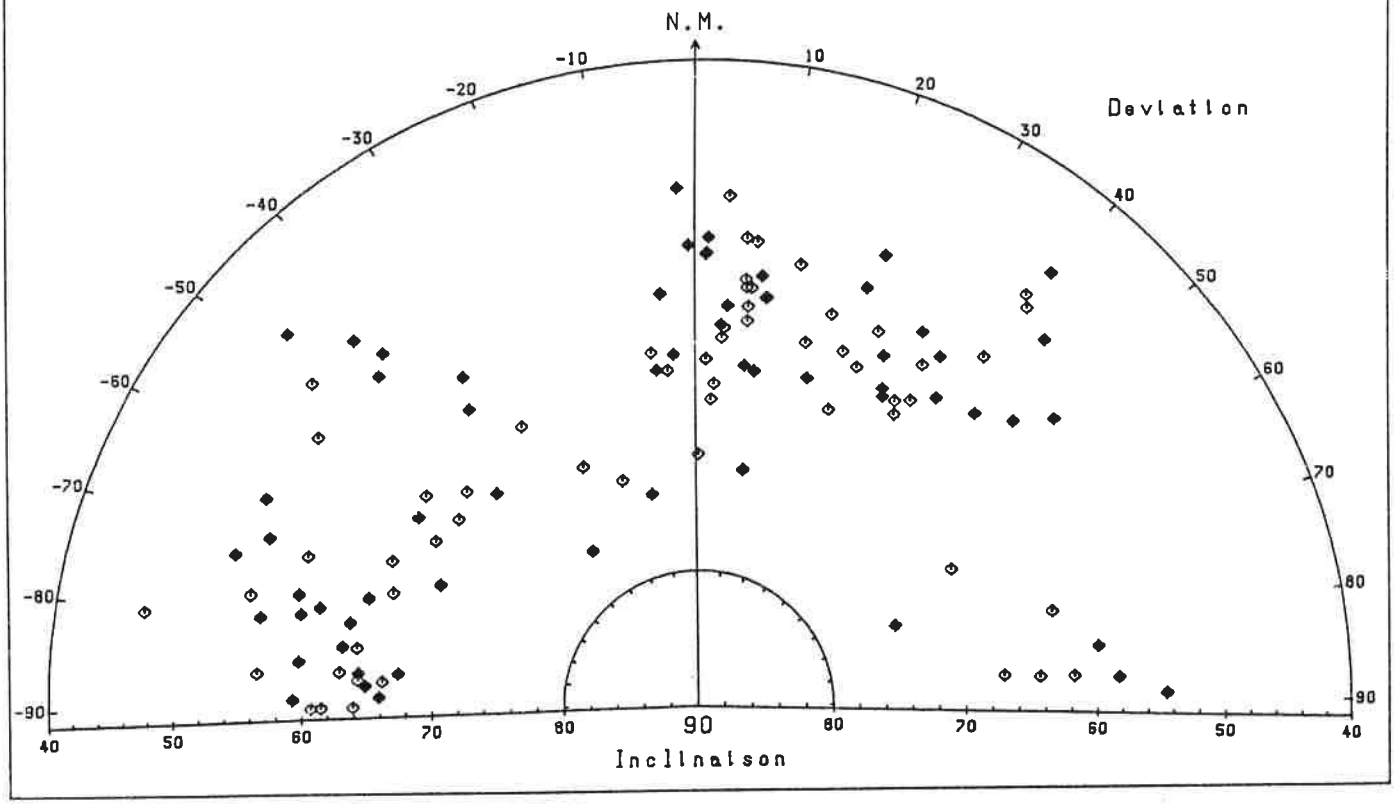



**Fig. VII-6** : Courbes J/Jo (sauf pour 124U).

CREHEN La Touche
Tubull couche 3
Fichier : 22049BTU.RES
03-10-85

Elements traites : TUBULI
Positions a plat

**Fig. VII-7a**

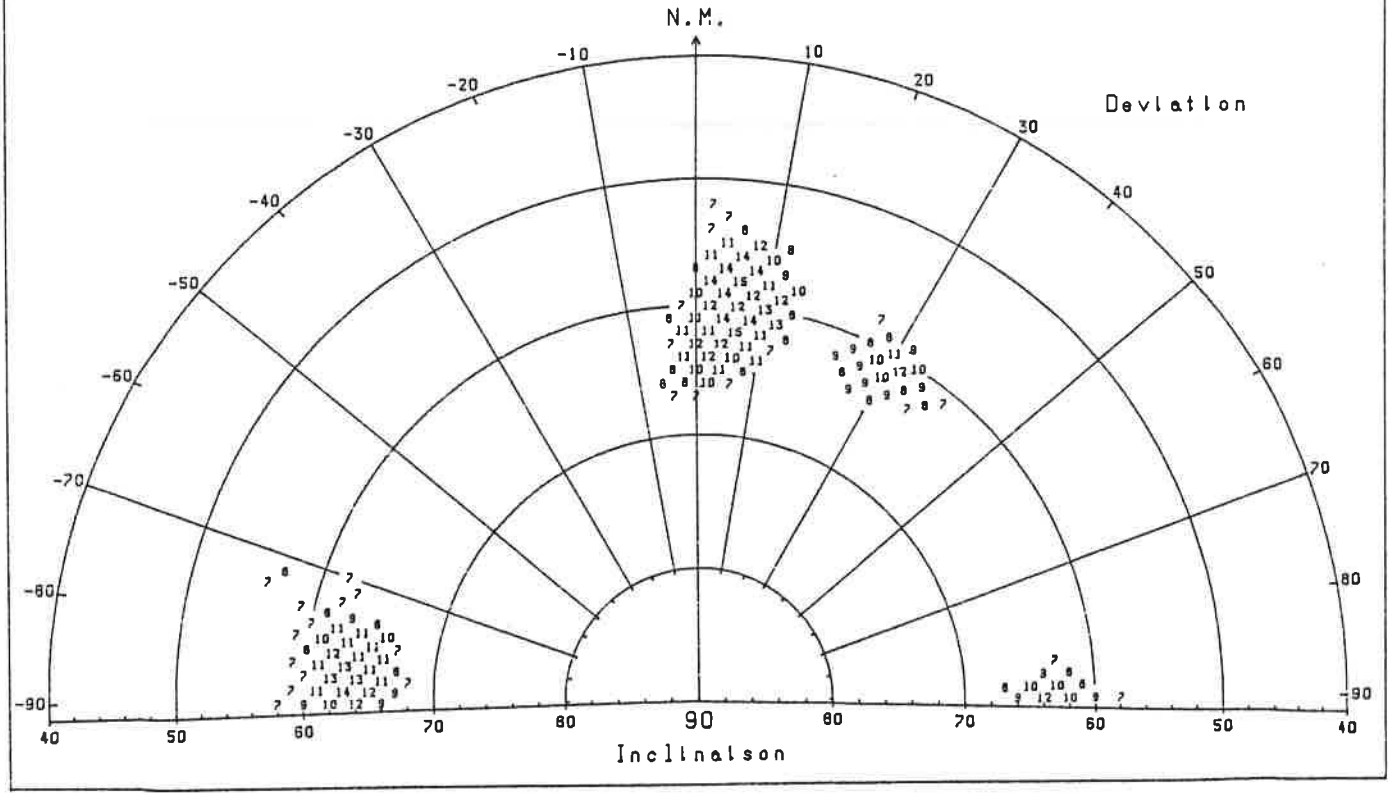



CREHEN La Touche
Tubull couche 3
Fichier : 22049BTU.RES
03-10-85

Elements traites : TUBULI
Positions a plat

Fenetre mobile
selon un cone
de 8 degres
d'ouverture

**Fig. VII-7b**



### INTERPRETATION ARCHEOLOGIQUE

Plus de 82% des *tubuli* étaient placés debout dans le four lors de la cuisson de fabrication. L'existence d'agglomérats dédoublés dans le diagramme (I,Δ) incite à penser que les couches de *tubuli* étaient empilées en épis croisés afin de mieux asseoir le chargement. L'orientation de la paroi du four proche du N.M. serait à chercher entre +6° et +32°. En prenant une valeur médiane de +20° et en tenant compte de la forme rectangulaire des *tubuli* dans le plan (Oxy) (fig. VII-3), l'orientation de la deuxième paroi devrait être de -70° environ. Cette valeur paraît tout à fait plausible si on la reporte dans le diagramme de pointage en figure VII-7a.

D'après les conclusions établies en deuxième partie au sujet des effets perturbateurs des directions d'aimantation, la valeur de l'inclinaison à retenir pour le lot est celle correspondant à l'agglomérat dont la déviation est la plus proche du N.M. On a ainsi $\overline{I} = 61°$ après réduction à Paris. Compte-tenu de la part importante des céramiques sigillées des $I^{er}$ et $II^{e}$ siècles retrouvées sur le site, la date de fabrication des *tubuli* doit se situer soit entre 75 et 125 ap. J.-C., soit entre 160 et 200 ap. J.-C.

### CONCLUSION

L'exploitation archéomagnétique des *tubuli* s'avère tout à fait fructueuse. Notons que la stabilité "naturelle" de ces matériaux rend difficile l'existence de pendages lors de la cuisson. En conséquence, l'empilement systématique des *tubuli* selon des positions debout plutôt proches de la verticale devrait permettre, en principe, l'obtention d'agglomérats (I,Δ) assez concentrés et cohérents.

## B - LES IMBRICES

Les *imbrices* servaient à recouvrir les rebords jointifs des *tegulae*. Leur forme demi-cylindrique était assez irrégulière puisqu'elle était obtenue à partir d'une feuille d'argile légèrement trapézoïdale moulée sur la cuisse (Le Ny, 1986). Des observations faites lors de différentes fouilles archéologiques (Léva, 1966 ; Laubenheimer, 1979 ; Tomasevic, 1982) tendent à montrer que les *imbrices* étaient cuits posés majoritairement debout sur l'une de leurs extrémités (fig. VII-8). Ceci nous a conduit à exploiter l'inclinaison de l'ATR exprimée par rapport à un plan (Oxy) perpendiculaire à l'axe l'allongement de ces matériaux (fig. VII-9). Le repérage de la déviation apparaît le plus souvent sans signification puisque la majorité des fragments retrouvés ne possèdent pas les deux extrémités de l'arc de cercle vu en coupe dans le plan (Oxy). C'est la découverte d'un grand nombre d'*imbrices* lors de la fouille de La Touche en Créhen qui a permis, pour la première fois, de tenter une étude archéomagnétique sur ce type de matériaux.

### ETUDE ARCHEOMAGNETIQUE DES IMBRICES

Cette étude s'est en fait résumée à la mesure de l'inclinaison de l'ATR sur 66 échantillons carottés selon l'axe z défini en figure VII-9. Le résultat des mesures est donné en figure VII-10 sous la forme de deux histogrammes, l'un avec un pas de 1 degré, l'autre avec un pas de 2°. Quatre vingt quatorze pour cents des éléments ont une inclinaison comprise entre 40° et 80°, ce qui confirme l'utilisation largement préférentielle de la position debout comme position de rangement des *imbrices* dans les fours. La valeur moyenne de l'inclinaison est de 60° tandis que le maximum de l'histogramme apparaît pour 63°. Ces valeurs sont tout à fait cohérentes avec celle de 61° obtenue pour les *tubuli*. Ce qui porte à penser que ces deux types de matériaux retrouvés dans une même couche lors de la fouille ont été très probablement fabriqués simultanément.

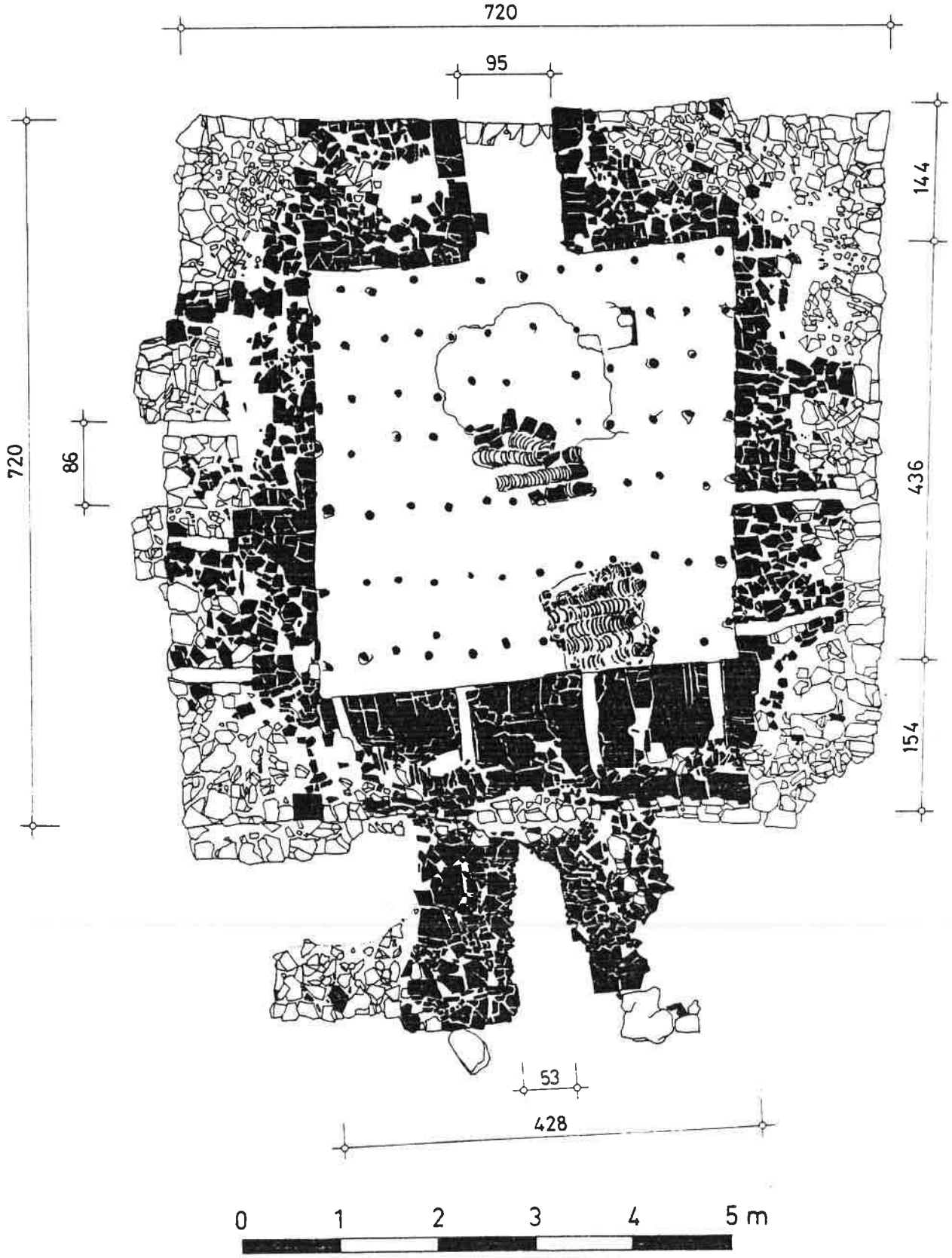



**Fig. VII-8** : Four de tuilier gallo-romain fouillé à Kaiseraugst, Liebrüti (Suisse) (Tomasevic, 1982). Les restes d'un chargement d'*imbrices* en position debout ont été retrouvés sur la sole horizontale.

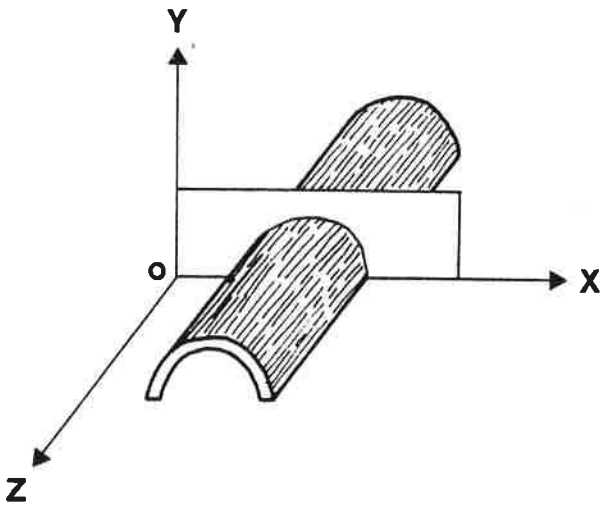



**Fig. VII-9** : Schéma d'*imbrex* et repère (Oxyz) associé.

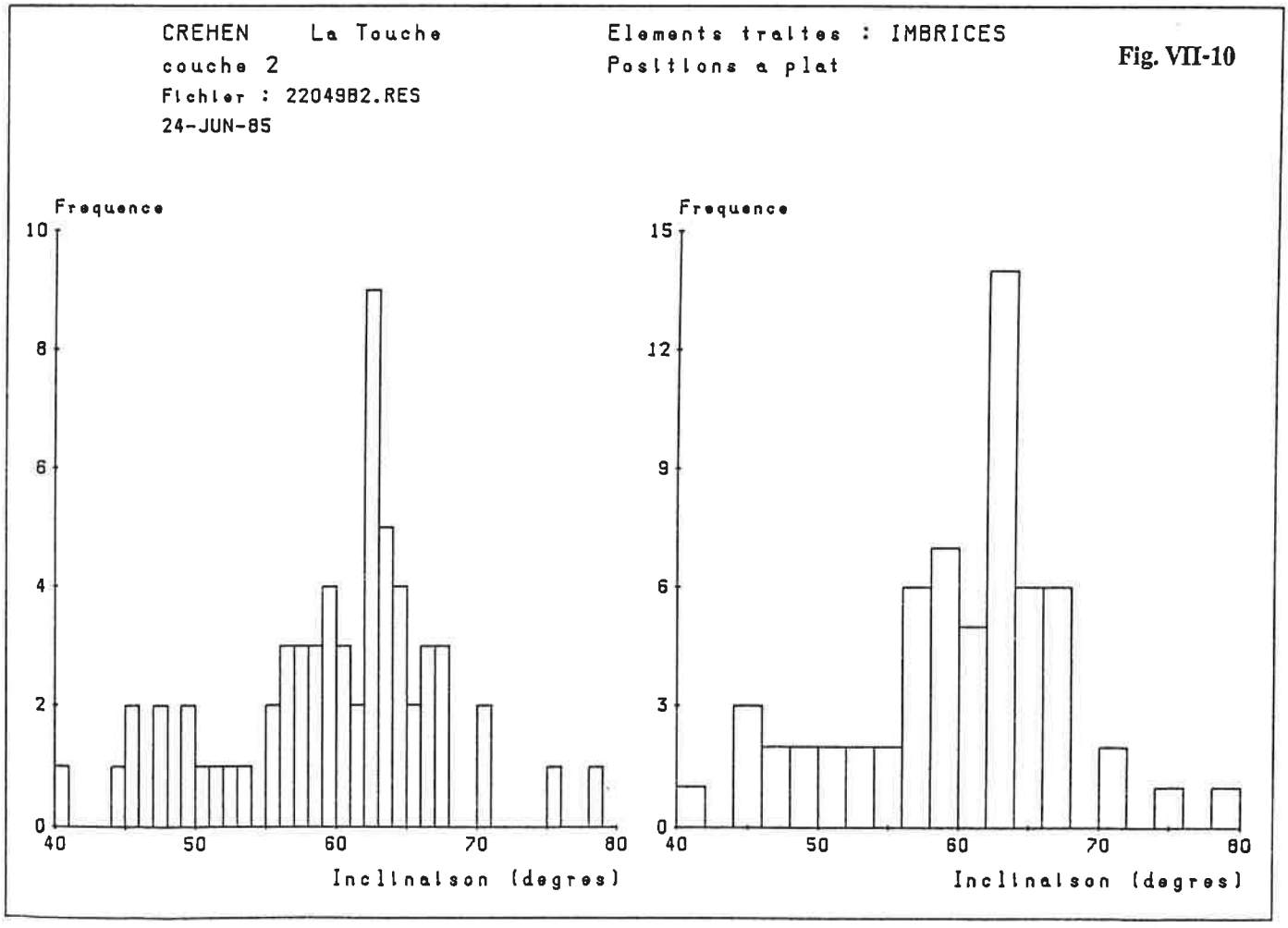



**Fig. VII-10**

## CONCLUSION

L'utilisation des *imbrices* à des fins de datation archéomagnétique est possible à la condition d'opérer sur de très grands échantillonnages. Il faut garder à l'esprit que des effets de pendage peuvent fausser les résultats de façon indécelable. L'absence de signification de la déviation empêche toute possibilité de vérification éventuelle du caractère réellement horizontal du plan (Oxy) tel qu'il est défini en figure VII-9. Moyennant ces remarques de prudence, on peut tout de même noter le caractère tout à fait encourageant de ces premiers résultats obtenus pour les *imbrices*.

# VIII - LES BRIQUETAGES

## INTRODUCTION

Les briquetages sont des installations d'argile cuite destinées à la confection de pains de sel obtenus par évaporation artificielle de saumures. On en retrouve des vestiges le long des côtes de l'Atlantique et de la Manche, tant en France qu'en Angleterre, de même qu'en Lorraine (vallée de la Seille) et en divers autres points du globe : Afrique, Japon (Langouët *et al.* , 1974 et 1976).

La typologie des briquetages permet de diviser la Bretagne en deux régions (Gouletquer, 1970) :

- La côte méridionale avec les fourneaux à augets, sorte de grilles d'argile cuite supportant des moules à sel aux parois très fines.

- La côte nord ainsi que les îles Anglo-Normandes avec des installations comportant toujours des *hand-bricks* et des godets (récipients cylindriques aux parois épaisses). Les *hand-bricks* désignent les nombreuses boulettes d'argile cuite utilisées comme cales sur les piliers et les briques dont elles portent l'empreinte.

## A - APPORT DE L'ARCHEOMAGNETISME A LA TECHNOLOGIE DES BRIQUETAGES

Les premières études archéomagnétiques appliquées aux briquetages ont été entreprises par I. Bucur *et al.* (1975 et 1977) sur des installations retrouvées dans le Marais de Dol-de-Bretagne (Ille-et-Vilaine) par L. Langouët *et al.* (1974 et 1976).

Ces installations ont fourni un mobilier varié constitué de fragments des éléments suivant :

- Les godets, d'une hauteur de l'ordre de 22 cm et d'un diamètre interne moyen de 10 cm. Ils sont toujours retrouvés brisés à cause du démoulage des pains de sel.
- Les piliers, boudins d'argile d'une hauteur pouvant atteindre 35 à 40 cm. Leurs extrémités sont aplaties.
- Les briques, d'une épaisseur de l'ordre de 2 à 3 cm et d'une largeur moyenne d'environ 14 cm.
- Les boulettes, devant servir à caler les différents éléments du briquetage.

L'étude archéomagnétique a permis d'obtenir les renseignements suivants :

- Les piliers ont acquis leur aimantation soit en position verticale, soit dans des positions quelconques.
- Les briques ont acquis leur aimantation dans une position proche de l'horizontale.
- Les directions d'aimantation obtenues sur les boulettes montrent, compte tenu de leur forme, que ces éléments étaient placés au haut ou au bas des piliers.

La synthèse de ces données permet de reconstituer le montage de ce type de briquetages (fig. VIII-1). Les positions quelconques observées sur une partie des piliers sont la conséquence de l'effondrement, lors de l'abandon, d'une partie des structures dans un foyer toujours actif. La date archéomagnétique 40 $\pm$ 15 ap. J.-C.

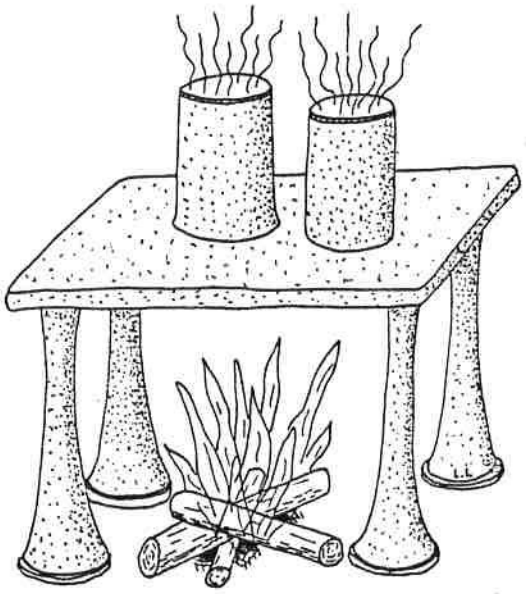


**Fig. VIII-1** : Schéma d'une installation de briquetage dans le Marais de Dol (Langouët, 1974).

(Bucur *et al.*, 1975 et 1977) obtenue pour ces briquetages du Marais de Dol est en parfaite concordance avec celle fournie par le matériel archéologique, soit 25 - 30 ap. J.-C. (Langouët *et al.*, 1974 et 1976).

Une étude archéomagnétique similaire a été menée sur des briquetages provenant de Werl en R.F.A. Le détail des résultats en est présenté dans l'article intitulé "Les apports de la désaimantation thermique dans des études archéomagnétiques de matériaux déplacés" donné en annexe du chapitre III.

Dans ces exemples, l'archéomagnétisme a permis de replacer dans l'espace certaines parties des briquetages. La méthode apporte ainsi des éléments complémentaires des observations archéologiques permettant de mieux comprendre la structure et l'utilisation de ces installations.

## B - ETUDE ARCHEOMAGNETIQUE DES BRIQUETAGES DE KARREG-AR-YELLAN EN PLOUBAZLANEC (COTES-DU-NORD)

Le gisement de Karreg-ar-Yellan est situé au nord-ouest de l'Arcouest (commune de Ploubazlanec, Côtes-du-Nord). Il se trouve au pied d'un grand rocher granitique relié à la terre par deux cordons de galets enfermant un étang. L'érosion marine de dépots meubles au sud-est de ce rocher a révélé la présence d'une industrie paléolithique au cours de l'automne 1980. Depuis cette date, plusieurs campagnes de fouilles ont été menées par J.-L. Monnier (Laboratoire d'Anthropologie, Préhistoire, Protohistoire et Quaternaire Armoricains, Université de Rennes I) (fig. VIII-2a). Les premières couches ont révélé la présence d'une occupation protohistorique (Monnier, 1985 et 1986). Lors de la fouille de septembre 1985, des fosses ont été mises au jour (fig. VIII-2b). Leur remplissage était constitué entre autre par de nombreux fragments de briques, de boulettes d'argile rubéfiée et de tessons de céramique, le tout pêle-mêle. Il y avait aussi de nombreux charbons de bois. Ces éléments correspondaient de toute évidence à des fours à sel datant de la Tène finale, d'un type caractéristique du Trégor défini par P.-L. Gouletquer en 1970. Ces briquetages sont composés de godets, de briques allongées de section rectangulaire ou trapézoïdale (fig. VIII-3) et de *hand-bricks*, paquets d'argile façonnés à la main et servant à soutenir ou caler les briques.

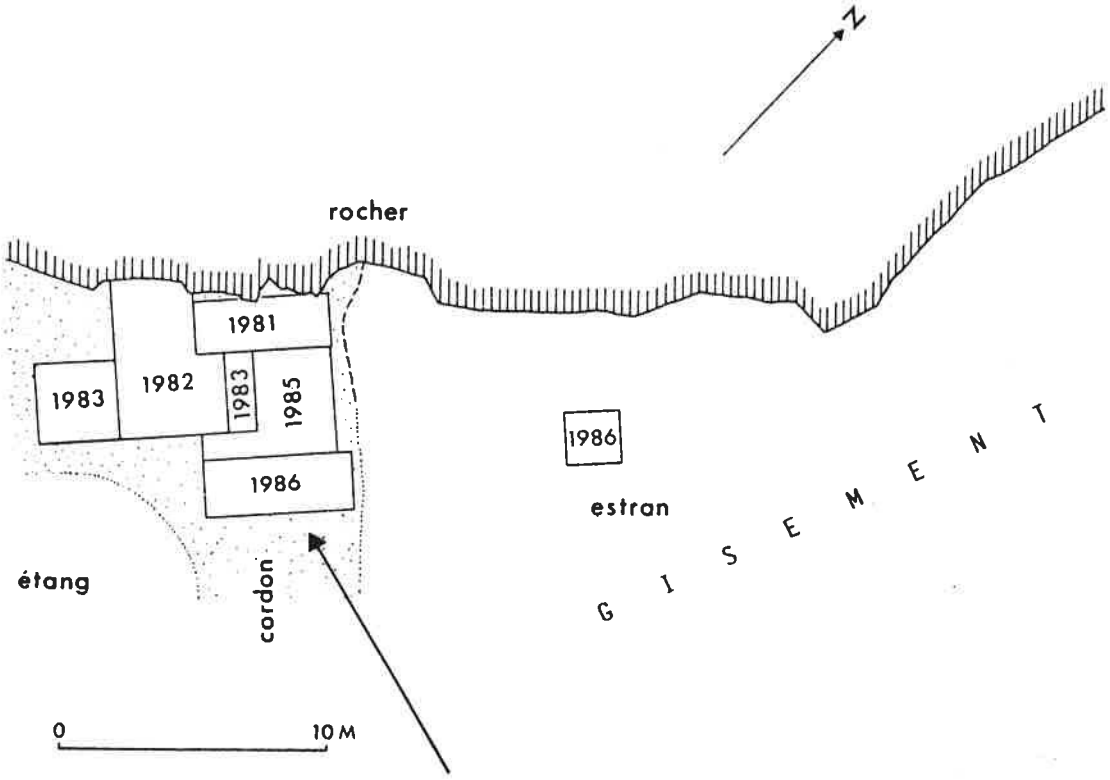



**Fig. VIII-2a** : Localisation des fouilles de Karreg-ar-Yellan en Ploubazlanec (Côtes-du-Nord).

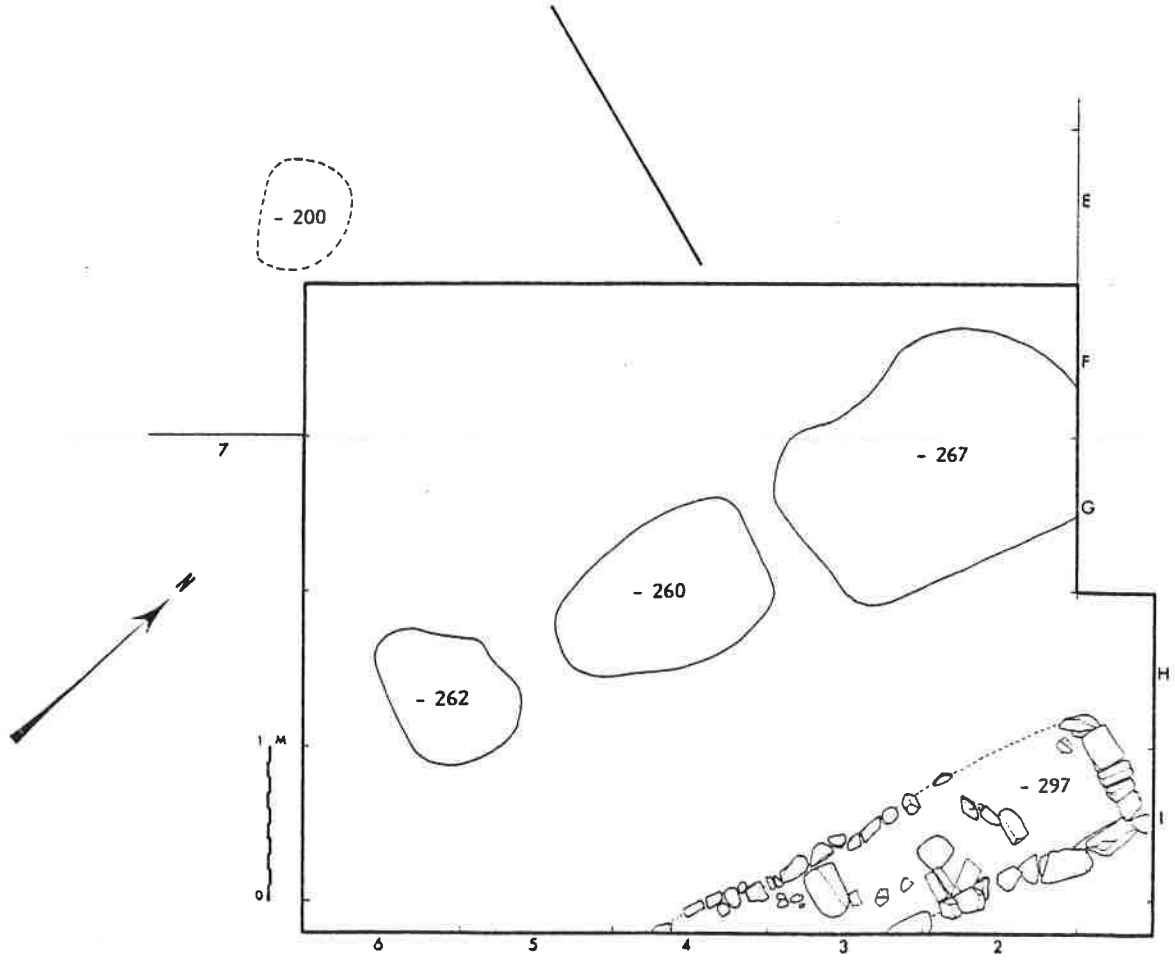



**Fig. VIII-2b** : Karreg-ar-Yellan. Plan général des structures de l'Age du Fer : four appareillé et fosses (Monnier, 1986).

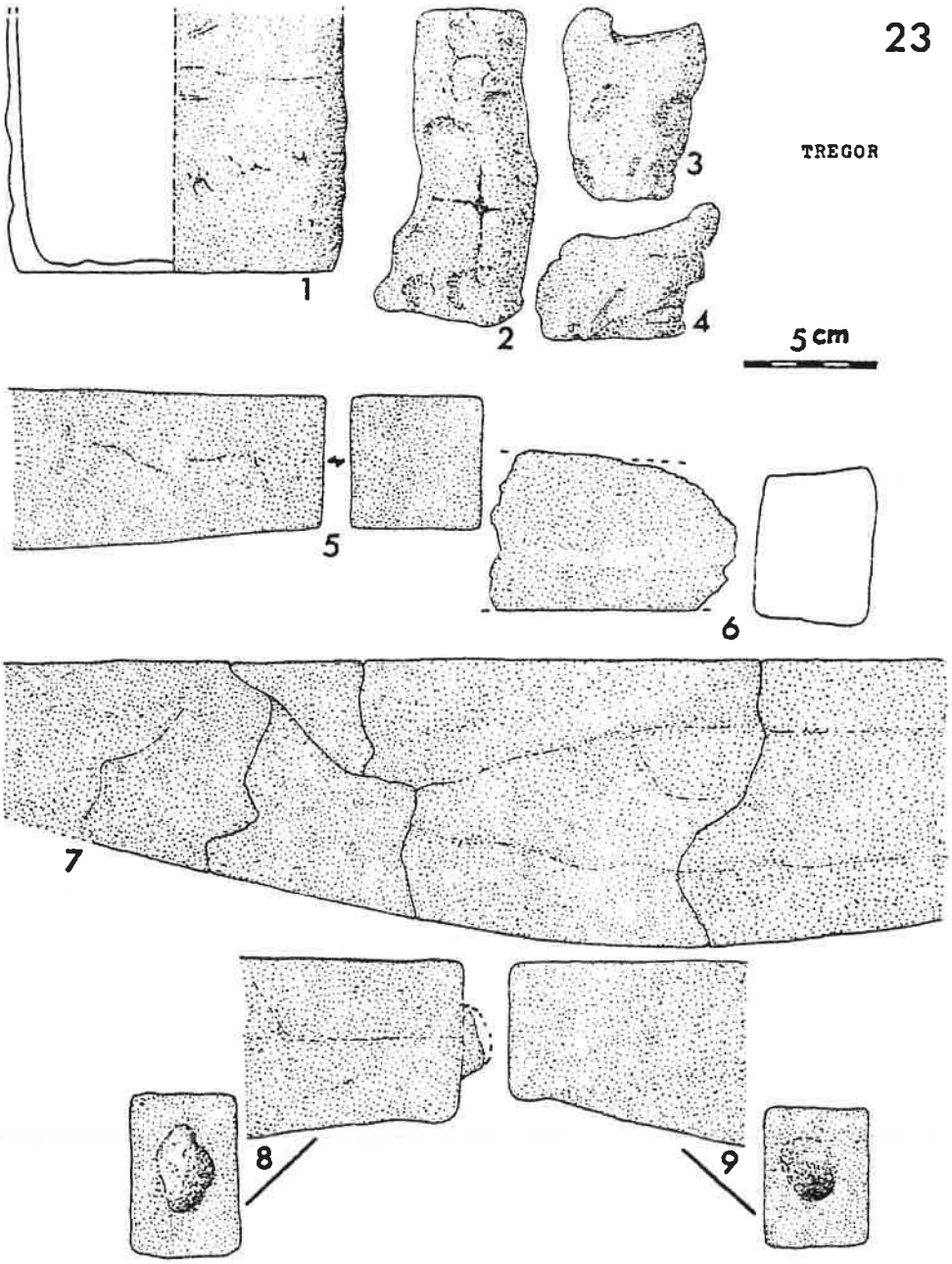



**Fig. VIII-3** : Eléments de briquetages du Trégor (Gouletquer, 1970).

1 : gobelet cylindrique (Landrellec).
2 à 4 : *hand-bricks* (Trozoul).
5 et 6 : briques (Trozoul).
7 à 9 : fragments provenant de l'Ile à Poule.

Selon P.-L. Gouletquer, "Les *hand-bricks* étaient alignés sur les bords des fosses et servaient de supports aux barres ou briques trapézoïdales qui constituaient ainsi des traverses légèrement surélevées par rapport au niveau du sol. . . Les moules n'étaient pas soumis à l'action d'un feu violent, mais à la chaleur régulière dégagée par les braises."

La fouille d'un foyer de briquetages à l'Ile à Poule en Kerbors (Côtes-du-Nord) par L. Langouët et L. Goulpeau (1980) avait fourni un matériel identique à celui de Karreg-ar-Yellan, particulièrement en ce qui concerne les briques. Mais l'étude archéomagnétique en était restée infructueuse. C'est l'abondance des fragments retrouvés à Karreg-ar-Yellan qui offrit une nouvelle occasion d'étude archéomagnétique de ce type de briques.

## L'ECHANTILLONNAGE

L'échantillonnage consiste en une soixantaine de fragments de briques allongées en forme de barres de section transversale rectangulaire ou légèrement trapézoïdale. La fosse dans laquelle ces éléments ont été retrouvés était large d'environ 1,50 m et profonde de 0,60 m (carrés F2-F3 et G2-G3, fig. VIII-2b). Une évaluation de la longueur originale des briques a été tirée de la longueur totale des fragments mis bout à bout, soit 890 cm, et du nombre d'extrémités recensées, soit 34. Ainsi, la longueur moyenne d'une brique aurait été d'au moins une cinquantaine de centimètres (Breton, 1986). Douze extrémités portaient une cupule qui devait permettre d'aligner les briques bout à bout par l'intermédiaire d'une boulette d'argile. De telles travées, si elles ont existé, devaient constituer des grilles assez importantes.

La figure VIII-4 montre que les briques ont des bords différentiables. L'un est convexe tandis que l'autre est droit. Le côté le plus large d'une section de brique trapézoïdale correspond presque toujours au bord convexe. La forme de ces matériaux incite à penser qu'ils étaient cuits de chant, la face plane correspondant au bord droit placée vraisemblablement selon un plan proche de l'horizontale dans la structure. Ces observations nous ont conduit à choisir le plan (Oxy) de la figure VIII-4 comme plan horizontal de référence et à prélever les carottes perpendiculairement à ce dernier suivant l'axe z. L'orientation vers le haut ou vers le bas des bords convexes des briques sera déterminée par la mesure de la direction de l'aimantation dans ce repère.

## LES RESULTATS DES MESURES

Les mesures brutes des directions d'aimantation montrent que 89% des 63 fragments carottés ont été cuits effectivement en position de chant. L'inclinaison moyenne obtenue est de 63°4 et l'aimantation moyenne de 1 A/m (fig. VIII-5a). Cette faible aimantation peut provenir de ce que les briquetages subissaient des feux peu violents destinés à favoriser l'évaporation lente et continue des saumures. Elle peut aussi provenir de la faible teneur en oxydes de fer du loess à 24% d'argile retrouvé sur place et ayant probablement servi à la fabrication des briques (Monnier, 1986).

La représentation dans le diagramme (I, Δ) des directions d'aimantation montre une grande dispersion (fig. VIII-5b). C'est pourquoi une désaimantation thermique en champ nul a été effectuée, jusqu'à stabilisation des directions d'aimantation sur 7 échantillons selon les étapes 150, 250, 350, 425, 500 et 550°C. Les diagrammes de Zijderveld (fig. VIII-6) montrent l'existence d'une aimantation secondaire acquise selon des positions quelconques pour des températures variant entre 20° et 350 - 450°C. Ces aimantations parasites proviennent très probablement d'un effondrement ou d'une destruction alors que l'installation n'était pas encore refroidie.

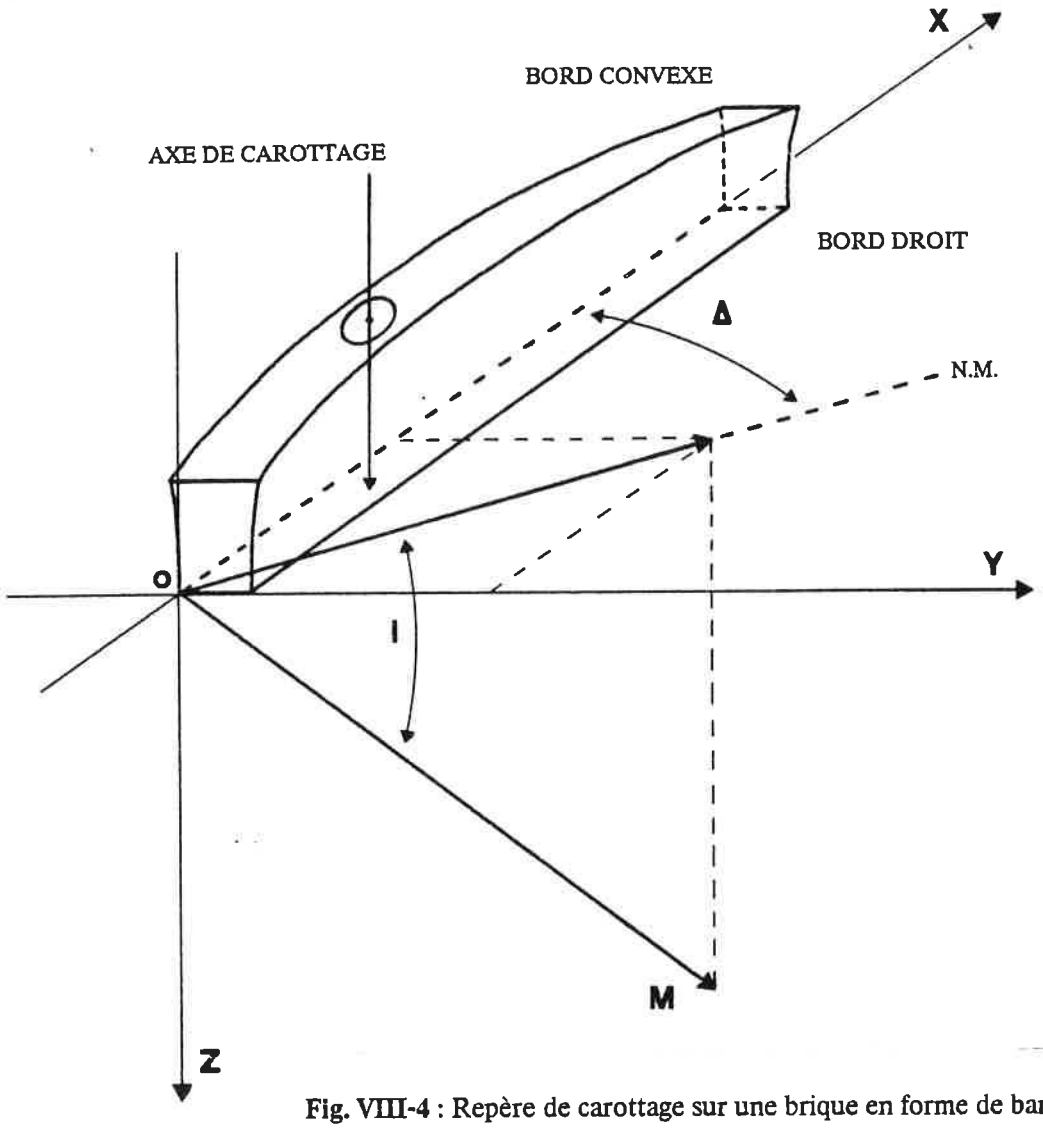



**Fig. VIII-4** : Repère de carottage sur une brique en forme de barre.

Selon les courbes J/Jo en figure VIII-6, quatre échantillons sur sept conservent de 30 à 60% de leur aimantation initiale après désaimantation en champ nul à 550°C. Les briquetages de Karreg-ar-Yellan ont donc connus des températures assez fortes, certainement de l'ordre de 600°C ou plus. Afin d'accélérer l'élimination des aimantations parasites sur l'ensemble des 63 échantillons du lot, la désaimantation thermique a été effectuée directement à 425°, 500° et 570°C de sorte que la stabilité de la direction de l'aimantation primaire soit contrôlée. L'amélioration des statistiques s'avère tout à fait probante puisque 98% des briques apparaissent alors avoir été cuites en position de chant.

Les matériaux d'argile cuite présentent presque toujours une anisotropie d'aimantation thermorémanente qui provoque la non-colinéarité entre la direction de l'aimantation acquise et celle du CMT ambiant. La correction de cet effet revient à déterminer les facteurs d'anisotropie $F_{xz}$ et $F_{xy}$. Selon les conditions standart définies au chapitre V, le chauffage des échantillons se fait en champ nul à 700°C pendant 1 h 30. Il est suivi d'un refroidissement rapide (par ventilation) en 1/2 h sous un champ contrôlé de 47000 $\gamma$ . Le résultat des mesures est présenté dans le tableau suivant ainsi qu'en figure VIII-7.

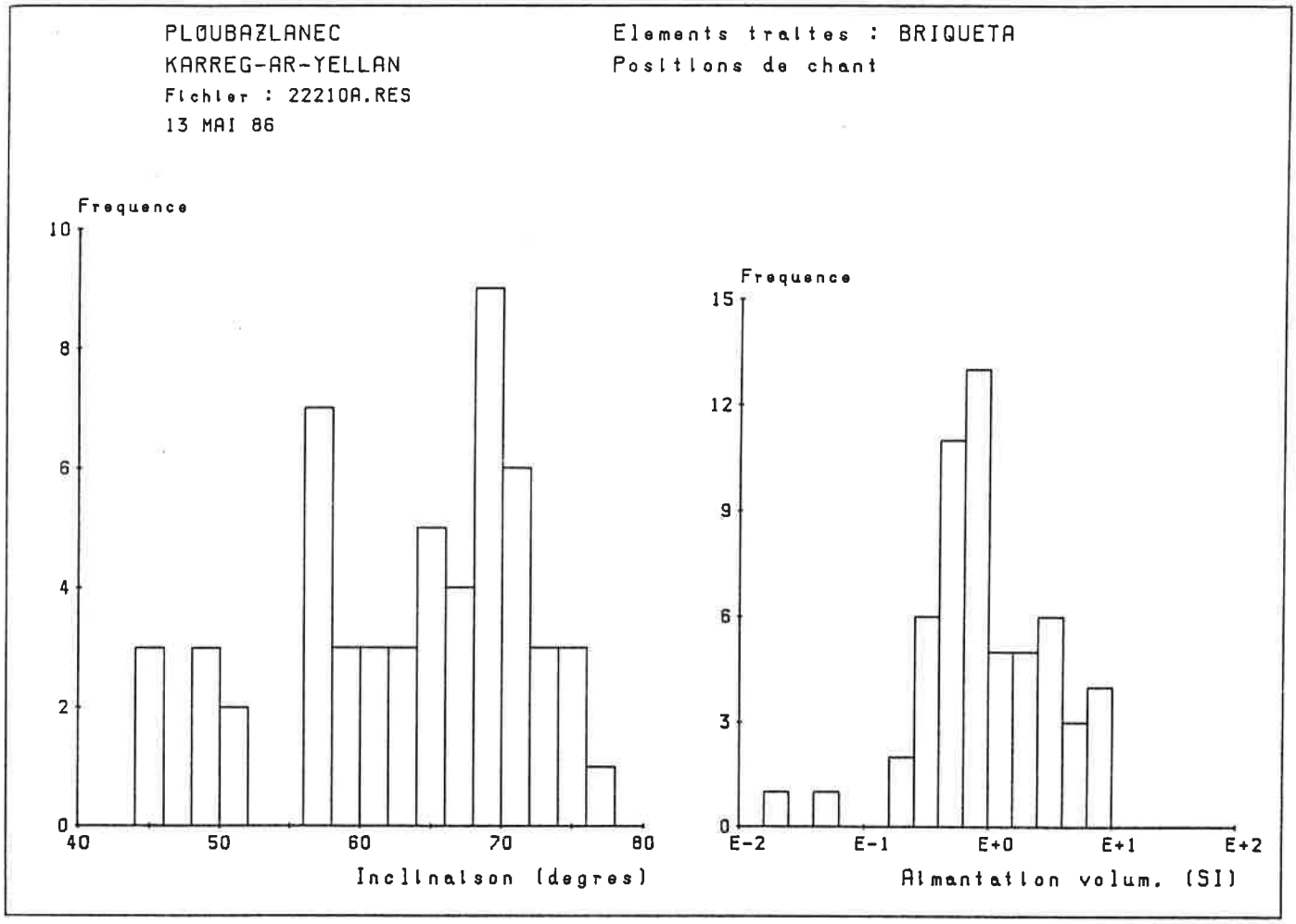
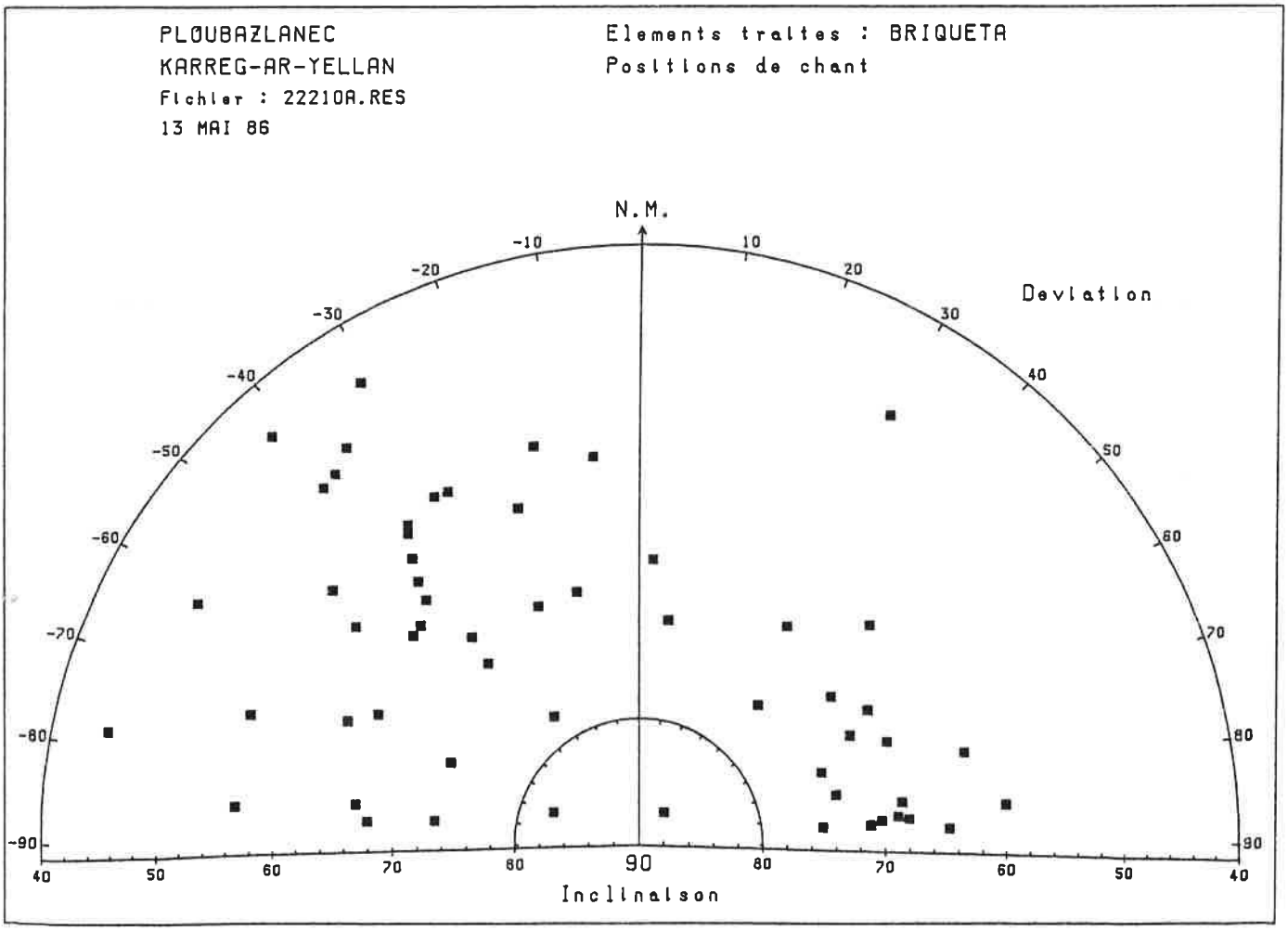

PLOUBAZLANEC
KARREG-AR-YELLAN
Fichier : 22210A.RES
13 MAI 86
Elements traites : BRIQUETA
Positions de chant
Frequence
Inclinaison (degres)
Frequence
Aimantation volum. (SI)
E-2
E-1
E+0
E+1
E+2

Fig. VIII-5


PLOUBAZLANEC
KARREG-AR-YELLAN
Fichier : 22210A.RES
13 MAI 86
Elements traites : BRIQUETA
Positions de chant
N.M.
Deviation
Inclinaison

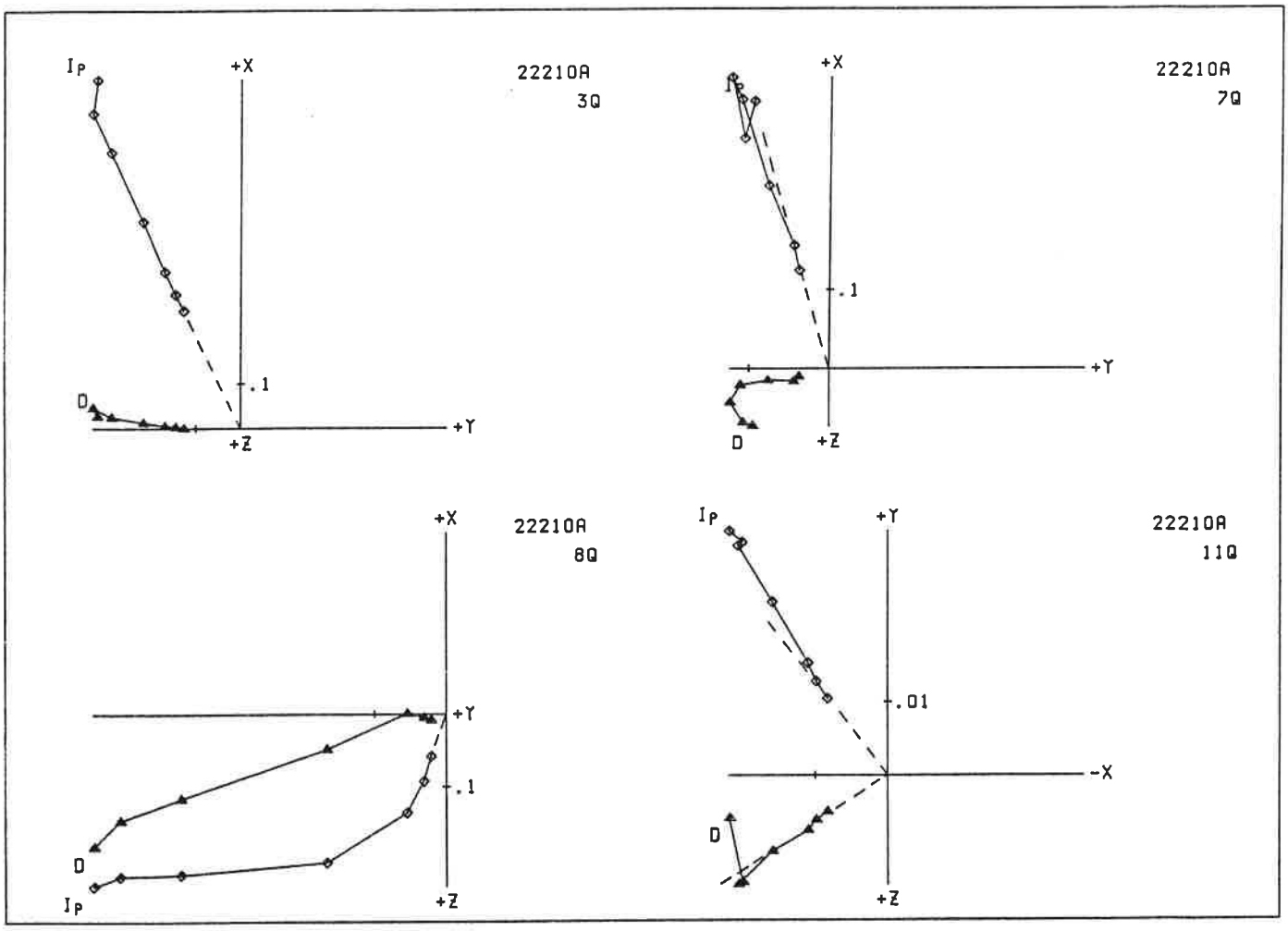
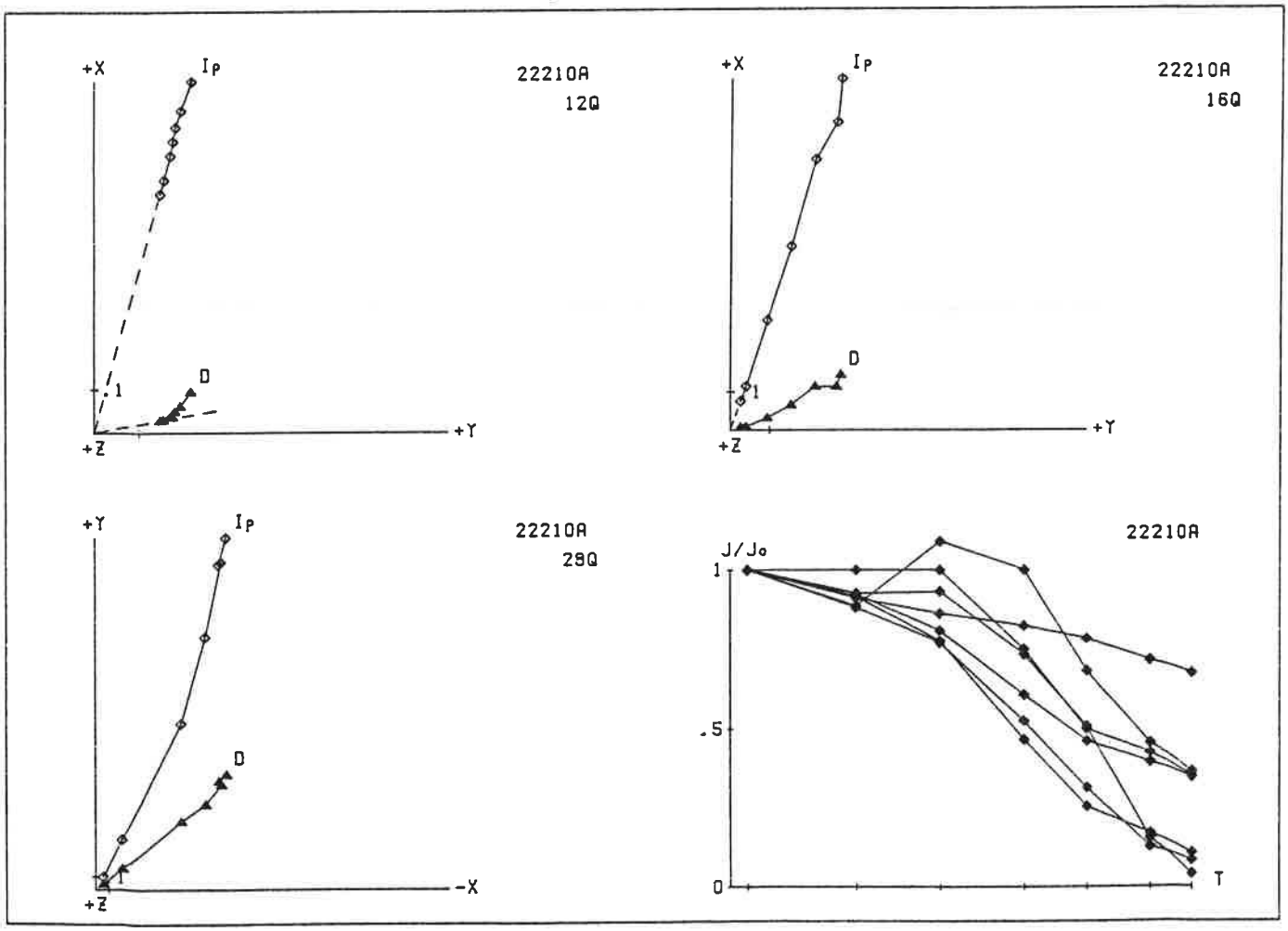
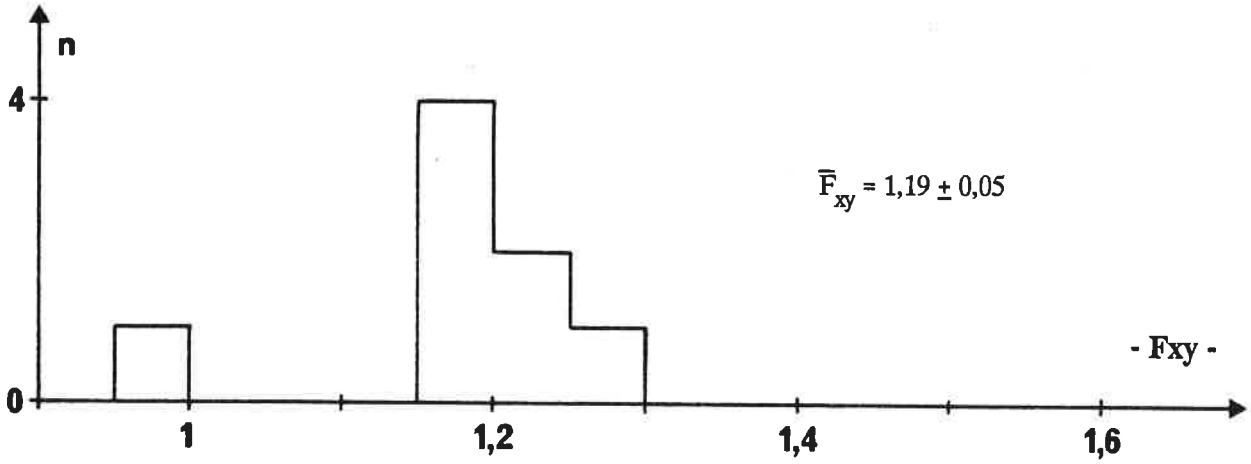

22210A
3Q
+X
Ip
.1
D
+Y
+Z
22210A
7Q
+X
Ip
.1
+Y
D
+Z
22210A
8Q
+X
+Y
.1
D
Ip
+Z
22210A
11Q
Ip
+Y
.01
-X
D
+Z

**Fig. VIII-6**


22210A
12Q
+X
Ip
.1
D
+Y
+Z
22210A
16Q
+X
Ip
.1
D
+Y
+Z
22210A
28Q
+Y
Ip
D
-X
+Z
22210A
J/Jo
1
.5
0
T

| N° | $M_x$ $10^{-5}$ Am$^2$ | $M_y$ $10^{-5}$ Am$^2$ | $M_z$ $10^{-5}$ Am$^2$ | $F_{xz}$ | $F_{xy}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 7Q | 0,9214 | 0,7599 | 0,8644 | 1,066 | 1,213 |
| 8Q | 0,8754 | 0,7512 | 0,8574 | 1,021 | 1,165 |
| 16Q | 0,9645 | 0,7906 | 0,9104 | 1,059 | 1,220 |
| 19Q | 2,0750 | 1,8990 | 1,9650 | 1,056 | 1,093 |
| 20Q | 1,8940 | 1,5890 | 1,7240 | 1,099 | 1,192 |
| 36Q | 0,7574 | 0,5976 | 0,7189 | 1,054 | 1,267 |
| 41Q | 0,2811 | 0,2398 | 0,2623 | 1,072 | 1,172 |
| 45Q | 1,2960 | 1,0980 | 1,2720 | 1,019 | 1,180 |



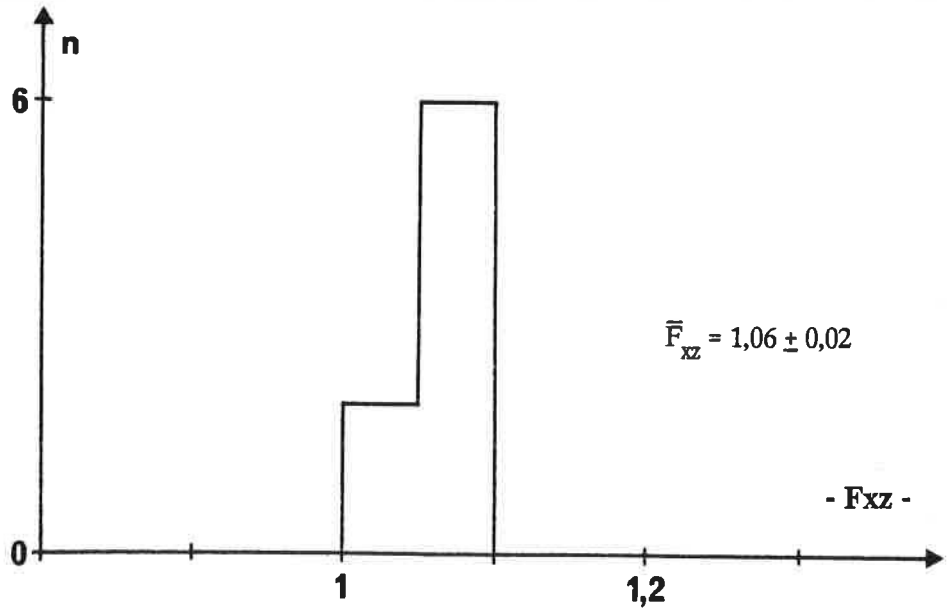




Fig. VIII-7

Le tenseur d'anisotropie décrit un ellipsoïde dont le grand axe est parallèle à l'axe x, le petit à l'axe y et l'intermédiaire à l'axe z. L'anisotropie est ainsi directement corrélée à la forme géométrique des matériaux.

La correction d'effet de forme, quant à elle, n'apporte aucune modification des résultats en raison de la faible aimantation des matériaux (1 A/m).

La figure VIII-8 fournit le résultat de la désaimantation thermique et de la correction d'anisotropie d'ATR. Les points noirs en figure VIII-8a indiquent que le bord convexe des briques était dirigé vers le haut. Seulement 19% d'entre elles avaient leur bord convexe dirigé vers le bas. Cette donnée vient contredire l'idée selon laquelle le bord droit formait le plan horizontal recevant les godets.

Le diagramme des densités (fig. VIII-8b) montre l'existence de deux agglomérats distincts. Pour l'agglomérat B proche du N.M. , la statistique de Fisher appliquée aux 28 points compris dans un cône de 30° d'ouverture centré sur le maximum de densité, donne :

$$\overline{I} = 56°5 \pm 2°5 \qquad \overline{\Delta} = -45°5 \pm 5° \qquad k = 102$$

Pour l'agglomérat A, la statistique porte de même sur 28 points compris dans un cône de 30°. On obtient :

$$\overline{I'} = 66° \pm 2° \qquad \overline{\Delta'} = 81° \pm 5°5 \qquad k' = 139$$

## INTERPRETATION ARCHEOLOGIQUE DES RESULTATS

La continuation des fouilles par J.-L. Monnier en 1986 a permis la découverte de nouvelles structures de briquetages (fig. VIII-2b). La structure la plus importante et la plus interessante mise au jour est une fosse allongée, de forme rectangulaire, d'une largeur d'une soixantaine de centimètres, d'une longueur devant dépasser les 3,50 m et d'une profondeur d'environ 0,80 m (fig. VIII-2b, carrés H1, I1 à I4). Ses parois étaient soigneusement appareillées avec des galets engagés dans le loess argileux fortement rubéfié. Le fond de ce four était riche en charbons de bois. Son remplissage comprenait des fragments de briques, des piliers ou *hand-bricks*, des galets rubéfiés et quelques débris d'augets ainsi que de nombreux tessons de poteries (Monnier, 1986). L'absence de traces de cuisson et l'imperméabilité du loess argileux encaissant laissent supposer que les trois fosses alignée à l'ouest du four étaient destinées au stockage de la saumure. Les éléments de briquetages retrouvés dans celles-ci correspondent très vraisemblablement à un remblaiement du site après destruction.

On peut dès à présent proposer une interprétation archéologique des résultats archéomagnétiques obtenus à partir des briques provenant des fosses. L'agglomérat A de la figure VIII-8b tend à montrer qu'une partie des briques proviennent des structures du four voisin. La déviation moyenne de 81°, qui représente la direction de l'axe x d'allongement des barres par rapport au N.M., est sensiblement perpendiculaire à l'axe du four. Les briques devaient être placées en travers de la fosse afin de constituer une grille destinée à supporter les godets au-dessus du feu. La largeur de 60 cm du four correspond assez bien à la longueur minimale de 50 cm évaluée pour les briques. Les nombreux piliers ou *hand-bricks* retrouvés devait servir à soutenir les extrémités des barres de part et d'autre de la tranchée. Une proposition de reconstitution des briquetages de Karreg-ar-Yellan est donnée en figure VIII-9.

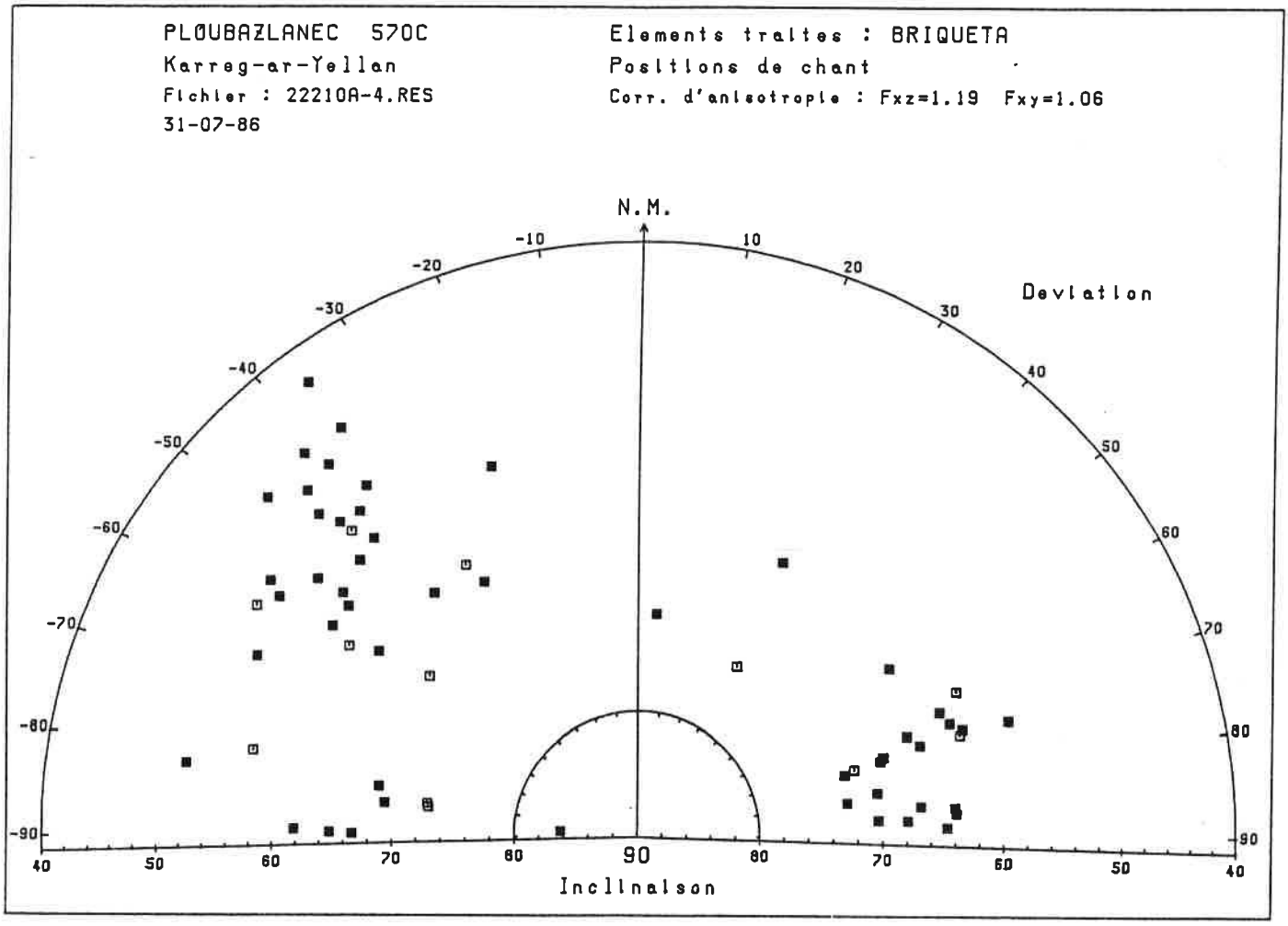
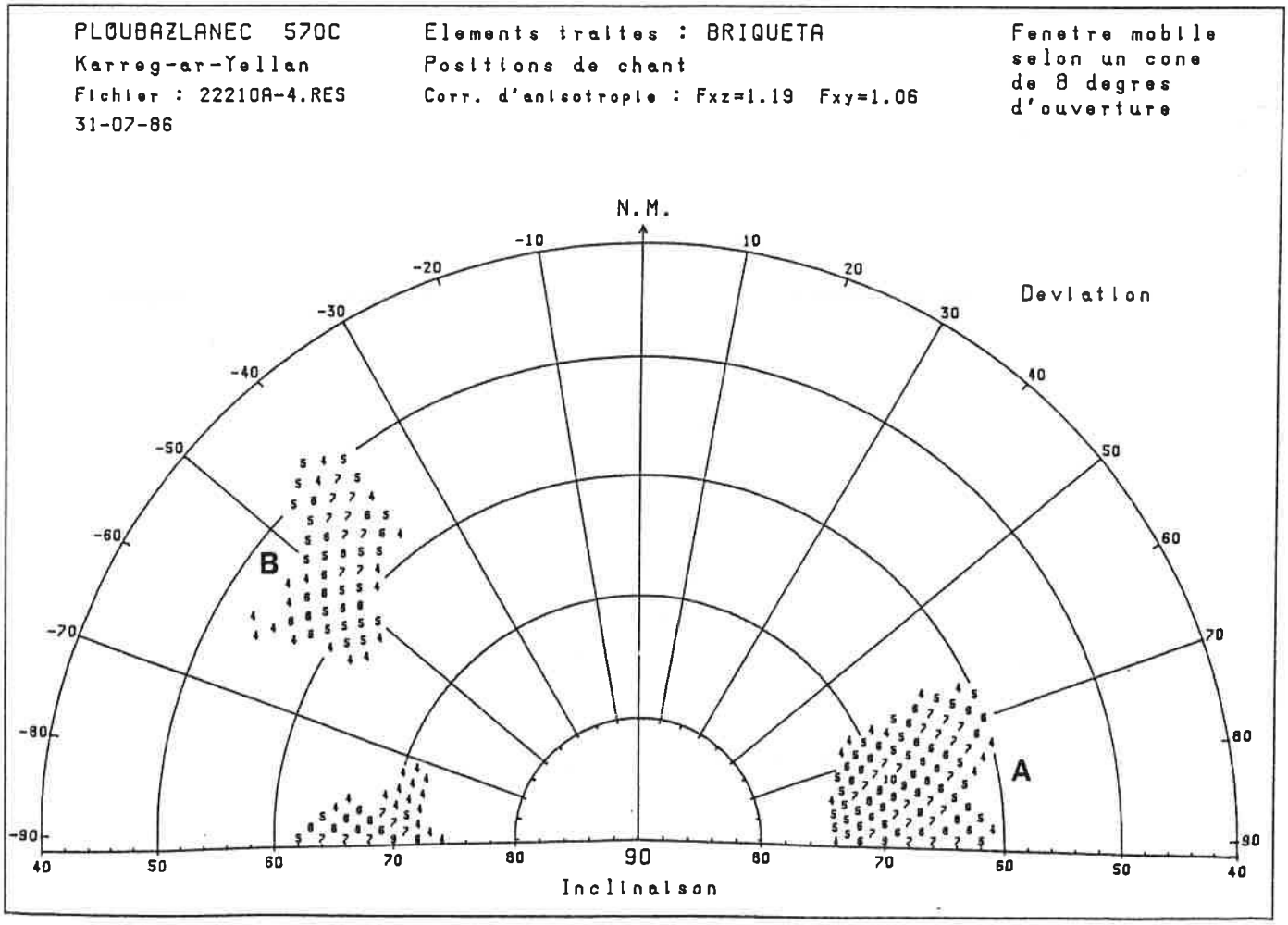

PLOUBAZLANEC 570C
Karreg-ar-Yellan
Fichier : 22210A-4.RES
31-07-86
Elements traites : BRIQUETA
Positions de chant
Corr. d'anisotropie : Fxz=1.19 Fxy=1.06
N.M.
Deviation
Inclinaison

**Fig. VIII-8**


PLOUBAZLANEC 570C
Karreg-ar-Yellan
Fichier : 22210A-4.RES
31-07-86
Elements traites : BRIQUETA
Positions de chant
Corr. d'anisotropie : Fxz=1.19 Fxy=1.06
Fenetre mobile selon un cone de 8 degres d'ouverture
N.M.
Deviation
Inclinaison
A
B

Il subsiste cependant quelques problèmes. En particulier, l'interprétation de l'agglomérat B en figure VIII-8a et b semble assez difficile. Cet agglomérat présente une très faible inclinaison et une déviation tout à fait déconnectée de l'orientation de l'axe du four voisin. L'existence de ces deux groupements A et B peut s'interpréter de deux manières. Une première explication consisterait à supposer l'existence de deux lots de briques distincts provenant de deux fours d'orientations différentes. Cette hypothèse rencontre cependant quelques objections. D'une part aucun four ni aucune fosse ne permet d'attester sur la terrain la présence d'orientations corrélées à la déviation du groupement B. D'autre part, rien dans la pâte ni dans l'anisotropie magnétique des argiles ne permet de distinguer deux lots de briques différents.

Une deuxième explication serait à chercher dans un effet des positions de cuisson. Ainsi on peut envisager soit un déversement latéral des briques dû à l'instabilité de la position de chant, soit une pente due à la différence de hauteur entre les deux bords de la fosse. La première hypothèse du déversement revient à faire un changement de repère par rotation autour de l'axe x (fig. VIII-4). La direction moyenne (I,Δ) de l'agglomérat B peut être représentée par un vecteur unitaire dont les composantes en coordonnées cartésiennes sont :

$$x = \cos I \cdot \cos \Delta$$
$$y = \cos I \cdot \sin \Delta$$
$$z = \sin I$$

La rotation d'angle $\alpha$ autour de l'axe x dans le sens trigonométrique s'exprime par :

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & \sin\alpha \\ 0 & -\sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

Si l'on se fixe la valeur I' de l'inclinaison dans le nouveau repère, alors la nouvelle déviation Δ' se déduit de la formule :

$$\tan \Delta' = \sqrt{y^2 + z^2 - \sin^2 I'} \; / \, x$$

pour une rotation $\alpha$ de :

$$\sin \alpha = (-y \sin I' + x z \tan \Delta') / (y^2 + z^2)$$

La rotation nécessaire pour faire passer l'inclinaison I = 56°5 de l'agglomérat B à l'inclinaison I' = 66°, qui est celle de l'agglomérat A, entraîne Δ' = 18° et $\alpha$ = -17°4. Dans le diagramme (I,Δ), le groupement B se caractériserait alors par la direction moyenne I' = 66° et Δ' = -18°. Le net désaccord entre la déviation calculée et celle de l'agglomérat A fait apparaître l'hypothèse du déversement des briques comme très peu vraisemblable.

L'hypothèse de la pente des barres, quant à elle, revient à faire une rotation autour de l'axe y (fig. VIII-4). On a alors :

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & -\sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

La fixation de la valeur I' dans le nouveau repère entraîne :

$$\tan \Delta' = y / \sqrt{x^2 + z^2 - \sin^2 I'}$$

et

$$\sin \beta = (x \sin I' - y z / \tan \Delta') / (x^2 + z^2)$$

Lorsque I passe de 56°5 à 66°, on a $\Delta' = 75°4$ et $\beta = 18°5$. La direction moyenne du groupement B se caractérise alors par le couple $I' = 66°$ et $\Delta' = -75°4$. La déviation devient cette fois tout à fait cohérente avec celle de l'agglomérat A. Cela signifie que toutes les briques retrouvées dans la fosse étaient placées perpendiculairement à l'axe de la tranchée du four voisin. Cependant, il est archéologiquement difficile de justifier une pente de 18°5 vers l'ouest pour une partie des barres formant la grille au-dessus du foyer. La seule explication serait à chercher dans un effondrement du bord de la tranchée dans le four alors que l'installation était encore soumise à un feu assez intense. Ce scénario semble tout à fait plausible puisque la fouille a montré qu'une partie de la paroi n'était plus en place du côté ouest (limite en pointillé en figure VIII-2b). Une circulation intense des saulniers entre les fosses à saumure et le four pourrait être à l'origine d'un tel effondrement.

Sans négliger le fait que les positions réelles de cuisson pouvaient varier plus ou moins fortement d'une brique à l'autre autour de la position théorique de chant, il apparaît comme hautement probable que la seconde hypothèse d'une pente systématique d'une partie des briques fournisse l'explication de la présence des deux agglomérats A et B dans le diagramme archéomagnétique $(I,\Delta)$.

## CONCLUSION

Si les observations archéologiques faites par P.-L. Gouletquer au sujet du montage des briquetages du Trégor sont confirmées, il n'en ressort pas moins que des problèmes peuvent subsister quant aux positions réelles de cuisson des matériaux lors de la dernière utilisation des installations. La complexité de l'interprétation des résultats de Karreg-ar-Yellan montre que le succès de la méthode dépend beaucoup des hypothèses dites de bon sens concernant les positions de cuisson. Quoiqu'il en soit, l'étude archéomagnétique à venir des briques retrouvées, en 1986, dans la structure même du four devrait apporter des indications complémentaires décisives en faveur ou non de cette première et très séduisante interprétation.

En dernier lieu, la datation des briquetages de Karreg-ar-Yellan peut être déduite de la valeur moyenne de l'inclinaison fournie par l'agglomérat A, soit $\bar{I} = 66° \pm 2°$. La datation Carbone 14 des charbons de bois retrouvés dans la fosse donne 1930 ± 30 ans BP (GIF - 6959), soit, après calibration, une date comprise entre 130 av. J.-C. et 220 ap. J.-C. Dans cet intervalle, la courbe de variation de l'inclinaison pour l'époque gallo-romaine (Langouët *et al.*, 1983) fournit deux solutions autour de 50 av. J.-C. et 50 ap. J.-C. (*cf.* fig. XI-3). Malheureusement, le mobilier archéologique ne permet pas, pour l'instant, de choisir entre ces deux dates.

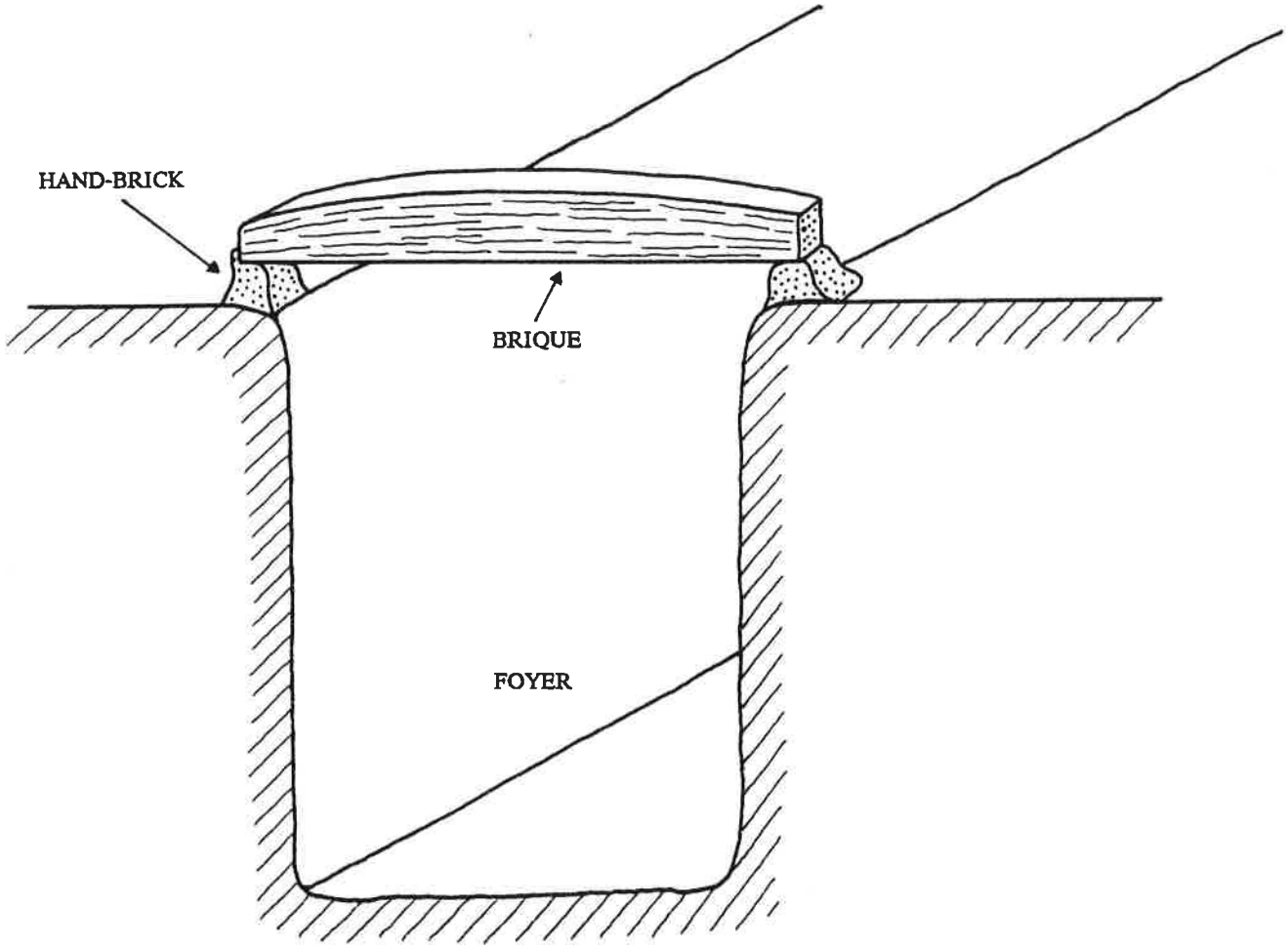



**Fig. VIII-9** : Essai de reconstitution de l'installation de briquetage de Karreg-ar-Yellan (Ploubazlanec, Côtes-du-Nord).

# IX - LES FONDS DE POTS

Si les poteries sont cuites leur fond posé à plat sur un plan horizontal, alors la mesure de l'inclinaison de l'ATR par rapport au plan des fonds permet de remonter, compte-tenu des effets perturbateurs, à l'inclinaison du CMT ayant régné lors de la cuisson. La déclinaison reste inaccessible, selon le principe de l'archéomagnétisme des matériaux déplacés. De même, la déviation non repérable n'a plus de sens à cause de la symétrie de révolution des fonds par rapport à l'axe vertical. Par contre, l'intensité est *a priori* utilisable (Aitken, 1981).

Les premiers essais d'utilisation des mesures de direction d'aimantation sur les poteries ont été entrepris par E. Thellier (1959 et 1981). D'après cet auteur, les inclinaisons mesurées présentent presque toujours une trop grande dispersion dont l'origine est à rechercher d'une part dans la non-verticalité des axes des pots lors de la cuisson, d'autre part dans l'existence de réchauffements partiels (glaçures, utilisations dans un foyer, incendie).

Un des problèmes sans doute rencontré par E. Thellier est l'inhomogénéité en date et en provenance des lots de pots retrouvés sur les sites d'utilisation. La poterie est généralement beaucoup plus largement diffusée que les matériaux de construction, et il n'est pas surprenant de rencontrer sur un même site des ensembles de provenances et de dates différentes.

C'est pourquoi notre effort s'est concentré sur l'étude de productions homogènes attestées, généralement retrouvées dans ou non loin (tessonnières) des ateliers de production. Nous présentons ici, à titre d'exemple, les résultats obtenus sur un ensemble de fonds de pots recueillis lors de la fouille de l'atelier carolingien de Launay-Margat en Guipel (Ille-et-Vilaine) (Lanos *et al.* , 1986).

L'étude archéologique et archéomagnétique de cette poterie, jointe à une étude céramologique effectuée par G. Querré (Laboratoire d'Anthropologie, Préhistoire, Protohistoire et Quaternaire Armoricains, Université de Rennes I), fera l'objet d'une publication dans la *Revue d'Archéométrie* en 1987. Nous en donnons ci-après le texte de la première partie consacrée à la fouille, la production et la datation.

# DATATION ARCHEOMAGNETIQUE DE LA POTERIE CAROLINGIENNE DE LAUNAY-MARGAT EN GUIPEL (Ille-et-Vilaine)

Philippe LANOS

*Laboratoire d'Archéométrie, Université de Rennes I*

## INTRODUCTION

La fouille de l'atelier de Launay-Margat en Guipel (Ille-et-Vilaine) a mis au jour un petit four de potier circulaire accompagné d'une grande quantité de tessons d'une poterie typiquement carolingienne. La présentation de la fouille et l'étude de la production sont complétées par l'apport de deux méthodes de datation : le Carbone 14 et l'Archéomagnétisme. Ces deux techniques ont permis d'obtenir la date du dernier fonctionnement du four et de confirmer l'apparition, dès le début du X$^{e}$ siècle, des lèvres caractéristiques en bandeau en Haute-Bretagne.

## A - DECOUVERTE ET IDENTIFICATION DU SITE

En 1979, G. Faguet, prospectrice au Centre Régional d'Archéologie d'Alet (Ce.R.A.A.), a identifié un important gisement très concentré de tessons de poterie mis au jour lors de labours effectués par Monsieur Champalaune, propriétaire du lieu de découverte. Ce gisement se situe près du village de Launay-Margat en Guipel (Ille-et-Vilaine) (fig. 1), en la parcelle C1 104, dite "Le domaine", du cadastre révisé de 1964. Cette prospection avait livré les informations suivantes :

"Dans la parcelle 103, on a remarqué autrefois la présence de substructions lors des labours. Dans une zone très restreinte de la parcelle 104, on trouve une très grande quantité de tessons d'une poterie homogène, grise, à gros grains de dégraissant. Beaucoup de ces tessons portent des défauts qui correspondent à des ratés de cuisson. Outre les pots globulaires, forme majoritaire, on a noté la présence d'un manche de poëlon en la même pâte. Les fonds sont plats, tous enlevés à la ficelle. La forme des cols, la présence d'une panse décorée ainsi que l'aspect de la pâte font penser à la poterie carolingienne" (Langouët *et al.* , 1979).

Ces renseignements furent transmis à la Direction des Antiquités Historiques de Bretagne qui nous accorda à la demande du Ce.R.A.A. , le 26 août 1982, une autorisation de sondage.

## B - LA FOUILLE

La fouille eut lieu du 20 au 25 septembre 1982, avec l'aide bénévole de six membres du Ce.R.A.A. Le site se situe à environ 100 m au sud-est du ruisseau de la Normandière. Le sous-sol est constitué de schistes micacés du Briovérien métamorphisés par le granite (Carte géologique de Rennes au 1/80 000). Dans la parcelle 104, ce *substratum* n'est, par endroits, qu'à quelques dizaines de centimètres de profondeur.

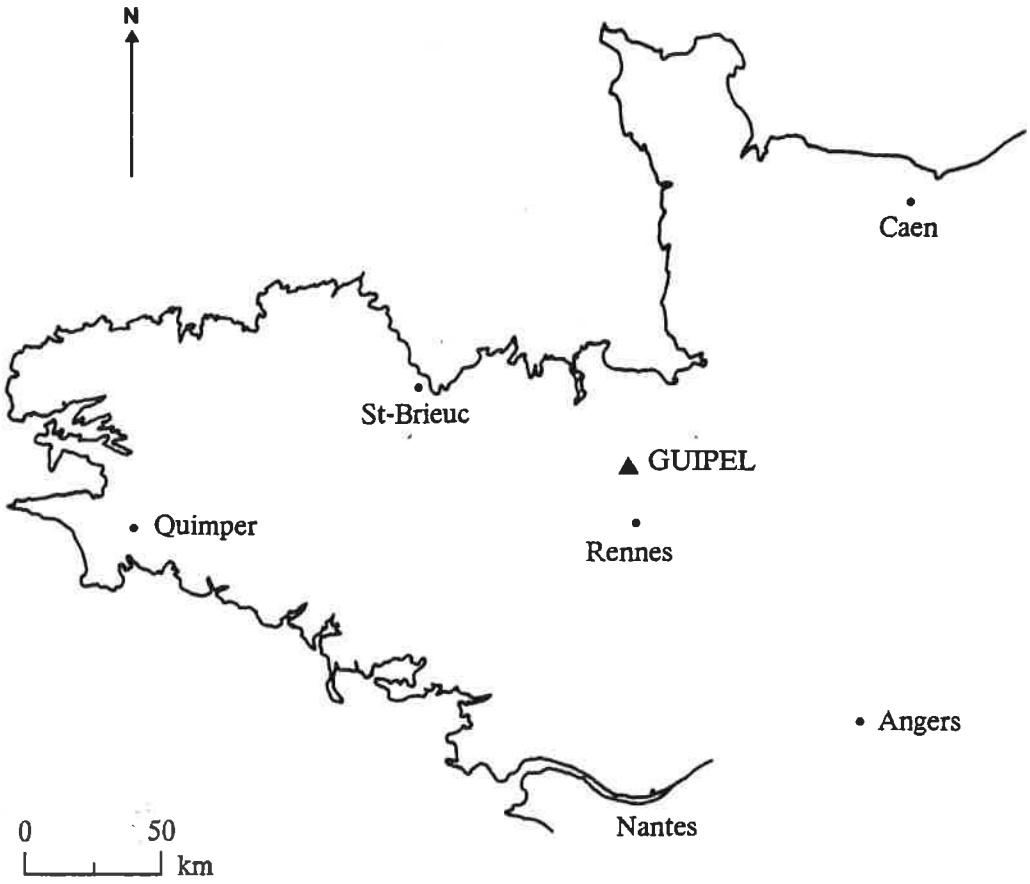



**Fig. 1** : Localisation du four de potier carolingien de Launay-Margat en Guipel (Ille-et-Vilaine, Bretagne).

La prospection magnétique effectuée par le Laboratoire d'Archéométrie de l'Université de Rennes I dans le but de localiser le four, fut perturbée par la présence d'une ligne à haute tension dans les abords immédiats. La fouille de la zone où l'anomalie magnétique était la plus forte révéla qu'il s'agissait en fait d'un sol d'occupation. L'observation des couches archéologiques et la chance permirent dans un second temps de découvrir quelques mètres plus loin l'emplacement exact du four.

## 1 - LE SOL D'OCCUPATION

La couche de terre labourée représente 30 cm d'épaisseur en moyenne. Elle contient une grande quantité de tessons de poteries très fragmentées : essentiellement des petits fragments de cols, de panses et de fonds de pots. Le soubassement argileux apparaît à 50 cm de profondeur, d'où une épaisseur de la couche archéologique ne dépassant pas les 20 cm. La stratigraphie, très simple, fait apparaître deux niveaux :

- Une couche de terre noire, bordée au nord par de l'argile jaune, assez pure, et au sud par la même argile surmontée d'un dépôt de sable.

- Un empierrement formant le sol d'occupation.

La couche de terre noire recouvre toute la surface du sol empierré. Il s'agit d'une terre fine et poudreuse, riche en charbons de bois. Ces derniers ont été récoltés en une quantité suffisamment importante pour permettre une datation par le carbone 14. Cette couche contient une très grande quantité de tessons : des cols dont certains avec des lèvres en bandeau, des becs pontés, des fonds de pots plats. Un fragment de panse a été retrouvé avec un décor au repoussé. De nombreux tessons sont visiblement des ratés de cuisson. Quatre ensembles de fragments formant les restes de quatre pots différents furent découverts à la base de la couche, au niveau de l'empierrement. Malheureusement, aucun de ces ensembles n'a permis une reconstitution même partielle d'un pot sur toute sa hauteur.

Dans la partie sud de cette zone, au même niveau que la couche noire, apparaît une couche de sable blanc, quartzeux, apparemment détritique. Cette couche de sable recouvre de l'argile jaune très collante et s'étend en une lentille allongée est-ouest au sud et à l'ouest de la zone (visible lors des labours). Dans la partie nord, on note la présence de la même argile jaune en limite de l'empierrement et en stratigraphie.

L'empierrement lui-même est constitué d'un mélange de cailloutis, cailloux, sable et argile, le tout extrêmement tassé et compact. Il forme une surface horizontale légèrement ondulée et qui semble avoir subi un long piétinement. Aucune signification particulière n'a pu être donnée aux quelques groupements de grosses pierres qui reposent sur ce sol. Il ne s'agit ni de calages de trous de poteaux, ni de fondations de murs. Dans un premier temps, la présence de pierres rougies avait suggéré l'existence d'un foyer. Mais aucun élément significatif n'est venu étayer sérieusement cette hypothèse.

Cet empierrement qui borde et surplombe l'avant-fosse à l'entrée du four paraît avoir été l'aire de travail des potiers. De chaque côté, se trouvent les matières premières, argile et sable, nécessaires à la confection des pots.

## 2 - LE FOUR

Le décapage de la terre végétale a fait apparaître une surface horizontale rouge, en forme de poire, délimitée par un empierrement. En avant de cette surface, se trouvait une fosse remplie d'une terre noire semblable à celle précédemment décrite et contenant une très grande quantité de tessons de poterie et de charbons de bois.

L'empierrement délimitant la surface rouge forme la paroi d'un four qui comprend deux parties : l'alandier et le laboratoire. L'intérieur du laboratoire et une partie de l'alandier étaient remplis de terre, de pierres et d'argile cuite mêlées. Les pierres semblent provenir de la paroi même. Le dégagement du remplissage n'a révélé aucune structure reconnaissable, ni aucune présence de poterie. Par contre, les faces internes et le fond du four se délimitaient parfaitement d'eux-mêmes par l'extrême résistance de l'argile vitrifiée les enduisant ; Celle-ci, de couleur sombre bleuté à noir, présente une épaisseur variant entre un et deux centimètres. Son très bon état de conservation a permis d'effectuer dix prélèvements archéomagnétiques qui furent soumis au laboratoire de géomagnétisme de St Maur-des-Fossés pour datation.

Malgré les écrêtements destructifs opérés par les labours successifs, les vestiges du four restaient suffisamment importants pour donner une vision en plan complète du laboratoire, de l'alandier et des parois (fig. 2). Le grand axe du four est orienté est-ouest et l'ouverture donne vers l'est.

- Le laboratoire, subcirculaire, offre un diamètre moyen de 1 m. Le fond est constitué d'un sol d'argile vitrifiée qui repose sur un filon de diabase. Il présente une pente inclinée régulièrement vers l'est de 11° en moyenne. La transition entre le laboratoire et l'alandier est marquée par une rupture de pente assez brusque du sol incliné et un resserrement des parois qui deviennent pratiquement parallèles entre elles.

- L'alandier est long d'environ 40 cm pour une largeur identique. Le substratum affleure au fond de l'alandier comme au fond de la fosse qui le prolonge.

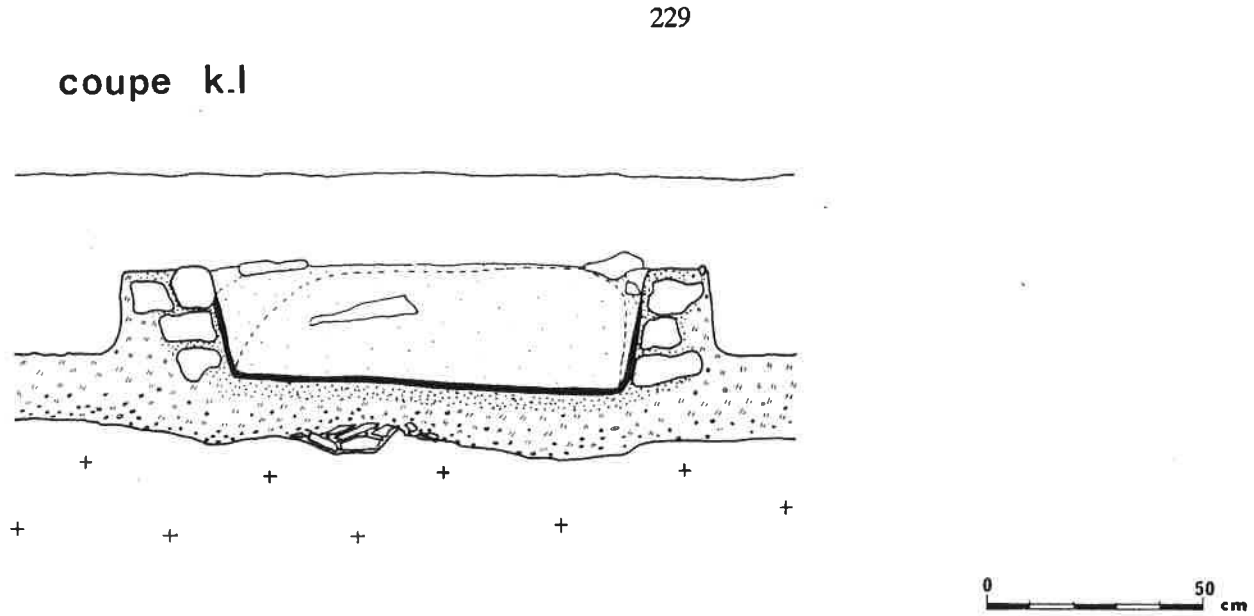
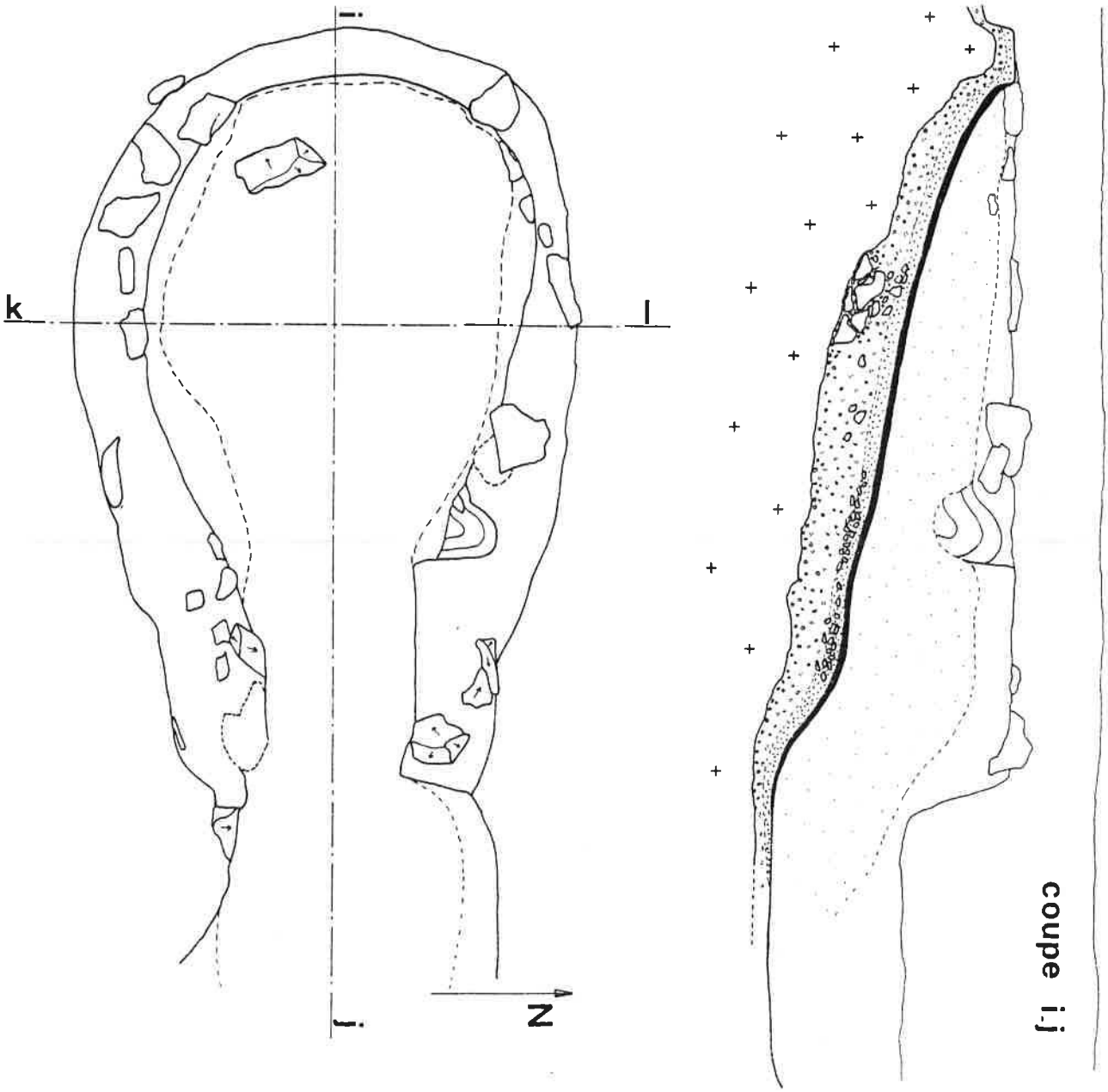



Fig. 2 : Vue en plan et en coupe du four de Guipel.



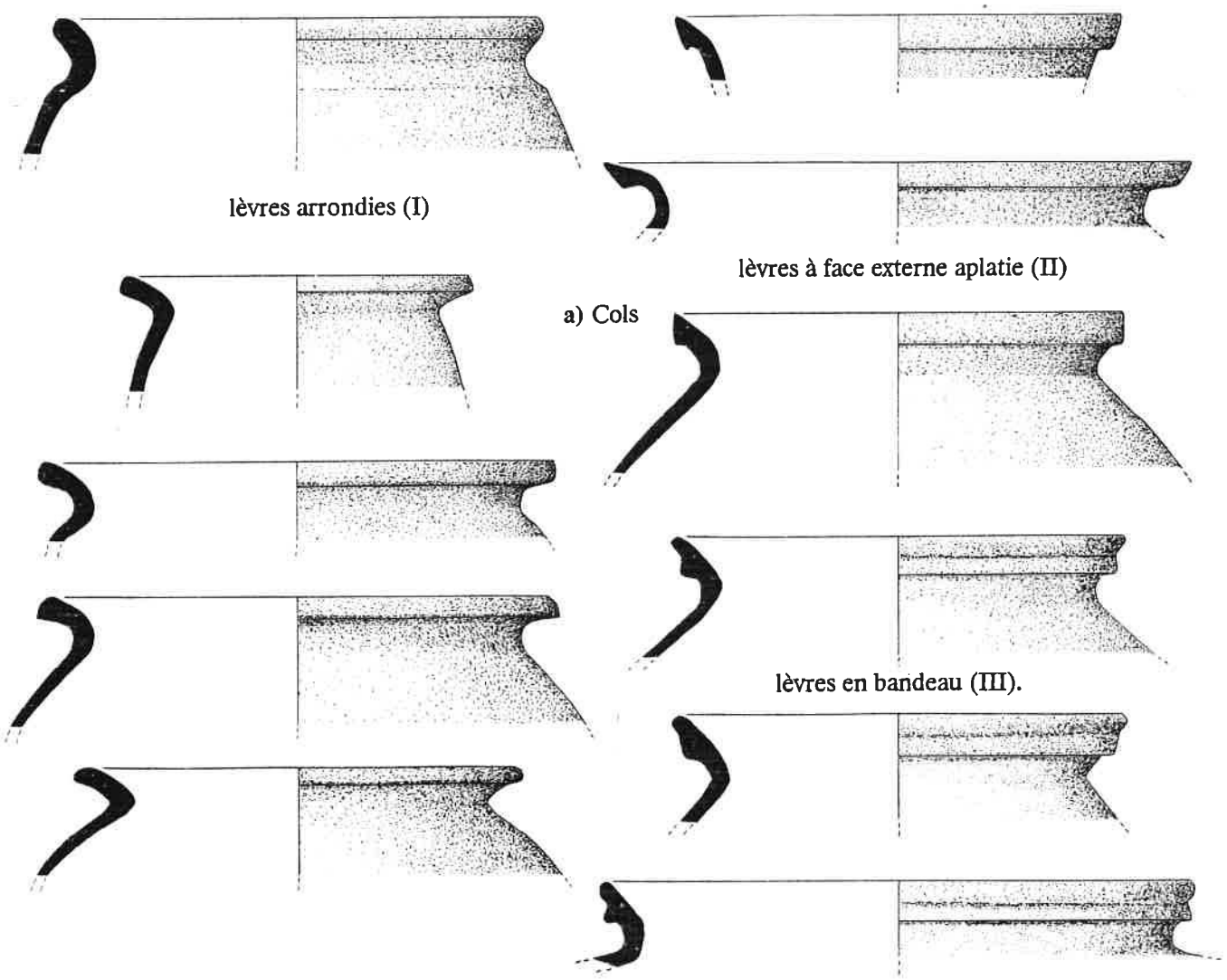
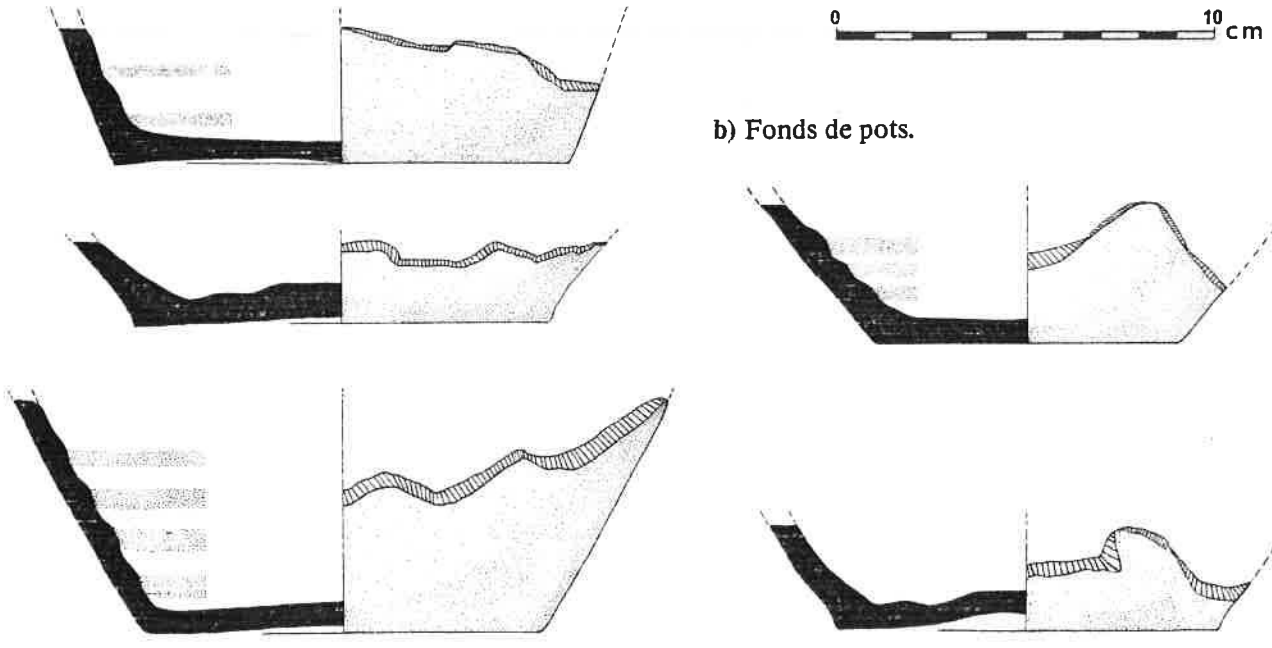



**Fig. 3a et b** : Cols et fonds de pots typiques de la production de Guipel :



Les parois du laboratoire et de l'alandier sont constituées d'argile graduellement cuite et de pierres dont l'agencement reste assez sommaire. Tout porte à penser qu'il s'agit d'un four enterré plutôt que d'une construction hors sol. En effet, l'argile englobant les structures semble correspondre à une poche d'argile dans laquelle le four aurait été aménagé. De plus, aucune couche archéologique n'apparaît en stratigraphie entre la terre végétale et cette argile tout autour du four. On a constaté seulement la continuation de la couche noire du sol d'occupation jusqu'à la fosse noire du four. Cette fosse noire ainsi que le début de l'alandier contenaient une telle quantité de ratés de cuisson qu'on peut imaginer un abandon du four après un tri des poteries utilisables lors du vidage (par le haut ?) du laboratoire et le rejet des ratés dans l'entrée.

## C - LA PRODUCTION DE L'ATELIER,

L'étude de la production de Guipel a été menée pour chacun des ensembles de tessons retrouvés dans les trois différentes zones de fouille qui sont : la terre végétale (TV), la couche noire sur le sol d'occupation (S) et la fosse noire à l'entrée du four (F) (Lanos *et al.* , 1986). Malgré la grande homogénéité de cette production tant au niveau de la pâte que des formes, la distinction entre les trois ensembles a permis de mettre en évidence une différenciation des dimensions et des types de lèvres.

Le nombre des tessons recensés s'élève à environ 5 800, parmi lesquels 703 fragments de cols et 306 fragments de fonds ont fait l'objet de mesures de rayons de courbure. La dimension moyenne des tessons varie entre 3 et 10 cm.

La poterie retrouvée à Guipel constitue un échantillonnage très probablement biaisé du fait qu'il s'agit essentiellement de rejets de cuisson. L'examen de cette production abandonnée sur place permet de distinguer deux formes :

- des pots (et quelques pichets) globulaires,
- des pots tronconiques et des jattes.

a) Les pots globulaires représentent 95 % de la production. Cette forme se subdivise en trois ensembles selon le type de lèvre : les lèvres arrondies (I), les lèvres avec face externe aplatie (II) et les lèvres en bandeau (III) (fig. 3a).

Ces trois types de lèvres apparaissent dans des proportions différentes selon les trois zones de provenance :

- TV et S : 95 % de type I,
  5 % de type II et III.

- F : 10 % de type I,
  80 % de type II,
  10 % de type III.

Pour les zones TV et S qui présentent 95 % de lèvres du type I, le diamètre moyen est de 15 cm, tandis que le diamètre moyen est de 14 cm pour la zone F où les lèvres sont à 80 % de type II.

Les fonds sont plats, mais certains présentent une lègère concavité. Leurs épaisseurs varient entre 4 et 10 mm (fig. 3b). Les fonds ont tous été enlevés à la ficelle. Les diamètres montrent là aussi une différenciation suivant les zones.

- zone TV : deux maximums : l'un à 11 cm, l'autre à 13 cm.
- zone S : un maximum à 11 cm,
- zone F : un maximum à 10-11 cm.

La zone F diffère une nouvelle fois des deux autres par un diamètre moyen des fonds situé autour de 10 - 11 cm. On peut observer au sein de la zone TV deux diamètres moyens. Cela révèle l'existence de deux ensembles distincts par les dimensions pour les pots globulaires avec lèvres de type I.

Le bas des panses est toujours d'allure tronconique. Quelques fragments de panses sont ornementés de boudins verticaux impressionnés par application des doigts.

La présence de becs verseurs pontés et d'anses montre qu'une partie des pots globulaires correspond en fait à des pichets. Les becs verseurs sont toujours associés à des lèvres du type I. Ceci explique pourquoi ces becs et ces anses sont majoritairement retrouvés dans les zones offrant 95 % de ce type de lèvre.

b) Quelques fragments de cols attestent la présence de pots tronconiques et de jattes, sortes de coupes sans bords ni anses. On note enfin l'existence d'un fragment de manche de poëlon.

Les déformations figurent sur environ 10 % de l'échantillonnage. Elles apparaissent au niveau des cols et des panses. Par contre, aucune déformation n'est à observer sur les fonds. Il s'agit le plus souvent d'effondrements des cols à l'intérieur des pots, en particulier pour les tessons provenant de la fosse à l'entrée du four. L'origine de ces effondrements est à chercher dans la fragilité entraînée par l'amincissement de la paroi des panses depuis le fond où l'épaisseur varie entre 5 et 10 mm jusqu'à la base du col où l'épaisseur n'est plus que de 3 à 5 mm. Ces accidents sont typiques de phénomènes de sur-cuissons qui interviennent en fin de chauffe lorsque la température atteint le seuil de plasticité et de déformabilité de la pâte. L'examen de la déformation des cols, en particulier de ceux retrouvés parmi les rejets de la fosse, suggère que les pots étaient empilés debout les uns sur les autres dans le four.

## D - LA DATATION

### 1 - LA DATATION PAR LE CARBONE 14

Environ 60 g de charbons de bois retrouvés dans la couche noire de la zone I et la fosse noire de la zone II ont été soumis pour datation par le carbone 14 au Centre des Faibles Radioactivités de Gif/Yvette. Le résultat de la mesure d'âge donné par M. Delibrias est :

$$1040 \pm 50 \text{ ans BP} \quad \text{(GIF-6074)}$$

soit, après calibration à partir des tables du "groupe de Tucson" (*Revue d'Archéométrie*, supplément 1983), une date calendaire située avec 95 % de certitude entre 880 et 1140 ap. J.-C.

### 2 - LA DATATION PAR L'ARCHEOMAGNETISME

#### a - Exposé de la méthode.

L'archéomagnétisme est basé sur la propriété qu'ont les argiles cuites d'acquérir, au cours du refroidissement après tout chauffage au-delà de la température de Curie (680 °C pour les terres cuites), une aimantation thermorémanente (ATR) proportionnelle et colinéaire au champ magnétique terrestre (CMT) régnant au moment et au lieu du chauffage.

L'aimantation ainsi acquise est très stable. Elle ne peut être totalement détruite que par un nouveau réchauffement au-delà de la température de Curie. Dans ce cas, une nouvelle aimantation qui sera fonction du champ extérieur régnant alors, viendra remplacer la précédente au cours du refroidissement. Si le réchauffement ultérieur n'atteint pas la température de Curie, seule la partie de l'aimantation acquise précédemment dans cet

intervalle de température, sera détruite et remplacée par une nouvelle aimantation appelée ATR partielle. Aussi peut-on avoir dans une même argile cuite une aimantation totale composée en fait de plusieurs ATR partielles. L'analyse thermique par réchauffement progressif en champ magnétique nul détruit successivement les ATR partielles et permet de reconstituer les directions des différentes aimantations acquises par le matériau.

La mesure des ATR des terres cuites dont la date de dernière cuisson est bien connue a permis de reconstituer la direction du CMT à diverses époques. Réciproquement, la connaissance de cette variation permet, après mesure d'aimantation et vérification d'un certain nombre de tests, d'effectuer une datation.

L'archéomagnétisme se subdivise en deux domaines d'application qui sont : l'archéomagnétisme des structures en place et l'archéomagnétisme des objets déplacés.

- Les structures en place désignent les fours, les foyers, les constructions incendiées, etc... Le prélèvement, sur ces structures, d'échantillons orientés permet la mesure de la direction de l'aimantation qui définit complètement celle du champ régnant alors. Cette direction est caractérisée par son inclinaison I par rapport au plan horizontal, et sa déclinaison D par rapport au Nord Géographique.

- Les objets déplacés désignent les tuiles, les briques, les carreaux de pavage, les poteries, etc... Ces objets ont été déplacés depuis le lieu de leur cuisson de fabrication jusqu'à celui de leur utilisation. Ce déplacement leur a fait perdre définitivement le repère géographique (Nord, Est, Verticale) dans lequel ils furent cuits. Cependant, il est permis de penser que ces objets furent cuits majoritairement l'une de leurs faces planes posée à plat sur un plan horizontal (fond ou sole de four). Dans cette hypothèse technique, qui n'a de sens que statistique, les tuiles et les briques présentent trois positions possibles : à plat, de chant ou debout ; par contre, les poteries n'en présentent qu'une : à plat, sur le fond ou sur le col. La variation de l'inclinaison du CMT se situant entre + 50° et + 75° durant la période historique en France (Thellier, 1981 ; Langouët *et al.* , 1983), on ne retient parmi les positions possibles que celle qui donne une inclinaison comprise dans un intervalle élargi à (40°, 80°). L'archéomagnétisme des objets déplacés permet donc, outre la datation à partir de l'inclinaison, la reconstitution d'un certain nombre de données archéotechnologiques telles que les positions de cuisson.

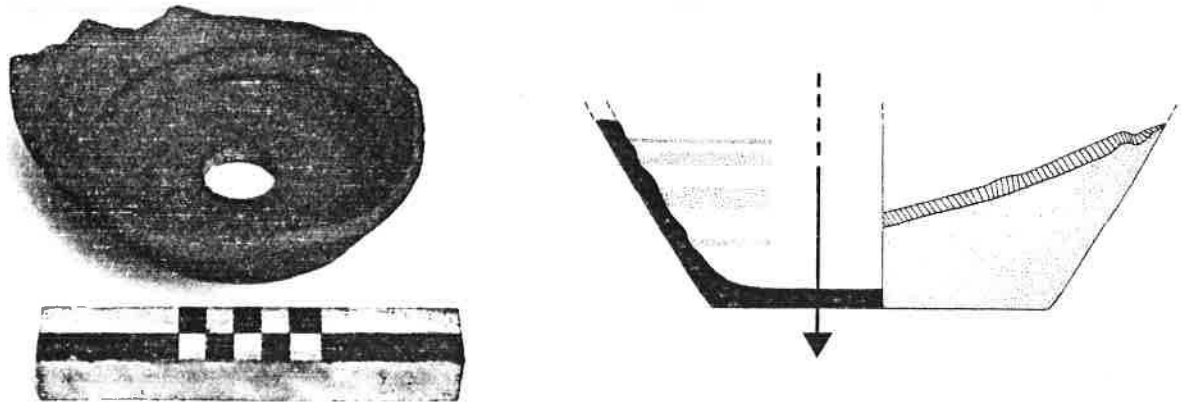


**Fig. 4** : Schéma de prélèvement des carottes perpendiculairement au fond des pots.

**b - Etude archéomagnétique du four.**

Le site de Guipel a fait l'objet d'une étude archéomagnétique complète portant à la fois sur le fond du four et les fonds de pots.

Dix échantillons ont été prélevés dans l'argile vitrifiée du fond du four selon la méthode mise au point par E. Thellier. Chaque échantillon est pris dans un cube de plâtre dont la face supérieure est parallèle au plan horizontal local. Sur chaque cube, l'indication de la direction du soleil et de l'heure permet de redéterminer exactement la direction du nord géographique. La mesure de la direction de l'aimantation sur chaque échantillon est effectuée sur un inductomètre à rotation continue au Laboratoire de Géomagnétisme de Saint-Maur-des-Fossés (Thellier, 1938 ; Le Goff, 1975). L'aimantation rémanente visqueuse (ARV), qui est une aimantation parasite acquise lors du séjour prolongé du matériau dans le CMT depuis sa dernière cuisson jusqu'à nos jours, est déterminée par la méthode directe-inverse. Le tableau suivant résume les résultats des mesures :

| N° échant. | Déclin. locale | Coef. traînage % | Déclin. ARV | Inclin. ARV | Moment ARN $10^{-3}$ Am$^2$ | Déclin. ARN | Inclin. ARN |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -6.48 | 4.39 | -1.51 | 61.45 | 0.38 | 23.52 | 64.47 |
| 2 | -5.89 | 3.08 | 16.78 | 66.31 | 1.34 | 23.12 | 64.32 |
| 3 | -8.37 | 2.89 | 3.00 | 65.53 | 1.88 | 26.86 | 63.68 |
| 4 | -7.86 | 3.26 | -0.49 | 63.39 | 1.76 | 25.80 | 65.64 |
| 5 | -7.79 | 3.80 | 8.74 | 59.42 | 1.43 | 24.79 | 64.53 |
| 6 | -10.00 | 3.02 | -4.07 | 61.92 | 2.18 | 27.72 | 61.35 |
| 7 | -7.04 | 5.82 | 10.42 | 60.01 | 0.67 | 23.59 | 64.49 |
| 8 | -6.20 | 5.38 | -6.59 | 64.73 | 0.88 | 23.07 | 65.04 |
| 9 | -6.20 | 3.51 | 7.30 | 58.33 | 2.15 | 28.52 | 60.84 |
| 10 | -6.20 | 3.88 | -2.57 | 62.10 | 1.14 | 22.76 | 64.42 |

La très faible viscosité des échantillons de Guipel (coefficient de traînage < 5 %) indique un matériau de bonne qualité magnétique. La statistique de Fischer appliquée aux dix échantillons donne :

$$\overline{I} = 63^\circ 9 \pm 1^\circ$$

$$\overline{D} = 25^\circ 1 \pm 2^\circ 3 \quad \text{est}$$

La très bonne précision des résultats est soulignée par une valeur élevée du facteur k de la statistique de Fisher : k = 1977. Afin de comparer l'inclinaison moyenne retrouvée sur le four de Guipel avec la courbe de variation séculaire de l'inclinaison établie pour Paris, une correction de latitude de 0°5 est nécessaire d'où :

$$\overline{I}_{Paris} = \overline{I}_{Guipel} + 0^\circ 5 = 64^\circ 4 \pm 1^\circ$$

Cette valeur de l'inclinaison se retrouve aux époques suivantes :

60 , 200 , 280 , 430 , 940 , 1510 , 1900 ap. J.-C.

En fait, la valeur de + 25° de la déclinaison portée sur la courbe I(t) - D(t) permet de ne retenir qu'une seule date possible dans le Moyen-Age. En effet, ce n'est que durant le X$^e$ siècle que la déclinaison du CMT dans nos régions atteint des valeurs dépassant les 20° est. On obtient donc une solution unique pour la datation archéomagnétique de la dernière cuisson du four de potier de Guipel :

940 ± 15 ap. J.-C.

**c - Etude archéomagnétique de la poterie.**

Cent fragments de fonds de pots présentaient une surface plane de taille suffisante pour permettre une étude archéomagnétique. Les résultats s'avérant identiques pour les trois zones TV, S et F, tous les fonds ont été regroupés et traités en un seul lot. Des carottes de 25 mm de diamètre et d'épaisseur variant selon les pots entre 4 et 10 mm ont été prélevées perpendiculairement au plan défini par les fonds avec l'aide d'un foret diamanté amagnétique (fig. 4). Les mesures des directions d'aimantation ont été effectuées sur le magnétomètre spinner Schonstedt du Laboratoire de Géophysique de l'Université de Rennes I.

A chaque carotte est associé un repère (Oxyz) (fig. 5a) de telle sorte que l'axe z soit parallèle à celui du carottage. L'axe y est choisi arbitrairement vu la symétrie de révolution des pots autour de l'axe z. La mesure de la déviation n'a donc dans ce cas aucun sens archéomagnétique. Seule, l'inclinaison est utilisable moyennant certaines hypothèses sur la position des fonds lors de la cuisson.

Une première approche consiste à considérer que les fonds ont été cuits posés à plat sur un sol plan et horizontal. Cette hypothèse n'est cependant envisageable que si les inclinaisons mesurées se répartissent dans l'intervalle (50°, 75°) des valeurs prises par l'inclinaison du champ terrestre dans nos régions durant la période historique. L'examen de l'histogramme des mesures brutes en figure 8a montre effectivement des inclinaisons majoritairement situées dans cet intervalle. Ainsi, les pots de Guipel étaient cuits plutôt debout sur une surface horizontale ou proche de l'horizontale. Les trois-quarts des inclinaisons mesurées sont positives dans le repère de la figure 5a, ce qui signifie que 75 % des pots ont été cuits avec une ouverture orientée à l'opposé de la direction du CMT. On peut donc conclure que la très grande majorité des pots de Guipel ont été cuits statistiquement debout avec leurs cols dirigés vers le haut.

Cependant, il est impossible de tirer une valeur moyenne significative de l'histogramme des inclinaisons en figure 8a. C'est pourquoi deux types de correction ont été menés pour tester une éventuelle amélioration des résultats.

*Correction des aimantations parasites.*

- Une désaimantation a été effectuée afin de nettoyer les ATR partielles parasites telles que la visqueuse (ARV) ou encore les ATR acquises après d'éventuels effondrements ou basculements du chargement au cours du refroidissement (les ratés attestent la survenue de tels accidents). Un premier essai de désaimantation par champ alternatif s'est avéré infructueux à cause de la grande résistance des échantillons à ce type de désaimantation. D'après le diagramme J/Jo en figure 6, 15 à 30% de l'aimantation subsiste après l'application d'un champ de 950 Oe qui est le maximum atteint par l'appareillage disponible. C'est pourquoi la désaimantation a été poursuivie par la méthode thermique. Les directions d'aimantation des échantillons deviennent stables lorsque ce traitement en champ nul atteint des températures de 470°C. L'histogramme des inclinaisons obtenues après désaimantation (fig. 8b) permet de constater une nette amélioration par rapport à l'histogramme en figure 8a, et une tendance bimodale autour des valeurs 50° et 70°.

*Correction de l'anisotropie d'aimantation thermorémanente.*

- Les matériaux d'argile cuite, et en particulier les poteries, présentent des directions de plus ou moins facile aimantation qui sont à l'origine d'anisotropies magnétiques parfois très importantes (Rogers *et al.* ,1979). La conséquence en est la non-colinéarité entre la direction de l'ATR acquise et celle du CMT ambiant. C'est pourquoi une détermination du tenseur d'anisotropie a été effectuée pour la poterie de Guipel à partir de 10 échantillons sélectionnés parmi les cent de l'étude. Chaque échantillon est porté à une température de 700°C pendant 1h30 et refroidi rapidement en 1/2h dans un champ magnétique uniforme et constant de 47 000 $\gamma$ . Ce traitement est répété trois fois par carotte en faisant chaque fois agir le champ parallèlement à l'un des axes ox, oy et oz. Le résultat des mesures montre que les aimantations acquises $M_x$, $M_y$ et $M_z$ sont à 1 ou 2 degrés près dirigées selon les axes ox, oy et oz d'application du champ. Les facteurs d'anisotropie $F_{xz}$ et $F_{xy}$ correspondent respectivement aux rapports $M_x/M_z$ et $M_x/M_y$. Les résultats sont présentés dans le tableau suivant :

a) Hypothèse d'un fond posé à plat sur un sol horizontal.

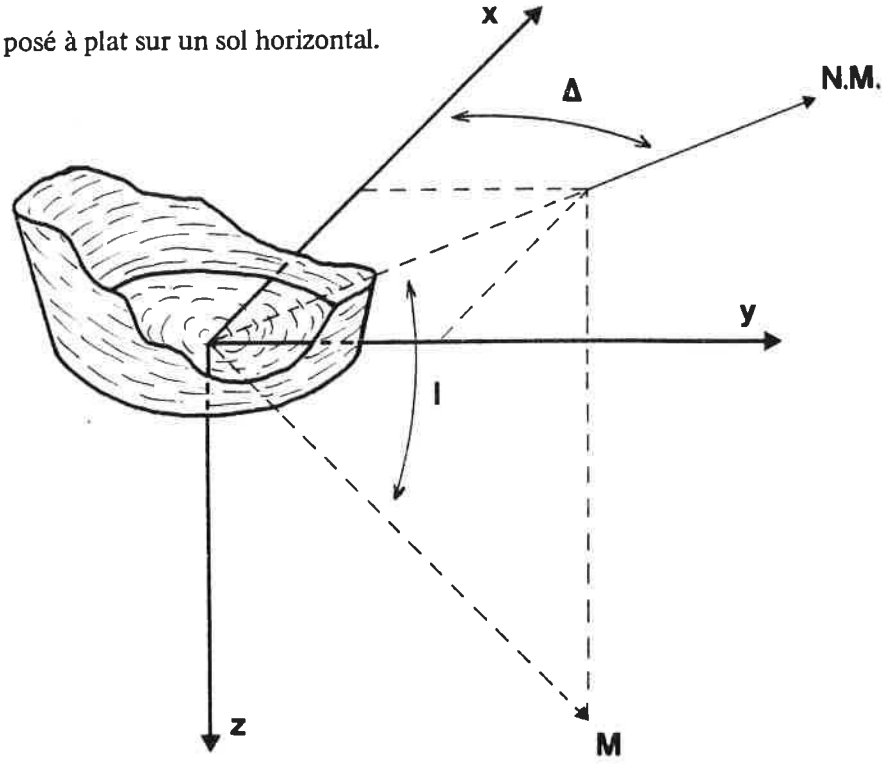
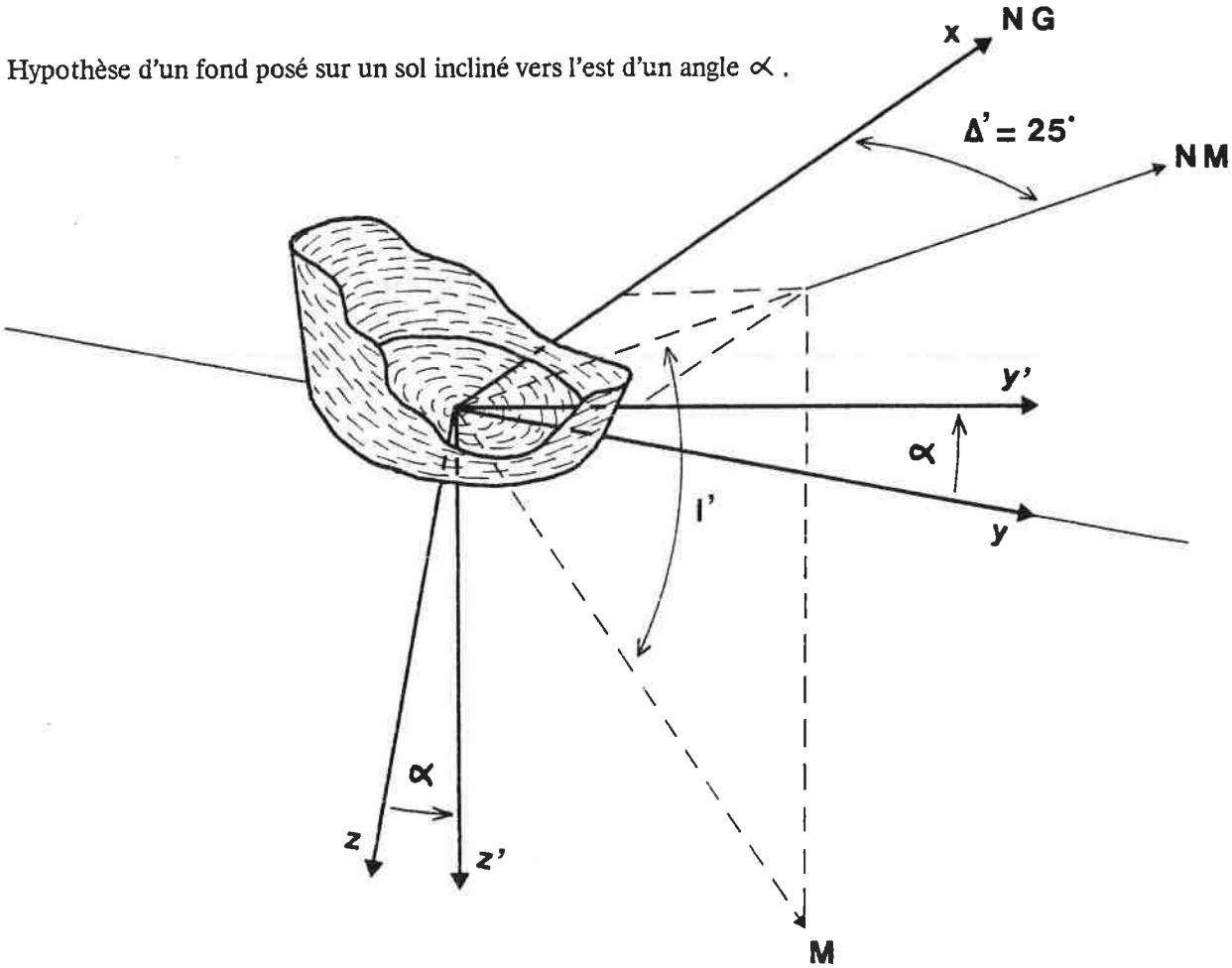



**Fig. 5a et b** : Repères de carottage des fonds de pots.

b) Hypothèse d'un fond posé sur un sol incliné vers l'est d'un angle $\alpha$ .



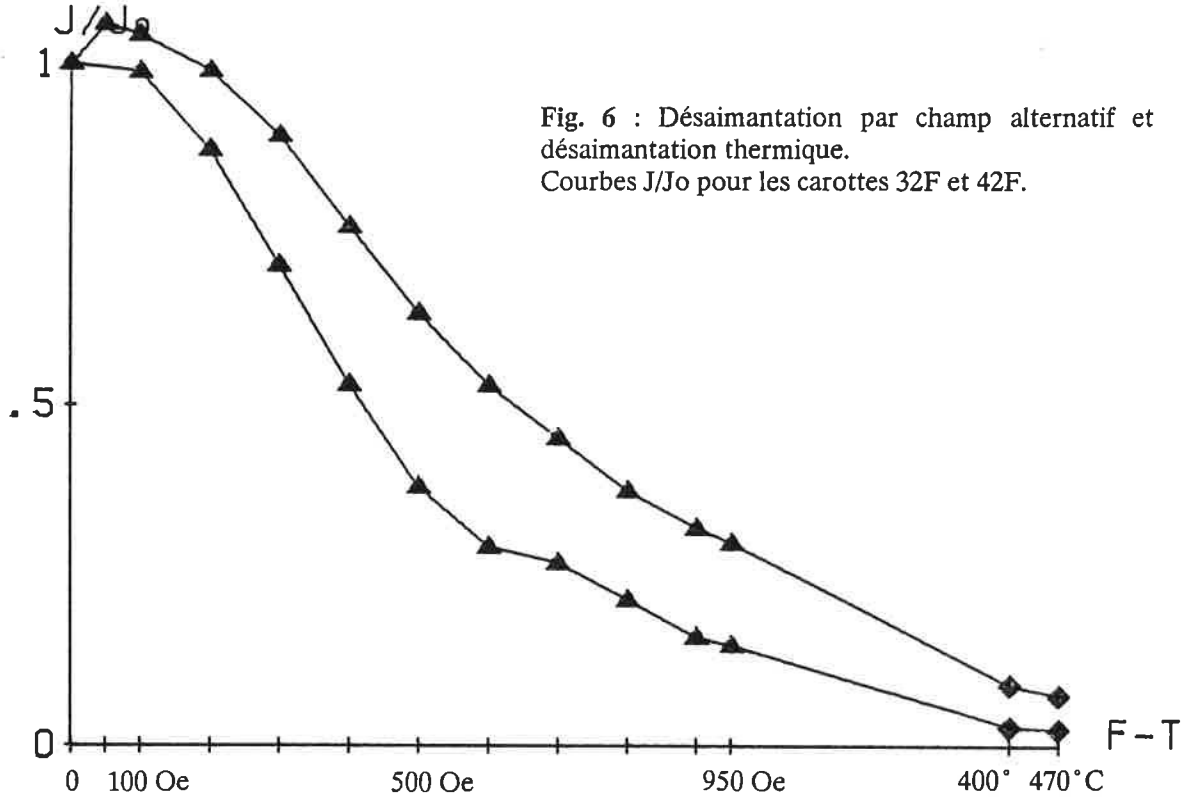



Fig. 6 : Désaimantation par champ alternatif et désaimantation thermique.
Courbes J/Jo pour les carottes 32F et 42F.

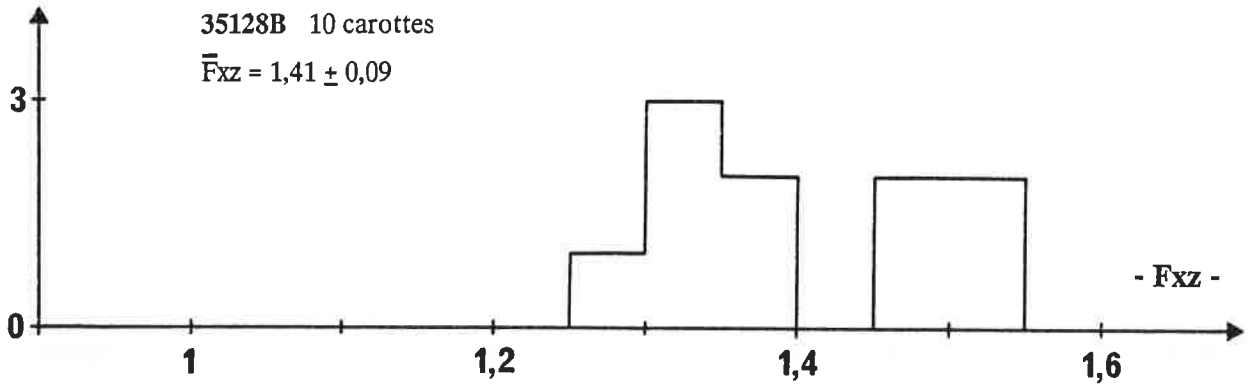
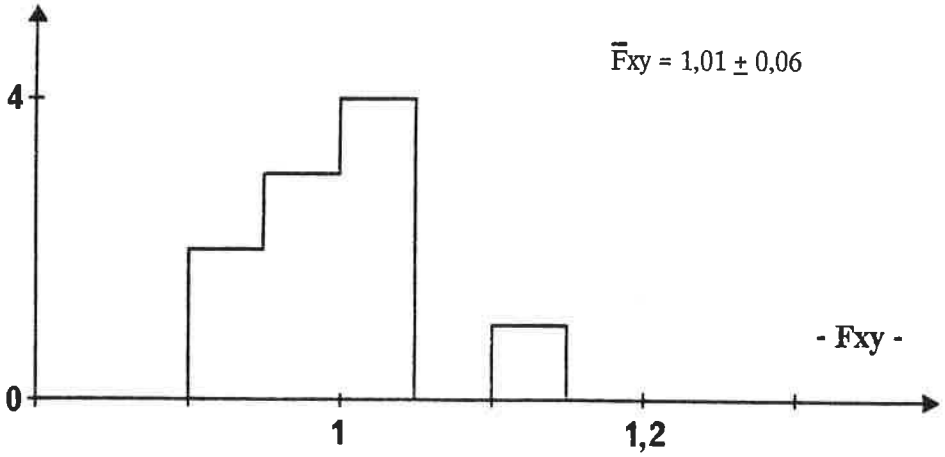



Fig. 7a et b : Caractérisation du tenseur d'anisotropie d'aimantation thermorémanente.



| Trait N° | I à 470° | $M_x$ $10^{-5}$ $Am^2$ | $M_y$ $10^{-5}$ $Am^2$ | $M_z$ $10^{-5}$ $Am^2$ | $F_{xz}$ | $F_{xy}$ | 470°C + correction avec $F_{xz}$ | 470°C + correction $\overline{F}_{xz}$=1,41 | \|écart\| |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 10F | 45°1 | 1,926 | 1,968 | 1,429 | 1,348 | 0,979 | 53°5 | 54°8 | 1°3 |
| 11F | 59°6 | 0,649 | 0,690 | 0,426 | 1,524 | 0,940 | 68°9 | 67°4 | 1°5 |
| 13F | 77°5 | 0,708 | 0,693 | 0,527 | 1,343 | 1,021 | 80°6 | 81°1 | 0°5 |
| 14F | 77°4 | 2,139 | 2,113 | 1,444 | 1,481 | 1,012 | 81°4 | 81°0 | 0°4 |
| 15F | 67°9 | 0,954 | 0,912 | 0,619 | 1,541 | 1,046 | 75°2 | 73°9 | 1°3 |
| 17F | 15°6 | 0,739 | 0,746 | 0,562 | 1,314 | 0,990 | 20°1 | 21°5 | 1°4 |
| 20F | 72°4 | 0,438 | 0,385 | 0,338 | 1,293 | 1,137 | 76°2 | 77°3 | 1°1 |
| 21F | 42°4 | 1,537 | 1,511 | 1,028 | 1,495 | 1,017 | 53°8 | 52°2 | 1°6 |
| 22F | 82°8 | 0,827 | 0,854 | 0,595 | 1,389 | 0,969 | 84°8 | 84°9 | 0°1 |
| 23F | 54°5 | 1,144 | 1,222 | 0,834 | 1,371 | 0,936 | 62°5 | 63°2 | 0°7 |

Les facteurs moyens d'anisotropie (fig. 7a et b) sont :

$$\overline{F}_{xz} = 1{,}41 \pm 0{,}09$$
$$\overline{F}_{xy} = 1{,}00 \pm 0{,}06$$

Le tenseur moyen d'anisotropie décrit un ellipsoïde de révolution aplati dont le plan équatorial est confondu avec le plan des fonds de pots. L'origine de la très forte anisotropie (41 %) des fonds de pots de Guipel est à rechercher dans la structure particulière de la pâte engendrée par le tournage des poteries.

La correction d'anisotropie n'est en toute rigueur envisageable que lorsque les facteurs $F_{xz}$ et $F_{xy}$ sont connus pour chaque carotte. En effet, ces facteurs peuvent varier assez sensiblement d'un objet à un autre, voire d'un point à un autre d'un même objet. Pour les pots étudiés ici, la dispersion reste faible ($\pm$ 0,09) et la correction effectuée à partir du facteur moyen $F_{xz}$ = 1,41 pour l'ensemble des échantillons s'avère tout à fait légitime si on la compare à celle effectuée échantillon par échantillon (Tableau ci-dessus). La correction d'anisotropie appliquée à l'ensemble des fonds permet d'obtenir un histogramme des inclinaisons nettement plus pointu et resserré d'allure bimodale autour des valeurs 60° et 74° (fig. 8c).

*Correction de la pente du fond du four.*

L'existence de deux pics à 60° et 74° semble indiquer a priori un pendage symétrique des pots de $\pm$ 10° maximum selon une direction apparemment unique mais qui reste inconnue. Cependant, on comprend mal pourquoi les potiers auraient cherché à incliner régulièrement de $\pm$ 10° leurs pots lors du chargement sur une sole supposée plane et horizontale.

Une autre hypothèse de rangement, plus pragmatique sinon plus simple, consiste à considérer que les pots étaient posés debout directement sur le fond du four qui présente une pente régulière de 11° vers l'est (fig. 2). Si l'on suppose que l'axe x de chaque carotte correspond à la direction du Nord géographique, cela revient à faire tourner le repère (Oxyz) d'un angle $\alpha$ = 11° autour de cet axe (fig. 5b). Il est possible de calculer pour chaque carotte ce que devrait être la déviation $\Delta$ puisqu'après correction de pente, la déviation finale $\Delta'$ doit être égale à la déclinaison de 25° Est, déterminée à partir des prélèvements en place. La connaissance de la déviation $\Delta$, de l'inclinaison I et de la rotation $\alpha$ permet ensuite de déduire la valeur I' de l'inclinaison corrigée.

Le calcul proprement dit se fait en trois étapes :

a) Premièrement, la rotation d'angle $\alpha$ dans le repère de la figure 5b peut s'écrire sous la forme d'une matrice :

$$\begin{bmatrix} x' = x \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha & -\sin\alpha \\ 0 & \sin\alpha & \cos\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y.\cos\alpha - z.\sin\alpha \\ y.\sin\alpha + z.\cos\alpha \end{bmatrix}$$

d'où :

$$\sin I' = \cos I \,.\sin \Delta \,.\sin\alpha + \sin I \,.\cos\alpha \qquad \text{(I)}$$

$$\operatorname{tg} \Delta' = (\cos I \,.\sin \Delta \,.\cos\alpha - \sin I \,.\sin\alpha)/\cos I \,.\cos \Delta \qquad \text{(II)}$$

L'inclinaison I est la mesure obtenue après désaimantation thermique et correction d'anisotropie. L'angle $\alpha$ est de 11° et correspond à la pente du fond du four. La déviation finale $\Delta'$ doit être de 25° Est. C'est la déclinaison obtenue à partir des prélèvements effectués sur l'argile vitrifiée du fond du laboratoire. La connaissance de l'inclinaison corrigée I' est liée à l'inconnue $\Delta$.

b) La seconde étape du calcul consiste à éliminer sin I' entre les équations (I) et (II). En posant :

$$A = \operatorname{tg} \Delta' / \cos\alpha \qquad x = \sin \Delta$$

et

$$B = \operatorname{tg} I \,.\, \operatorname{tg}\alpha \qquad y = \cos \Delta$$

on a :

$$x - Ay = B$$

Sachant que $x^2 + y^2 = 1$, on obtient un système de deux équations à deux inconnues dont la solution peut s'écrire sous la forme :

$$\Delta = \arccos \left[ \frac{\sqrt{A^2 - B^2 + 1} \; - \; AB}{A^2 + 1} \right]$$

Cette solution tient compte du fait que la déviation doit se situer entre - 90° et + 90° en accord avec la direction générale du CMT (fig. 5b) dans nos régions.

C) La troisième étape du calcul consiste à reporter la valeur calculée $\Delta$ dans l'équation (I) afin de déterminer l'inclinaison corrigée I'. Cette correction ainsi menée pour chacune des carottes a permis d'obtenir l'histogramme des inclinaisons en figure 8d. La courbe lissée en pointillé met en évidence un maximum à 66° et un autre à 82°. Si la première couche de pots était directement posée sur le fond incliné du four, il est probable que la superposition des couches supérieures devait se faire en essayant de rattraper plus ou moins une pente cause d'instabilité. La valeur forte et anormale de 82° peut provenir soit d'une sur-correction effectuée sur des pots n'ayant jamais fait l'objet de pendage, soit de l'existence de positions tout à fait aberrantes. Par contre, la valeur de 66° semble tout à fait cohérente avec celle obtenue à partir des prélèvements en place et permettrait de dater les fonds de pots de Guipel du tout début du $X^e$ siècle.

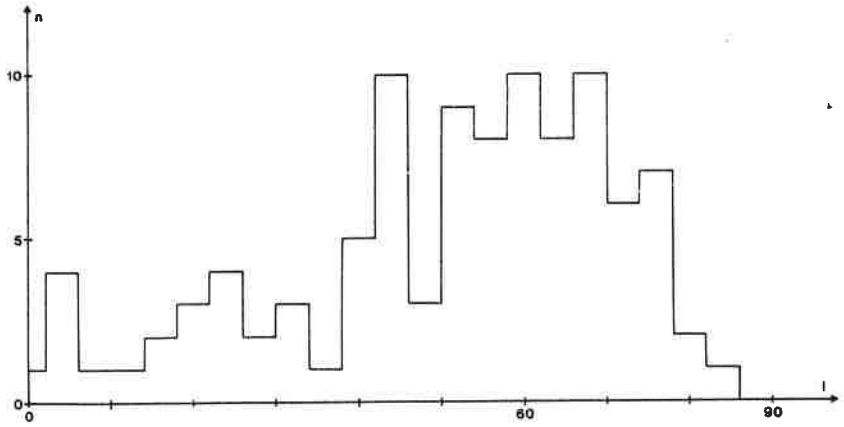
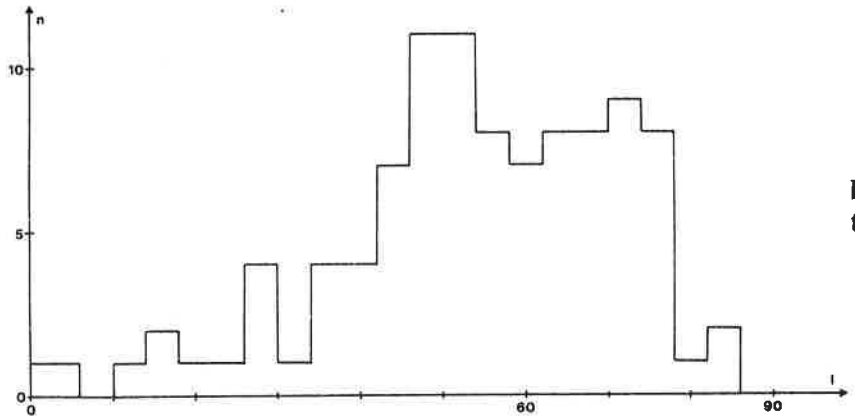
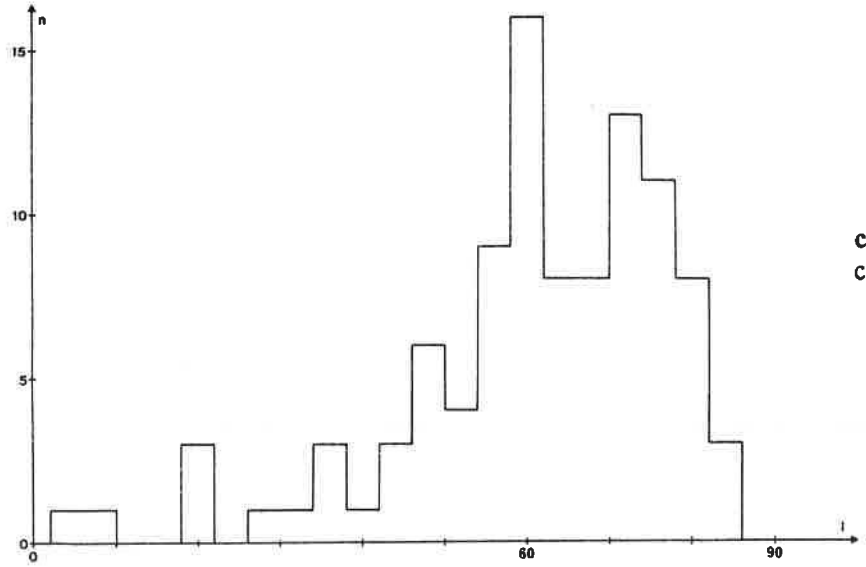



**Fig. 8a, b, c et d** : Histogrammes des inclinaisons mesurées.

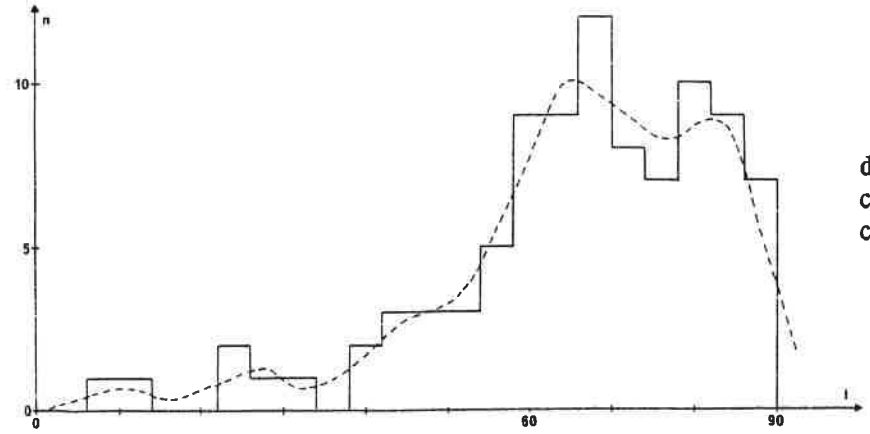
a) Mesures brutes.




b) Après désaimantation thermique.




c) Après désaimantation et correction d'anisotropie d'ATR.




d) Après désaimantation, correction d'anisotropie et correction de pente.

Le désaccord entre cette inclinaison de 66° mesurée sur les fonds de pots et celle de 64° mesurée sur le fond du four peut provenir d'une légère anisotropie magnétique de l'argile vitrifiée du four lui-même. Il suffirait que cette anisotropie soit de l'ordre de 10% pour expliquer cette différence de 2°. Malheureusement, la détermination des facteurs d'anisotropie pour le four n'a pas été possible à cause d'échantillons trop friables.

En conclusion, la date de dernier fonctionnement du four de Guipel doit se situer dans la première moitié du X$^{e}$ siècle. Les pots devaient être cuits empilés debout les uns sur les autres dans un four très probablement sans sole. L'ensemble du chargement devait reposer directement sur le fond incliné du four.

## CONCLUSION

Les datations par le Carbone 14 et par l'archéomagnétisme montrent que l'atelier de potier de Guipel a cessé de fonctionner durant la première moitié du X$^{e}$ siècle. L'archéomagnétisme des fonds de pots conjugué à l'archéomagnétisme des structures en place a permis l'obtention de précieuses indications sur le mode de remplissage du four. Ainsi, il est très probable qu'il n'y avait pas de sole et que les pots reposaient debout sur le fond du four, au contact direct avec le feu de l'alandier.

La production retrouvée à Guipel, presque uniquement composée de pots globulaires dont une faible proportion de pichets, montre la coexistence de lèvres de type convexe retrouvées sur le sol d'occupation et de lèvres à bord droit et en bandeau retrouvées dans le four même. Cette différenciation spaciale semble indiquer une évolution dans le type des lèvres produites, avec apparition des bandeaux dans de faibles proportions. Ces dernières lèvres sont attestées dès la première moitié du X$^{e}$ siècle dans le nord-ouest de la France (De Bouard, 1976). En Haute-Bretagne, les sites carolingiens de Trans (35), daté du début du X$^{e}$ siècle (Langouët *et al.* 1977 et 1978), et de Planguenoual (22) (Langouët, 1984) en présentent, de même que Guipel, de faibles pourcentages. Ceci tend à montrer que ces trois ateliers fonctionnaient au début de l'apparition des lèvres en bandeau.

Cette étude est un exemple de l'efficacité d'une étroite collaboration entre les disciplines archéologiques et archéométriques. La datation des poteries est un élément essentiel dans la compréhension de l'évolution des formes et des techniques. Parallèlement, la reconstitution des modes de chargement est à même de contribuer à une meilleure connaissance des pratiques artisanales anciennes.

## BIBLIOGRAPHIE

Carte géologique de la France au 1/80 000, n°75, feuille de Rennes, 3ème édition, Paris 1959.

**DE BOUARD M., 1976,** La céramique de Doué-la-Fontaine (IX$^{e}$ - XI$^{e}$ siècles), *Archéologie Médiévale*, t. VI, p. 247-286.

**LANGOUET L., MOUTON D., NOURRY-DENAYER F., POZZI J.-P., RICQ M. et VALLADAS H., 1977,** La poterie carolingienne de Trans (Ille-et-Vilaine), *Dossiers du Ce.R.A.A.*, 5, p. 109-142.

**LANGOUET L., MOUTON D., NOURRY-DENAYER F., POZZI J.-P., RICQ M. et VALLADAS H., 1978,** Fouille et datation d'un four médiéval à Trans (Ille-et-Vilaine), *Revue d'Archéométrie*, 2, p. 65-87.

**LANGOUET L. et MOUTON D., 1978,** La poterie carolingienne de Trans, *Medieval ceramics*, vol. 2, p. 23-29.

**LANGOUET L., FAGUET G. et VILBERT L.R., 1979,** Chronique de prospection archéologique 1979 dans les arrondissements de Dinan et Saint-Malo, *Dossiers du Ce.R.A.A.*, 7, p. 105-111.

**LANGOUET L., BUCUR I., GOULPEAU L., 1983,** Les problèmes de l'allure de la courbe de variation séculaire du champ magnétique terrestre en France : nouveaux résultats archéomagnétiques, *Revue d'Archéométrie*, 7, p. 37-44.

**LANGOUET L. , 1984,** Un atelier de potier des environs du X$^{e}$ siècle au Frêche Clos en Planguenoual (22), *Dossiers du Ce.R.A.A.* , 12, p. 1-9.

**LANOS P. , QUERRE G. et LEROUX G. , 1986,** Un atelier de potier carolingien à Launay-Margat en Guipel (Ille-et-Vilaine), fouille, datation et production, *Dossiers du Ce.R.A.A.* , 14, p. 53-71.

**LE GOFF M. , 1975,** *Inductomètre à rotation continue pour la mesure des faibles aimantations rémanentes et induites en magnétisme des roches*, Thèse, Dipl. Ing. CNAM, Paris, 85 p.

**ROGERS J. , FOX J.M.W. and AITKEN M.J. , 1979,** Magnetic anisotropy in ancient pottery, *Nature*, 277, p. 644-646

**THELLIER E. , 1981,** Sur la direction du champ magnétique terrestre en France durant les deux derniers millénaires, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 24, p. 89-132.

Les tableaux de corrections des dates 14C effectués par le "groupe de Tucson", Application à l'Archéologie, *Revue d'Archéométrie*, supplément 1983, 99 p.

# X - LES MONNAIES

L'établissement de la courbe des variations séculaires en orientation du CMT nécessite l'utilisation de matériaux magnétiques bien datés. C'est pourquoi la découverte de l'existence d'un magnétisme rémanent dans les monnaies (Tanner, 1979 ; Hoye, 1981 et 1983 ; Tarling, 1982 et 1983), qui sont des matériaux particulièrement bien datés, a suscité dès le départ un vif intérêt. Mais les études menées jusque-là n'ont porté que sur des lots de monnaies ne présentant aucune homogénéité tant en ce qui concerne la date de frappe qu'en ce qui concerne l'emplacement de l'atelier. C'est pourquoi les résultats obtenus sont difficilement corrélables entre eux. Les principales conclusions peuvent se résumer ainsi :

- Les monnaies anciennes frappées ont acquis leur aimantation avec le droit (effigie de l'empereur) tourné vers le bas confirmant que le coin dormant était toujours le coin de droit.

- Les inclinaisons observées sont généralement trop fortes pour correspondre à celle du CMT à la date de frappe et à l'emplacement de l'atelier.

- L'aimantation des monnaies saucées a été perturbée par l'opération d'argenture effectuée probablement à chaud. Les faibles inclinaisons mesurées dans ce cas pourraient correspondre à un sauçage en position verticale.

Dans le but de mieux comprendre l'origine et la nature de cette aimantation rémanente observée dans les monnaies, une étude a été menée sur un ensemble cohérent fourni par G. Aubin, Directeur des Antiquités Historiques des Pays de Loire. Il s'agit d'un enfouissement de plusieurs millier d'*antoniniani* trouvé à Guéhenno (Morbihan) et contenant entre autres près de 2000 monnaies au type de revers *PAX AVG* dont 275 frappées avec les mêmes coins de droit et de revers. L'étude archéomagnétique de ce dernier lot cohérent de 275 monnaies frappées a fait l'objet d'une publication, en collaboration avec L. Goulpeau et L. Langouët, qui paraîtra dans *Archaeometry* durant l'été 1987. Bien que le texte de cette publication , joint en annexe de ce chapitre, fasse la synthèse des recherches menées sur ce sujet, il n'est pas inutile de résumer ici les principaux résultats acquis en ce qui concerne les possibilités d'utilisation des propriétés archéomagnétiques des monnaies.

Le problème posé était de savoir s'il existait une correspondance entre la direction de l'aimantation des monnaies et celle du CMT ambiant. Connaissant l'avantage que procure la mesure du couple inclinaison-déviation dans l'interprétation des données archéomagnétiques obtenues à partir de matériaux déplacés, on a cherché à associer aux monnaies un repère permettant la mesure de cette déviation $\Delta$ . Puisque le coin de droit (effigie de l'empereur) était toujours fixé sur une enclume n'ayant pas elle-même de raison d'être déplacée au cours de la frappe (fig. X-1), on peut prendre comme axe de référence fixe le bord quasi-linéaire du bandeau des couronnes radiées visibles sur le droit des monnaies. De plus, on a de bonnes raisons de penser que les flans étaient frappés sur un plan horizontal matérialisé par le coin fixé sur l'enclume. Dans ce repère (fig. X-2) sont mesurés l'inclinaison I entre la direction d'aimantation et sa projection orthogonale sur le plan d'aplatissement de la monnaie, la déviation $\Delta$ entre cette projection et l'axe x , et le moment magnétique M. Les mesures ainsi effectuées ont permis de confirmer le fait que l'aimantation est dirigée vers le droit des monnaies. Si cette aimantation est bien acquise selon l'orientation vers le bas du CMT dans l'hémisphère nord, on voit là encore que le coin de droit correspond bien au coin dormant.

La représentation dans un diagramme polaire des directions d'aimantation (I, Δ) montre une distribution autour de l'axe vertical (*cf.* fig. 2 et 3 de l'article). La statistique de Fisher appliquée à une telle distribution donne :

$$I = 89°3 \sim 90° \qquad \alpha_{95} = 1°4 \qquad k = 43,9$$

L'utilisation de la déviation associée à l'inclinaison a ainsi permis la représentation réelle de la direction de l'aimantation dans l'espace. Les fortes inclinaisons observées par Tarling (1982) et Hoye (1983) ne sont dues en fait qu'à la représentation unidimensionnelle de la direction de l'aimantation. Si la distribution des vecteurs est fishérienne , l'allure de l'histogramme des inclinaisons seules doit être décrite par la fonction de fréquence de la statistique de Fisher :

$$f(\theta) = \sin\theta \ . \exp(k \cos\theta)$$

$\theta$ étant le demi-angle au sommet par rapport à la verticale (oz).

La dérivée de la fonction f ($\theta$) s'annulle lorsque :

$$\cos\theta - k \sin^2\theta = 0$$

Cette équation admet pour solution :

$$\theta = \arccos\left( (-1 + \sqrt{1 + 4k^2}) / 2k \right)$$

avec k = 43,9 on obtient $\theta = 8°6$ , soit I = 81°4 si on prend l'angle complémentaire par rapport au plan de la monnaie.

Cette valeur correspond bien à l'inclinaison de 82° donnée par le maximum de l'histogramme en figure 1 de l'article en annexe. Bien que la fonction f ($\theta$) ne décrive pas parfaitement la distribution observée, on peut tout de même noter une très bonne concordance (Fig. X-3). Les fortes valeurs de l'inclinaison conduisaient Tarling et Hoye à supposer que le champ était localement verticalisé par la présence de coins en acier ou chemisés d'acier. En fait, l'aimantation étant distribuée autour de la verticale, il paraît beaucoup plus vraisemblable que l'orientation soit liée à l'axe de propagation de l'onde de choc résultant de la frappe. La dispersion observée proviendrait alors de la non-reproductibilité exacte du geste de frappe d'une monnaie à l'autre.

Ainsi, l'archéomagnétisme des monnaies frappées ne peut pas servir à la construction de la courbe de référence des variations séculaires du CMT. Par contre, il peut fournir des indications d'ordre technologique comme l'identification de la face correspondant au coin dormant.

L'origine et la nature des porteurs de l'aimantation font l'objet d'une étude détaillée dans les paragraphes - corrélation entre l'intensité d'aimantation et la composition en fer, aimantation isotherme à saturation et distribution interne de l'aimantation - de l'article donné en annexe.

Si l'utilisation archéomagnétique des monnaies frappées à des fins de datation reste impossible, on peut se poser la question de savoir ce qu'il en est des monnaies coulées. Tarling (1982) a montré l'existence d'une aimantation rémanente faible, avec une inclinaison de 28°, sur un As républicain. Souhaitons qu'à l'avenir on puisse disposer d'ensembles cohérents en lieu de fabrication et en date pour répondre à une telle question.

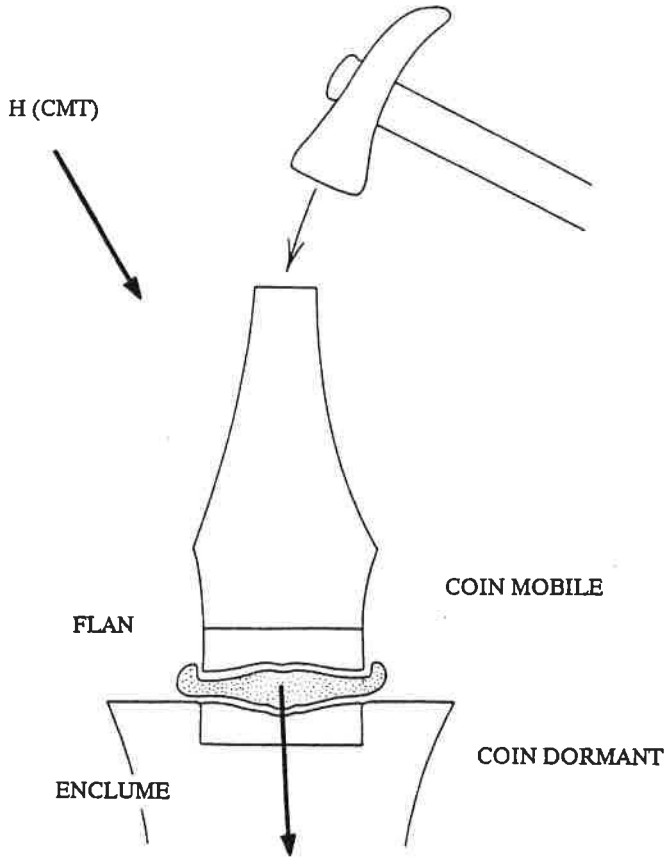



**Fig. X-1** : Schéma de principe de la frappe d'une monnaie (Rutter, 1983).

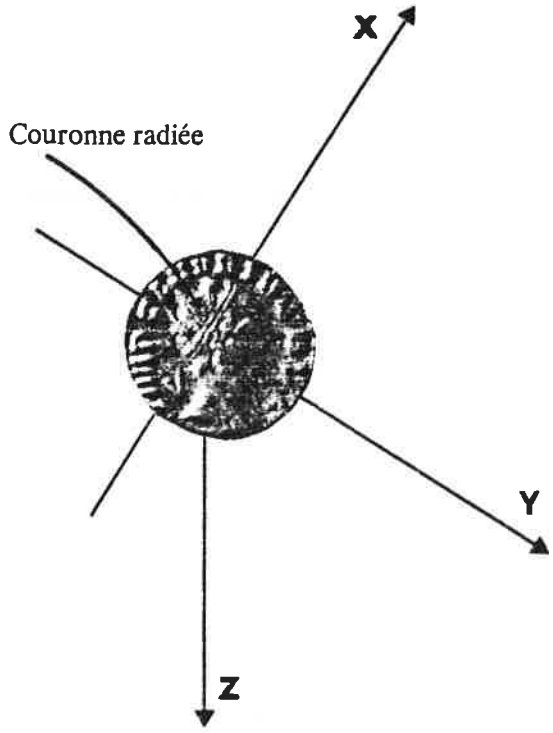
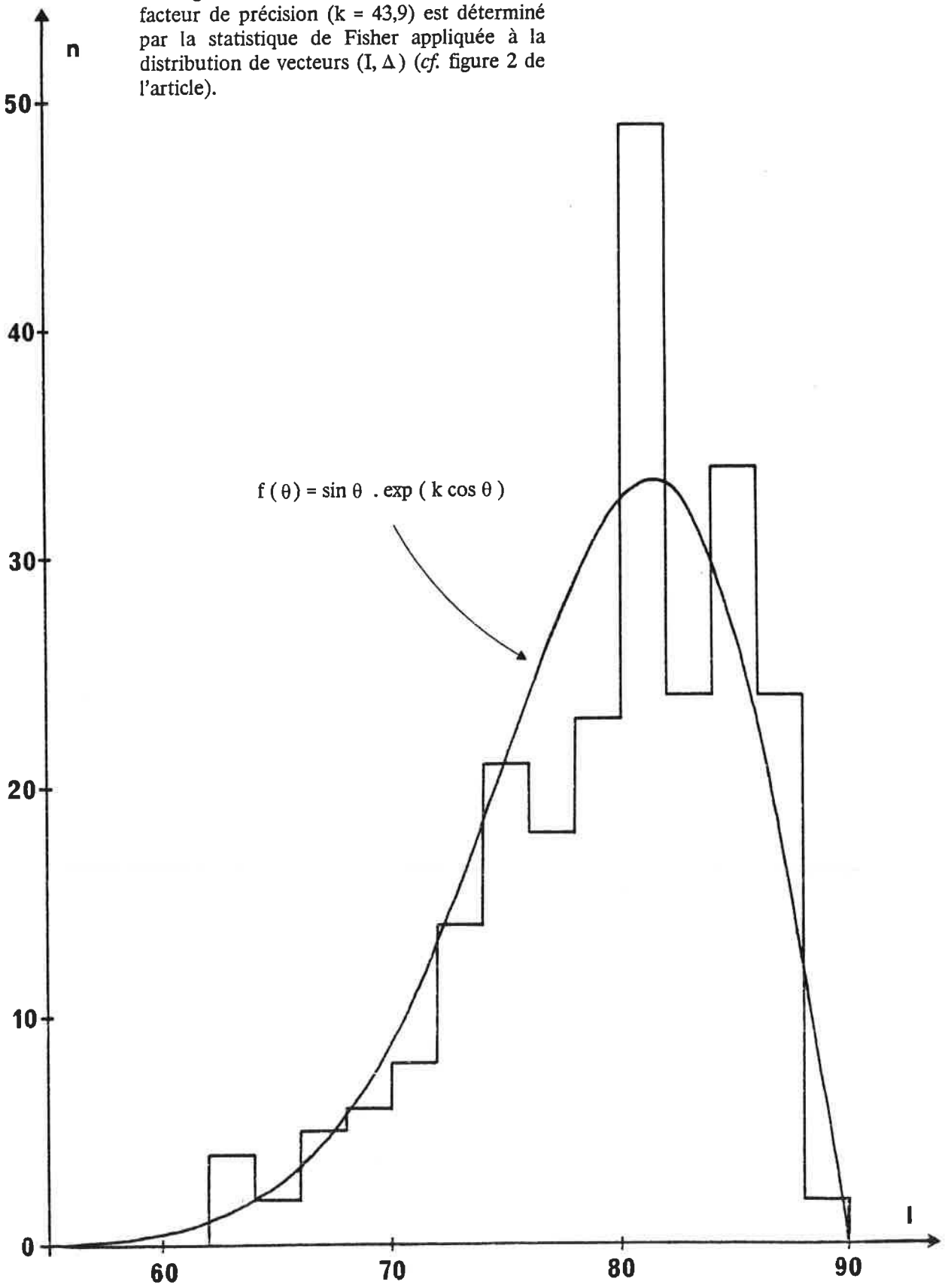



**Fig. X-2** : Repère (oxyz) associé aux monnaies. L'axe x est placé parallèlement au bord de la couronne radiée (visible sur le droit) ; l'axe z est perpendiculaire au plan de la monnaie.

Fig. X-3 : Lissage par la fonction f de l'histogramme des inclinaisons mesurées. Le facteur de précision (k = 43,9) est déterminé par la statistique de Fisher appliquée à la distribution de vecteurs (I, Δ) (*cf.* figure 2 de l'article).



# THE REMANENT MAGNETIZATION OF ANCIENT STRUCK COINS

L.P. GOULPEAU , P. LANOS and L. LANGOUET

*laboratoire d'archéométrie*
*Université de Rennes I (France)*

## ABSTRACT

Magnetic and other measurements are reported for the Guehenno-II gallo-roman hoard (56, France) which, amongst several thousand *Tetricus antoniniani*, contains 275 coins struck with the same dies both for obverse and reverse. The orientation of the remanent magnetization is systematically directed outwards from the obverse confirming the identity of the anvil die with the obverse. The magnetization vector is statistically distributed around the vertical axis giving no indication of the geomagnetic inclination at the time of striking. Consequently ancient struck coins cannot be used for dating. The origin of the remanent magnetization was investigated using several approaches : correlation with iron content, saturation isothermal magnetization, internal homogeneity of magnetization and iron content.

## INTRODUCTION

During recent years there have been several papers (Tanner, 1979 ; Hoye, 1981 ; Tarling, 1982 ; Hoye, 1983 ; Tarling, 1983) on the remanent magnetization of ancient coins and these have drawn the attention of reseachers to the possibility of such studies. Up to the present time these studies have been carried out on series of coins chosen from public or private collections, but all these series were disparate both by the mint and by the minting date. Consequently, it was difficult to understand and to explain the results obtained and the only definite conclusions from studies are the following :

- The ancient struck coins had been magnetized with the Emperor's head downwards so that the anvil die was always the obverse.

- The observed inclinations were generally steeper than would be expected for the inclination of the geomagnetic field at the mint location at the time.

- The magnetization of silvered copper coins had been disturbed during the silvering.

But the exact physical nature of the involved phenomenae remains hypothetical. For this reason we undertook a study of this type with a monetary series coherent both in date and place of minting.

At our request, the Direction des Antiquités historiques des Pays de Loire put at our disposal 275 third century radiate imitations from the Guehenno-II hoard. This hoard of several thousand *antoniniani*, found in Brittany, contains amongst them *c.* 2000 PAX AVG reverse type coins of which 275 were struck with the same obverse and reverse dies. Those studied here are divided as follows :

- 240 coins were used for the systematical study of the remanent magnetization.

- 20 coins were transmitted to J.N. Barrandon of the Centre J. Babelon to study the correlation between iron content (by neutron activation) and magnetization intensity.

- 10 coins were employed in demagnetization and remagnetization studies.

- 5 coins were destroyed by progressive solution in dilute nitric acid to study the decrease in magnetization, as a function of the decrease in iron content.

REMANENT MAGNETIZATION

The magnetization measurements were performed with a Schonstedt Instrument Company spinner magnetometer (DSM1) of which the sample holder has a residual magnetization of *c.* $0.5 \times 10^{-8}$ $Am^2$. Since previous measurements had shown the very low magnitudes of the remanent magnetization to be measured (from 1.2 to 2 $\times 10^{-8}$ $Am^2$), it was necessary to develope a plexiglas sample holder of which the residual magnetization was as low as $0.1 \times 10^{-8}$, thus only 5-8% of the value of the remanent magnetization in the coins under study.

The measurements show that the remanent magnetization is always (100%) oriented from reverse to obverse and therefore all the studied coins were struck with the obverse die underneath, fixed into the anvil. Consequently, the obverse drawing had fixed orientation in the horizontal plane as long as the block holding the anvil with the obverse die was not displaced during the striking process. Thus, we can use certain details from the obverse drawing (for example the quasi-linear border of the radiate crown) as a reference for the orientation in the horizontal plane and define a deviation angle $\Delta$ between this line of reference and the projection of the vector of the remanent magnetization in this plane.

The measured inclinations, of which the occurence histogram is given in figure 1, were generally steeper than would be expected for the likely inclination of the terrestrial magnetic field (TMF) in Brittany at the time. However, the histogram can lead us to error if we interpret the maximum of the fitted curve as the dominant occurence. In figure 2, we have plotted each pair of values ($I$ , $\Delta$), measured for each of the 240 studied coins, in a polar co-ordinate system. These points are statistically distributed around the point of origin ($I = 90°$). The radial density obtained by dividing the number of points in a centered coronet by its surface, conforms to a Gaussian distribution with a standard deviation equal to 8° (figure 3). It can be seen then that the maximum of the fitted curve observed on figure 1 is produced only by the conjonction of decreasing function (the centered Gaussian distribution of the density of the points) and an increasing one (the centered coronet surface for an increasing radius). This effect is in every respect similar to that observed in the theoritical studies of the distribution versus distance from production site of certain manufactured artefacts (axes, ceramics, etc) by random walk processes (Hodder, 1976).

We might have discussed this in terms of a Fisher distribution and considered figure 2 as a projection over a horizontal plane of the intersections of the magnetization vectors measured for each coin with a unit sphere. The Fisher statistics applied to such a plot, gives the following results :

$I = 89°3 \sim 90°$ , $\alpha_{95} = 1°4$ , $k = 43.9$

The histogram of figure 1 is thus that of radial frequencies of which the maximum must appear at 81°4 according to the Fisher statistics, in good agreement with the 82° value read on the curve.

The angular occurence histogram (figure 4) shows the random orientation of the horizontal component of the remanent magnetization. However this result possesses a very low level of reliability because with a quasi-vertical magnetization the horizontal component is of the same order of magnitude as the residual magnetization of the sample holder. The poor reproducibility of the experimental data on the deviation $\Delta$ corrobates this remark.

Consequently, a first result is the statistical distribution of the remanent magnetization around the vertical axis which is, in all probability, co-linear with the propagation axis of the shock-wave resulting from the striking impulse of the hammer-blow. Consequently, study of the remanent magnetization of struck coins cannot be used for dating.

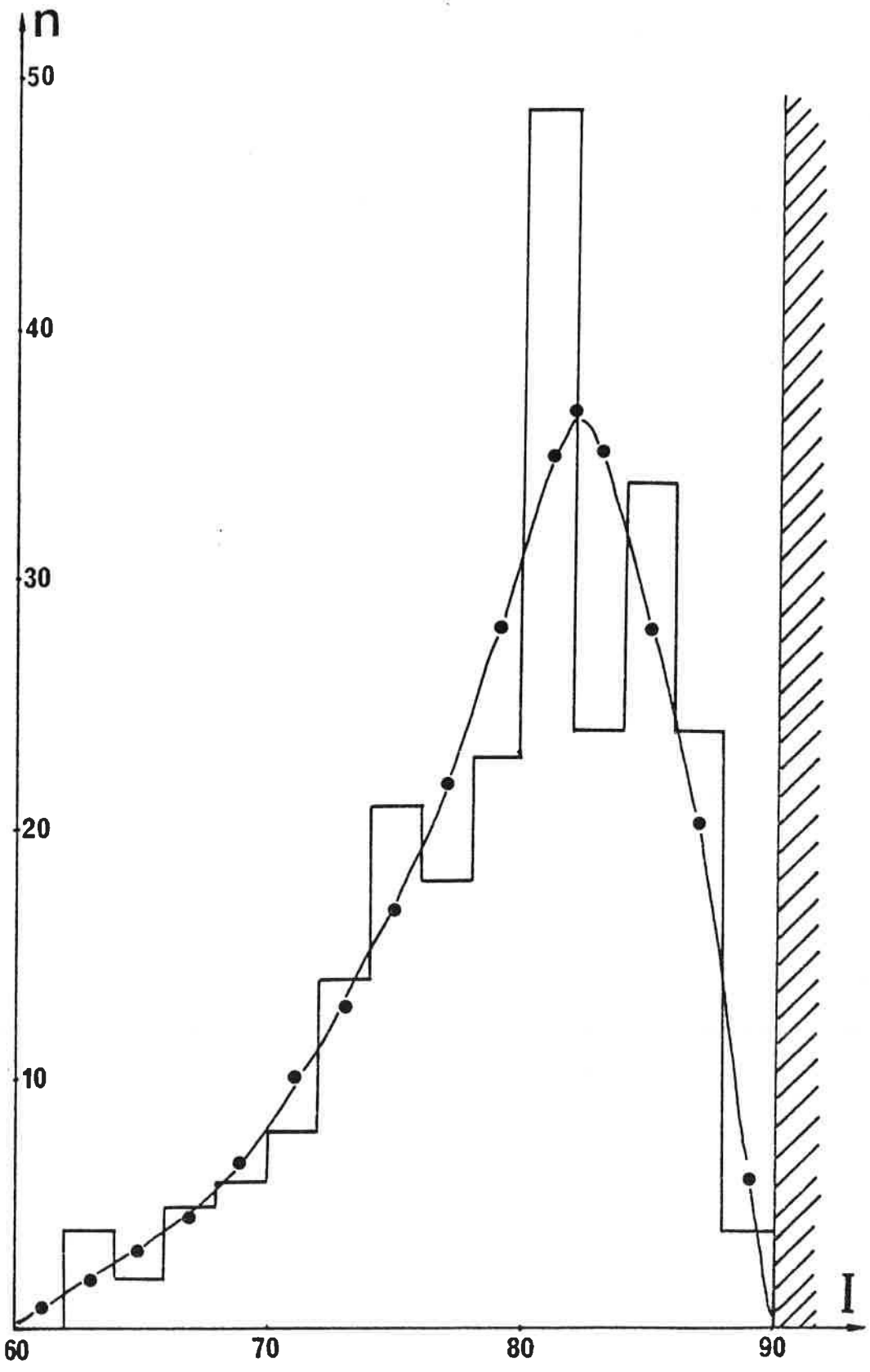



Fig.1 : Histogram of inclinations measured for 240 coins from the Guehenno-II hoard.

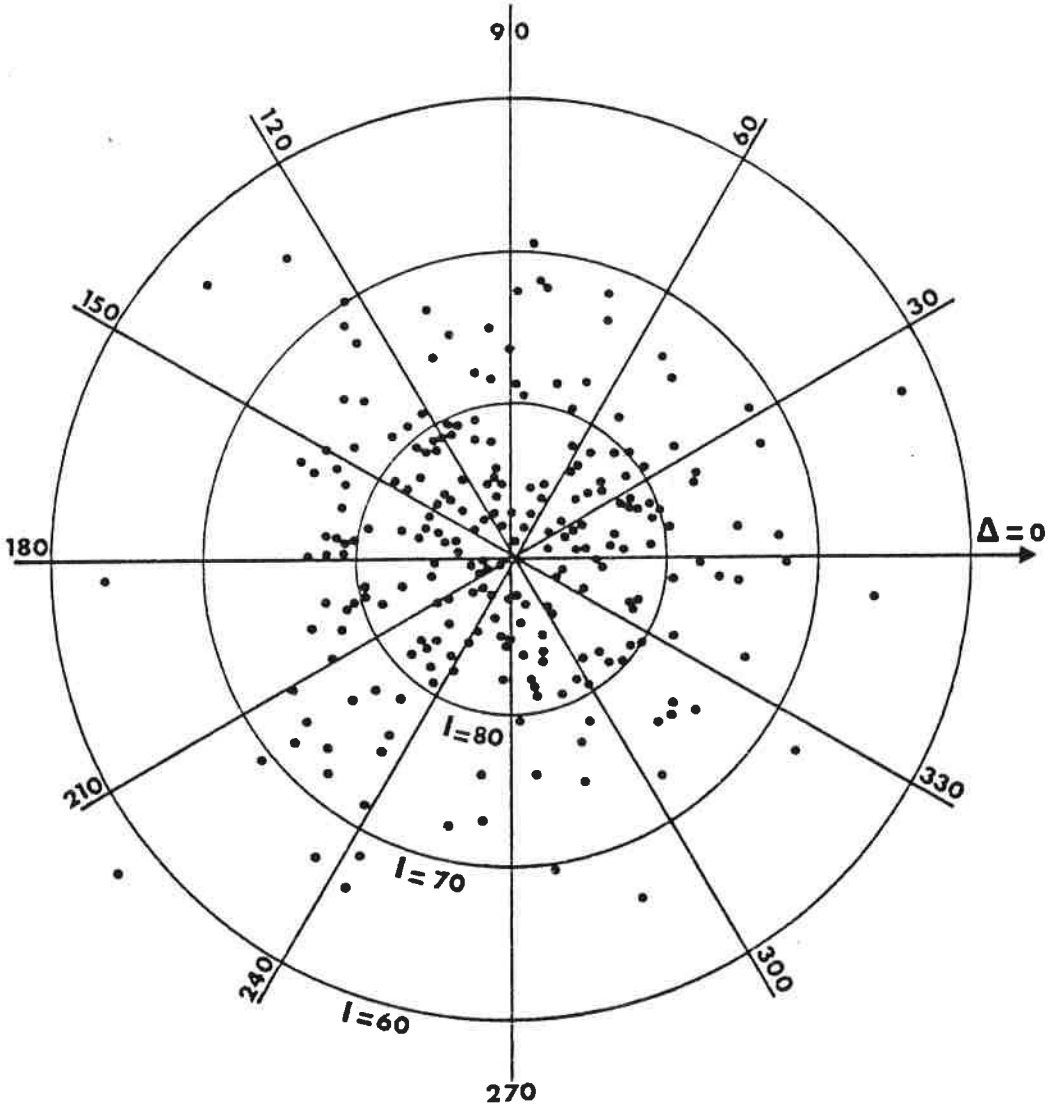



Fig.2 : Polar plot of the inclination-deviation values.

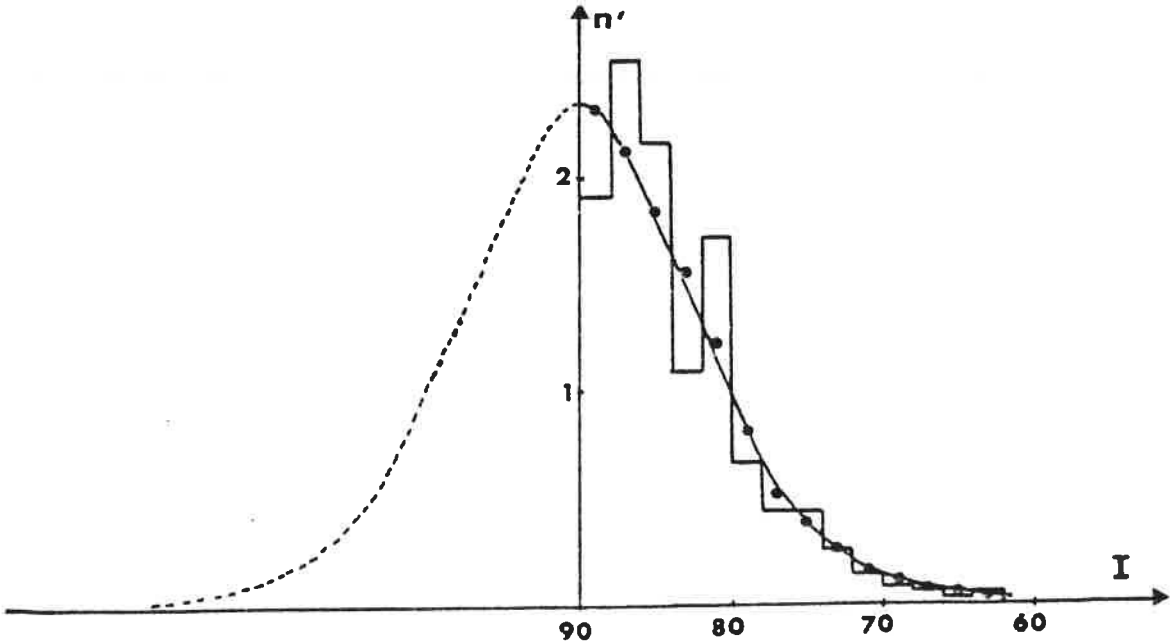



Fig.3 : Radial density of the points plotted on figure 2.

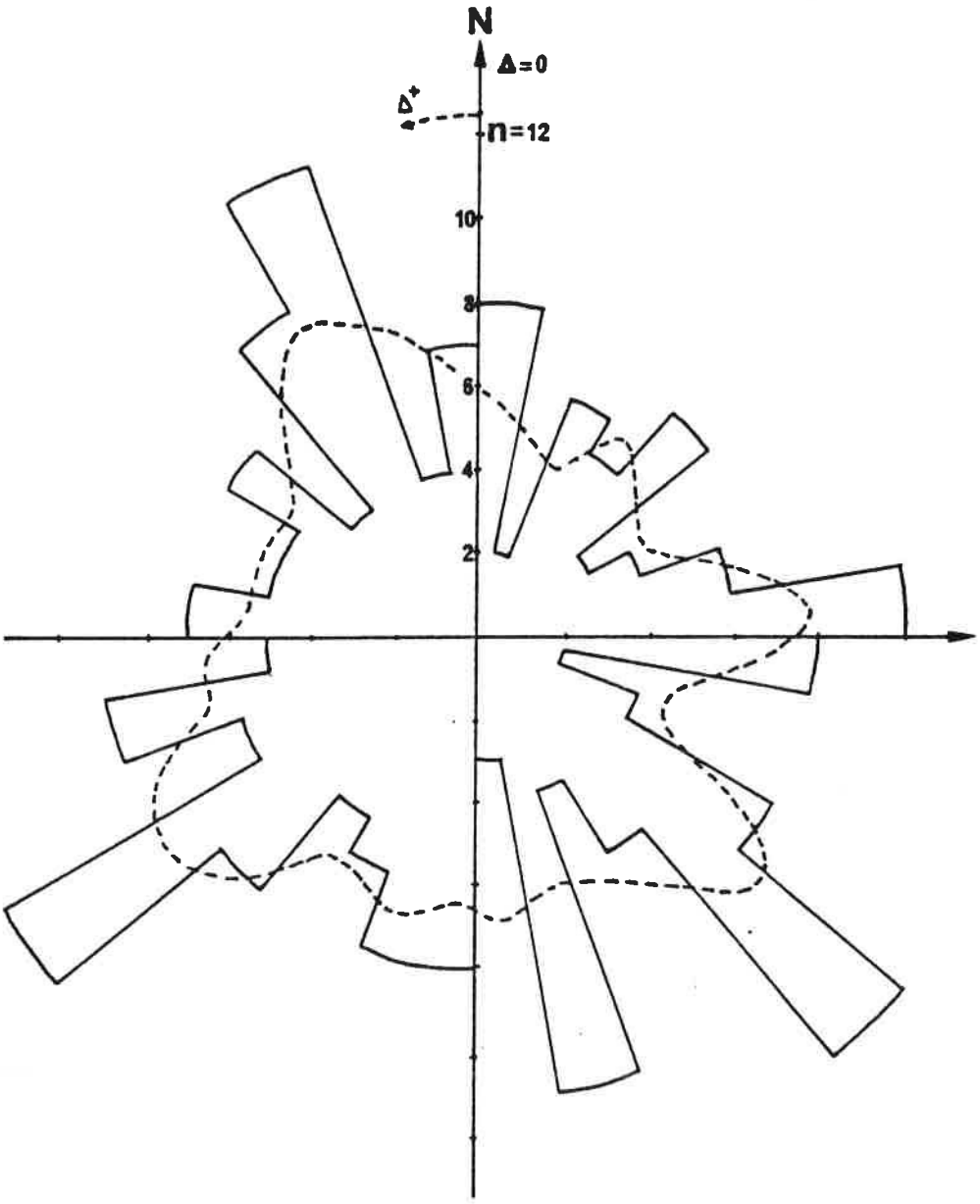



Fig.4 : Annular occurence histogram of the deviation values.

## CORRELATION BETWEEN MAGNETIZATION INTENSITY AND IRON CONTENT.

The occurence histogram of the magnetization intensity of the 240 coins is shown in figure 5 with a logarithmic scale. To understand the origin of the magnetization and to look into the possible correlation between this and the iron content of the coin, we had fourteen coins analysed by neutron activation. The results are listed in Table 1 of which the last column gives, in milligrammes for each coin, the ponderal iron content computed from these data.

TABLE 1

| Ref. | Weight (g) | M($10^{-5}$) (cgs) | Composition (% mol.) Cu | Pb | Sn | Zn | Sb | Fe | As | Iron % weight | Iron (mg) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| G1 | 0.820 | 0.364 | 76.9 | 16.0 | 6.86 | 0.70 | 0.21 | 0.092 | 0.085 | 0.0780 | 0.640 |
| G2 | 0.760 | 1.010 | 78.4 | 13.9 | 6.85 | 0.72 | 0.18 | 0.081 | 0.070 | 0.0696 | 0.529 |
| G3 | 0.770 | 0.235 | 78.1 | 14.1 | 6.92 | 0.72 | 0.18 | 0.120 | 0.072 | 0.1030 | 0.793 |
| G4 | 0.800 | 0.823 | 78.5 | 13.1 | 7.25 | 0.82 | 0.20 | 0.100 | 0.070 | 0.0864 | 0.691 |
| G5 | 0.678 | 0.496 | 76.1 | 15.2 | 7.66 | 0.78 | 0.20 | 0.150 | 0.072 | 0.1288 | 0.873 |
| G6 | 0.840 | 0.944 | 77.0 | 12.1 | 9.92 | 0.77 | 0.22 | 0.150 | 0.089 | 0.1303 | 1.094 |
| G7 | 0.992 | 1.710 | 77.2 | 14.4 | 7.55 | 0.67 | 0.20 | 0.125 | 0.075 | 0.1074 | 1.066 |
| G8 | 0.848 | 0.838 | 76.4 | 15.8 | 6.80 | 0.79 | 0.18 | 0.098 | 0.063 | 0.0839 | 0.711 |
| G9 | 0.645 | 1.590 | 78.6 | 13.4 | 7.00 | 0.77 | 0.17 | 0.120 | 0.070 | 0.1034 | 0.667 |
| G10 | 0.819 | 1.640 | 77.9 | 14.2 | 6.90 | 0.80 | 0.18 | 0.110 | 0.070 | 0.0946 | 0.774 |
| G14 | 1.397 | 4.240 | 82.8 | 10.2 | 6.75 | | 0.18 | 0.300 | | 0.2583 | 3.609 |
| G15 | 0.753 | 0.325 | 76.4 | 11.5 | 11.8 | | 0.27 | 0.260 | | 0.2252 | 1.696 |
| G16 | 1.174 | 1.740 | 77.5 | 16.1 | 6.20 | | 0.13 | 0.150 | | 0.1272 | 1.493 |
| G17 | 1.445 | 1.820 | 75.3 | 22.4 | 7.35 | | 0.18 | 0.100 | | 0.0796 | 1.150 |

The histogram of the molecular iron content is also plotted in figure 5. For both the magnetization intensity and the molecular iron content, the distribution functions are regular (pseudo-gaussian), the mean value and the standard deviation being respectively :

$\overline{M} = 1.6 \times 10^{-8}$ Am$^2$ $\qquad \sigma = 0.19$

%Fe = 0.128% $\qquad \sigma = 0.09$

The question of correlation between these two parameters (magnetization M and ponderal iron content P) was carried out. Figure 6 shows that the short range correlation is poor. However, indisputably, a long range correlation exists, for which the computed linear relation is :

$M = 11.4 \times 10^{-6}$ P with M in Am$^2$ and P in gramme.

Thus, it is certain that a relationship exists between the iron content and the intensity of the observed magnetization but this is not the only parameter which plays a part in such a process.

The cristallographic co-ordinates of the iron must also play a part (face-centered cubic $\gamma$-iron of antiferromagnetic structure versus ferromagnetic body-centered cubic $\alpha$-iron) as had already been foreseen by Hoye (1981 , 1983).

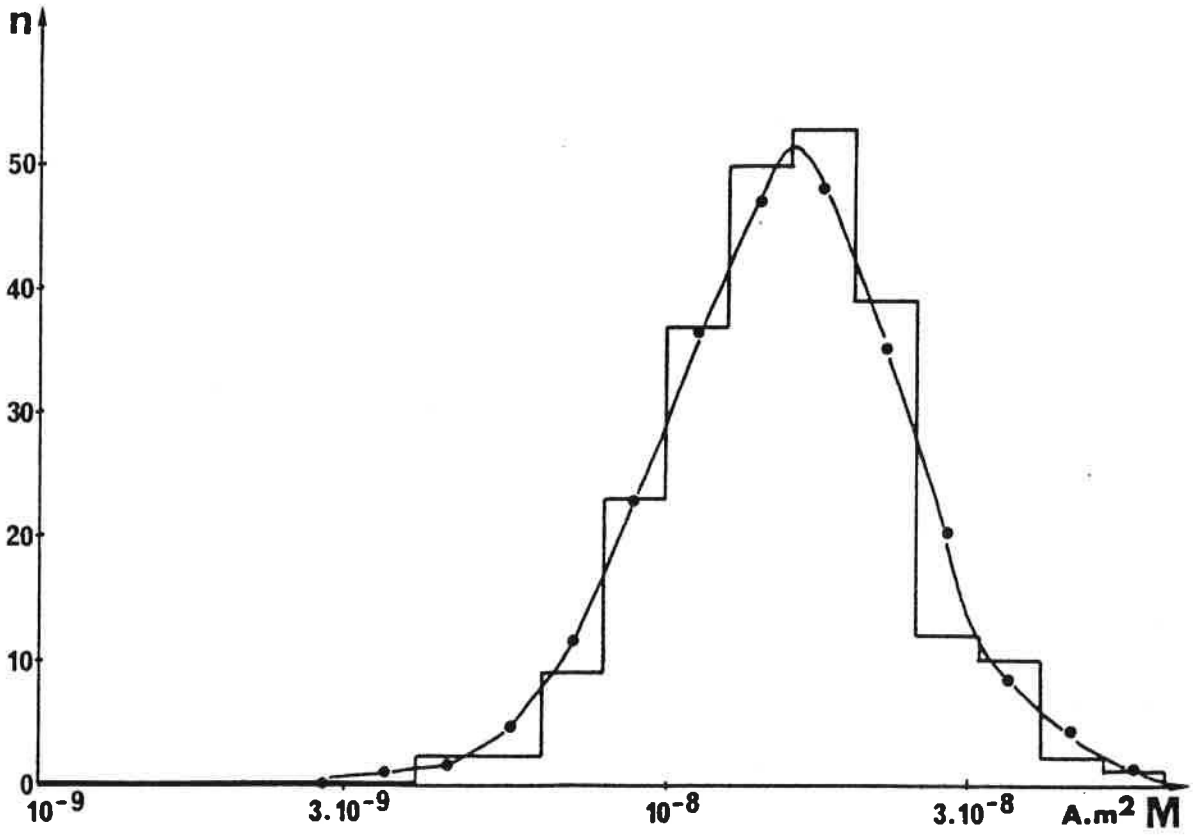
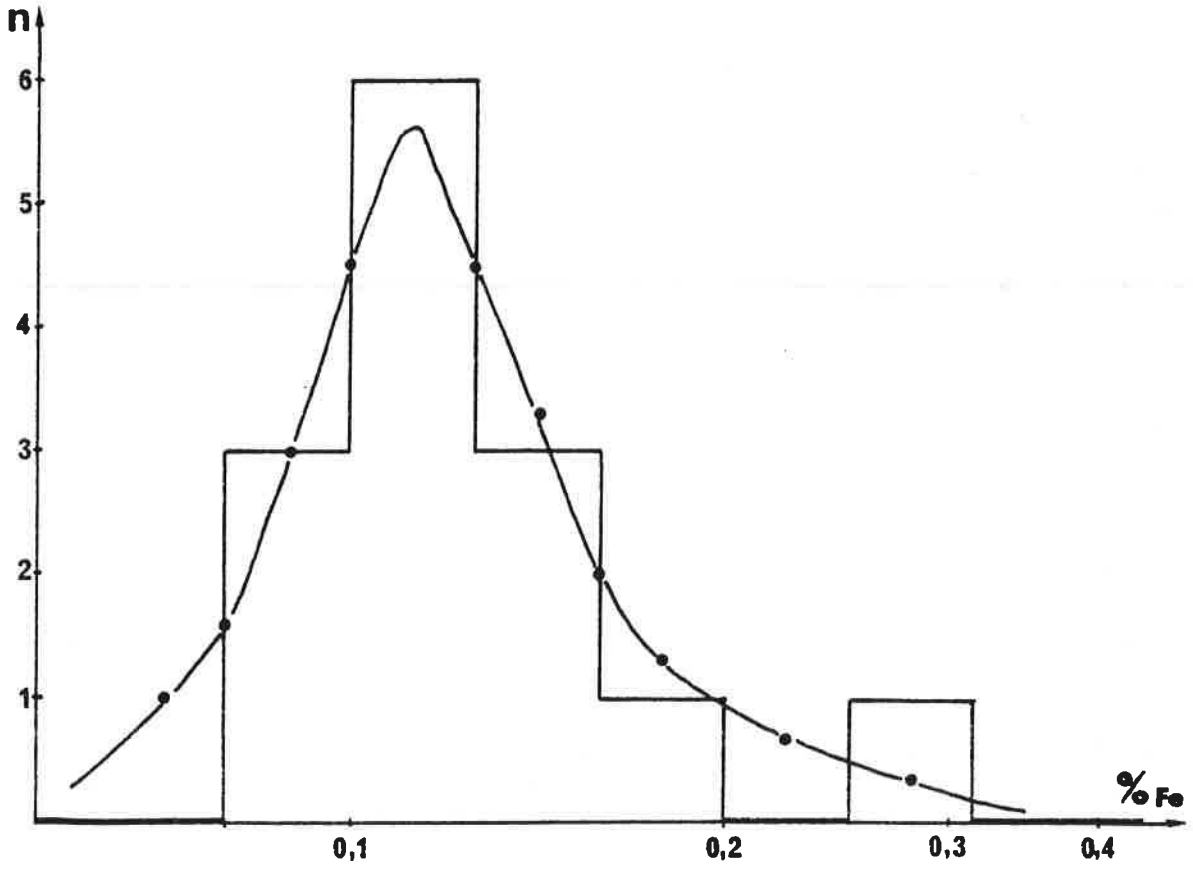



Fig.5 : Histograms of molecular iron content and of magnetization intensity.



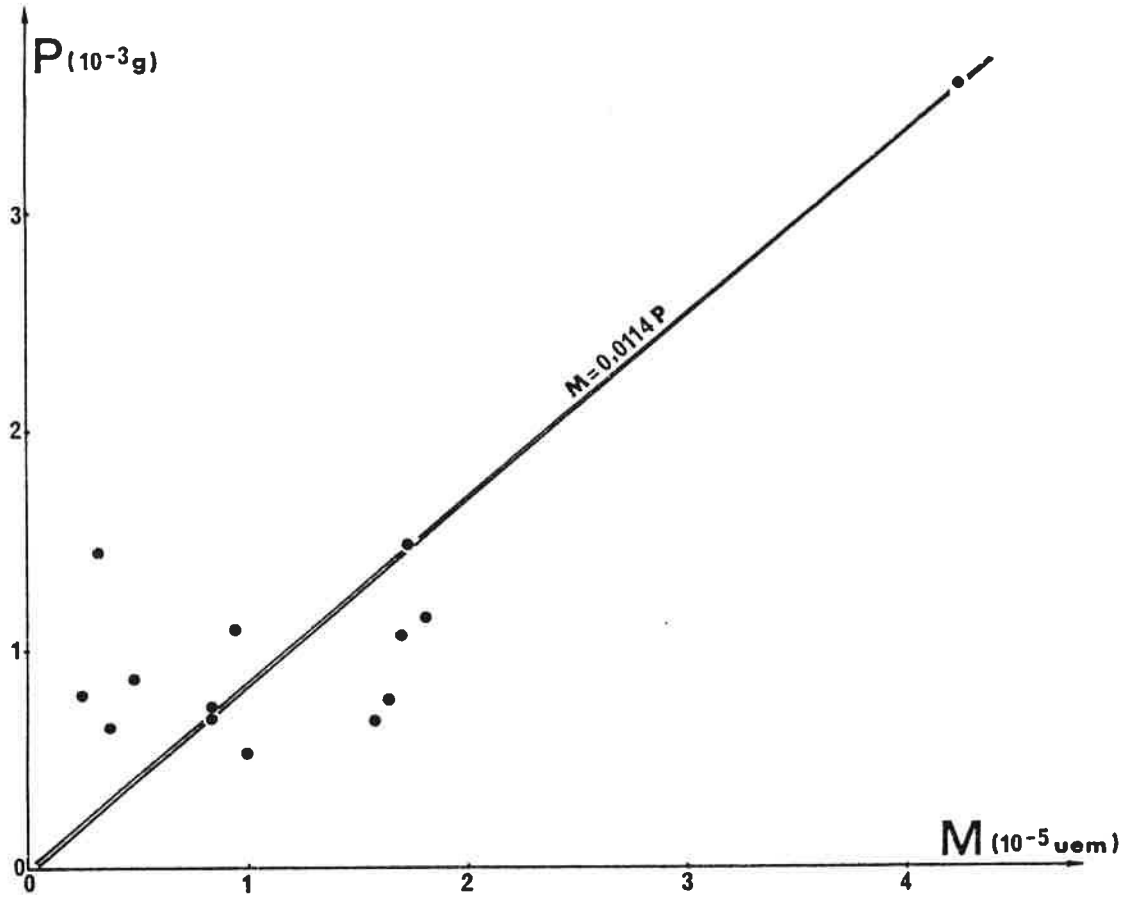



Fig.6 : Correlation between ponderal iron content and magnetization intensity.

## SATURATION ISOTHERMAL MAGNETIZATION

The way in which saturation isothermal remanent magnetization (SIRM) is approached is useful in indicating the nature of the remanence carriers. We have carried out an isothermal magnetization with increasing applied field for two coins. For one of the coin, the field was parallel to its plane and for the other it was perpendicular. The typical SIRM curves for the two cases are shown in figure 7. These curves reach saturation at 0.25T which is a value nearer to the magnetite (0.2T) than to the haematite value (more than 1T) and plainly different to that given by Hoye (1983) for a Greek coin from the 2nd century BC. The somewhat fortuitous similarity which appears between the magnetite behaviour and that of the presumably metallic iron precipitated in the bronze matrix, could be conjecturally explained on the basis of the similarity of the electronic grouping of the d-unpaired electrons on the outer layer of the atoms in the metallic iron and in $Fe^{2+}$ of the magnetite (4 unpaired electrons in each case).

Nevertheless a simulation performed by Hoye on a 1% iron-doped copper blank gave a 0.6T saturation field, which may be compared to the 0.55T value observed by ourselves with several virgin bronze blanks of modern manufacture. This value is explained by Hoye (1983) as typical for fine-grained particles such as iron microcrystallite embedded in a bronze matrix.

The two coins which were submitted to the SIRM process, had initially a low remanent magnetization, the inclination of which was respectively 53° (H parallel) and 72° (H perpendicular). During this process, we were able to follow the evolution of the remanent magnetization orientation (the curves on figure 8 show its reorientation up to the values of 0° and 90° respectively). Total reorientation is obtained with only 0.06T less than the field required for saturation.

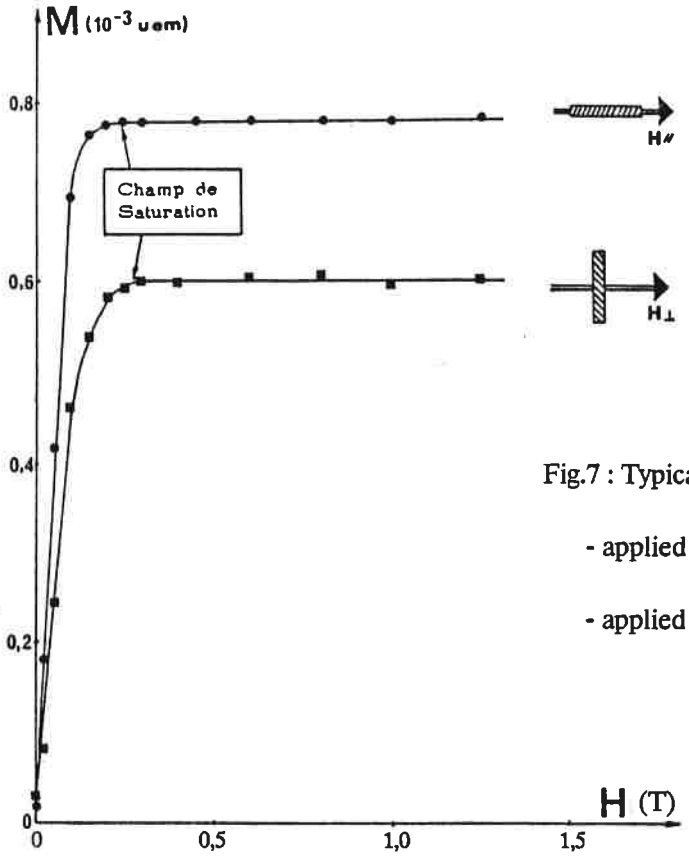



Fig.7 : Typical SIRM curves for two coins with :

- applied field parallel to the coin plane.
- applied field perpendicular to the coin plane.

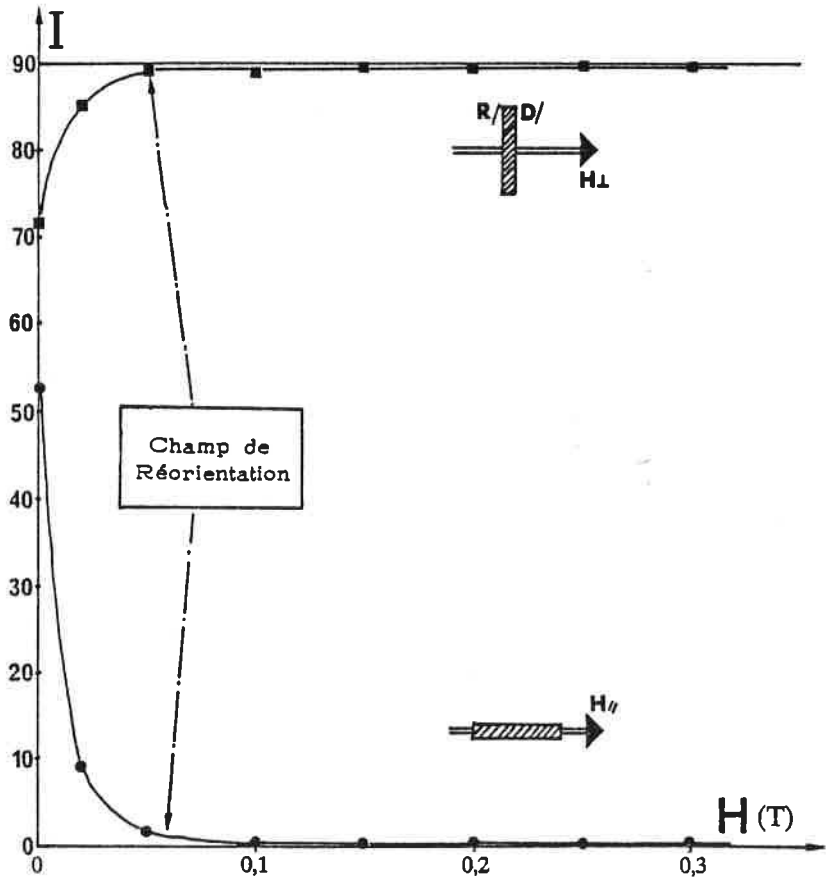



Fig.8 : Typical curves of reorientation of magnetization, under parallel or perpendicular applied field.

For the case of H parallel, the field was applied along an axis coinciding with the reference direction of the obverse pattern (the border of the radiate crown). The reorientation in the plane of the coin of the remanent magnetization given by the $\Delta$ evolution follows a variation similar to that of the inclination with a reorientation field of the same order of magnitude (0.08T).

The similarity of the values of the reorientation field shows that no anisotropy or easy magnetization axis exist. Hence these effects cannot be used to explain the divergence of the remanent magnetization obtained during striking from the vertical axis.

## THE INTERNAL DISTRIBUTION OF THE MAGNETIZATION

According to a hypothesis put forward by Hoye (1983) although iron is slightly soluble in molten copper (4%), it is insoluble when copper is at room temperature (Hansen, 1958). When the blanks are being made the iron present may dissolve in the copper in the melting pot before casting. During the cooling process the excess iron precipitates in the copper matrix as microcrystals of $\gamma$-iron in which no magnetization takes place. When the blanks are being cold-worked or struck, a part of the $\gamma$-iron transforms itself into $\alpha$-iron microcrystals, which could be magnetization carriers. However we may ask if this transformation is homogeneously distributed in the inside of the coin thus giving a regular magnetization or if the pressure gradient, resulting from the absorption of the striking shock-wave from the surface, induces a decrease in the percentage of the $\gamma$-iron transformed into $\alpha$-iron as with increasing distance from the surface?

In order to discover which of the two hypotheses was plausible, we gradually etched with nitric acid two coins which were obligingly sacrificed by the Direction des Antiquités Historiques des Pays de Loire. After each step of the etching the coins were weighed and their magnetization intensity measured.

If the transformation is homogeneous the drop in the measured remanent magnetization should be proportional to the loss of weight. In order to compare the results obtained with the two coins, we have normalized the weight P and the magnetization M with regard to their initial values before any etching ($P_0$ and $M_0$). The curves $M/M_0$ versus $P/P_0$ given on figure 9 show a non-linear decrease, supporting the second hypothesis. The concentration of the remanence carriers is evidently higher near the surface of the coin than on the inside. This is not due to the patina, because the previous elimination of this did not have any effect on the measured value of the intensity of the magnetization.

Before concluding, it was necessary to check whether there was any increase in iron content near the surface, due to corrosion or transport phenomena during burial. For this purpose, a coin was cut along the diameter ; the iron content on the cut-section was measured in relation to the depth from the surface, with an electron microprobe. The results, given in the figure 10, show an unchanging content, perhaps with a little reduction near the surface owing to corrosion. The overall iron content for the studied coin is 0.129% , the level of which is given in figure 10 by a dashed line. The agreement between these results is evident. The slightly decrease in the iron content near the surface reinforces the observed phenomena, since a lowering of the iron content corresponds to an increase in the percentage of the remanence carriers.

The second hypothesis is consequently the most plausible but unfortunately the minimum transverse size of the electron beam is too large compared to those of the iron microcrystals to permit the distinction between Fe$\alpha$ grains and the Fe$\gamma$ grains. Hence at present the direct confirmation of the variation of the Fe$\alpha$/Fe$\gamma$ ratio, decreasing from the surface to the core of the coin, is impossible owing to the technological limitations of the available apparatus.

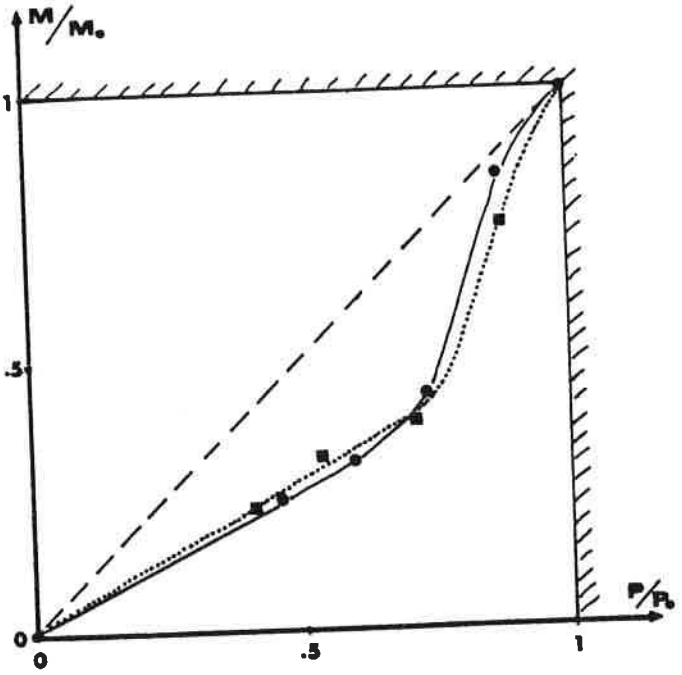



Fig.9 : Magnetization intensity versus weight for two coins progressively etched with nitric acid.

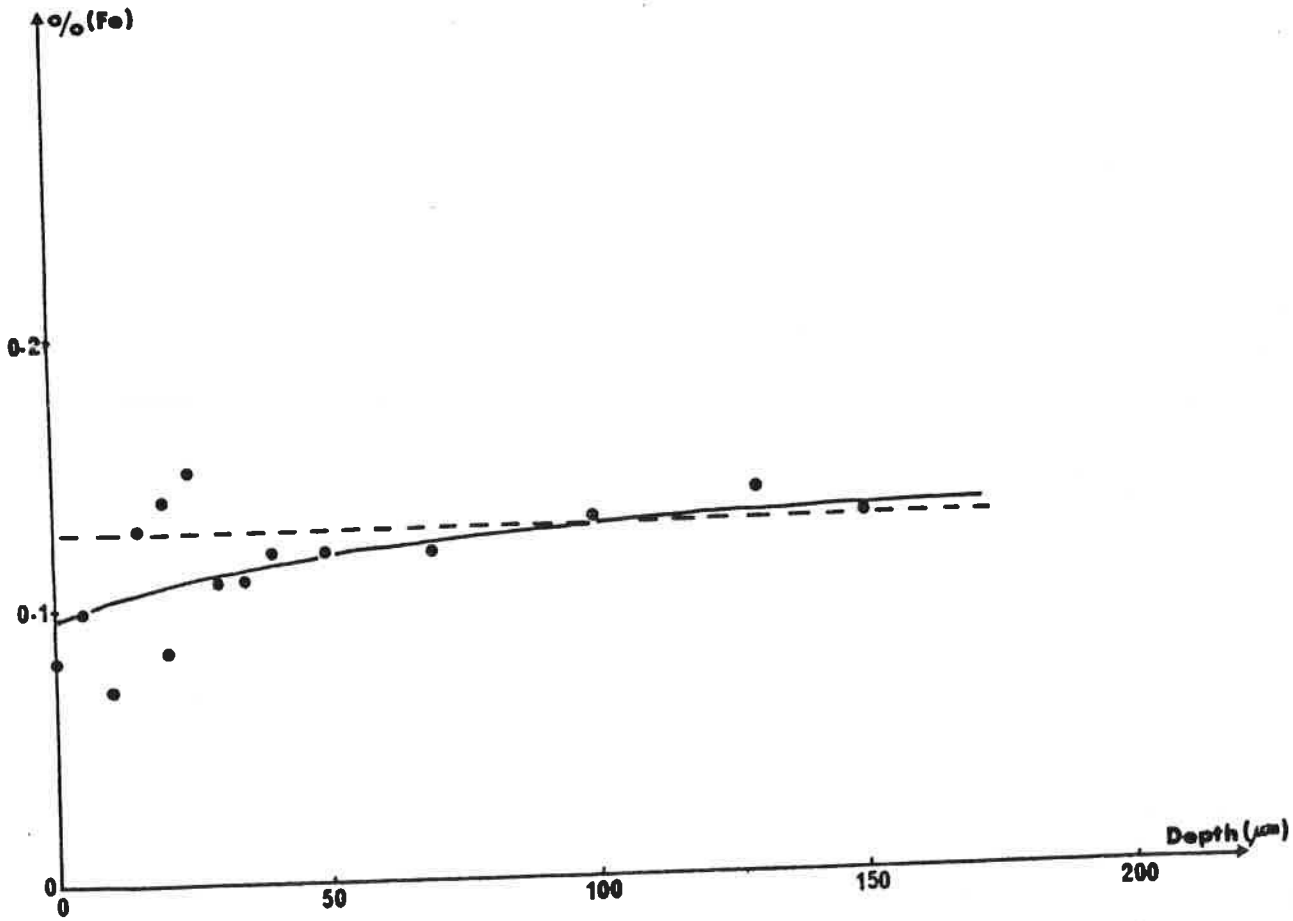



Fig.10 : Molecular iron content versus depth from surface obtained from a coin by electron microprobe measurements.

## CONCLUSIONS

The hypothesis put forward by Hoye (1983) concerning the precipitation of the γ-iron (face-centered cubic antiferromagnetic), followed by a Feγ-Feα transformation during the striking process, is corroborated by several new results :

- The iron content is only one of the parameters which plays a role in the acquisition of magnetization, there being a feeble correlation between the two. The crystallographic nature of the iron is another important parameter to take into account.

- The metallic form of the iron is confirmed by values of both the saturation and the reorientation fields. Indeed, these values are very much lower than those observed for iron oxides.

- The concentration of remanence carriers initially decreases rapidly with distance from the surface and then diminishes more slowly althought the iron content remains nearly constant in the bulk of the blank. Thus, it appears that the extent to which γ-iron is transformed into α-iron decreases from surface to core, as would take place if the efficiency of the Feγ-Feα transformation depended on the mechanical strain intensity. The shock-wave due to the striking impulse is absorbed in the copper matrix during its propagation from the surface, thus the intensity of the induced strain also decreases. Consequently, the Feα content diminishes in the interior of the coin.

Finally, the iron crystallizes into the form of γ-iron grains because this is the stable form at high temperature and the identity of the face-centered cubic structure, both for the copper and for the γ-iron, induces an epitaxial growth. When the temperature returns to normal room temperature the γ-iron crystallites are trapped in a metastable state and during the striking process, a Feγ-Feα transition takes place (like the well-known "martensic" transition which appears under work-hardening) and the coins acquire a "piezoremanent" magnetization.

But, however that may be, we can no longer hope to use the remanent magnetization of ancient struck coins to obtain reference points for geomagnetic field variation curves.

## REFERENCES

**Hansen M., 1958,** *Constitution of binary alloys*, 2nd Edn. New-York, McGraw Hill.

**Hodder I. and Orton C., 1976,** *Spatial analysis in archaeology*, Cambridge University Press.

**Hoye G.S., 1981,** Ancient coins as archaeomagnetic indicators?, *communication at the 21st symposium for Archaeometry*, Brookhaven, May 1981.

**Hoye G.S., 1983,** Magnetic properties of ancient coins, *Journal of Archaeological Science*, 10, 43-49.

**Tanner B.K., MacDowall D.W., MacCormack I.B. and Smith R.L.,** 1979, Ferromagnetism in ancient copper-based coinage, *Nature*, 280, 46-48.

**Tarling D.H., 1982,** Archaeomagnetic properties of coins, *Archaeometry*, 24/1 , 76-79.

**Tarling D.H., 1983,** The possible utilisation of the magnetization of archaeological metallic artefacts, *Journal of Archaeological Science*, 10, 41-42.

# Quatrième partie

# APPLICATIONS A L'ARCHEOLOGIE

# XI - ARCHEOMAGNETISME ET DATATION

Sans entrer dans une revue complète des recherches consacrées à la reconstitution de la variation séculaire du champ magnétique terrestre, il convient de présenter ici un aperçu des connaissances concernant la variation en inclinaison et en déclinaison, en France et dans les pays voisins durant l'époque historique. Nous laisserons de côté les recherches sur l'intensité qui n'ont pas encore débouché sur un tracé suffisamment précis utilisable à des fins de datation (Thellier et Thellier, 1959).

## A - LE CHAMP MAGNETIQUE TERRESTRE

La variation du CMT, en un lieu donné, est la superposition de variations transitoires, d'origine externe (influences solaires) et de variations séculaires dont l'origine se trouve à l'intérieur du globe. On définit le champ moyen comme étant le champ débarrassé de ses variations transitoires. Le champ moyen peut s'exprimer mathématiquement sous la forme d'un potentiel, fonction de la longitude, de la latitude et de la distance au centre de la terre du point considéré. Les constantes intervenant dans l'expression de ce potentiel sont déterminées à partir des mesures effectuées dans les différents observatoires mondiaux. Le potentiel peut s'exprimer sous la forme d'un développement en harmoniques sphériques dont le premier terme (en $1/r^2$), de loin le plus important, correspond au dipôle.

$$V_i = a \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=0}^{n} (a/r)^{n+1} \cdot P_n^m(\cos\theta) \cdot ( g_n^m \cos m\,\psi + h_n^m \sin m\,\psi )$$

a : rayon de la terre.

La différence entre le champ observé et le champ du dipôle constitue le champ non dipôle qui représente de 10% à 16% du champ magnétique total. Les périodes de variation de ce champ non dipôle sont estimées entre 10 et 1000 ans, tandis que celles mettant en jeu le champ dipôle sont au moins de 10 000 ans.

## B - HOMOGENEITE DE LA VARIATION SECULAIRE POUR L'EUROPE DE L'OUEST

La datation par l'archéomagnétisme nécessite en toute rigueur la connaissance à tout instant en un lieu donné, des composantes inclinaison, déclinaison et intensité du CMT. Les variations de la direction ont fait l'objet de mesures directes dès les années 1600 à Londres, Paris et Rome (Bauer, 1899). Les courbes montrent à l'évidence un bon parallélisme, l'écart provenant essentiellement de la différence de latitude entre les sites. Ce parallélisme se retrouve sur les courbes I - D obtenues par J.C. Tanguy *et al.* (1985) pour les laves de l'Etna (Sicile) et par G.S. Hoye pour le Vésuve (1981). L'examen de ces données pour les trois derniers siècles montre *a priori* une assez grande homogénéité des variations séculaires de la direction du CMT dans un domaine s'étendant de l'Italie aux Iles Britanniques. Cette observation légitime la réduction en un lieu donné (Paris par exemple) des mesures obtenues à partir de sites répartis sur cette aire géographique. Aussi, si une région manque de structures bien datées pour une époque particulière (par exemple le Haut-Moyen-Age pour la France), il est

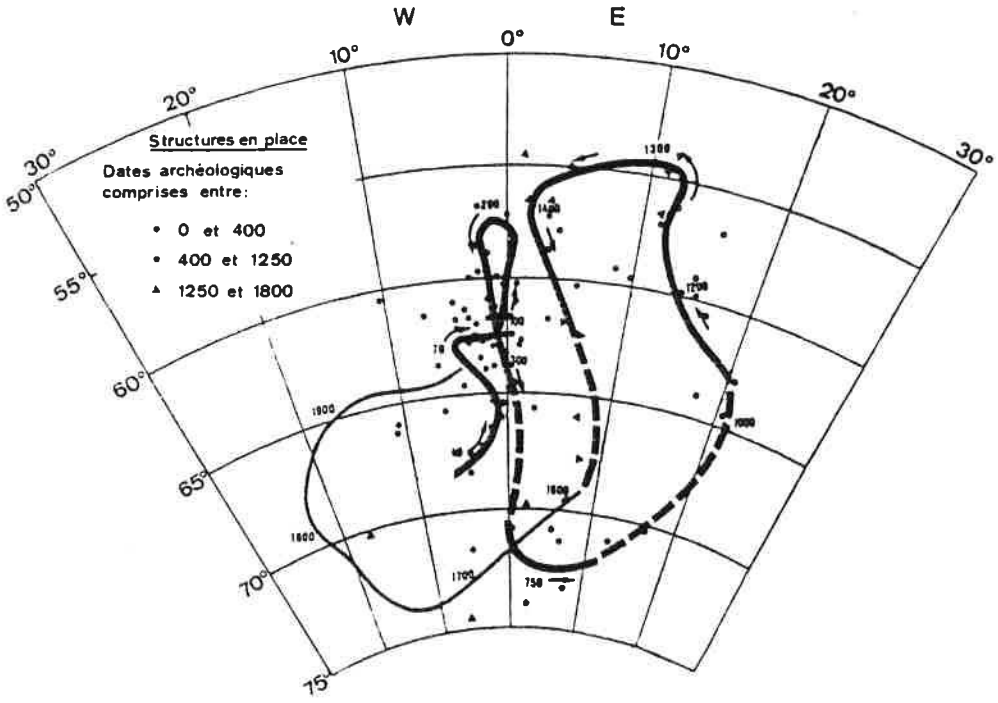



Fig. XI-1 : Courbe I - D à Paris (Thellier, 1981).

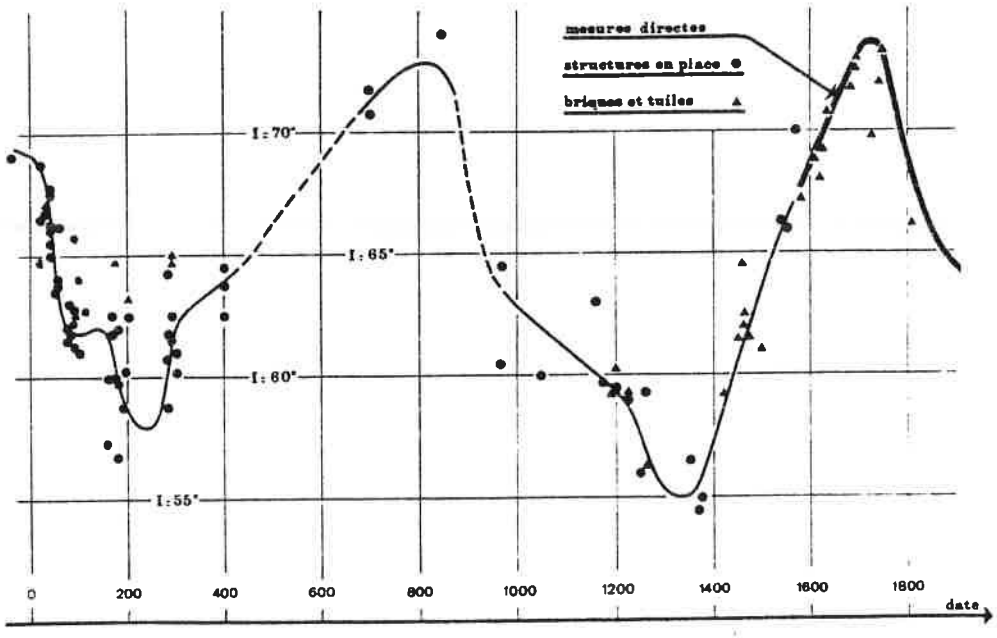



Fig. XI-2 : Courbe I = f ( t ) à Paris (Thellier, 1981).

possible de restituer la courbe à partir d'autres régions fournissant pour la même période des argiles cuites de date connue.

## C - LA VARIATION EN DIRECTION DU CMT, EN FRANCE, DURANT LES DEUX DERNIERS MILLENAIRES

L'archéomagnétisme s'applique, par définition, aux périodes archéologiques (de la protohistoire à nos jours). La reconstitution de cette variation nécessite l'existence de structures d'argile cuite bien datées par le contexte archéologique ou par les documents historiques. En faisant appel à un étalonnage préalable, la datation archéomagnétique apparaît comme une méthode de datation relative. Notons ici que la dénomination "datation absolue" appliquée à certaines méthodes scientifiques semble peu réaliste. En effet, ces méthodes que l'on pourrait qualifier d'objectives, ont recours à des données ou des mesures presque toujours liées à l'environnement (Giot et Langouët, 1984). Le travail du spécialiste consiste alors à évaluer et à corriger autant que faire se peut, toute influence de cet environnement sur les mesures.

Il n'est pas possible dans l'état actuel des connaissances de donner une loi mathématiquement formulable décrivant la variation du CMT. Contrairement à des méthodes de datation basées sur des phénomènes évolutifs simples (décroissance du taux de radiocarbone par exemple), la variation du CMT dépend d'un très grand nombre de paramètres. Aussi le comportement du phénomène apparaît-il comme imprévisible et aléatoire. Le seul moyen de reconstituer cette variation est en fait de la mesurer directement à partir de matériaux datés susceptibles d'en avoir fossiliser et conservé la grandeur.

Nous savons que les argiles cuites sont des matériaux ayant la propriété d'enregistrer la direction (de même que l'intensité) du CMT ambiant lors du refroidissement après cuisson. Ces matériaux sont généralement très bien cuits et de très grande stabibilité magnétique. Les mesures des éléments du champ sur de tels matériaux furent entreprises dès avant-guerre par E. Thellier (1938). La synthèse d'une quarantaine d'années de travail (Thellier, 1981) a permis à ce dernier de proposer une reconstitution de la variation de la direction, en France, pour des périodes allant du début de notre ère au XVIII$^{e}$ siècle (fig. XI-1 et 2). Les recherches sur la direction se poursuivent actuellement pour combler certaines lacunes et améliorer le tracé.

Les Laboratoires de Géomagnétisme de Saint-Maur et d'Archéométrie de Rennes (Langouët *et al.* , 1983 ; Bucur, 1986) ont récemment apporté des données nouvelles sur la direction du CMT aux époques gallo-romaines (0 - 400 ap. J.-C.) (fig. XI-3 et 4) et médiévales (fig. XI-6). Pour l'époque gallo-romaine, le nouveau tracé présente une double oscillation qui rappelle curieusement la première courbe proposée par E. Thellier en 1971. Afin de tenir compte des imprécisions, le tracé présente une épaisseur qui englobe le barycentre des points d'étalonnage (fig. XI-3). I.G. Hedley *et al.* (1984) propose de même un tracé en double oscillation pour l'ensemble des données françaises et anglaises (fig. XI-5). Cependant, l'amplitude de cette variation reste très faible et pose à nouveau le problème du lissage des courbes. Chez E. Thellier, le lissage consiste en une moyenne mobile effectuée par intervalle de temps. Chez I.G. Hedley, une méthode de moindres carrés utilisant les fonctions de spline permet de choisir, par validation croisée, le meilleur lissage pour un ensemble de points sélectionnés par une simulation Monte Carlo tenant compte des erreurs sur l'inclinaison (respectivement la déclinaison) et l'âge. Le résultat en est un écrêtement des valeurs tant en inclinaison qu'en déclinaison. Notons que l'amélioration des tracés ne peut résulter que de l'obtention du maximum de points d'étalonnage les plus précis possibles, surtout en date. Tout traitement statistique, aussi élaboré soit-il, ne donnera jamais plus d'information que ce que contiennent les données.

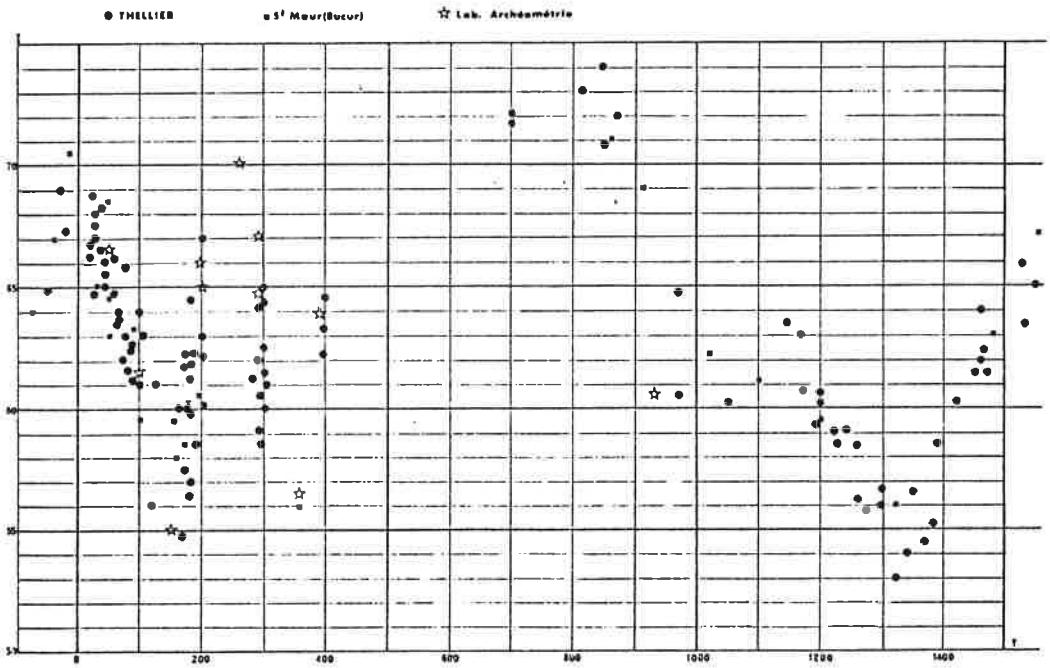


Fig. XI-3 : Points d'étalonnage I = f ( t ) à Paris (Langouët *et al.* , 1983, inédit).

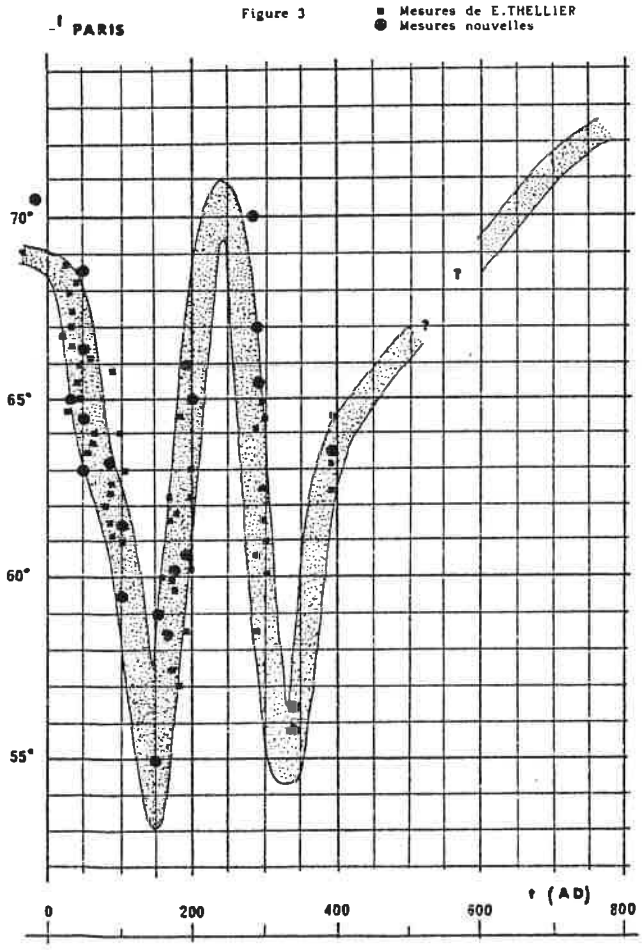



Fig. XI-4 : Courbe I = f ( t ) à Paris, durant l'époque gallo-romaine, d'après de nouveaux résultats (Langouët *et al.* , 1983).

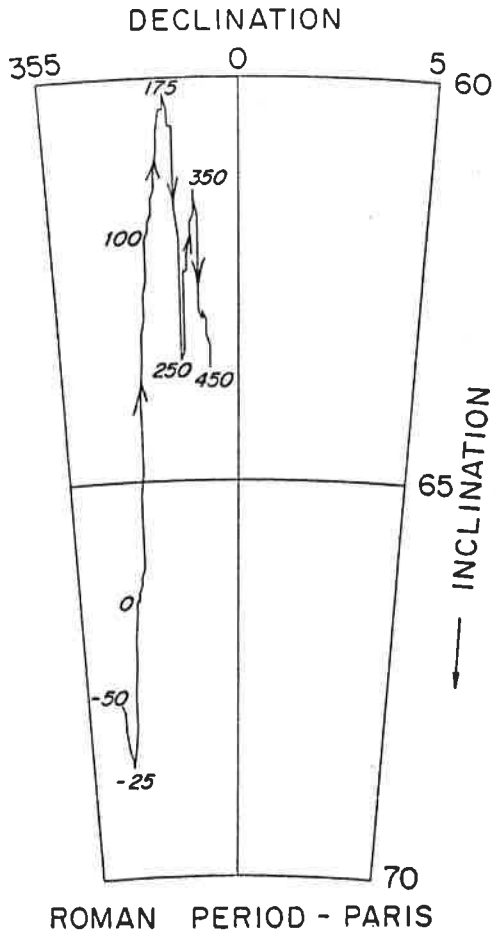



**Fig. XI-5** : Courbe I - D à Paris, à l'époque gallo-romaine, d'après un nouveau traitement statistique (Hedley *et al.* , 1986)

Les récents travaux d'I. Bucur (1986) ont permis d'affiner la variation I - D durant le Moyen-Age (fig. XI-6). A titre de comparaison sont données les courbes I - D établies par Aitken (1970) pour Londres (fig. XI-7) et J.C. Tanguy (1985) pour la Sicile (fig. XI-8). Actuellement, les Laboratoires de Saint-Maur et de Rennes portent leur effort sur l'extension de la courbe en-deçà de l'ère chrétienne.

## CONCLUSION

La déviation restant inutilisable puisque liée à la variation séculaire de la déclinaison, seule l'inclinaison peut servir à la datation des matériaux déplacés. Le schéma en figure XI-9 donne le principe de l'obtention d'un intervalle de date tenant compte à la fois de l'erreur sur la courbe et de l'erreur sur la mesure. D'après les figures XI-4 et 6, plusieurs solutions existent pour une même valeur de l'inclinaison. La datation archéomagnétique des matériaux déplacés s'avère une méthode précise et fiable (précision de l'ordre de $\pm$ 20 à $\pm$ 30 ans), mais elle présente cet inconvénient du choix entre plusieurs dates possibles. Généralement, le contexte archéologique permet de n'en retenir qu'une seule. Le nombre des solutions pourrait être restreint par l'utilisation conjointe de l'inclinaison et de l'intensité. En effet, à l'échelle du millénaire, le champ ne doit prendre que rarement le même couple de valeur inclinaison-intensité. La reconstitution de la variation de tous les éléments (I, D, M) du champ apparaît comme le meilleur moyen d'assurer les chances de l'unicité d'une date archéomagnétique. L'obtention d'une courbe précise de la variation séculaire de l'intensité pour les temps historiques ne peut donc que contribuer au développement de la datation des matériaux déplacés d'argile cuite.

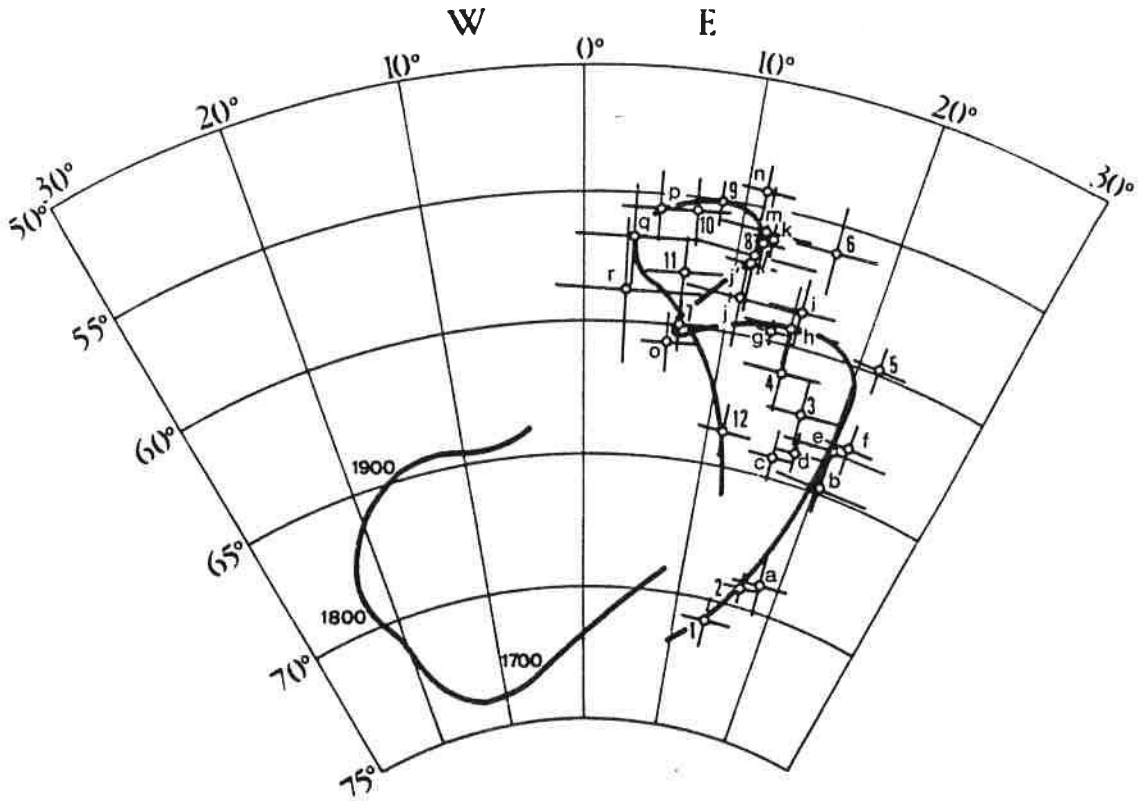



Fig. XI-6 : Courbe I - D à Paris, au Moyen-Age (Bucur, 1986).

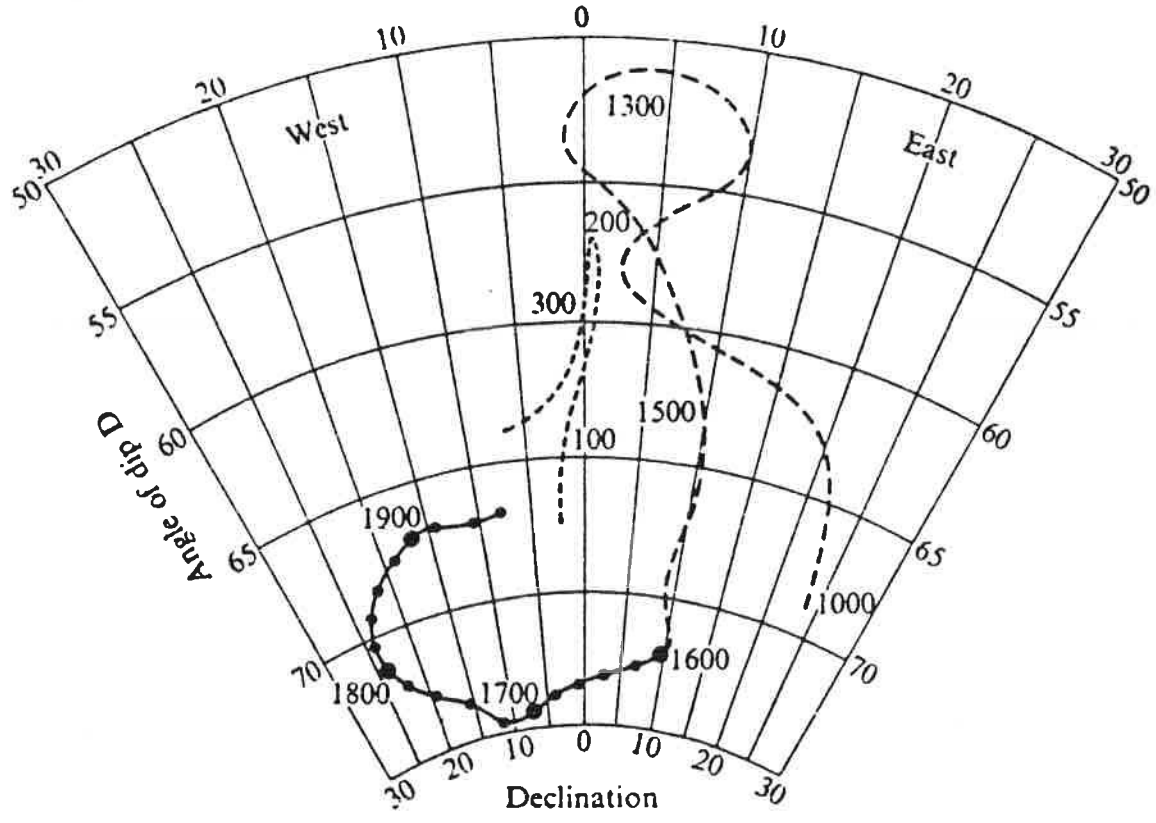



Fig. XI-7 : Courbe I - D à Londres (Aitken, 1970).

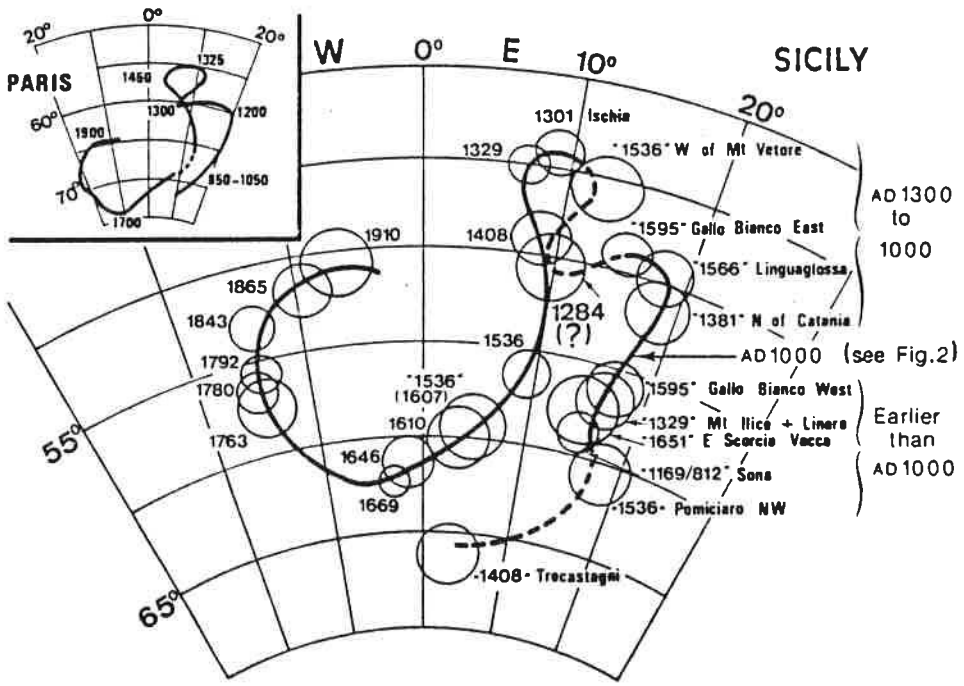



Fig. XI-8 : Courbe I - D en Sicile (Etna) (Tanguy *et al.* , 1985).

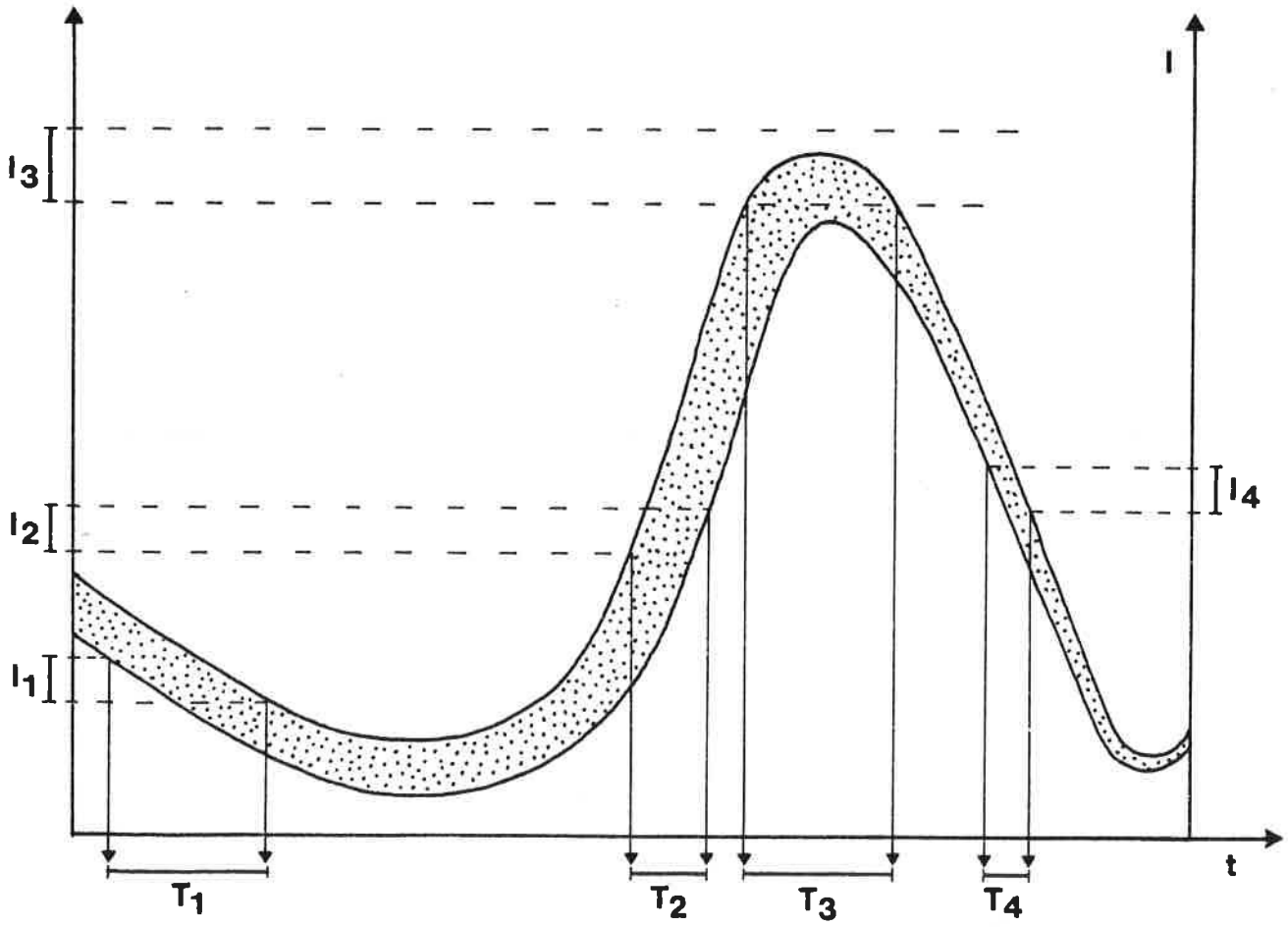



Fig. XI-9 : Principe de la détermination d'une date à partir d'une courbe d'étalonnage (exemple donné pour l'inclinaison).

# XII - ARCHEOMAGNETISME ET ARCHEOTECHNOLOGIE

## INTRODUCTION

Si la datation est l'objectif principal de l'étude archéomagnétique des matériaux d'argile cuite, il n'en ressort pas moins que cette méthode permet l'obtention de renseignements archéologiques précieux portant essentiellement sur les modes de chargement des fours et les caractéristiques magnétiques des pâtes. La reconstitution des modes de chargement des fours peut se faire à partir du pourcentage des positions de cuisson (à plat, de chant, debout), de l'orientation des plans d'aplatissement et de l'orientation des faces des objets. La caractérisation des pâtes peut se faire en fonction de l'intensité moyenne d'aimantation et de l'éventuelle présence de l'anisotropie d'aimantation thermorémanente. Ce chapitre porte sur les tuiles (*tegulae* gallo-romaines et tuiles plates médiévales), les briques et les carreaux de pavage, qui sont des matériaux produits en masse depuis l'époque gallo-romaine jusqu'à nos jours.

## A - LES POSITIONS DE CUISSON

Bien que toutes les positions soient *a priori* envisageables pour la cuisson des matériaux de construction, il apparaît dans la pratique que les positions réellement utilisées vérifiaient un certain nombre de conditions d'équilibre et de logique des chargements. En particulier, la disposition des matériaux ne doit pas en principe gêner le bon tirage des fours.

Lorsque l'objet est de forme parallélépipèdique, on peut distinguer les positions à plat, de chant et debout. Par contre, on ne distingue que les positions à plat et sur tranche pour les objets de forme carrée tels que les carreaux de pavage et certaines briques (de pilettes d'hypocauste par exemple).

### 1 - EPOQUE GALLO-ROMAINE

Pour cette époque, pratiquement tous les lots de tuiles et de briques étudiés sont cuits à 90% en position debout. Une preuve archéologique de ce type de rangement est donnée par les traces que peuvent laisser les extrémités des tuiles sur la sole (fig. XII-1). Tout lot présentant une autre position majoritaire de cuisson peut apparaître comme l'oeuvre d'un atelier aux pratiques originales. Par exemple, parmi les 72 sites de prospection ayant fait l'objet d'une étude archéomagnétique en Haute-Bretagne (*cf.* chapitre XIII), un seul présente 92% des éléments cuits en position de chant (site de la Mare-Pilais en Plénée-Jugon, Côtes-du-Nord).

Il est très rare que 100% des tuiles soient cuites en position debout. On observe souvent la proportion 90% debout, 10% à plat qui a été interprétée par L. Goulpeau et L. Langouët (1980 et 1982) comme correspondant à un chargement constitué de couches de tuiles debout séparées par des planchers de tuiles à plat. Selon ces auteurs, la proportion entre les deux positions peut s'exprimer par la relation :

$$\% = L / ( L + h )$$

Pour $35\ cm < L < 40\ cm$ et $4\ cm < h < 6\ cm$ (fig. XII-2), on obtient une proportion de debout variant entre 85% et 91%.

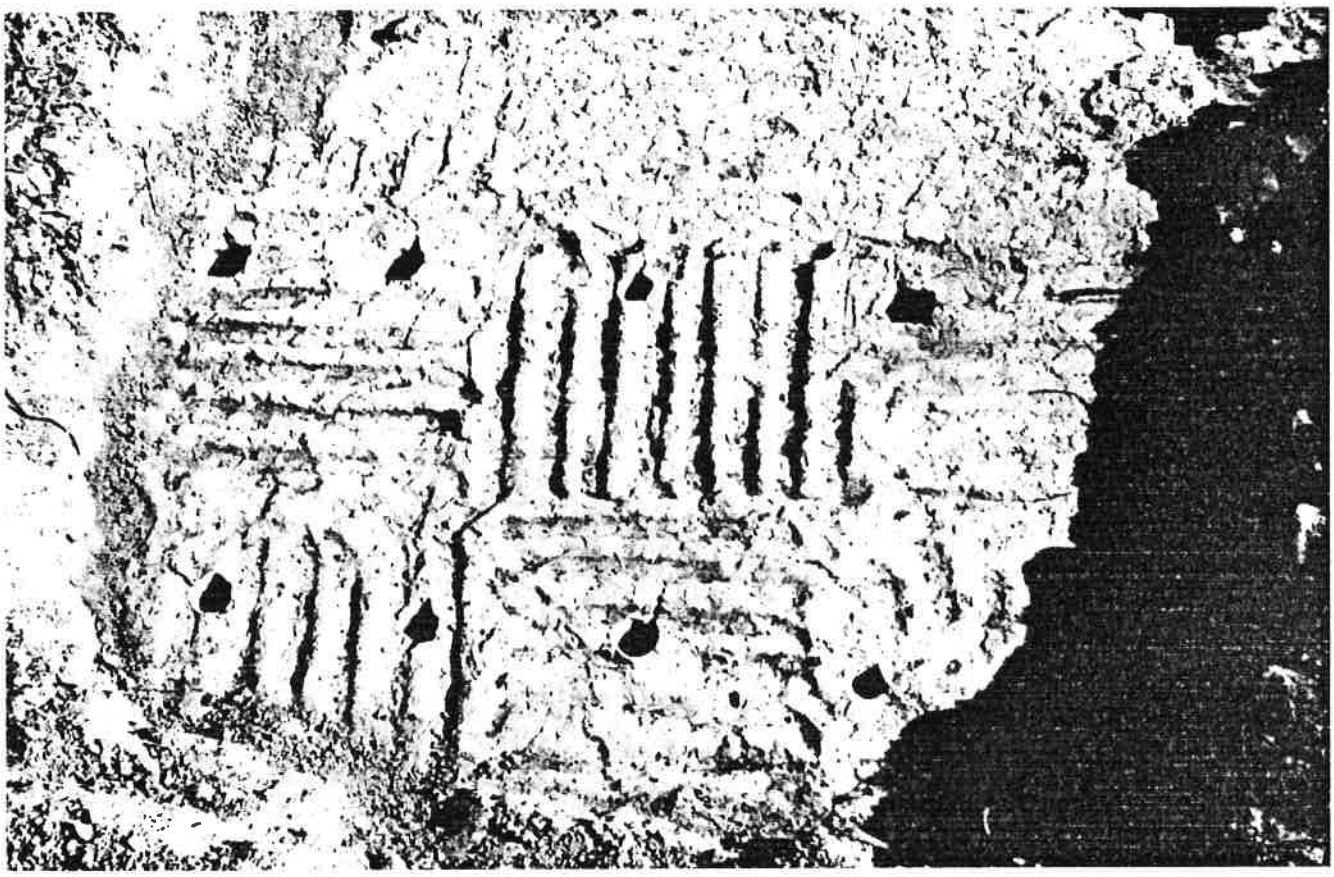


Fig. XII-1 : Empreintes laissées sur la sole d'un four gallo-romain par les extrémités de tuiles cuites debout. Chuisnes (Eure-et-Loire), Le Champ de Rigny (cliché G. Fessard).

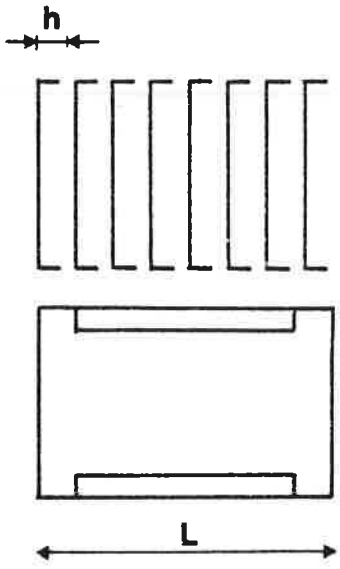



Fig. XII-2 : Proportion de tuiles cuites debout pour une tuile cuite à plat.

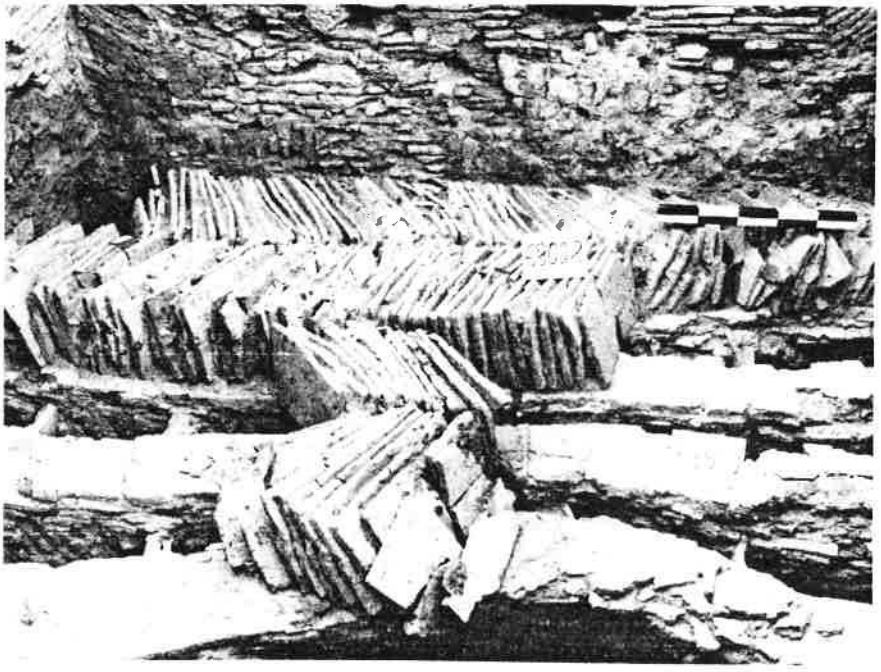


**Fig. XII-3** : Chargement de tuiles plates restées en place dans un des fours de la Cour Napoléon au Louvre (Paris). Les tuiles ont été cuites de chant, en épi, avec apparemment un léger pendage alterné (Espagnet, 1987).

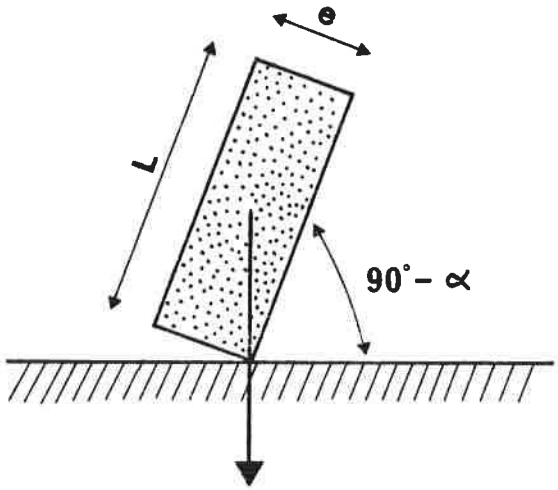



**Fig. XII-4** : Angle minimal d'un pendage : Tan ∝ = e / L

## 2 - EPOQUE MEDIEVALE

Pour l'époque médiévale, les positions sont beaucoup plus variées. Les tuiles plates à crochet sont très souvent cuites de chant. Un exemple archéologique en est donné en figure XII-3. Il s'agit d'un reste de chargement retrouvé dans un des fours de la Cour Napoléon au Louvre à Paris (Espagnet, 1987).

Notons cependant l'existence de lots combinant les deux positions de rangement de chant et debout à la fois. La combinaison 1/3 de chant, 2/3 debout a été mise en évidence pour des lots de tuiles plates provenant d'abbayes médiévales de la région de Dijon (Côte-d'Or). Cependant, nous ne savons pas encore quel pouvait être l'agencement de ces types de chargement.

Les positions de cuisson des carreaux de pavage sont assez variées. En fait, on observe soit des chargements uniquement sur tranche (*cf.* Rennes, La Bintinais, chap. VI) ou uniquement à plat, soit une combinaison de couches alternées à plat - sur tranche (*cf.* Les Rairies, chap. V)

## 3 - LES PENDAGES

Les positions réelles des matériaux sur tranche pouvaient différer plus ou moins largement des positions théoriques. Pour asseoir les chargements, il était parfois plus commode d'incliner les matériaux les uns contre les autres selon des directions pouvant varier d'une rangée à l'autre et d'une couche à l'autre. Lorsque cette dernière alternance existe, elle peut être décelée dans les diagrammes inclinaison-déviation par l'apparition d'agglomérats dédoublés (*cf.* Nantes, Beaux-Arts, lot F et Rennes, La Bintinais, lot G, chap. VI).

L'existence de pendages est attestée aussi bien pour les tuiles (Goulpeau et Langouët, 1980) et les briques gallo-romaines que pour les tuiles plates (Espagnet, 1987) (fig. XII-3) et les carreaux de pavages médiévaux (*cf.* Rennes, La Bintinais). On a pu constater d'une manière générale que le pendage minimal est l'angle dont il faut incliner l'objet pour l'empêcher de retomber dans sa position initiale (fig. XII-4).

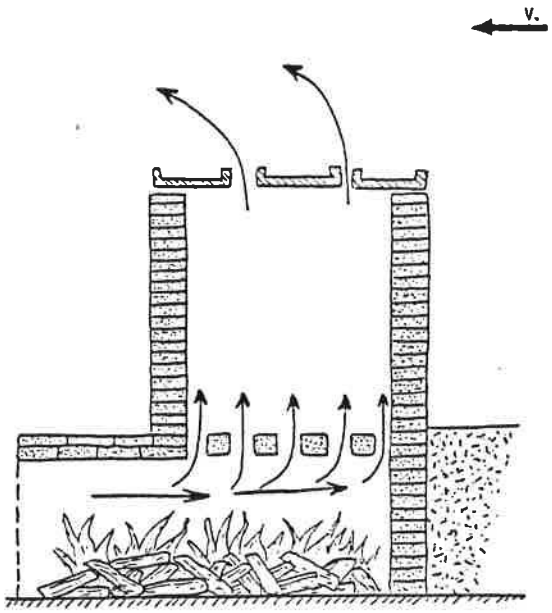
Le pendage minimal $\alpha$ serait de l'ordre de 4 à 5° pour les tuiles, et de l'ordre de 10° pour les carreaux.

## 4 - LA PENTE DES SOLS

L'horizontalité du plan de chargement des fours est liée au mode de tirage.

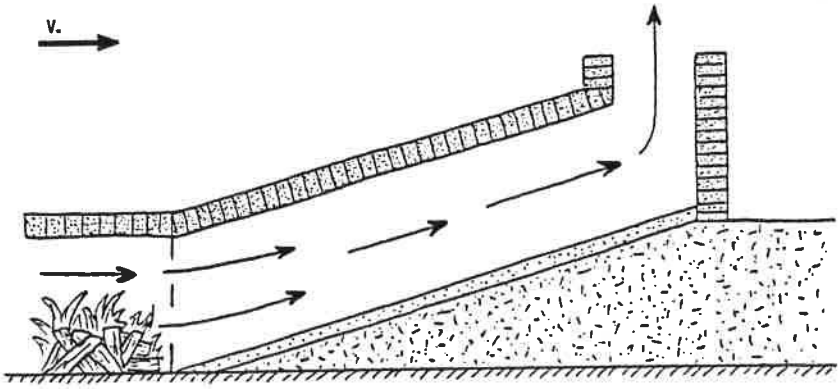
- Dans le tirage vertical (fig. XII-5a), le chargement repose sur une sole horizontale placée au-dessus de l'alandier. Ce type de four entraîne généralement un empilement assez régulier des matériaux autour des positions à plat, de chant et debout.

- Dans le tirage oblique (fig. XII-5b), le chargement repose directement sur un sol oblique dont la pente est dirigée vers l'alandier (*cf.* Les Rairies, chap. V). Dans ce cas, la position à plat reste une position stable, tandis que la position sur tranche exigerait, pour des raisons d'équilibre, que les matériaux soient placés plutôt parallèlement à la direction de pente (Goulpeau *et al.* , 1986) (fig. XII-6). Le remplissage du four des Rairies est exemplaire à ce titre (*cf.* fig. V-8c). La stabilité latérale du "château de carte" est assurée du fait que les carreaux tiennent seuls en équilibre sur la tranche.




a

Fig. XII-5 : Soles horizontales et sols obliques (Le Ny, 1987).




b

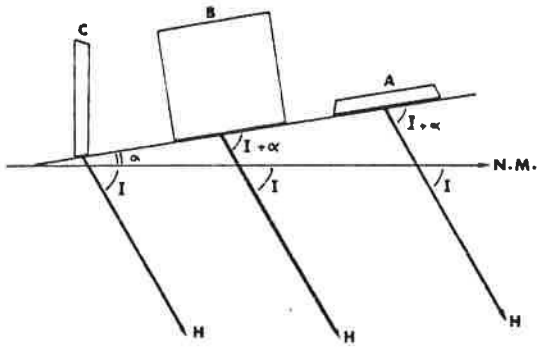



Fig. XII-6 : Positions stables des carreaux sur un sol oblique (Goulpeau *et al.* , 1986).

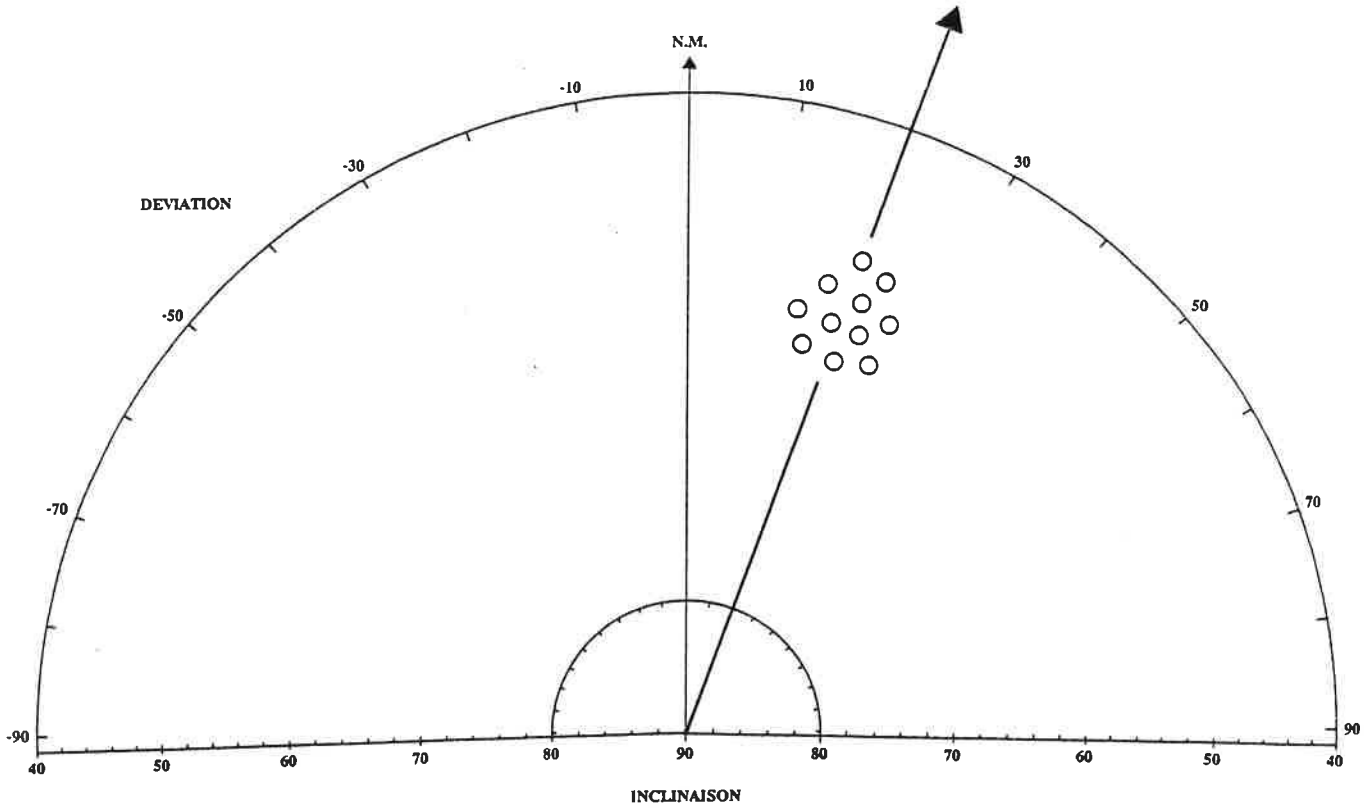



**Fig. XII-7** : Deux exemples de reconstitutions possibles de rangées de tuiles pour un même diagramme (I, Δ). Les cercles vides indiquent que les faces supérieures des matériaux sont orientées à l'opposée du N.M.

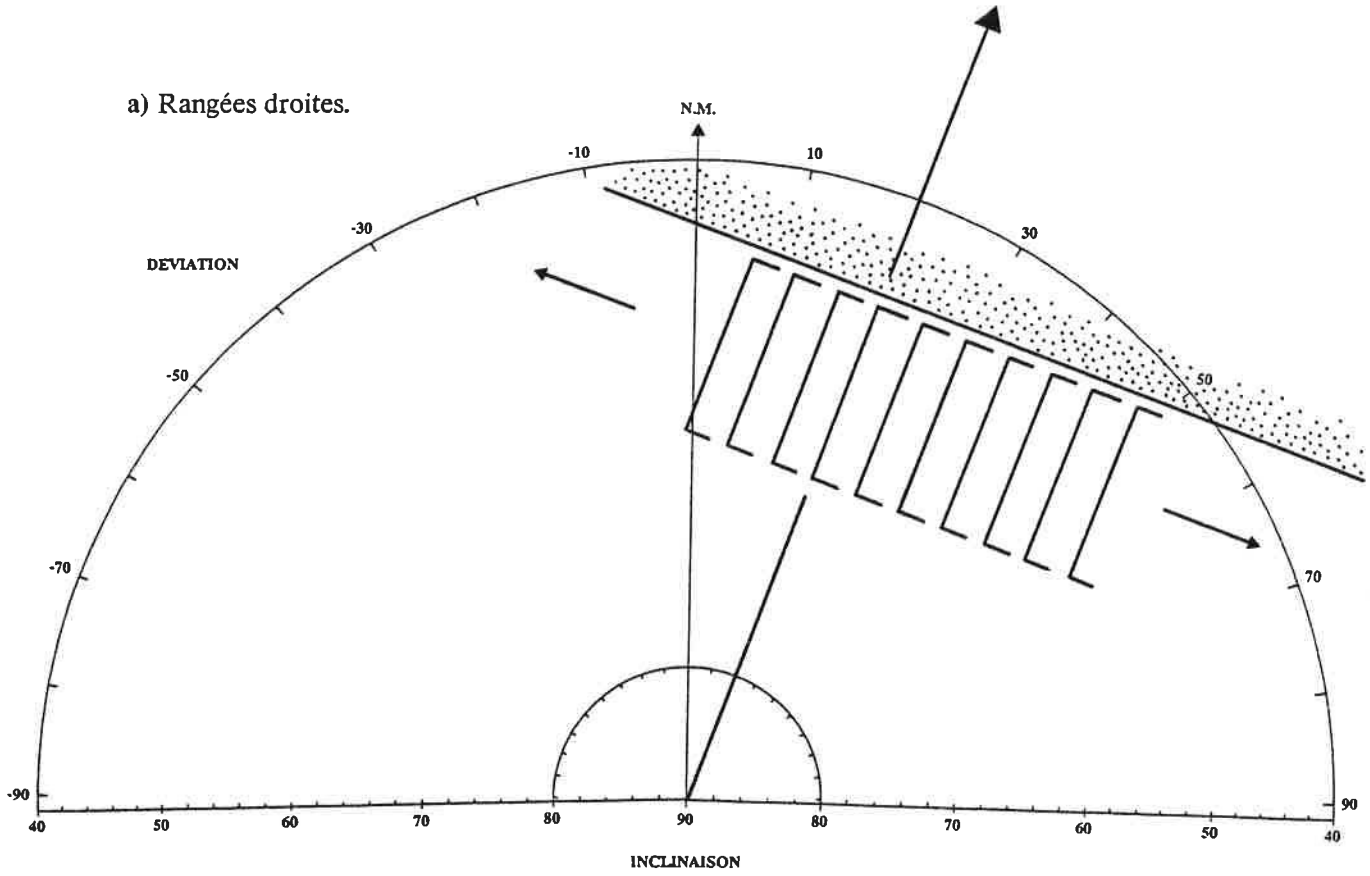
Pour les tuiles plates, généralement d'assez faible épaisseur, leur stabilité n'était le plus souvent assurée que par un pendage systématique qui, combiné à la pente du sol du four, pouvait entraîner des dispositions très complexes souvent difficiles à reconstituer d'après les seules données archéomagnétiques.

## B - LES DIRECTIONS DE RANGEMENT ET LE PLAN DES FOURS

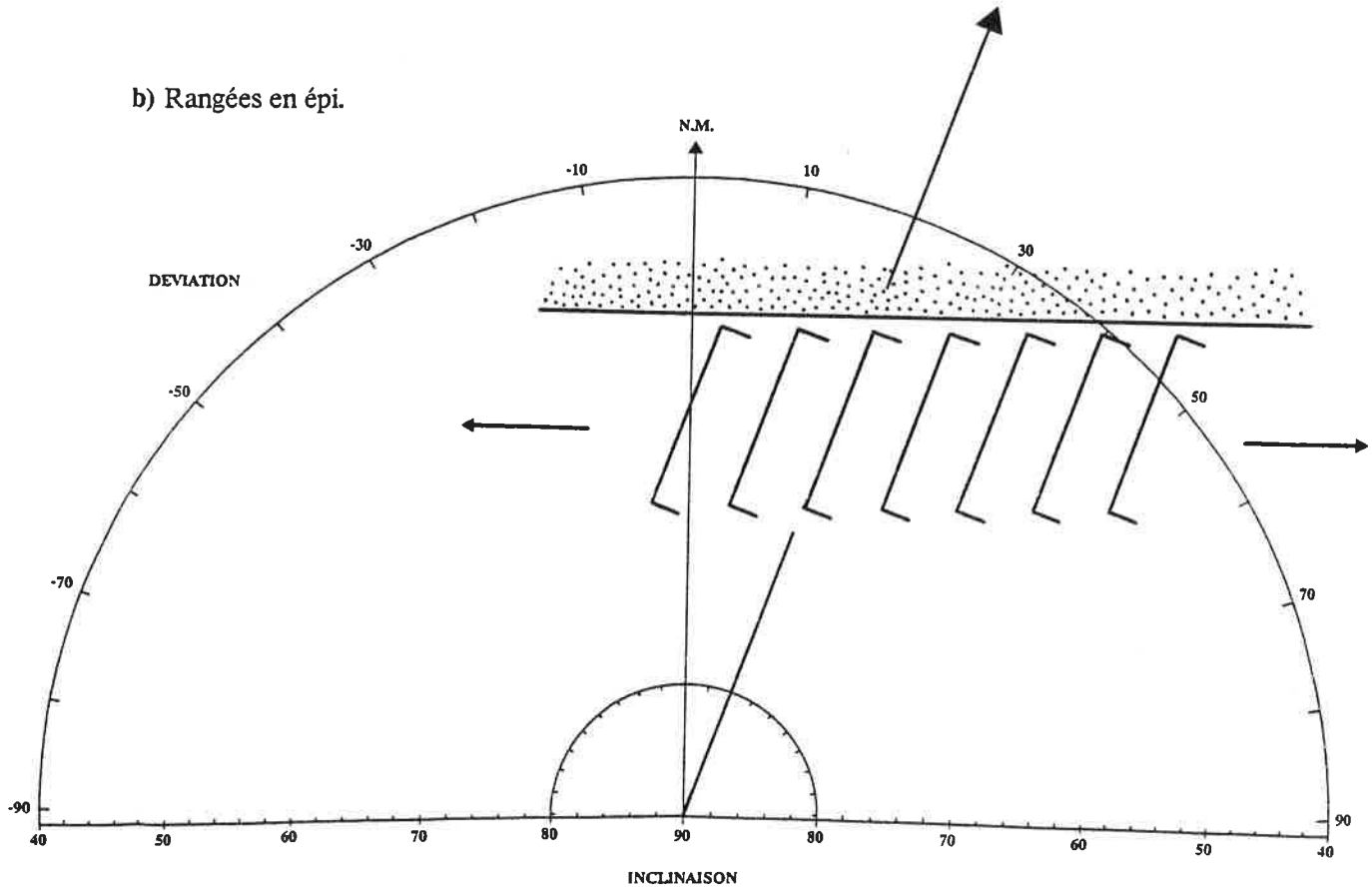
Les déviations observées dans les diagrammes (I, Δ) donne l'orientation des matériaux dans les fours. Pour les positions de chant ou debout, la déviation représente l'angle entre le plan vertical d'aplatissement des objets et le Nord magnétique. Pour la position à plat, la déviation représente l'angle entre l'un des bords des objets et le Nord magnétique. La présence d'agglomérats très concentrés en inclinaison et déviation induit une disposition des matériaux selon des rangées rectilignes (fig. XII-7)

Une répartition uniforme des déviations entre -90° et +90° par exemple, induit l'existence de rangées disposées en cercles (fig. XII-8).

a) Rangées droites.




b) Rangées en épi.



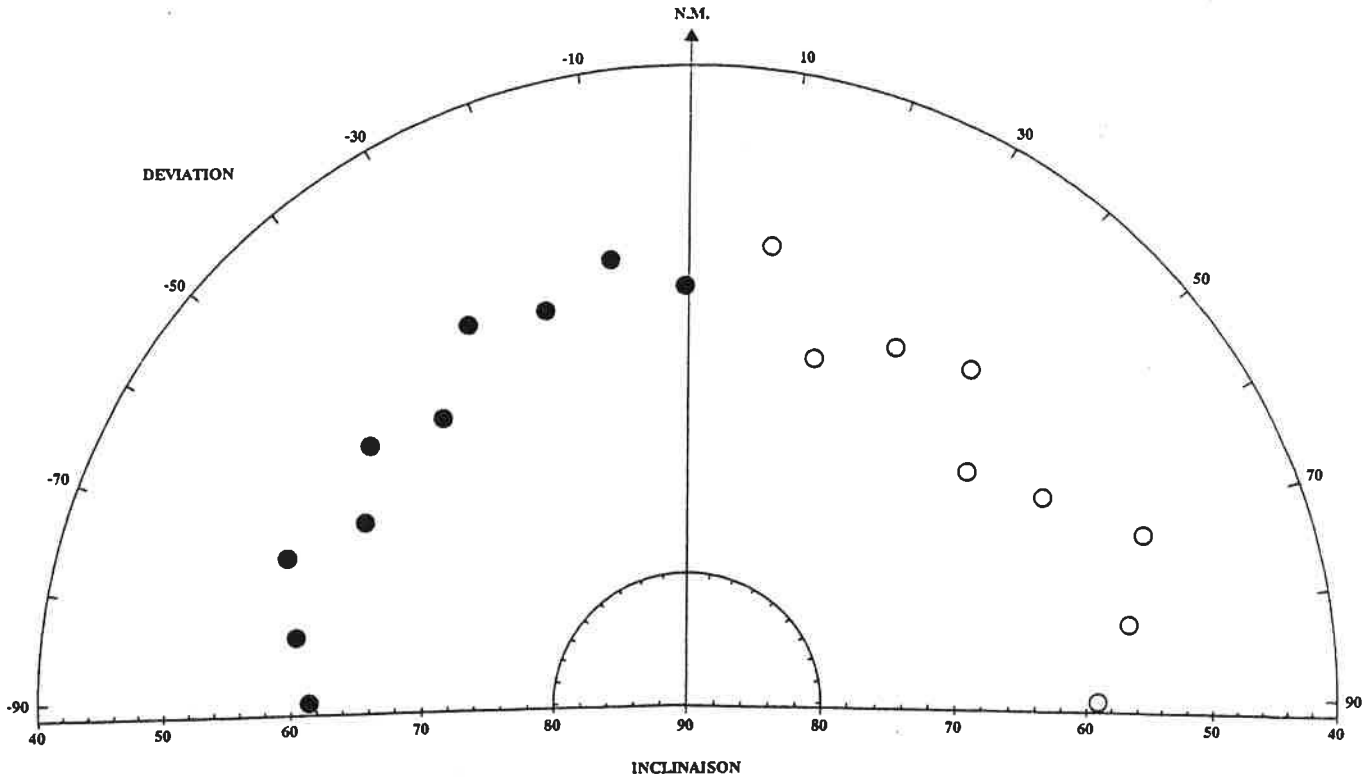
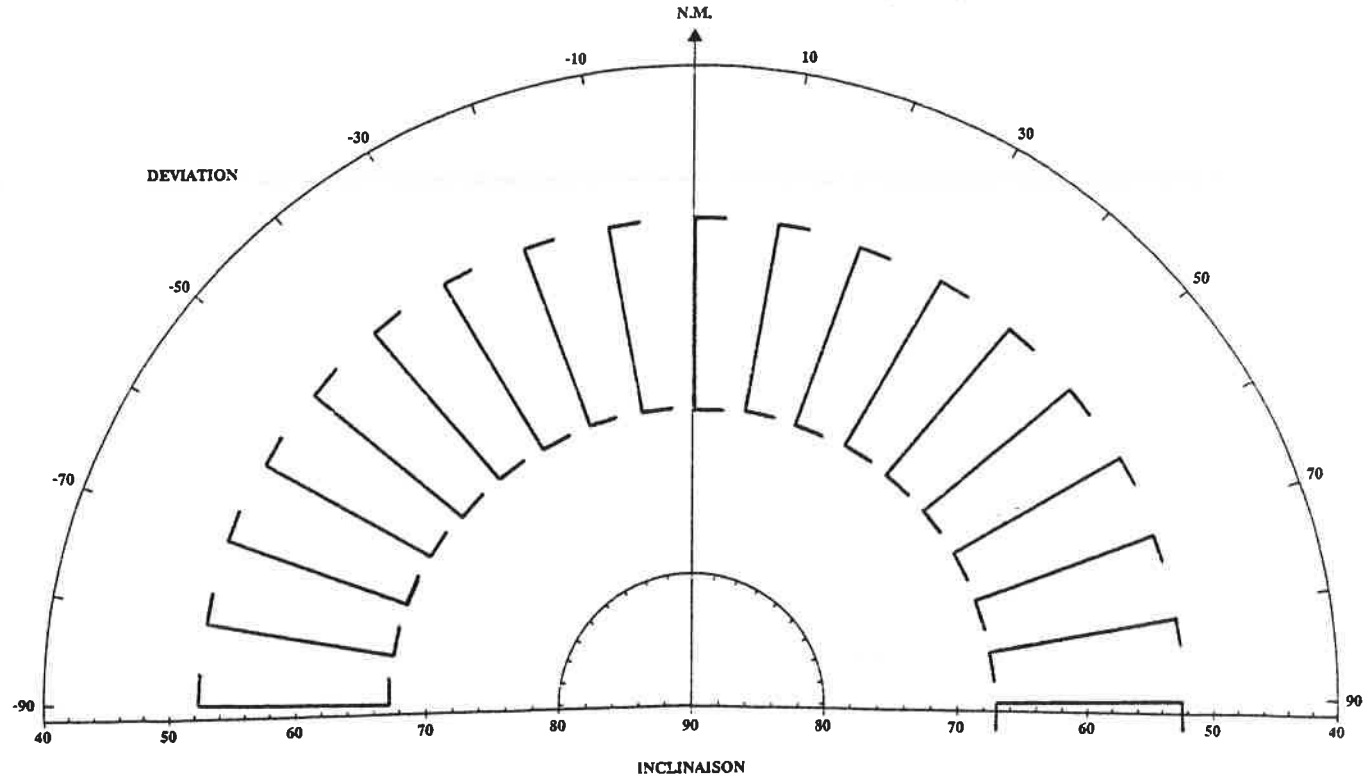



Fig. XII-8 : Exemple de rangement dans un four circulaire.



Le bon sens nous entraîne à penser que la disposition de ces rangées était guidée par la forme interne des parois des laboratoires. Malheureusement, rien dans les diagrammes (I, Δ) ne permet de définir l'orientation réelle des rangées de matériaux. En effet, si ces derniers peuvent être alignés parfaitement les uns derrière les autres, ils peuvent tout autant être disposés en épi, induisant des directions de parois tout à fait différentes. La figure XII-9 donne un exemple de quelques reconstitutions possibles de rangements droit ou en épi dans un four rectangulaire ou trapézoïdal, à partir d'un même diagramme (I, Δ).

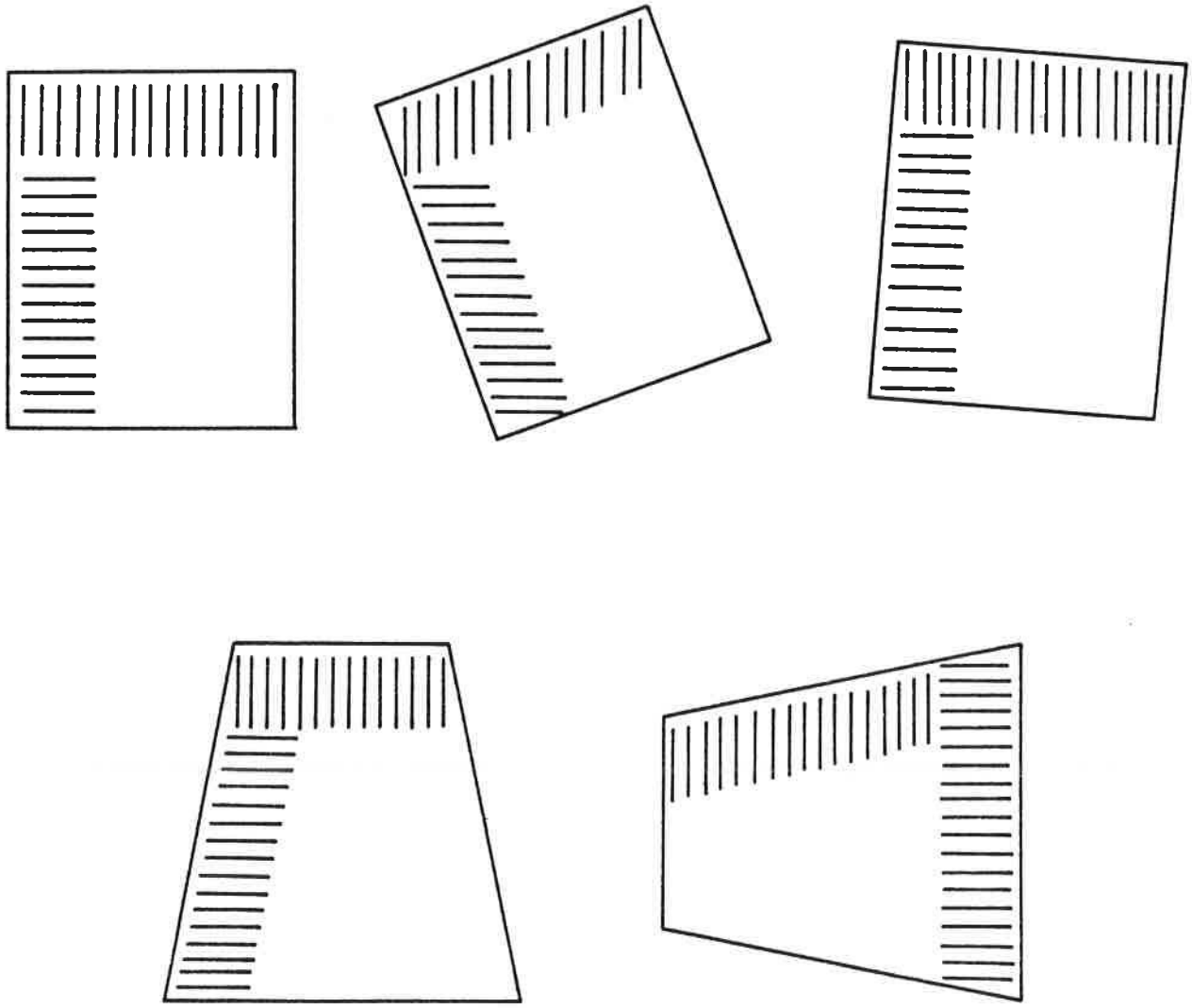
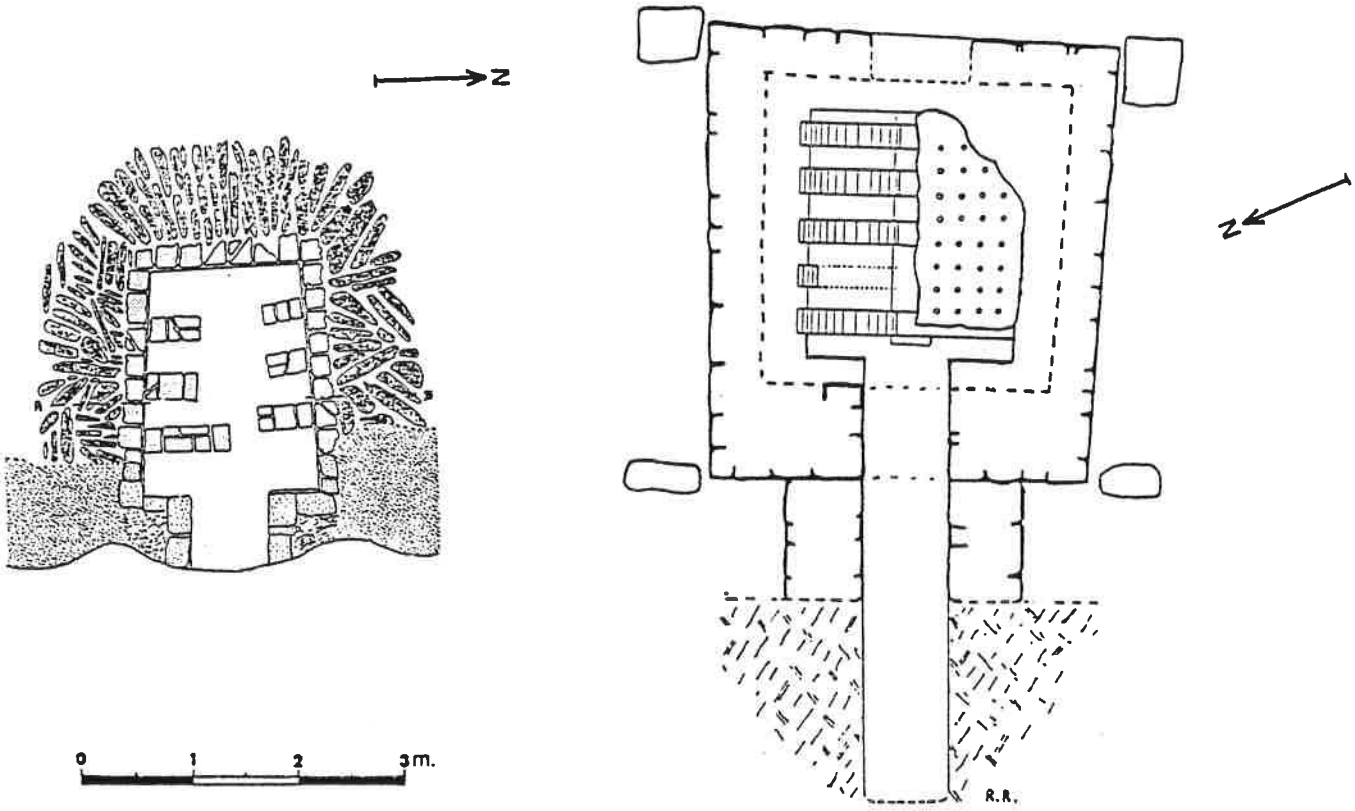


**Fig. XII-9** : Quelques formes, orientations et chargements possibles de fours pour un même diagramme (I, Δ).




a) Plonevez-Porzay (Finistère), Camezen (Sanquer, 1971).

b) Trouhaut (Côte-d'Or), Fontaine Merle (Ratel, 1960).

**Fig. XII-10** : Exemples de fours trapézoïdaux fouillés.

A l'époque gallo-romaine, la forme des fours était le plus souvent rectangulaire (McWhirr, 1979 ; Le Ny, 1986). La forme trapézoïdale existe aussi, mais elle semble rare (fig. XII-10). C'est pourquoi la forme rectangulaire est *a priori* déduite de l'existence d'agglomérats complémentaires dans le diagramme (I, Δ).

Pour l'époque médiévale, les diagrammes archéomagnétiques suggèrent une grande variété de modes de chargements et sans doute de formes de fours. Un cas particulier interessant est le rangement en épi croisé. En effet, ce type de rangement est bien mis en évidence dans le diagramme (I, Δ), ce qui permet de restituer éventuellement l'orientation réelle des parois du four (fig. XII-11).

Notons enfin que l'archéomagnétisme des objets déplacés n'est pas en mesure de définir laquelle des directions Δ ou Δ' correspond à l'axe passant par l'alandier.

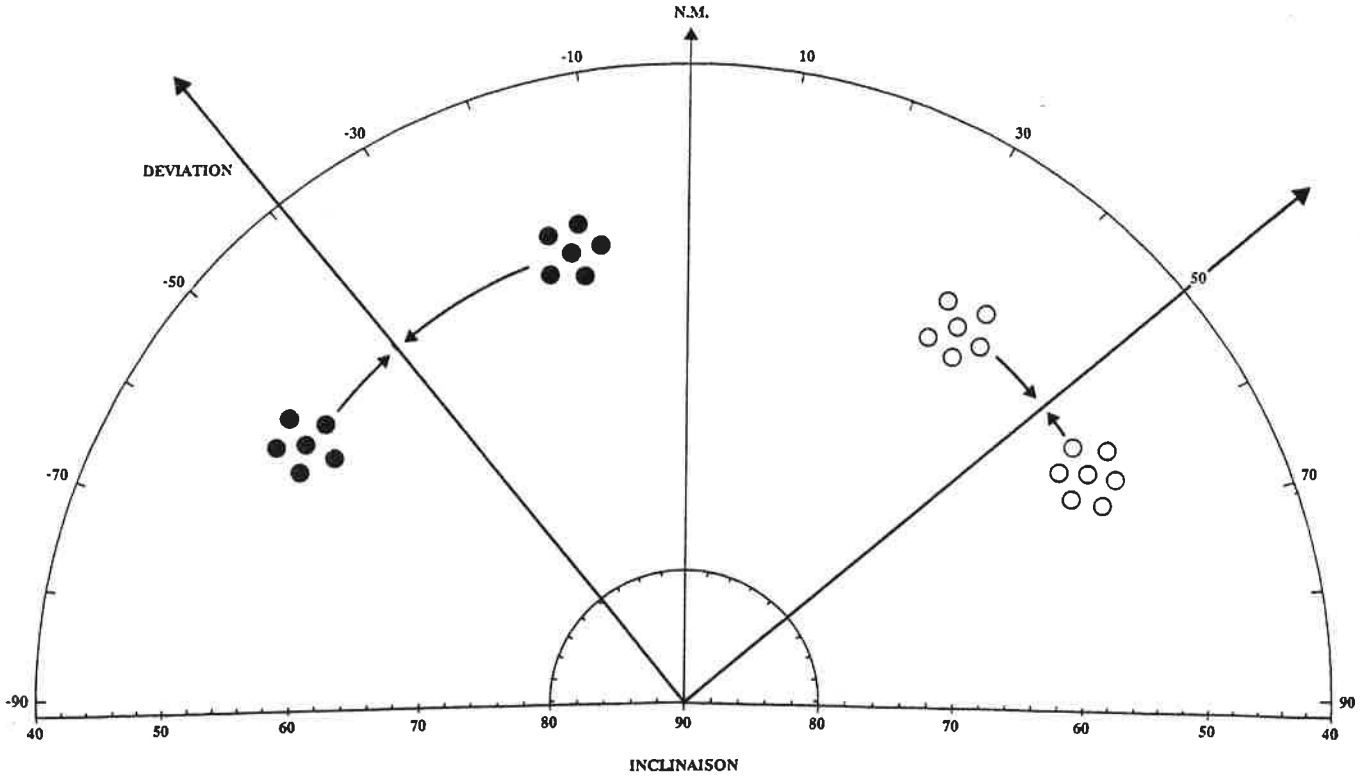
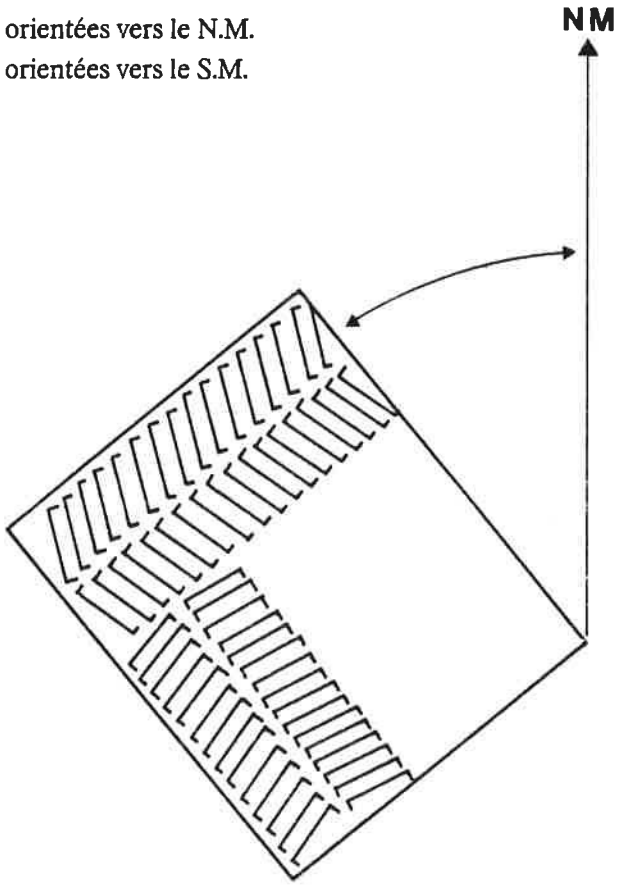



**Fig. XII-11** : Rangements en épis croisés de tuiles debout dans un four rectangulaire et diagramme (I, Δ) associé.

● : faces supérieures orientées vers le N.M.
○ : faces supérieures orientées vers le S.M.



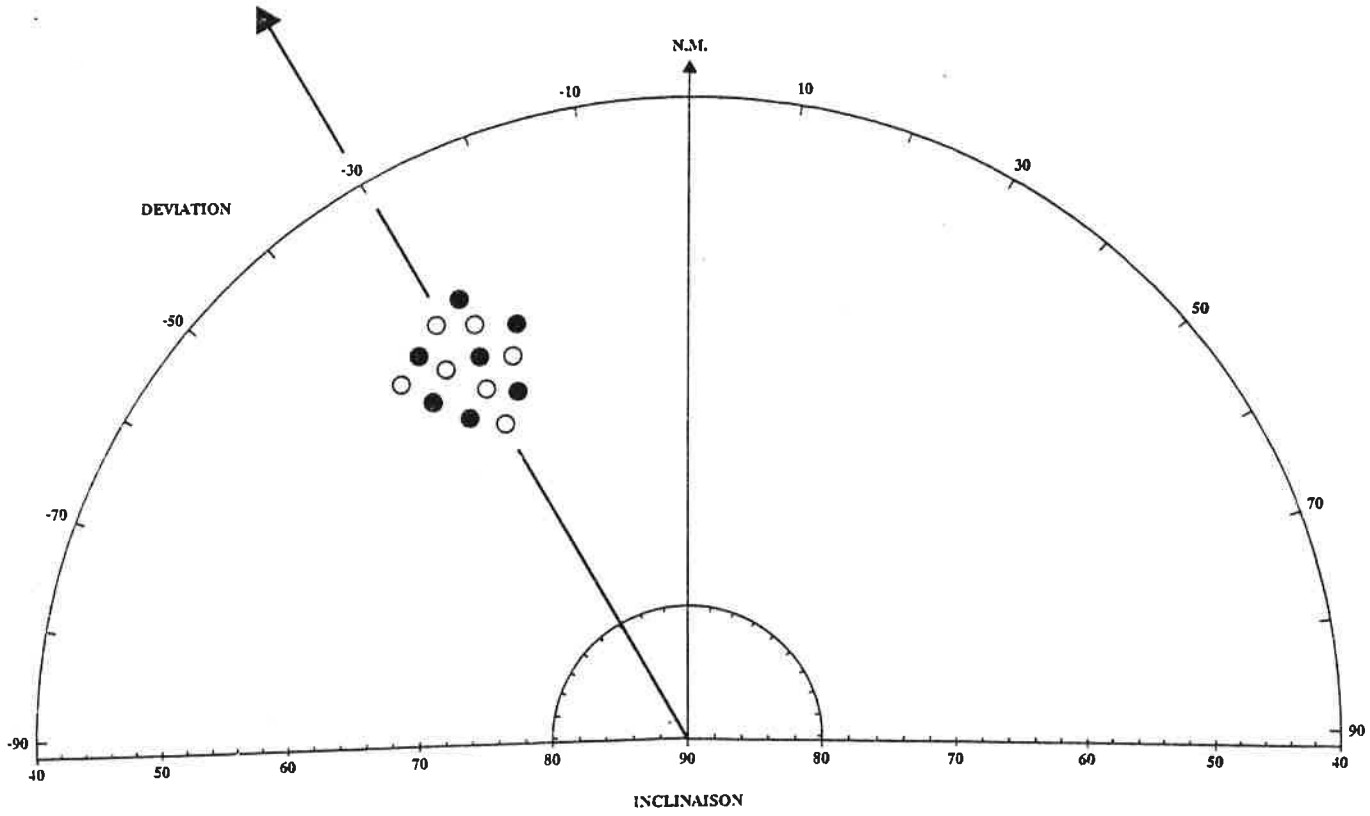
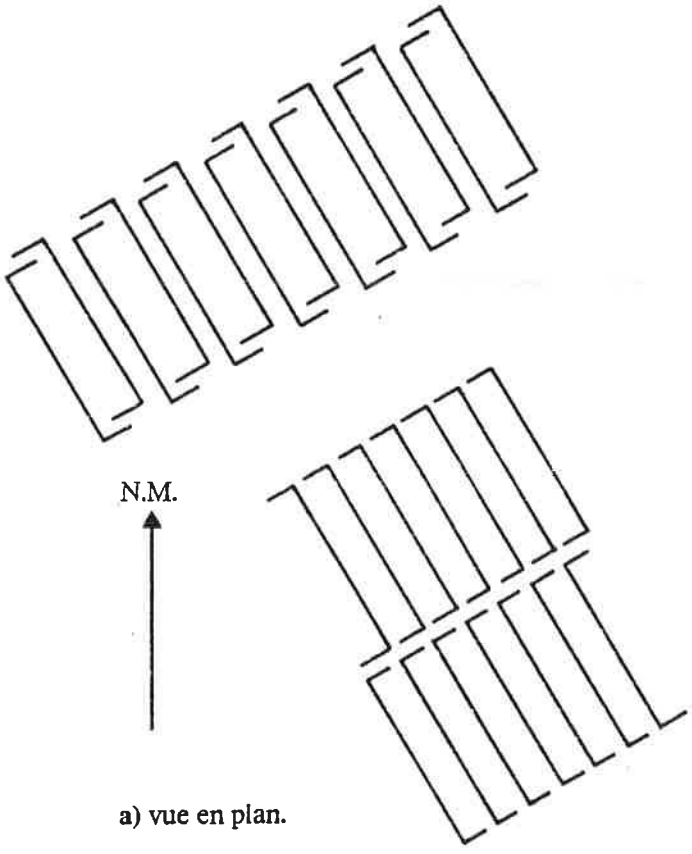
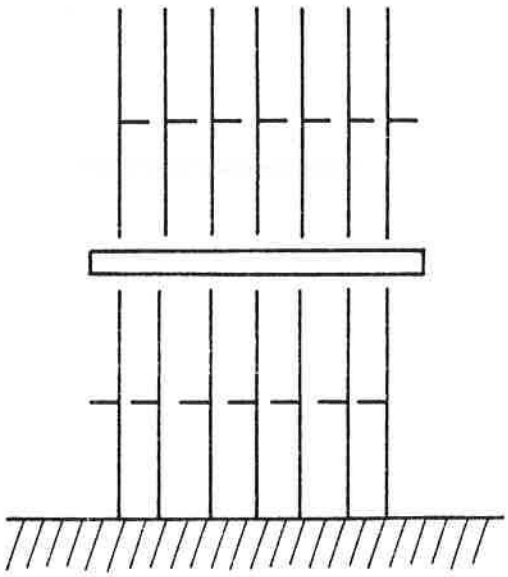



**Fig. XII-12** : Différents agencements possibles de matériaux sur tranche déduits d'un agglomérat (I, Δ) présentant une orientation alternée des faces supérieures par rapport au Nord magnétique.




a) vue en plan.



b) vue en coupe.

## C - L'ORIENTATION DES FACES DES MATERIAUX

La face dite supérieure des matériaux est définie comme étant la face comportant des traces de lissage, côté rebord pour les tuiles gallo-romaines, côté crochet éventuel pour les tuiles plates médiévales, côté décor éventuel pour les carreaux de pavage. Notons que cette dénomination conventionnelle "face supérieure" est sans rapport avec l'orientation vers le haut ou vers le bas des objets dans les constructions. On peut repérer, au sein d'un même agglomérat (I, Δ) les différentes orientations des faces des matériaux. Les éléments d'un agglomérat peuvent avoir toutes les faces supérieures tournées dans une même direction ou bien présenter, par exemple, une moitié dans un sens et une moitié dans l'autre. Cette alternance permet parfois de déceler des effets parasites tels que les pendages (*cf.* Nantes, Beaux-Arts, lot F, chap. VI). Plus généralement, cette donnée peut servir à caractériser des ateliers en fonction des types de chargement. Un exemple d'exploitation de ces orientations est donné au chapitre XIII, à propos de lots provenant de sites de prospection dè Haute-Bretagne.

A une même proportion de faces supérieures tournées dans un sens et dans l'autre, pour un agglomérat donné, correspond différents modes de rangement, soit en rangées croisées (fig. XII-12), soit en damier (fig. XII-1). Plus rarement, il arrive que le diagramme (I, Δ) indique un seul sens par agglomérat. Ce cas trahit un rangement extrêmement régulier des matériaux dans les fours.

## D - LES INTENSITES MOYENNES D'AIMANTATION

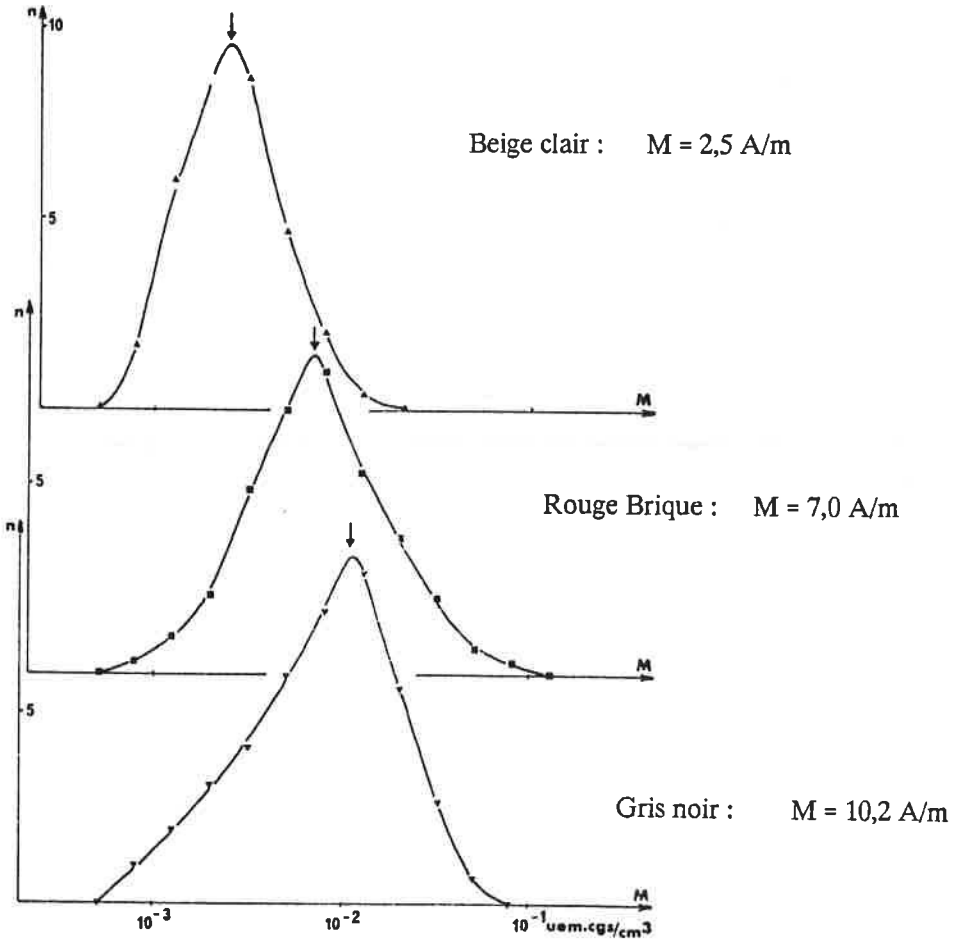



**Fig. XII-13** : Corrélation entre la coloration des pâtes et l'intensité moyenne d'aimantation sur des carreaux de pavage, retrouvés à la Hardelière en Laval (Mayenne) (Bucur *et al.* , 1984).

Lorsque l'histogramme des aimantations volumiques (exprimées en A/m) présente un seul mode très pointu et resserré, on peut définir pour le lot une intensité moyenne d'aimantation caractéristique. Les matériaux gallo-romains, la plupart du temps très bien cuits, offrent des aimantations assez fortes allant de 5 à 20 A/m (*cf.* chapitre XIII). Par contre, on observe des intensités d'aimantation moins fortes pour les matériaux médiévaux, de l'ordre de 1 à 7 A/m en moyenne. Les modes de cuisson (température, atmosphère) de même que la nature des argiles employées, interviennent de façon complexe dans le processus d'acquisition de cette aimantation. Donc, si cette donnée peut servir à caractériser les productions, il faut se garder de vouloir lui en faire dire plus.

Il arrive parfois qu'au sein d'un même lot on puisse mettre en évidence des sous-populations d'éléments ayant des aimantations moyennes différentes. C'est le cas pour un lot de 240 fragments de carreaux médiévaux recueillis par L. Goulpeau et L. Langouët dans la tessonnière de l'atelier n° 3 de la Hardelière à Laval (Mayenne) (Bucur *et al.* , 1984). Ces auteurs ont pu montrer l'existence d'une nette corrélation entre la coloration des pâtes et l'amplitude de l'aimantation (fig. XII-13)

## E - L'ANISOTROPIE D'AIMANTATION THERMOREMANENTE

On a pu voir dans le chapitre VI que les matériaux déplacés d'argile cuite possède presque toujours des directions de plus ou moins facile aimantation corrélées à la forme des objets. Cette anisotropie a d'une manière générale pour effet d'aligner la direction de l'aimantation selon le plan d'aplatissement des matériaux. L'évaluation des facteurs d'anisotropie $F_{xz}$ et $F_{xy}$ permet la correction de cet effet important.

La détermination des facteurs $F_{xz}$ et $F_{xy}$ est une donnée archéotechnologique qui peut renseigner sur le mode de préparation et de moulage des pâtes. L'étude expérimentale des Rairies (*cf.* chap. V) a montré la parfaite coïncidence entre le tenseur d'anisotropie d'ATR et le mode de fabrication des carreaux par extrusion. Ce tenseur a la forme d'un ellipsoïde aplati selon le plan d'aplatissement et allongé selon le sens d'extrusion. La corrélation entre l'anisotropie et le moulage de la pâte paraît donc évidente. Le tableau suivant donne les facteurs $\overline{F}_{xz}$ et $\overline{F}_{xy}$ déterminés sur différents ensembles de matériaux de différentes époques (*cf.* chap. V) :

| | $\overline{F}_{xz}$ | $\overline{F}_{xy}$ |
|---|---|---|
| TUILES GALLO-ROMAINES | 1,09 | 1,00 |
| | 1,18 | 1,00 |
| | 1,26 | 1,04 |
| | 1,35 | 1,03 |
| BRIQUES GALLO-ROMAINES | 1,07 | 1,03 |
| | 1,13 | - |
| CARREAUX MEDIEVAUX | 1,18 | 1,01 |
| | 1,17 | 1,01 |
| | 1,29 | 1,00 |
| | 1,19 | 0,99 |
| TUILES MEDIEVALES | 1,27 | 1,15 |
| CARREAUX MODERNES | 1,35 | 1,08 |

On peut faire les remarques générales suivantes :

- Le facteur $F_{xy}$ est presque toujours voisin de 1, sauf pour les tuiles plates médiévales et les carreaux modernes. Pour ces derniers, la raison en est l'extrusion mécanique. Les tuiles plates médiévales doivent leur forte valeur $F_{xy}$ à leur très faible épaisseur et à leur allongement (dimensions moyennes : 25 x 15 x 1,3 cm). Cette géométrie a dû favoriser un couchage fortement directionnel de la pâte lors du moulage. Pour les autres matériaux, l'épaisseur plus grande et le rapport longueur/largeur voisin de 1 peuvent expliquer l'isotropie magnétique de la pâte dans le plan (Oxy).

- Le facteur $F_{xz}$ est toujours différent de 1. Ceci est lourd de conséquences pour ce qui est de la direction de l'aimantation acquise. Il est évident qu'il n'existe pas de corrélation entre ce facteur et l'époque de fabrication des matériaux. Ainsi, rien qu'au sein de l'époque gallo-romaine, on observe la plus grande diversité des valeurs. Par contre, il est interessant de noter une assez grande homogénéité des valeurs pour un même lot. Ceci tendrait à montrer que les facteurs $F_{xz}$ et $F_{xy}$ sont des paramètres caractéristiques d'une production.

## CONCLUSION

Ce chapitre a tenté de montrer les retombées archéologiques des études archéomagnétiques. La rigueur exige d'évaluer toutes les solutions archéologiques possibles déductibles des données fournies par l'archéomagnétisme. Dans le cas particulier d'un diagramme (I, Δ) présentant deux agglomérats bien distincts appartenant à un même ensemble $E_i$, il est possible de regrouper les renseignements archéomagnétiques sous la forme suivante :

$$E_i\ (\bar{I}_i\ ;\ \%P\ ;\ \bar{\Delta}_i\ ,\ \bar{\Delta}'_i\ ;\ xE\ ,\ (1\text{-}x)W\ ;\ yN\ ,\ (1\text{-}y)S\ ;\ \bar{M}\ ;\ \bar{F}_{xz}\ ,\ \bar{F}_{xy})$$

avec :

$\bar{I}_i$ : Inclinaison moyenne pour l'ensemble.

%P : Pourcentage de la position majoritaire de cuisson. P : à plat, C : de chant, D : debout.

$\bar{\Delta}_i$ : Déviation comprise entre -45° et +45°.

$\bar{\Delta}'_i$ : Déviation comprise entre -90° et -45° ou +45° et +90°.

x E , (1-x) W : Pourcentage de faces supérieures orientées vers l'est (E) et vers l'ouest (W) pour Δ .

y N , (1-y) S : Pourcentage vers le nord (N) et vers le sud (S) pour Δ' .

$\bar{M}$ : Intensité moyenne d'aimantation pour l'ensemble.

$\bar{F}_{xz}$ , $\bar{F}_{xy}$ : Facteurs d'anisotropie d'ATR pour l'ensemble.

# XIII - DES EXEMPLES D'APPLICATION

Deux exemples d'application, l'un ponctuel, l'autre à grande échelle, montrent les multiples apports de l'archéomagnétisme à l'archéologie.

## A - APPORT DE L'ARCHEOMAGNETISME A L'ETUDE DU PARCELLAIRE ANTIQUE.

L'exemple traité concerne un site gallo-romain retrouvé en prospection et situé près du lieu-dit Parga en Lescouet-Jugon (22084 003, Côtes-du-Nord).Ce site a livré des tuiles, des briques de pilettes d'hypocauste ainsi que du mobilier divers (monnaies, pesons, *etc...*). Il est implanté auprès d'une voie romaine certifiée reliant l'antique ville de Corseul (22) à celle de Vannes (56). L'étude archéomagnétique montre que les briques de pilettes ont été cuites à 95% à plat. Le diagramme (I, Δ) présente deux agglomérats selon deux déviations moyennes complémentaires (fig. XIII-1a et b). Notons que c'est à partir de ce site que L. Langouët et L. Goulpeau (1980) établirent l'intérêt de l'utilisation de la déviation et ainsi ouvrirent des horizons nouveaux à l'archéomagnétisme des matériaux déplacés.

Jusque-là, l'interprétation des données archéomagnétiques tirées de ce site paraît assez classique. Cependant, le fait qu'il s'agisse de briques de pilettes d'hypocauste cuites en position à plat suggère que l'aimantation de ces matériaux n'a pas été acquise dans le four lors de la cuisson de fabrication, mais bien plutôt dans les thermes de l'édifice où ils furent employés. Connaissant la régularité des constructions romaines, et en particulier celle des hypocaustes (fig. VII-1), il est possible de remonter à l'orientation très probable des murs du bâtiment par rapport au Nord magnétique de l'époque, soit -38° ouest et +52° est.

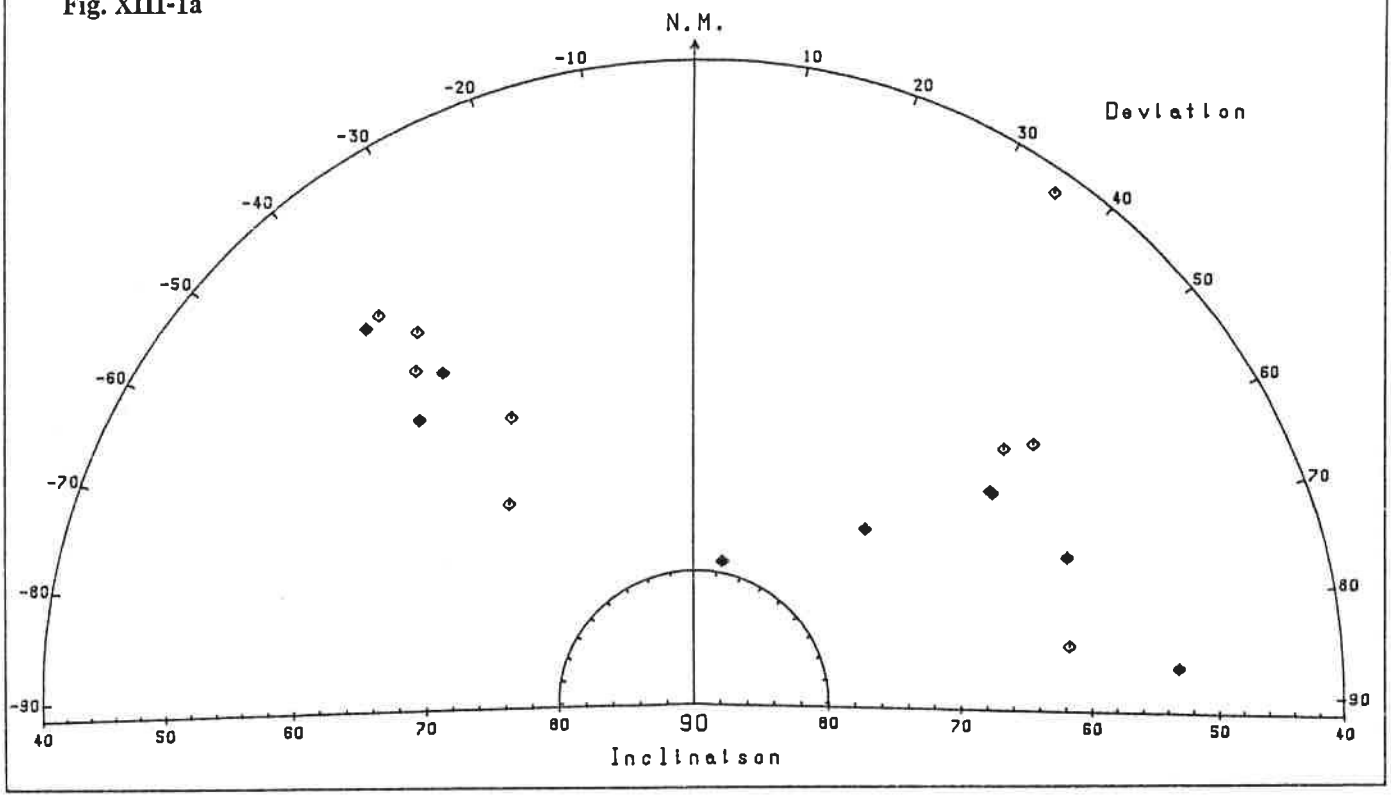
On peut admettre d'après E. Thellier (1981) que le Nord magnétique était quasiment confondu avec le Nord géographique durant l'époque gallo-romaine. D'où le report sur le plan cadastral (fig. XIII-2) des orientations déduites. On constate alors avec surprise une très bonne corrélation à la fois avec une partie du parcellaire et avec la direction de la voie romaine indiquée en pointillé. Notons que les parcellaires romains sont caractérisés principalement par des directions orthogonales entre elles et orthogonales aux voies à partir desquelles ils étaient le plus souvent établis. On a donc de bonnes raisons de penser qu'une partie de l'organisation actuelle du parcellaire remonte à l'époque gallo-romaine. On constate de plus que la direction de +52° correspond exactement à celle reliant les deux carrefours A et B sur le plan. Il paraît très probable que le tracé de la voie romaine ait subi une légère incurvation vers le sud à partir d'un tracé original plus rectiligne (ligne en pointillé). L'existence de ruines (peut-être celles de l'édifice en question) gênant le passage ont pu obliger à une telle modification. Le parcellaire et l'édifice semblent bien contemporains l'un de l'autre et postérieur à la voie, mais il est impossible dans l'état actuel des données archéologiques de définir une chronologie relative entre ces deux entités.

En résumé, l'archéomagnétisme apporte ici de fortes présomptions de preuves quant à l'identification d'un parcellaire gallo-romain à partir de simples fragments de matériaux de construction recueillis en surface lors de prospections. L'information archéologique qu'est la corrélation entre d'une part l'orientation de l'édifice et d'autre part le parcellaire et la voie romaine est obtenue ici par l'archéomagnétisme comme elle aurait pu l'être éventuellement par la photographie aérienne ou plus directement par la fouille.

JUGON
Parga
Fichier : 22084003.RES
13-MAR-86

Elements traites : PILETTES
Positions a plat

**Fig. XIII-1a**

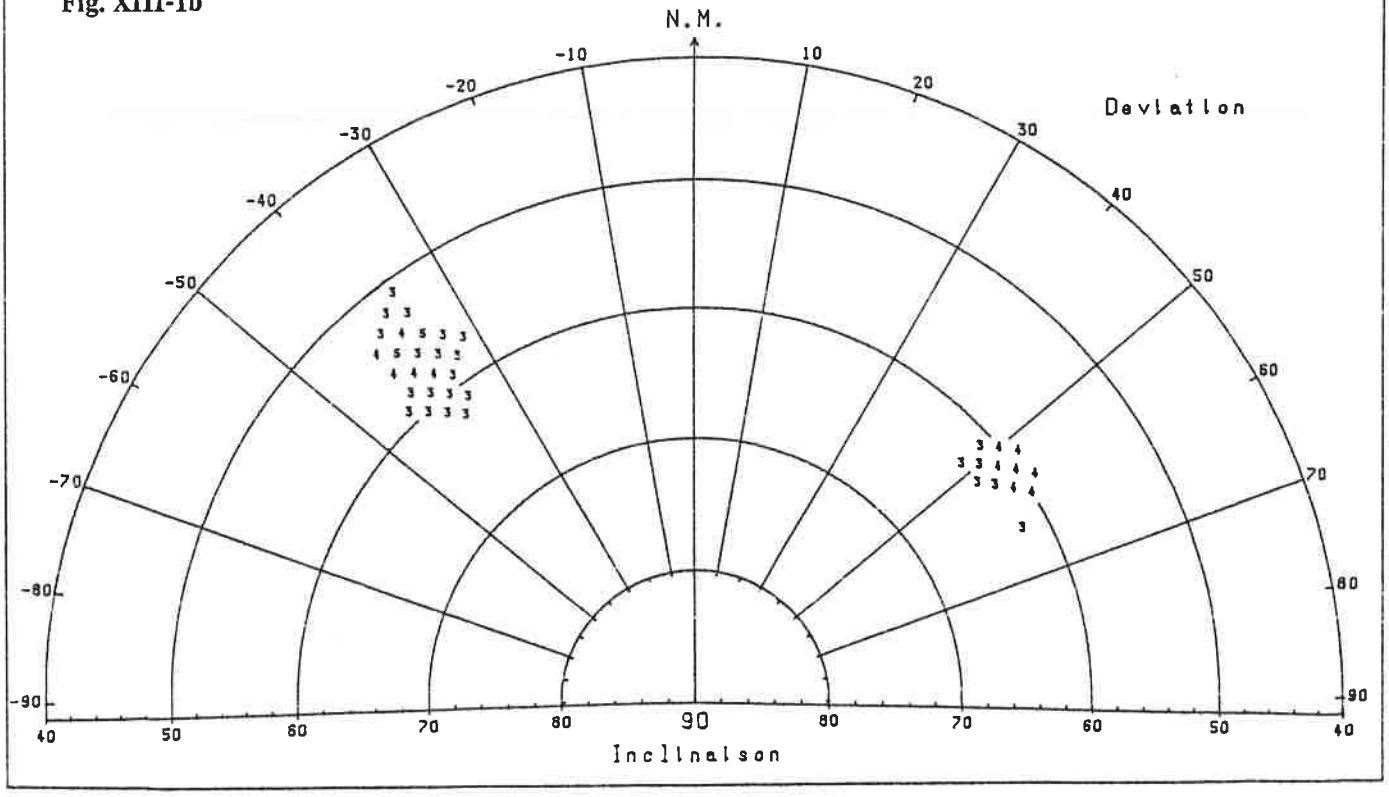



JUGON
Parga
Fichier : 22084003.RES
13-MAR-86

Elements traites : PILETTES
Positions a plat

Fenetre mobile
selon un cone
de 8 degres
d'ouverture

**Fig. XIII-1b**



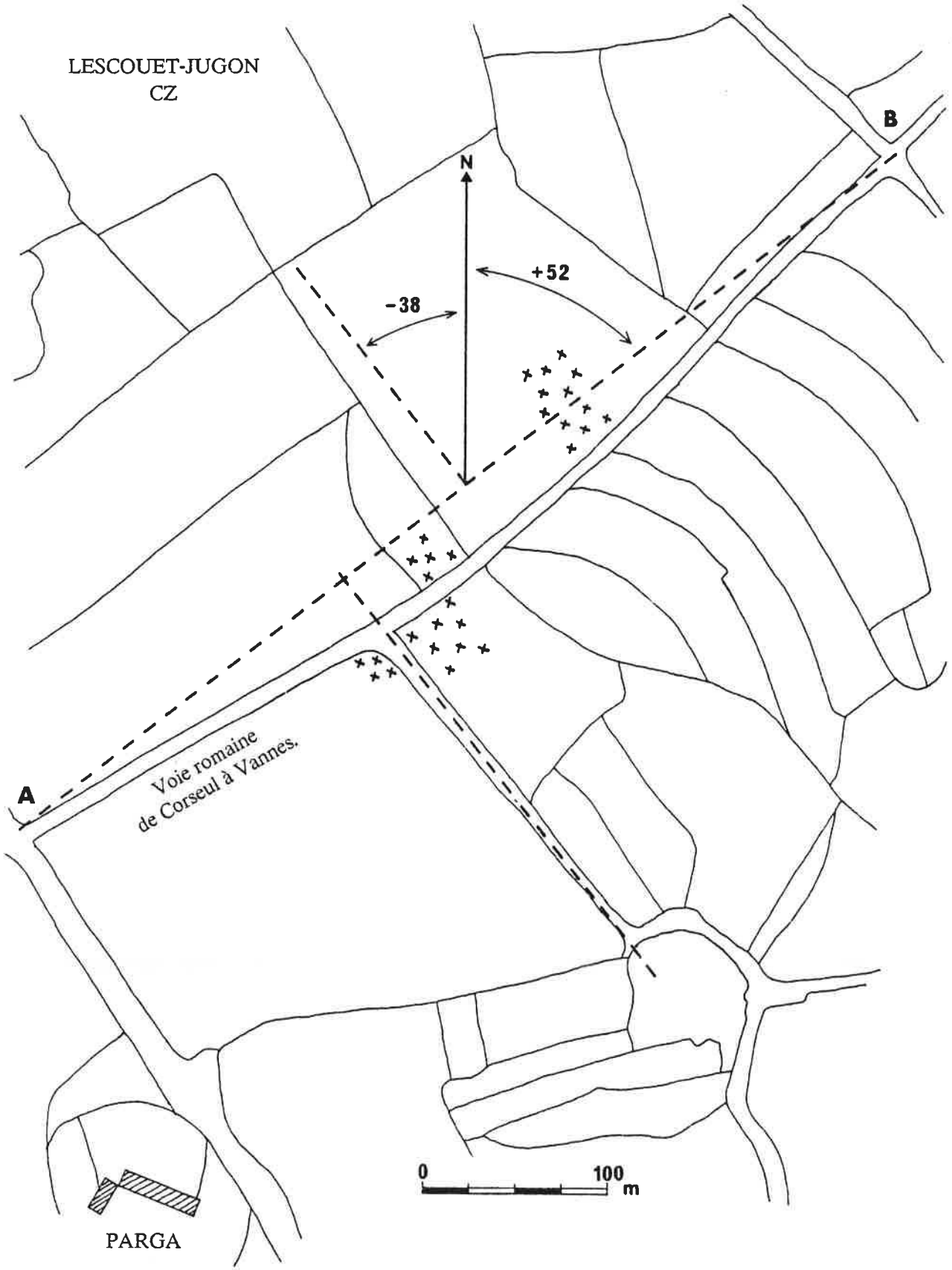



**Fig. XIII-2** : Localisation sur le cadastre du site gallo-romain de Parga en Lescouet-Jugon (22084 003). Les croix indiquent l'emplacement des fragments de matériaux de construction récoltés en prospection.

## B - APPORT DE L'ARCHEOMAGNETISME A L'ETUDE DES MATERIAUX DE CONSTRUCTION GALLO-ROMAINS RECUEILLIS EN MILIEU RURAL EN HAUTE-BRETAGNE.

Cet exemple se présente sous la forme d'un article qui sera publié dans le cadre d'un projet collectif de recherche ATP (Action Thématique Programmée) ayant pour objet l'archéologie du milieu rural à l'époque gallo-romaine en Haute-Bretagne.

# DATATION ARCHEOMAGNETIQUE DES EDIFICES RURAUX GALLO-ROMAINS EN HAUTE-BRETAGNE

## INTRODUCTION

L'archéomagnétisme des matériaux déplacés s'applique tout aussi bien à des éléments retrouvés en prospection qu'à des éléments retrouvés en fouille. A côté d'études effectuées sur des lots fournis par les archéologues dans le cadre de fouilles programmées, le Laboratoire d'Archéométrie a trouvé un vaste champ d'application de la méthode dans le cadre d'un projet original de recherche ATP (Action Thématique Programmée financée par le CNRS, de 1984 à 1986) dont le thème est : l'archéologie du milieu rural à l'époque gallo-romaine en Haute-Bretagne. Cette zone test recouvre trois départements, à savoir l'Ille-et-Vilaine et la partie des Côtes-du-Nord et du Morbihan située à l'est d'une ligne Saint-Brieuc - Vannes.

La connaissance du milieu rural à l'époque gallo-romaine en Haute-Bretagne a fait de nombreux progrès grâce aux renseignements recueillis sur les sites de prospection. Ces sites fournissent un matériel varié constitué majoritairement de mobilier céramique (commune et sigillée) et de matériaux de construction (tuiles, briques, *etc...*). La collecte, en grand nombre, de fragments de ces matériaux est l'oeuvre de nombreux prospecteurs bénévoles travaillant soit individuellement (Bassin de la Vilaine), soit au sein d'associations (Centre Régional d'Archéologie d'Alet, Centre de Recherche Archéologique du Pays de Rennes). Elle constitue la phase de prélèvement sur le terrain et ne demande qu'un minimum de précautions : localisation précise de la collecte et constitution éventuelle de lots différenciés au sein d'un même site. Le tri effectué au laboratoire permet de ne garder que les éléments présentant une taille suffisante et un bon état de conservation (peu érodés).

Les résultats présentés ici ont bénéficié des récents progrès de l'archéomagnétisme des matériaux déplacés. A ce titre, on peut insister sur la grande fiabilité des datations obtenues. Les conclusions archéologiques tirées de la datation des édifices ruraux gallo-romains, déjà présentées par L. Langouët et L. Goulpeau en 1984, ne sont que confirmées et ce d'autant plus que la méthode a bénéficié de traitements statistiques très sélectifs quant à la qualité des résultats.

L'archéomagnétisme des matériaux déplacés a cette particularité d'apporter, à côté de la datation, des renseignements d'ordre technologique sur la position et le rangement des matériaux dans les fours lors de la cuisson. D'où une série d'observations pouvant dénoter autant de particularités, de différences ou de ressemblances entre lots provenant de sites d'une même région. L'exposé de ces données, qui doivent être manipulées pour l'instant avec prudence, se veut d'indiquer les pistes de recherche futures en ce qui concerne la caractérisation et la provenance des matériaux de construction.

## A - DATATION

### RAPPEL DE LA METHODE

Les tuiles et les briques sont des matériaux d'argile cuite susceptibles d'avoir acquis, lors du refroidissement après cuisson de fabrication, une aimantation dite thermorémanente (ATR) proportionnelle et colinéaire au champ magnétique terrestre (CMT) du moment et du lieu. Ces matériaux de forme parallélépipèdique étaient théoriquement cuits en position à plat, de chant ou debout dans des fours dont on peut supposer *a priori* que la sole était horizontale. La mesure de la direction de l'aimantation, effectuée sur un magnétomètre spinner situé au Laboratoire de Géophysique de l'Université de Rennes I, se fait à partir de carottes de 25mm de diamètre prélevées sur les matériaux. Elle permet de déterminer la position de cuisson satisfaisant la condition selon laquelle l'inclinaison doit être comprise dans l'intervalle (50°, 75°), ceci en accord avec l'orientation générale du CMT dans nos régions durant la période historique (Thellier, 1981). Le choix de la position définit alors le couple inclinaison-déviation caractérisant la direction de l'aimantation à retenir pour le fragment de tuile spécifié. Il existe bien sûr un bruit de fond du fait que les positions réelles différaient plus ou moins des positions théoriques. Afin de minimiser cet effet, l'échantillonnage, c'est-à-dire le nombre de fragments différents, doit être assez grand. La centaine d'éléments apparaît comme un échantillonnage minimal.

**COMMENTAIRE DU TABLEAU 1**
(dans l'ordre des colonnes)

1) N° du site comprenant le département, la commune et le n° d'inventaire donné par la Direction des Antiquités Historiques de Bretagne.

2) Nom de la commune.

3) Nom du lieu-dit le plus proche du site.

4) N : Nombre d'éléments étudiés. T : tuiles repérées selon les bords , S : tuiles repérées selon les stries , B : briques , U : tubuli.

5) n : Nombre d'éléments retenus pour la statistique de Fisher.

6) $\bar{I} \pm \alpha_{95}$ : Inclinaison moyenne et $\alpha_{95}$ au sens de Fisher.

7) k : Facteur de précision

8) C.L. : Correction de latitude à ajouter à I pour obtenir une inclinaison réduite à Paris.

9) Date : Intervalle intégrant à la fois l'erreur sur la courbe et l'erreur sur l'inclinaison. Le choix de l'une des branches est fonction du mobilier associé.

ATP

ARCHEOLOGIE DU MILIEU RURAL

AUX EPOQUES PRE-ROMAINE ET GALLO-ROMAINE

EN HAUTE-BRETAGNE

## DATATION ARCHEOMAGNETIQUE DES SITES RURAUX

**TABLEAU 1**

| n° | Commune | Site | N | n | $\overline{I} \pm \alpha_{95}$ | k | C.L. | date |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 22003 001 | Aucaleuc | Coetfinet-d'en-Haut | 113T | 28 | 65° ± 2° | 185 | 0°5 | 175-230 |
| 22012 001 | La Bouillie | L'Islet | 144T | 17 | 71° ± 2° | 314 | 0°5 | 200-275 |
| 22035 001 | Les Champs-Géraux | Maupertuis | 96T | 46 | 64°5 ± 2°5 | 78 | 0°5 | 170-230 |
| 22035 009 | Les Champs-Géraux | Saint-Geoffroy | 43T+52S | 26 | 62° ± 3° | 106 | 0°5 | - |
| | | | | 9 | 67°5 ± 2° | 441 | 0°5 | - |
| 22048 037 | Corseul | Les Hannelais | 74T+88S | 23 | 63° ± 2° | 227 | 0°5 | - |
| | | | 119B | 21 | 67° ± 2°5 | 178 | 0°5 | - |
| 22049 003 | Créhen | La Touche, tubuli | 145U | 51 | 62° ± 1°5 | 236 | 0°5 | 40-125 |
| 22054 004 | Erquy | Le Champ de la Mare | 38T+31S | 20 | 61° ± 2°5 | 175 | 0°5 | - |
| 22084 003 | Jugon | Parga | 55T+20S | 25 | 67° ± 2° | 171 | 0°5 | - |
| 22147 003 | Merdrignac | La Ville-Oréal | 42T+16S | 11 | 63°5 ± 2°5 | 252 | 0°5 | - |
| 22179 005 | Fréhel | La Saudraie | 148T | 39 | 65°5 ± 2° | 151 | 0°5 | - |
| 22180 002 | Plélan-le-Petit | Couavra | 107T | 20 | 70° ± 2°5 | 159 | 0°5 | 190-280 |
| 22185 002 | Plénée-Jugon | La Mare Pilais | 93T+63S | 57 | 66° ± 1° | 222 | 0°5 | - |
| 22209 001 | Ploubalay | La Mettrie-Saudrais | 146T | 27 | 63°5 ± 1°5 | 256 | 0°5 | 170-220 |
| 22209 008 | Ploubalay | Drola | 109T | 23 | 65° ± 2°5 | 159 | 0°5 | 170-230 |
| 22209 032 | Ploubalay | Les Haies | 89T | 11 | 63°5 ± 3° | 180 | 0°5 | 160-225 |
| 22213 001 | Plouer | Le Boisanne | 32T+19S | 9 | 65° ± 3° | 245 | 0°5 | - |
| 22237 007 | Pluduno | Le Bois-Jançon | 97T | 20 | 66° ± 2° | 268 | 0°5 | 175-230 |
| 22239 003 | Plumaudan | Guillier | 45T | 9 | 65° ± 2° | 476 | 0°5 | 20-90 |
| 22242 005 | Plurien | Saint-Jean | 69T | 11 | 63° ± 3° | 172 | 0°5 | 160-225 |
| | | | | 14 | 70° ± 2°5 | 246 | 0°5 | 190-280 |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 22263 001 | Le Quiou | La Gare | 173T | 47 | 66°5 ± 2° | 118 | 0°5 | 180-240 |
| 22339 001 | Taden | Les Boissières | 59T+23S | 28 | 64°5 ± 2°5 | 120 | 0°5 | 170-230 |
| 22339 020 | Taden | Le Port | 144T | 21 | 64°5 ± 2° | 286 | 0°5 | 170-225 |
| 22357 004 | Trégon | La Haute-Mettrie | 110T | 23 | 70° ± 2° | 183 | 0°5 | 190-280 |
| 35004 001 | Antrain | La Bertinière | 291T | 71 | 65° ± 1°5 | 161 | 0°5 | - |
| 35009 016 | Baguer-Morvan | La Croix-Chemin | 111T+65S | 32 | 63°5 ± 2° | 165 | 0°5 | 170-220 |
| 35010 007 | Baguer-Pican | La Moignerais | 81T | 22 | 62°5 ± 1°5 | 372 | 0°5 | - |
| 35012 004 | Bain-de-Bretagne | La Haute-Folais | 67T | 17 | 61° ± 2°5 | 187 | 1° | 35-130 |
| 35033 004 | Bourg-des-Comptes | La Pionais | 79T | 14 | 63°5 ± 2°5 | 211 | 1° | - |
| 35073 001 | Châtillon/Seiche | fouilles I | 59T | 15 | 64° ± 2°5 | 192 | 1° | 20-100 |
| | | fouilles IIA | 134T | 32 | 62° ± 2° | 179 | 1° | 30-120 |
| | | fouilles IIB | 116T | 28 | 61° ± 2° | 149 | 1° | 40-130 |
| | | | | 16 | 64°5 ± 1°5 | 778 | 1° | 175-230 |
| 35075 001 | Chauvigné | La Claiteraie | 157T | 16 | 63°5 ± 2°5 | 191 | 0°5 | - |
| 35085 005 | Combourg | La Basse-Epine | 120T | 37 | 64° ± 2° | 148 | 0°5 | 170-225 |
| 35085 011 | Combourg | Trémaudan | 51T+19S | 30 | 64° ± 2° | 134 | 0°5 | - |
| 35085 012 | Combourg | Landréjard | 198T | 26 | 68° ± 1°5 | 259 | 0°5 | 0-65 |
| 35085 013 | Combourg | La Haute-Boissière | 89T | 24 | 66° ± 2°5 | 141 | 0°5 | - |
| 35085 033 | Combourg | Les Fontenelles | 83T | 13 | 63°5 ± 2° | 400 | 0°5 | 170-225 |
| 35085 034 | Combourg | Tervaux | 135T | 36 | 65° ± 1°5 | 182 | 0°5 | - |
| | | | | - | 63° | - | 0°5 | - |
| 35085 036 2 | Combourg | Les Cinq Chemins | 89T | 20 | 66°5 ± 2°5 | 166 | 0°5 | 175-280 |
| 35128 005 | Guipel | La Ville Morin | 142T | 27 | 65°5 ± 2° | 185 | 0°5 | - |
| 35180 001 | Miniac-sous-Bécherel | Le Poncet | 112T | 50 | 66° ± 2° | 117 | 0°5 | 180-285 |
| 35221 001 | Pléchâtel | La Ville Chérel | 84T+30S | 18 | 61°5 ± 2°5 | 203 | 1° | 160-220 |
| 35221 007 | Pléchâtel | La Cassière | 57T+43S | 25 | 64° ± 2°5 | 155 | 1° | - |
| 35233 003 | Québriac | La Mariais | 37T+15S | 16 | 63°5 ± 2° | 270 | 0°5 | - |
| 35233 009 | Québriac | Les Longrais | 49T+39S | 22 | 65° ± 2° | 205 | 0°5 | 170-230 |
| 35289 004 | Saint-Malo-de-Phily | La Mariais | 124T | 25 | 61°5 ± 1°5 | 267 | 1° | 165-215 |
| 35306 007 | Saint-Père | La Ville-Malherbe | 136T | 16 | 65° ± 2° | 252 | 0°5 | 170-230 |
| 35337 002 | Tinténiac | Le Châtelain | 83T+51S | 41 | 65°5 ± 2° | 148 | 0°5 | - |

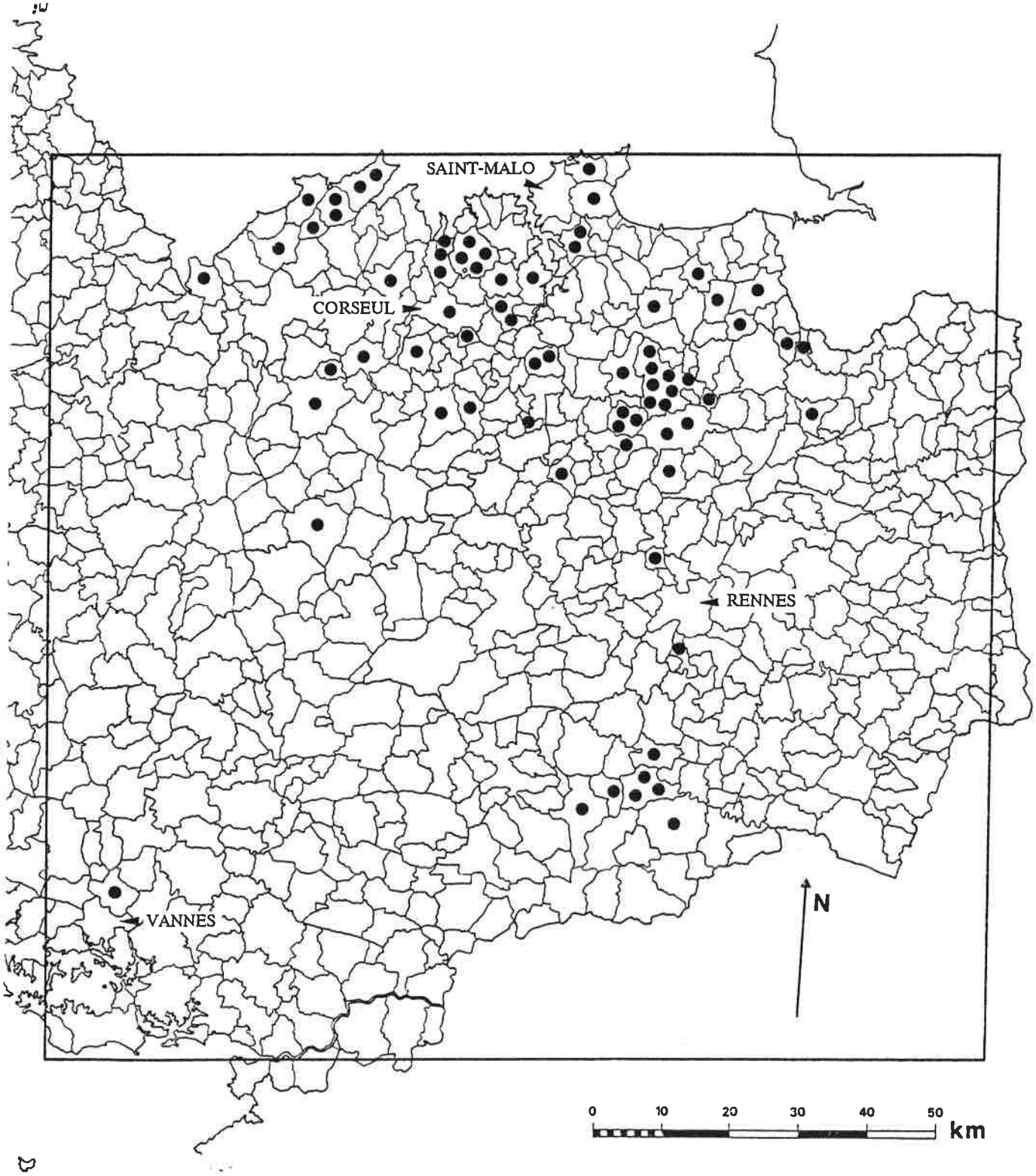



**Fig. 1** : Haute-Bretagne - Carte de répartition des sites de l'ATP ayant fait l'objet d'une étude archéomagnétique.

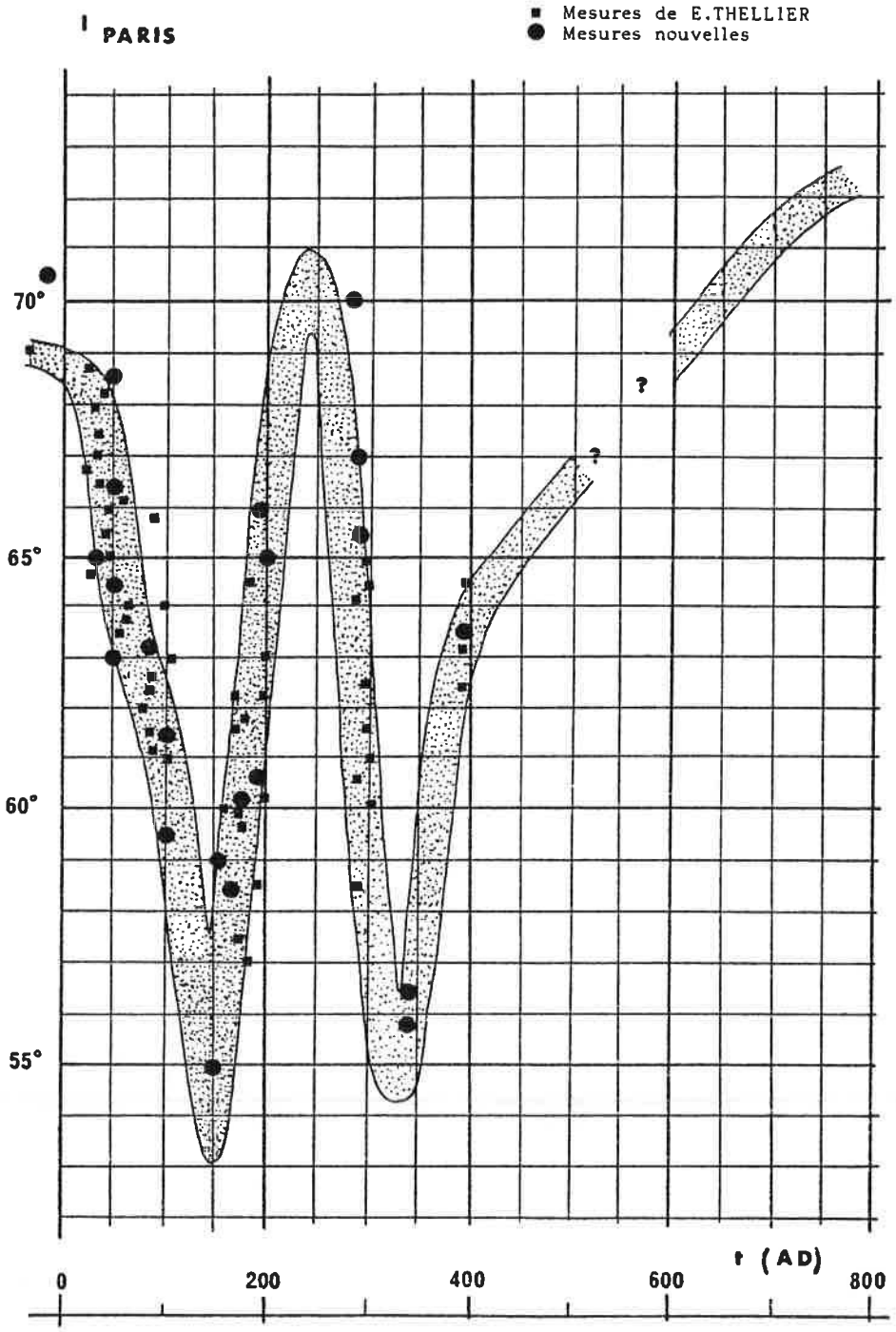



**Fig. 2** : Courbe de variation séculaire de l'inclinaison du CMT en France durant l'époque gallo-romaine, d'après L. Langouet, I. Bucur et L. Goulpeau (1983).

## LES SITES ETUDIES

Dans la zone étudiée, il a été recensé 1084 sites livrant des fragments de *tegulae*. Cependant, un bon nombre d'entre eux présentent soit un mobilier très érodé, soit une faible densité, soit les deux à la fois. En l'état actuel de l'inventaire, le nombre de sites potentiellement utilisables doit être de l'ordre de 300 à 400. Soixante-douze sites ont fait jusque-là l'objet d'une étude archéomagnétique, ce qui représente 7303 carottes, soit une moyenne de 100 carottes par lot. Quarante-sept sites ont donné des résultats archéomagnétiques exploitables (tabl. 1), avec 5667 carottes, soit 113 carottes par lot en moyenne. Le taux de réussite est de l'ordre de 65%. Les causes principales de l'impossibilité d'exploiter 25 sites proviennent de l'existence de perturbations de l'aimantation (essentiellement par des réchauffements partiels) ou d'échantillonnages trop faibles. Dans l'étude menée antérieurement par L. Langouët et L. Goulpeau (1984), 53 sites avaient été étudiés et 33 présentaient des résultats archéomagnétiques fiables. Tous les lots, anciennement et récemment traités, ont bénéficié des nouveaux modes de traitement des données mis au point. L'utilisation spécifique de la déviation, l'estimation de la précision et la correction des perturbations dues au champ démagnétisant ou à l'anisotropie d'aimantation thermorémanente, ont été appliquées à l'ensemble des lots et ont permis l'obtention de résultats archéomagnétiques beaucoup plus fiables. La cartographie des 72 sites étudiés est donnée en figure 1. La majorité d'entre eux se situe dans le nord-est des Côtes-du-Nord et le nord de l'Ille-et-Vilaine. Cet état reflète l'activité du Centre Régional d'Archéologie d'Alet dans cette région. Dans le cadre de l'ATP, les études archéomagnétiques se sont étendues aux Bassins de Rennes et de la Vilaine grâce à l'action de prospecteurs comme A. Provost, G. Jumel, M. Gautier et G. Leroux. A l'avenir, nous espérons étendre et intensifier ces recherches de façon plus uniforme sur l'ensemble de la Haute-Bretagne.

Les traitements débouchent sur la détermination d'une ou de plusieurs inclinaisons moyennes selon qu'un lot possède un ou plusieurs ensembles différents de tuiles. L'inclinaison moyenne permet de remonter à la date via l'utilisation des courbes de variation du CMT.

## L'UTILISATION DU MOBILIER CERAMIQUE

La variation séculaire de l'inclinaison du CMT, en France, durant l'époque gallo-romaine est donnée en figure 2 (Langouët *et al.* , 1983). La précision de la courbe est matérialisée par l'épaisseur du tracé qui englobe le barycentre des points d'étalonnage. On observe une double oscillation, d'où théoriquement 3 à 4 dates possibles pour une même inclinaison. Dans l'état actuel des possibilités de l'archéomagnétisme, seul le contexte archéologique permet de lever l'indétermination. Le mobilier retrouvé sur les sites contient très souvent une céramique particulière, appelée céramique sigillée, qui était importée principalement d'ateliers de production du Centre, du Sud et de l'Est de la Gaule. Cette céramique de luxe possède une pâte, des formes et des décors très caractéristiques permettant sa datation. L'utilisation statistique de ces datations (Langouët et Goulpeau, 1975 ; Langouët *et al.* , 1984) permet, dans certaines conditions, de choisir une date particulière parmi les dates archéomagnétiques possibles. L'histogramme des probabilités annuelles de fabrication des céramiques sigillées représente la somme des probabilités, par tranche de 5 ans, établies pour chaque tesson comme l'inverse de son intervalle de datation. Par exemple, un tesson du II$^{e}$ siècle a une chance sur cent d'avoir été fabriqué telle année entre 100 et 200 ap. J.-C.

La figure 3 donne l'histogramme des probabilités annuelles de fabrication des sigillées pour l'ensemble des sites prospectés de Haute-Bretagne. L'étude porte sur 2051 tessons expertisés. On constate une période d'importation maximale à partir du II$^{e}$ siècle, et plus particulièrement à partir du dernier quart du II$^{e}$ siècle. Le choix d'une date archéomagnétique à partir de telles statistiques repose sur le principe suivant :

- L'importation du mobilier associé ne peut être que presque contemporaine ou postérieure à la date de construction (Goulpeau et Langouët, 1984).

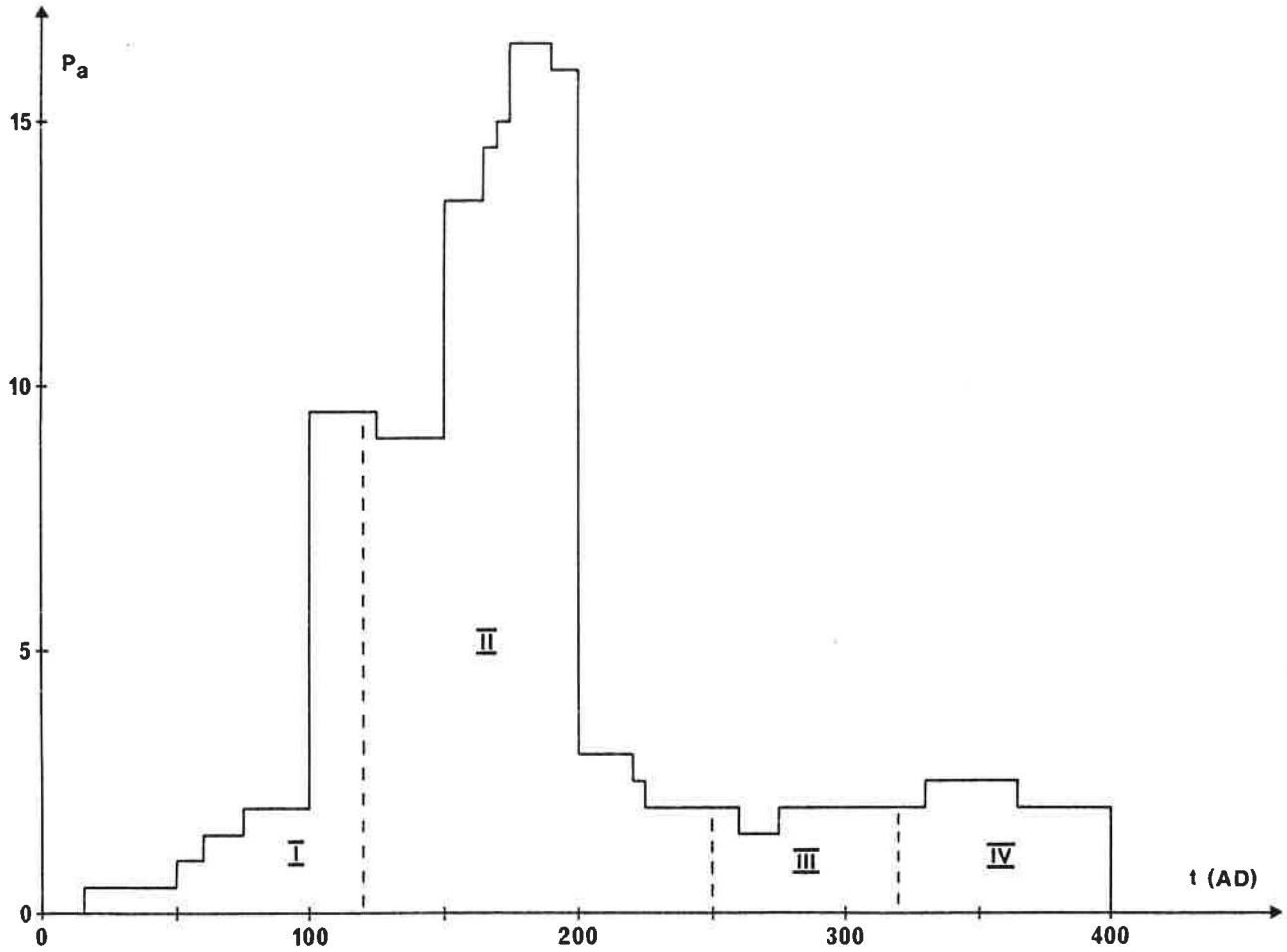



Fig. 3 : Histogramme des probabilités annuelles de fabrication des céramiques sigillées retrouvées en prospection sur les sites ruraux gallo-romains en Haute-Bretagne (2051 tessons).Les intervalles I, II, III et IV correspondent aux quatre branches ascendantes et descendantes de la courbe de variation de l'inclinaison donnée en figure 2.

Selon ce principe, le maximum de l'histogramme des probabilités détermine l'époque vers laquelle la construction a dû avoir lieu. Nous avons reporté en figure 3 les intervalles de temps correspondant aux quatre branches descendantes et ascendantes de la courbe de variation de l'inclinaison donnée en figure 2. La probabilité associée à chacune des branches s'exprime alors :

| | | |
|---|---|---|
| I | (000 - 120) | : 17% |
| II | (120 - 250) | : 66% |
| III | (250 - 320) | : 7% |
| IV | (320 - 400) | : 10% |

Ainsi il apparaît comme hautement probable que la seconde branche (120 - 250) de la courbe de l'inclinaison corresponde bien à la période principale de construction des édifices en dur dans le milieu rural en Haute-Bretagne.

La date de construction d'un site est déterminée lorsque ce dernier offre au moins quatre tessons expertisés de céramique sigillée. Si l'histogramme des probabilités annuelles de fabrication présente un seul maximum resserré correspondant à une seule des branches de la figure 2, la détermination de la date se fait sans ambiguité. Par contre, si l'histogramme présente différents apports à différentes époques, le problème du choix de l'une des branches se pose à nouveau. En pratique, la branche choisie est celle correspondant au premier

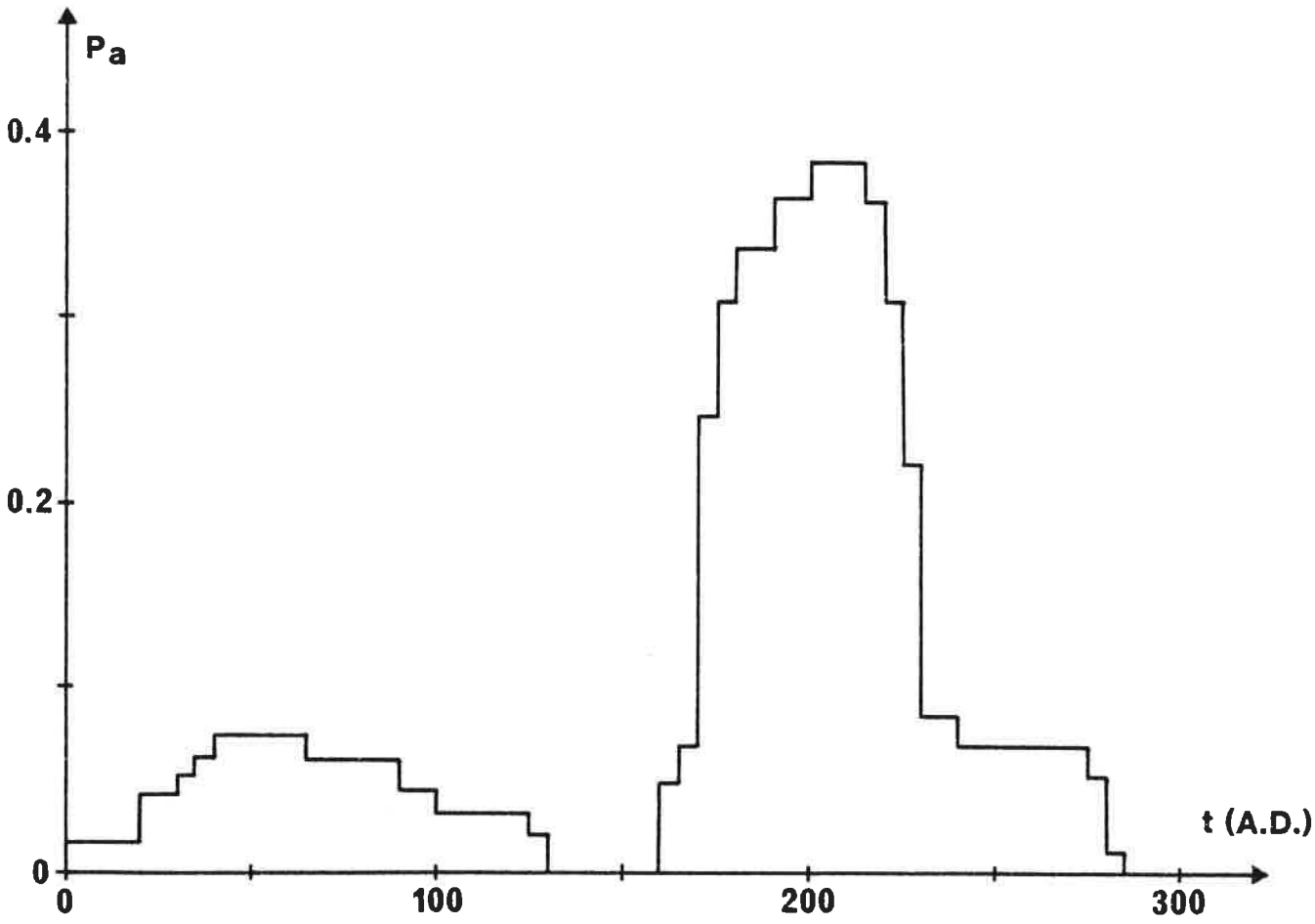



Fig. 4 : Histogramme des probabilités annuelles de fabrication des tuiles et briques gallo-romaines retrouvées en prospection sur les sites ruraux gallo-romains en Haute-Bretagne.

apport important de céramique sur le site. Par exemple, la première branche est retenue lorsque le nombre de tessons du I$^{er}$ siècle représente au moins 20% de l'échantillonnage total.

## LA DATATION ARCHEOMAGNETIQUE

Le tableau 1 donne le résultat des mesures archéomagnétiques effectuées sur les 47 sites exploitables. Vingt-sept d'entre eux ont fourni de la céramique sigillée permettant de retenir une date. Celle-ci est exprimée sous la forme d'un intervalle à 95% de confiance, intégrant à la fois l'erreur sur la courbe et l'erreur sur l'inclinaison. La figure 4 donne l'histogramme des probabilités annuelles de fabrication des 27 lots de tuiles et briques correspondant à 30 ensembles identifiés et datés (tabl. 1)

- 20% des ensembles donnent une probabilité maximale de fabrication autour de 50 ap. J.-C.

- 80% des ensembles donnent une probabilité maximale autour de 200 - 210 ap. J.-C.

On constate donc une première vague de construction essentiellement entre 50 et 100 ap. J.-C. et une deuxième très importante fin II$^{e}$ - début III$^{e}$ siècle ap. J.-C. Le fait qu'aucune construction ne soit datée de 120 à 160 ap. J.-C. provient de ce que les inclinaisons varient entre 61° et 71° (fig. 2). Il est probable que des erreurs interviennent dans le choix des dates à partir de la céramique sigillée. En particulier, le fait qu'aucun site ne soit

daté de 250 à 400 peut étonner. En réalité, tous les sites présentant des sigillées du IV$^{e}$ siècle sont caractérisés par des apports beaucoup plus importants de sigillées des II$^{e}$ ou I$^{er}$ siècles. Les sigillées du IV$^{e}$ siècle marqueraient alors une réoccupation de sites préexistants.

Si la courbe de variation de l'intensité du CMT était elle aussi connue avec précision pour l'époque gallo-romaine, la mesure de l'inclinaison et de l'intensité (la déviation ne pouvant servir à la datation) devrait permettre d'emblée de ne retenir qu'une seule date archéomagnétique et de s'affranchir du contexte archéologique. On ne peut ici qu'émettre le souhait de pouvoir un jour parvenir à une telle indépendance.

La comparaison des histogrammes 3 et 4 montre un décalage des maximums des probabilités de l'ordre de 30 ans. Ce décalage est imputable à la durée de vie des objets qui intègre à la fois le délai d'importation des céramiques depuis les centres de production jusqu'aux habitats, le délai d'utilisation des matériaux de construction, et les déménagements avec transfert de mobilier ancien.

### CONCLUSIONS SUR LA DATATION

On constate que la majorité des constructions en dur ne sont apparues dans le milieu rural en Haute-Bretagne que vers la fin du II$^{e}$ et le début du III$^{e}$ siècle ap. J.-C. L'habitat traditionnel a donc perduré jusqu'au milieu du II$^{e}$ siècle dans nos régions. A titre de comparaison, l'apparition des constructions en dur en Ile-de-France est datée de la fin du I$^{er}$ siècle et du début du second siècle ap. J.-C. (Le Glay, 1975).

Il résulte de ces datations que toute étude d'ensemble portant sur les matériaux de construction gallo-romains dans nos régions ne s'applique principalement qu'à un laps de temps restreint d'environ un siècle.

La datation archéomagnétique, en 1986, ne fait que confirmer les conclusions déjà avancées par L. Langouët et L. Goulpeau (1984). Cette confirmation est d'autant plus forte qu'elle s'appuie sur une méthode ayant fait l'objet de nombreuses améliorations tant en ce qui concerne les traitements statistiques qu'en ce qui concerne les corrections des effets parasites (Langouët *et al.* , 1986).

## B - EXPLOITATION DES DONNEES ARCHEOTECHNOLOGIQUES

Des renseignements d'ordre technologique sont rendus accessibles par la méthode. Il s'agit :

- Des positions de cuisson (à plat, de chant, debout),
- Des intensités d'aimantations par lot,
- Du nombre d'ensembles distincts de tuiles dans un même lot,
- De l'orientation des plans d'aplatissement des tuiles par rapport au nord magnétique de l'époque et du caractère rectangulaire des fours,
- De l'agencement des tuiles dans les fours.

Toutes ces données sont présentées dans le tableau 2. Leur étude statistique et leur cartographie peuvent apporter des renseignements archéologiques complémentaires et ouvrir des horizons nouveaux dans la perspective d'une meilleure connaissance des productions de matériaux de construction.

### LES POSITIONS DE CUISSON

Pour l'immense majorité des lots étudiés, 70 à 80% des éléments ont été cuits en position debout. Ceci ne fait que confirmer une constatation déjà effectuée à maintes reprises par L. Goulpeau et L. Langouët (1982 et 1984)). Un seul lot, provenant du site de la Mare-Pilais en Plénée-Jugon (22185 002), présente 92% des éléments cuits en position de chant. Le caractère extrêmement rare de ce type de rangement peut servir à identifier la

production d'un atelier particulier. Plus généralement, les lots n'ayant pas subi de perturbation par réchauffage partiel ultérieur présentent presque toujours un pourcentage de cuisson en position debout voisin de 90%. Des pourcentages entre 70 et 90% peuvent laisser entrevoir l'existence d'aimantations parasites. En effet, des tuiles cuites debout peuvent redonner une position à plat ou de chant par suite de l'acquisition d'une aimantation thermorémanente partielle dans une autre position à une autre époque. Afin d'éliminer une partie des erreurs dues à des positions minoritaires résultant souvent de perturbations, l'étude archéomagnétique porte uniquement sur les éléments de la position largement majoritaire définissant *a priori* le mode de rangement normal des matériaux dans le four.

Outre un faible échantillonnage, la raison essentielle pour laquelle 25 sites n'ont pu être exploités archéomagnétiquement réside dans de trop faibles pourcentages de positions debout. Ce qui trahit l'existence de perturbations importantes très probablement d'origine thermique qu'on peut imputer soit à des incendies, soit à des brûlis de surface. L'identification des incendies est une donnée archéologique interessante en ce qu'elle peut témoigner d'un accident ponctuel ou encore d'une destruction volontaire. Pratiquement, le meilleur moyen de caractériser un lot incendié est de montrer que l'aimantation secondaire a été acquise par des matériaux statistiquement en position à plat. En effet, de nombreuses fouilles ont montré (Adam, 1984) des édifices incendiés dont la toiture est retrouvée effondrée à plat sur les structures au sol.

L'hypothèse de brûlis de surface n'est pas non plus à rejeter. Des vestiges encore hors sol ont pu subir des feux de défrichage durant le Moyen-Age. L'incendie marque alors un événement le plus souvent très postérieur à l'abandon de l'édifice.

Notons que des désaimantations thermiques effectuées sur un certain nombre de lots à problème permettent d'affirmer l'existence de perturbations importantes, pouvant correspondre à des incendies, pour les sites de :

| | | |
|---|---|---|
| Baguer-Pican | La Moignerais | (35010 007) |
| Chatillon/Seiche | Lot I | (35073 11) |
| Combourg | Basse-épine | (35085 005) |
| St-Malo-de-Phily | La Mariais | (35289 004) |

**COMMENTAIRE DU TABLEAU 2**
(dans l'ordre des colonnes)

1) N° de site. Permet la correspondance avec le tableau 1.

2) %P : Pourcentage de positions debout. Lorsque la position majoritaire est différente, elle est identifiée par un symbole : C pour de chant, P pour à plat.

3) $\overline{M}$ : Aimantation volumique moyenne observée sur le lot.

4) nE : Nombre d'ensembles distincts dans le lot.

5) $\overline{\Delta}i$ : Déviation comprise entre -45° et +45°

6) $\overline{\Delta}'i$ : Déviation comprise entre -90° et -45° ou +45° et +90°.

7) $\delta$ : Ecart angulaire à 90° :

8) Rangt $\Delta i$ : Orientation est-ouest des faces supérieures des tuiles.

9) Rangt $\Delta' i$ : Orientation nord-sud des faces supérieures des tuiles.

## DONNEES ARCHEOTECHNOLOGIQUES

**TABLEAU 2**

| n° | %P | $\overline{M}$ | n E | $\Delta_i$ | $\Delta'_i$ | δ | rangt $\Delta_i$ | rangt $\Delta'_i$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 22003 001 | 76% | 2 | 1 | 18°5 | -54° | 17°5 | 1/3 E , 2/3 W | 1/2 N , 1/2 S |
| 22012 001 | 68% | 3 | 1 | -29°5 | 46° | 14°5 | 1/2 E , 1/2 W | S |
| 22035 001 | 82% | 5 | 1 | 23° | -70° | 3° | 1/2 E , 1/2 W | 1/2 N , 1/2 S |
| 22035 009 | 79% | 10 | 2 | 6°5<br>-44° | -82°<br>56° | 1°5<br>10° | 2/3 E , 1/3 W<br>? | N<br>? |
| 22048 037 | 64% | 6 | 1 | 16°5<br>-31°5 | -51°5<br>? | 22°<br>? | E<br>? | 1/2 N , 1/2 S<br>? |
| 22049 003 | 82% | 1 | 1 | 6°3 | -85°3 | 1°6 | - | - |
| 22054 004 | 85% | 10 | 1 | -27° | 76° | 13° | 1/2 E , 1/2 W | 1/2 N , 1/2 S |
| 22084 003 | 78% | 1 | 1 | 32° | -49° | 9° | 3/4 E , 1/4 W | 1/4 N , 3/4 S |
| 22147 003 | 83% | 1 | 2? | -34°5 | 53°5 | 2° | W | S |
| 22179 005 | 90% | 6 | 2? | 11°5 | -58° | 20°5 | 1/3 E , 2/3 W | 1/2 N , 1/2 S |
| 22180 002 | 68% | 5 | 1 | 31° | ? | ? | W | 1/3 N , 2/3 S |
| 22185 002 | 92% C | 3 | 1 | 28° | -57° | 5° | E | 1/3 N , 2/3 S |
| 22209 001 | 67% | 8 | 1 | 20° | -66°5 | 3°5 | 1/3 E , 2/3 W | 1/3 N , 2/3 S |
| 22209 008 | 74% | 4 | 1 | 11°5 | -60° | 18°5 | 1/2 E , 1/2 W | 1/2 N , 1/2 S |
| 22209 032 | 70% | 5 | 1 | 24° | -46° | 20° | 1/2 E , 1/2 W | 1/2 N , 1/2 S |
| 22213 001 | 73% | 3 | 1 | -6°5 | 85° | 1°5 | 1/2 E , 1/2 W | S |
| 22237 007 | 75% | 10 | 1 | 40°5 | -48° | 1°5 | 1/2 E , 1/2 W | 1/2 N , 1/2 S |
| 22239 003 | 71% | 10 | 1 | 16° | ? | ? | 1/2 E , 1/2 W | ? |
| 22242 005 | 88% | 4 | 2 | -2°<br>39° | -86°<br>-43° | 6°<br>8° | E<br>E | S<br>1/2 N , 1/2 S |
| 22263 001 | 87% | 10 | 1 | -1° | 89°5 | 0°5 | 1/2 E , 1/2 W | S |
| 22339 001 | 87% | 5 | 1 | 15° | ? | ? | 1/3 E , 2/3 W | 1/2 N , 1/2 S |
| 22339 020 | 83% | 10 | 1 | ? | -57° | ? | ? | ? |
| 22357 004 | 71% | 5 | 1 | -2° | -89°5 | 2°5 | 1/2 E , 1/2 W | 3/4 N , 1/4 S |
| 35004 001 | 86% | 6 | 1 | 5° | -87°5 | 2°5 | W | N |

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 35009 016 | 74% | 10 | 1 | 2°5 | 82°5 | 10° | 1/2 E , 1/2 W | 1/2 N , 1/2 S |
| 35010 007 | 99% | 15 | 1 | 3°3 | 89°2 | 4°1 | W | 3/4 N , 1/4 S |
| 35012 004 | 78% | 8 | 1 | 1° | -71°5 | 17°5 | E | 2/3 N , 1/3 S |
| 35033 004 | 81% | 10 | 1 | 9° | -83° | 2° | 2/3 E , 1/3 W | N |
| 35073 001 | 68% | 4 | 1 | ? | -60°5 | ? | ? | 2/3 N , 1/3 S |
| fouilles IIA | 77% | 10 | 1 | 21°9 | -73°3 | 5°2 | 1/2 E , 1/2 W | 1/2 N , 1/2 S |
| fouilles IIB | 85% | 2 | 2 | 0°1 | ? | ? | 1/2 E , 1/2 W | ? |
| | | | | 28°9 | ? | ? | 3/4 E , 1/4 W | ? |
| 35075 001 | 58% | 20 | 1 | 40°6 | -53°2 | 3°8 | W | 1/2 N , 1/2 S |
| 35085 005 | 81% | 6 | 1 | 2°5 | -88°5 | 1° | 1/2 E , 1/2 W | 1/2 N , 1/2 S |
| 35085 011 | 99% | 10 | 1 | -0°8 | -79°2 | 11°6 | 1/2 E , 1/2 W | 1/2 N , 1/2 S |
| 35085 012 | 70% | 10 | 1 | 0° | -89°8 | 0°2 | 1/2 E , 1/2 W | 1/2 N , 1/2 S |
| 35085 013 | 91% | 20 | 1 | 11°6 | -80 | 1°6 | 1/2 E , 1/2 W | 1/2 N , 1/2 S |
| 35085 033 | 69% | 15 | 1 | 3°6 | 80°9 | 12°7 | 1/2 E , 1/2 W | 1/2 N , 1/2 S |
| 35085 034 | 92% | 8 | 2 | -4°9 | -88°2 | 6°7 | E | 1/4 N , 3/4 S |
| | | | | 30° | -50°? | ? | W | N |
| 35085 036 02 | 79% | 10 | 1 | 11°4 | -80°4 | 1°8 | W | 2/3 N , 1/3 S |
| 35128 005 | 62% | 10 | 1 | 21°6 | -66°5 | 1°9 | 1/2 E , 1/2 W | 1/2 N , 1/2 S |
| 35180 001 | 88% | 7 | 1? | 16°7 | -61°3 | 12° | 1/4 E , 3/4 W | 1/2 N , 1/2 S |
| 35221 001 | 88% | 15 | 1 | 0°9 | -83°2 | 5°9 | E | N |
| 35221 007 | 77% | 10 | 1 | -3°9 | 89°7 | 3°6 | 1/2 E , 1/2 W | N |
| 35233 003 | 77% | 5 | 1 | 12°5 | ? | ? | 1/2 E , 1/2 W | ? |
| 35233 009 | 79% | 19 | 1 | 15°8 | -66°9 | 7°3 | E | 2/3 N , 1/3 S |
| 35289 004 | 90% | 10 | 1 | 17°9 | -78°9 | 6°8 | E | N |
| 35306 007 | 77% | 10 | 1 | 7°7 | -65°7 | 16°6 | 1/2 E , 1/2 W | 1/2 N ,1/2 S |
| 35337 002 | 76% | 8 | 1 | 19° | -77°6 | 6°6 | 1/2 E , 1/2 W | 1/2 N , 1/2 S |
| 56206 001 | 79% | 2 | 1 | 10°5 | -83°3 | 3°8 | 2/3 E , 1/3 W | 1/2 N , 1/2 S |

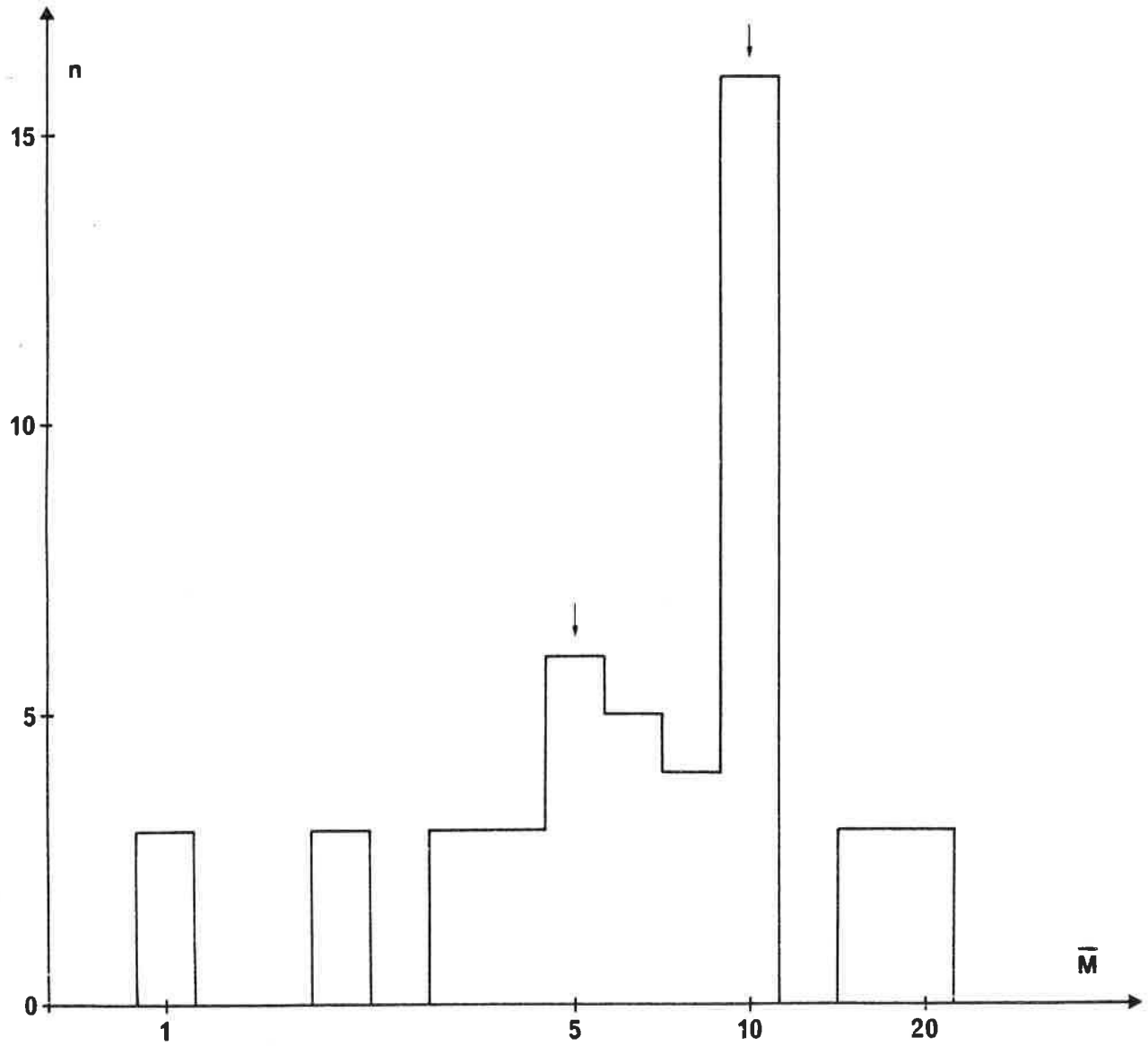



**Fig. 5** : Histogramme des intensités moyennes d'aimantation volumique (A/m) (échelle logarithmique).

## LES INTENSITES D'AIMANTATION

La troisième colonne du tableau 2 et l'histogramme en figure 5 indiquent des valeurs d'intensité moyenne d'aimantation par lot allant de 1 à 20 A/m. On observe de fortes valeurs (10 à 20 A/m) qui peuvent être à l'origine de perturbations importantes des directions d'aimantation. Le fort aplatissement de matériaux tels que les tuiles et briques associé à une forte aimantation entraîne l'existence de l'effet du champ démagnétisant qui tend à aligner l'aimantation selon le plan d'aplatissemnt des objets. C'est pourquoi la correction de cet effet (Lanos, 1987 à paraître) a été effectuée chaque fois que cela s'est avéré nécessaire.

L'histogramme en figure 5 suggère deux maximums, l'un autour de 5 A/m, l'autre autour de 10 A/m. La distinction entre des lots fortement aimantés (de 8 à 20 A/m) et des lots faiblement aimantés (1 à 7 A/m) fait l'objet d'une cartographie en figure 6. Malgré une certaine intrication des deux groupes de valeurs, on peut constater la présence de lots fortement aimantés essentiellement dans le bassin de la Vilaine et la région de Combourg. Par contre, les faibles valeurs semblent se situer plutôt autour de Corseul et vers la côte du Penthièvre. Il s'agit d'une tendance que seules des données plus nombreuses permettront de confirmer ou

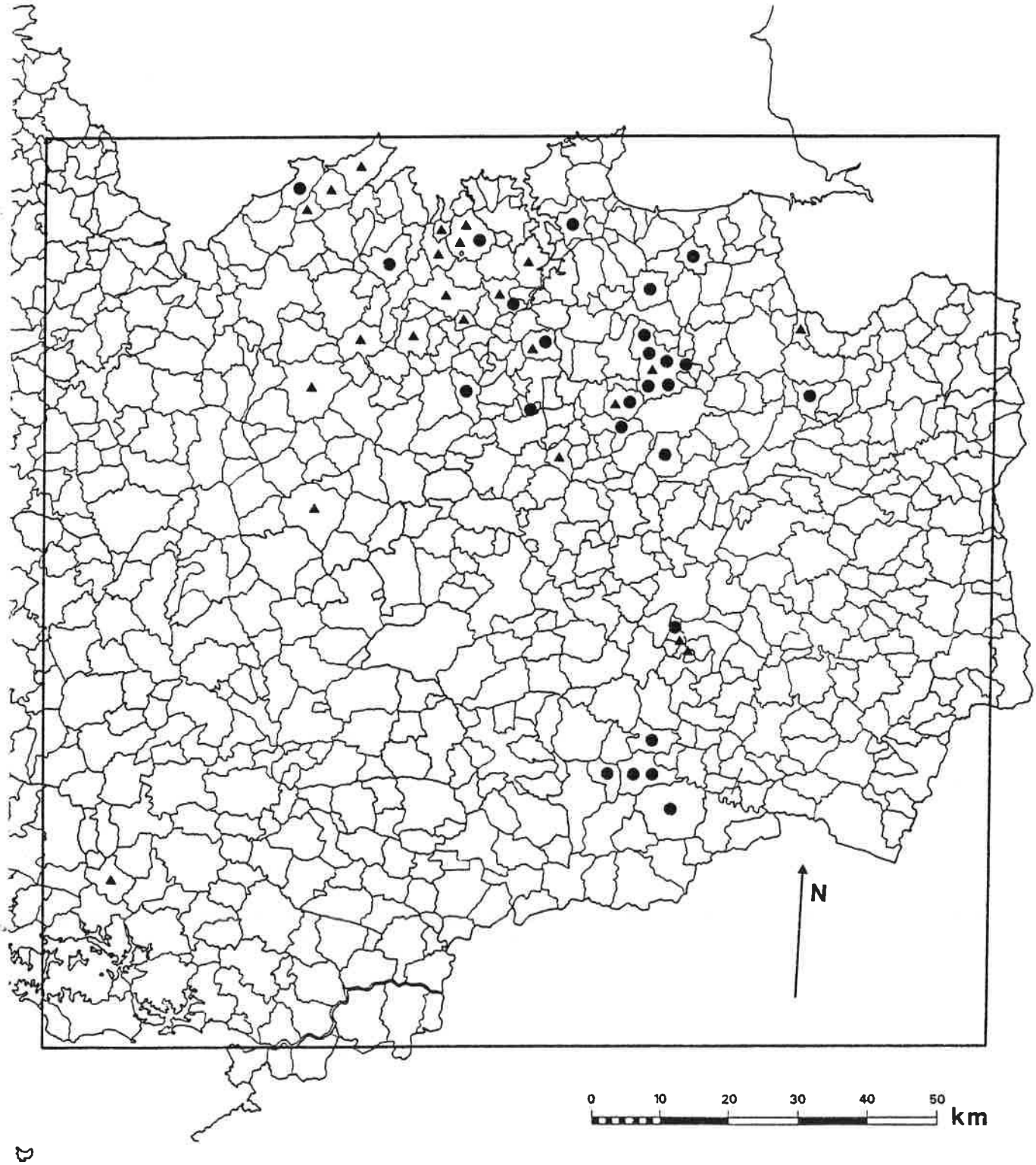



**Fig. 6** : Carte de répartition des lots étudiés en fonction de l'intensité moyenne d'aimantation :

▲ : $1 < \overline{M} < 7$ A/m

● : $8 < \overline{M} < 20$ A/m

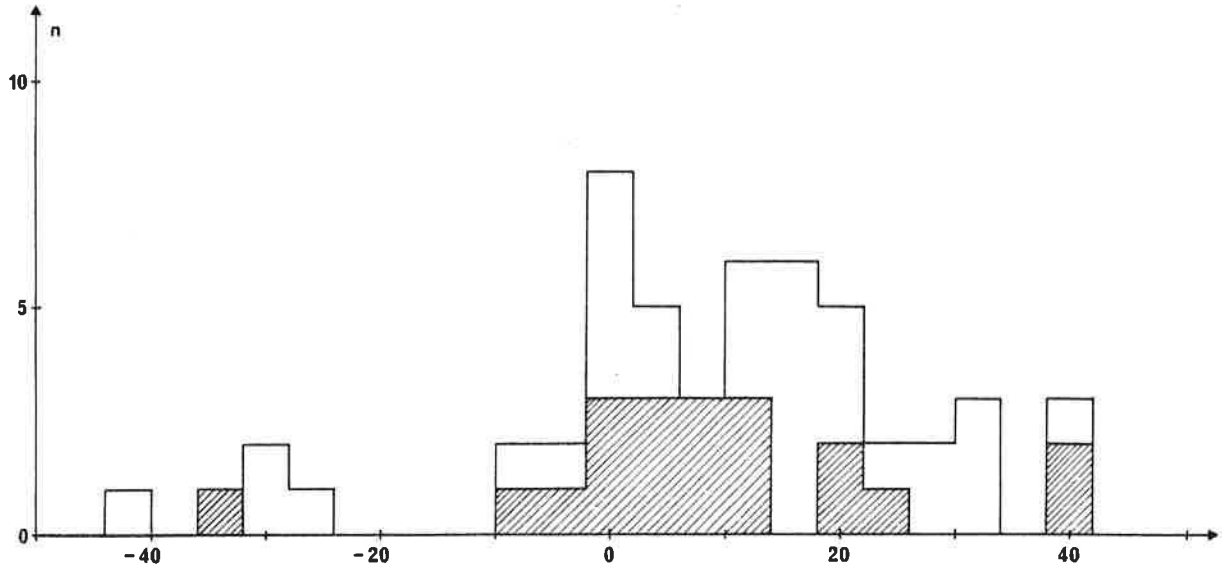



Fig. 7 : Histogramme des orientations $\bar{\Delta}$i des plans d'aplatissement des tuiles et briques par rapport au nord magnétique. Par définition, on a :

$$-45° < \Delta i < +45°$$

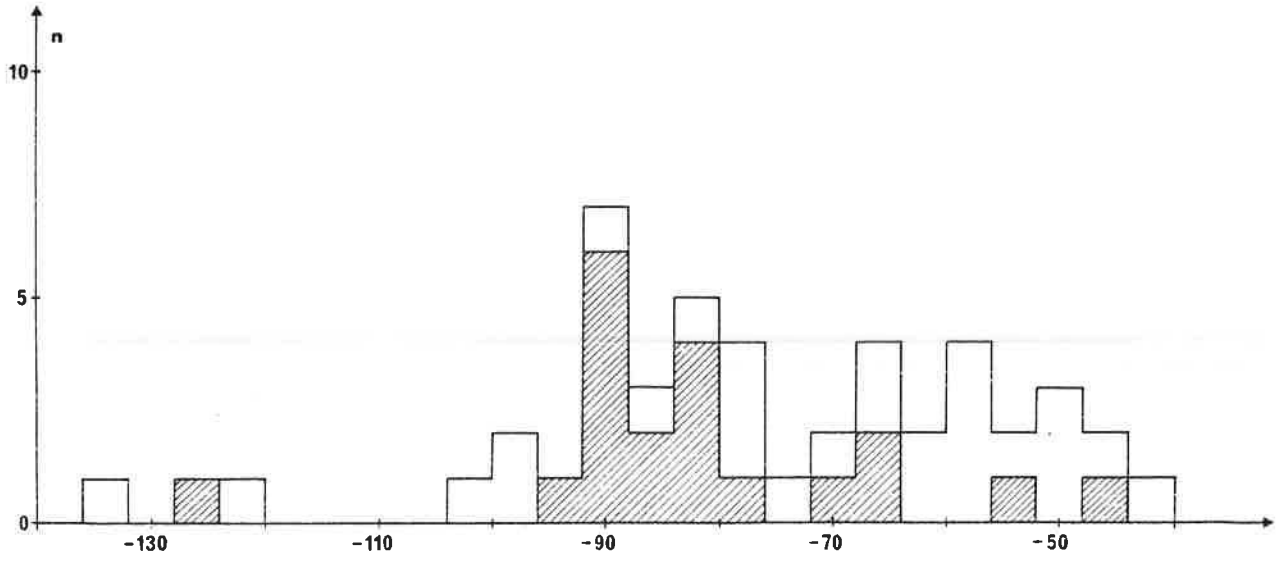



Fig. 8 : Histogramme des orientations $\bar{\Delta}$'i des plans d'aplatissement des tuiles et briques par rapport au nord magnétique. on a :

$$-90° < \Delta' i < -45° \quad \text{et} \quad +45° < \Delta' i < +90°$$

ou encore

$$-135° < \Delta' i < -45°$$

d'infirmer. Ces différences d'intensités selon les secteurs peuvent refléter aussi bien des natures d'argiles différentes que des modes de cuisson différents. Aussi, il convient d'être prudent car cette variable dépend de nombreux paramètres difficiles à appréhender.

## LE NOMBRE D'ENSEMBLES DISTINCTS PAR LOT

L'apparition dans les diagrammes inclinaison-déviation de deux groupements de points pour une même inclinaison I et selon des directions $\Delta$ et $\Delta'$ perpendiculaires est caractéristique d'un ensemble $E_i(I_i , \Delta_i , \Delta'_i)$ de tuiles fabriquées à une date donnée dans un four donné de forme très probablement rectangulaire. Sur un même site de prospection, on peut prélever un lot de fragments appartenant à un ou plusieurs ensembles. L'existence d'un seul ensemble s'interprète d'une manière simple. Il s'agit de l'apport sur le site de construction de matériaux produits à une date donnée et provenant d'un même four. L'existence de plusieurs ensembles peut s'interpréter soit comme des approvisionnements multiples à une date donnée, soit comme des réfections ou des agrandissements à des dates successives. Il ne faut cependant pas négliger le risque d'avoir des ensembles présentant des caractéristiques $(I_i , \Delta_i , \Delta'_i)$ semblables, rendant impossible toute discrimination et séparation dans les diagrammes I-$\Delta$ . Pour éviter au maximum ce risque de mélange, il convient de constituer sur le terrain des lots par secteurs identifiés, quitte à les regrouper par la suite si les résultats obtenus sont identiques.

Parmi les 49 lots étudiés, seuls 6 indiquent l'existence certaine ou très probable de deux ensembles distincts. Le fait que 88% des lots soient constitués d'un seul ensemble $E(I , \Delta , \Delta')$ implique que les constructeurs des édifices ruraux se soient approvisionnés en une seule fois auprès d'un même atelier. Les approvisionnements multiples ainsi que les agrandissements ou réparations importantes semblent relativement rares en milieu rural. Les toitures en service durant les III$^e$ et IV$^e$ siècles datent donc très probablement en majorité de cette période de construction intensive qui marque l'assimilation de la civilisation matérielle gallo-romaine par les populations autochtones.

## L'ORIENTATION DES PLANS D'APLATISSEMENT DES TUILES ET LE CARACTERE RECTANGULAIRE DES FOURS

Les histogrammes en figure 7 et 8 donnent les directions des plans d'aplatissement des tuiles et briques placées debout dans les fours. Par définition, on pose :

$$-45° < \Delta_i < +45°$$

$$-135° < \Delta'_i < -45° \quad \text{ou} \quad +45° < \Delta'_i < +135°$$

L'histogramme en figure 9 représente la différence, en valeur absolue, entre l'angle de 90° qui correspond à l'hypothèse de directions parfaitement orthogonales et l'angle entre les deux directions $\Delta$ et $\Delta'$ observées. On peut constater qu'au moins la moitié des ensembles donne des résultats attestant de directions orthogonales de rangement, ceci dans une fourchette allant de 0 à 5° compte tenu de la précision sur les déviations. La partie hachurée des histogrammes 7 et 8 correspond aux ensembles pour lesquels $\delta$ est compris entre 0° et 5°. Dans la mesure où les rangées étaient bien alignées parallèlement et perpendiculairement aux parois des laboratoires, l'examen de ces deux histogrammes montre d'une part que les fours étaient très majoritairement de forme rectangulaire, d'autre part qu'ils étaient orientés très préférentiellement selon les points cardinaux, puisqu'à l'époque gallo-romaine, le Nord magnétique reste pratiquement constant et voisin à quelques degrés près du nord géographique (Thellier, 1981). Quelques ensembles présentent des orientations très différentes avec $\Delta_i$ = 22° est, 40° est ou encore 34° ouest.

L'histogramme en figure 9 montre aussi des écarts angulaires $\delta$ très importants. On peut envisager deux explications, outre un bruit de fond certainement non négligeable : soit que les rangées de tuiles étaient disposées parallèlement à des parois de fours de forme trapézoïdale, soit que les tuiles étaient disposées en épi ou en chevron, comme cela se pratiquait au Moyen-Age pour les tuiles plates (Espagnet, 1987). En l'absence de fouilles et de données statistiques plus nombreuses, il paraît difficile pour l'instant de répondre à cette question.

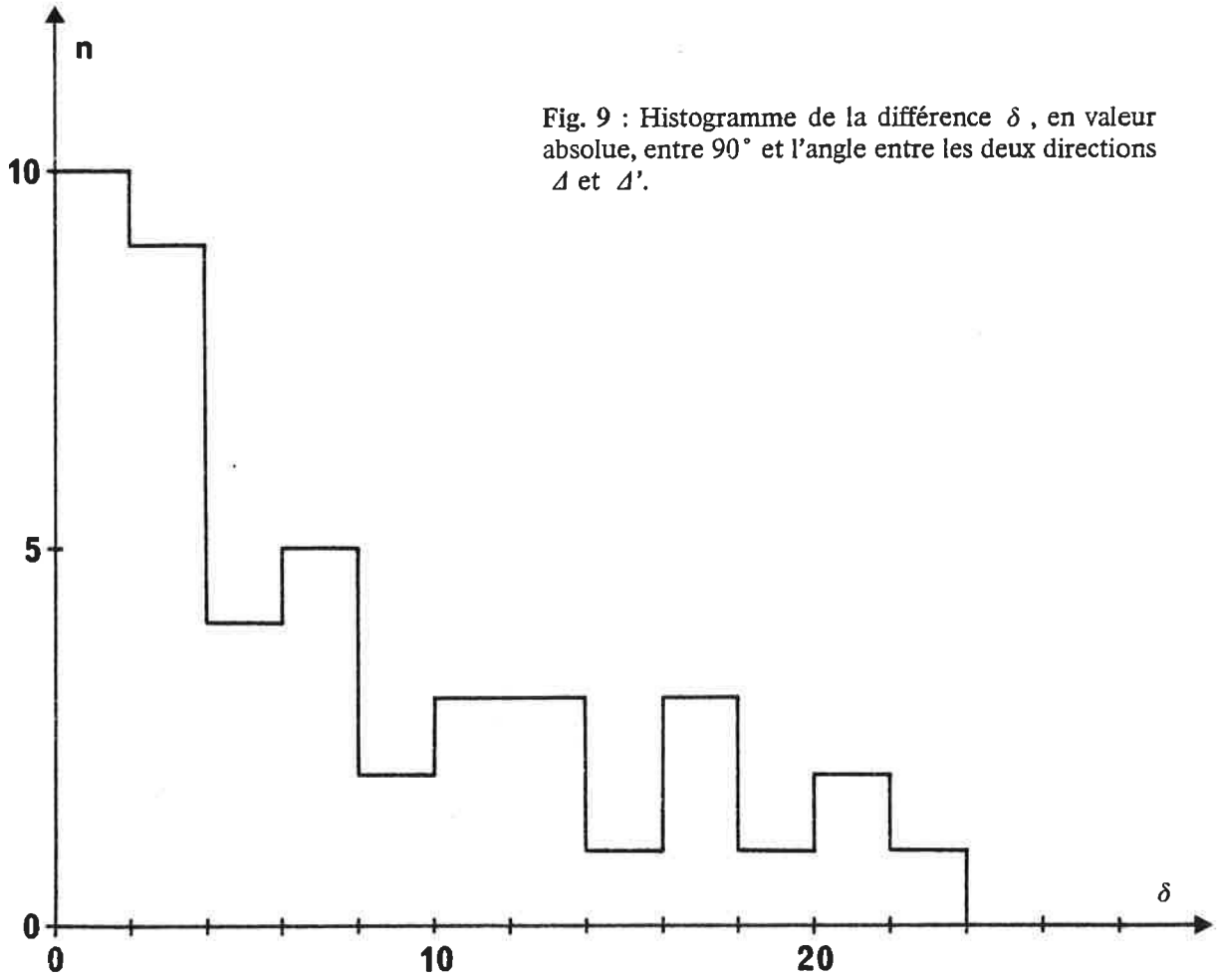



Fig. 9 : Histogramme de la différence $\delta$ , en valeur absolue, entre 90° et l'angle entre les deux directions $\Delta$ et $\Delta'$.

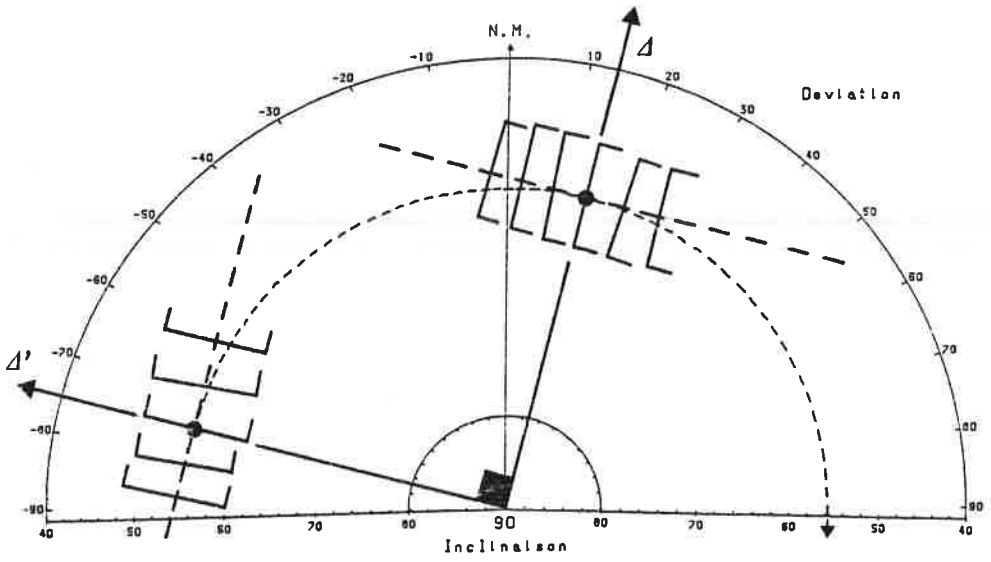



Fig. 10 : Diagramme (I, $\Delta$ ) montrant un seul ensemble E(I, $\Delta$ , $\Delta'$) caractérisé par deux directions orthogonales de rangées de tuiles. Si les rangées ne sont pas disposées en épi, on peut en déduire que le four est de forme rectangulaire. Les rebords des tuiles sont tous tournés vers l'est (E) pour $\Delta$ et vers le nord (N) pour $\Delta'$. Les caractéristiques de ce four peuvent se résumer ainsi :

E(56° ; 90% debout ; +12°, -78° ; E , N)

L'AGENCEMENT DES TUILES DANS LES FOURS

On peut encore caractériser un mode de chargement en repérant laquelle des faces supérieures (lissées) ou inférieures des tuiles et briques était tournée vers le nord magnétique (N.M.) de l'époque lors de la cuisson. Cette donnée permet de détecter des modes réguliers de rangement des objets : par exemple, rebord des tuiles toujours tournés dans la même direction. C'est cette même donnée qui est utilisée dans l'étude des monnaies (Goulpeau *et al.* , 1987) pour déterminer laquelle des faces correspond au coin dormant. Les dispositions variées des tuiles dans l'espace nécessite un mode de description particulier. Pour les déviations comprises entre -45° et +45°, soit pour des matériaux disposés plutôt parallèlement au N.M., on évalue la part des faces lissées (côté rebord) orientées vers l'est (E) et la part de celles orientées vers l'ouest (W). Pour les déviations comprises entre -90° et -45° ou entre +45° et +90°, soit pour des matériaux disposés plutôt perpendiculairement au N.M., on évalue la part des faces lissées orientées vers le nord (N) et la part de celles orientées vers le sud (S). Les proportions de ces orientations sont présentées pour chaque ensemble dans les colonnes 8 et 9 du tableau 2.

Le mode de rangement de loin majoritaire est (1/2 E , 1/2 W ; 1/2 N , 1/2 S). Pour une même direction, cela correspond soit à une alternance deux à deux des faces des éléments, soit à une alternance d'une rangée à l'autre ou d'une couche à l'autre. La probabilité d'apparition de ces proportions est donc grande vu le nombre de rangements différents auxquels ces dernières donnent lieu. A l'opposé, on peut remarquer l'existence d'ensembles présentant des rangées avec faces lissées toujours orientées dans la même direction. Les quatre cas de figure possibles E/N, E/S, W/N, W/S existent (tabl. 2) mais ne représentent que 13% des ensembles déterminés. Il s'agit de modes très réguliers de rangement des matériaux. Cette donnée peut servir dans la caractérisation de productions particulières. Citons par exemple les deux sites de La Ville Chérel en Pléchâtel et de La Mariais en Saint-Malo-de-Phily, qui présentent la même inclinaison (61°5 $\pm$ 2°5 soit 160-220 ap. J.-C.) et exactement la même disposition des tuiles dans le four lors de la cuisson, soit orientations E/N des faces supérieures et positions à 90% debout. La proximité des deux gisements (3 à 4 km) situés de part et d'autre de la Vilaine incite à penser que les matériaux proviennent d'un même atelier probablement peu éloigné. Des observations du même genre peuvent être faites pour d'autres ensembles du tableau 2.

## CONCLUSION

Il convient cependant d'être très prudent dans l'exploitation de telles données. De même qu'un seul tesson de céramique ne peut servir à caractériser une production et une diffusion, deux lots de tuiles ne peuvent servir à localiser un four, décrire sa forme et les habitudes de chargement s'y attachant. Lorsqu'une vingtaine de sites différents d'une zone très restreinte seront datés archéomagnétiquement , on pourra alors conjecturer plus raisonnablement sur les phases de construction ou encore sur la caractérisation des productions. De toute façon, cet apport de l'archéomagnétisme est une donnée importante qu'il faut replacer parmi les autres sources de renseignements archéologiques que sont la prospection , la fouille et l'analyse du matériel. Ainsi, l'étude des marques digitées et des estampilles relevées sur les tuiles et les briques est un autre moyen d'approcher les problèmes de production et de diffusion. L'amélioration des connaissances sur les matériaux de construction ne peut provenir que de la synthèse de toutes ces recherches. L'archéomagnétisme des matériaux déplacés fournit de nombreuses indications, mais il ne pourra jamais permettre seul la reconstitution de l'histoire d'un atelier ou encore de l'itinéraire d'une production. Par contre, l'utilisation statistique d'un grand nombre de mesures archéomagnétiques est à même de fournir des données fiables, parce que hautement probables, sur des périodes de construction, des aires de production ou encore des modes de chargement.

## BIBLIOGRAPHIE

**Adam J.P. , 1984**, *La construction romaine, matériaux et techniques*, Grands Manuels Picard, Paris, 367 p.

**Espagnet F. , 1987**, Palissy aux Tuileries de Paris, *La Revue de la Céramique et du Verre*, 32, p. 12-14.

**Goulpeau L. , 1980**, Fouille, datation et étude de l'édifice gallo-romain des Sables-d'Or, Annexe IV : Les matériaux de construction de l'édifice des Sables d'Or, *Dossiers du Ce.R.A.A.* , 8, p. 32-36.

**Goulpeau L. , 1984,** Les possibilités de l'archéomagnétisme des matériaux déplacés, in : Datation - Caractérisation des céramiques anciennes, *PACT*, 10, p. 191-202.

**Goulpeau L. et Langouët L. , 1980,** Datations d'apports de tuiles et briques sur des sites gallo-romains à l'aide de mesures archéomagnétiques opérées sur d'abondants échantillonnages, *Revue d'Archéométrie*, 4, p. 153-164.

**Goulpeau L. et Langouët L. , 1982,** Problems of interpretation of different graphs (I, Δ ) obtained through an archaeomagnetic study of displaced materials, *Proccedings of the 22nd Symposium on Archaeometry*, Bradford, U.K. , 1982, p. 112-121.

**Goulpeau L. et Langouët L. , 1984,** Détermination des dates de construction des édifices gallo-romains par l'archéomagnétisme des matériaux déplacés en argile (tuiles et briques), in : La prospection archéologique en Haute-Bretagne, *Dossiers du Ce.R.A.A.* , G, p. 128-133.

**Goulpeau L. , Lanos P. and Langouët L. , 1987,** The remanent magnetization of ancient struck coins, *Archaeometry*, à paraître.

**Langouët L. , Bucur I. et Goulpeau L. , 1983,** Les problèmes de l'allure de la courbe de variation séculaire du champ magnétique terrestre en France, nouveaux résultats archéomagnétiques, *Revue d'Archéométrie*, 7, p. 37-43.

**Langouët L. , Galliou P. et Gallou M. , 1984,** Analyse statistique d'un mobilier caractéristique : la céramique sigillée, *Dossiers du Ce.R.A.A.* , G, p. 90-99.

**Langouët L. et Goulpeau L. , 1975,** Sur l'utilisation statistique et cartographique des séries d'objets archéologiques, *Dossiers du Ce.R.A.A.* , 3, p. 95-118.

**Langouët L. , Lanos P. et Goulpeau L. , 1986,** Les apports de la désaimantation thermique dans des études archéomagnétiques de matériaux déplacés, *Revue d'Archéométrie*, 10, p. 9-18.

**Le Glay M , 1975,** La Gaule romanisée, in : *Histoire de la France rurale*, Paris, Seuil, p. 228.

**Le Ny F. , 1987,** *Les fours de tuiliers gallo-romains*, Documents d'Archéologie Française, 12, Paris.

**Thellier E. , 1981,** Sur la direction du champ magnétique terrestre en France durant les deux derniers millénaires, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 24, p. 89-132.

# CONCLUSION

La méthode de datation par l'archéomagnétisme, appliquée aux matériaux déplacés, voit ainsi un certain nombre de progrès se réaliser tant en ce qui concerne l'exploitation statistique des données qu'en ce qui concerne la correction des effets perturbateurs de la direction de l'aimantation. Un nouveau mode de représentation des résultats a été mis au point permettant une interprétation rapide aussi bien au niveau de la datation qu'au niveau des renseignements archéologiques obtenus. Ceci a été rendu possible grâce à l'utilisation des techniques couramment employées par les paléomagnéticiens. L'estimation de la précision sur la datation peut se faire à partir de la statistique de Fisher qui s'applique à une distribution de vecteurs dans l'espace. L'introduction du diagramme de Schmidt pour le pointage des valeurs de l'inclinaison (entre 0 et 90°) et de la déviation associée (entre -90° et +90°) permet de redéterminer l'orientation des parois des fours de tuiliers par rapport au nord magnétique de l'époque (de -90° ouest à +90° est). De plus, la distinction entre les faces supérieures et inférieures des matériaux permet de caractériser les types de rangements. Cette dernière donnée intervient très utilement aussi bien dans la détermination de certains phénomènes perturbateurs tels que le pendage, que dans la caractérisation des modes de remplissage des fours selon les époques ou les ateliers.

L'utilisation, à des fins de datation, de la direction de l'aimantation acquise par les matériaux posait un certain nombre de problèmes bien mis en évidence par la prise en compte de la déviation et de la position de cuisson des matériaux. D'une manière schématique, on constate presque toujours une inclinaison moyenne beaucoup plus faible pour les éléments cuits à plat que pour ceux cuits debout. De plus, un écart parfois important apparaît entre les éléments cuits debout perpendiculairement au méridien magnétique (déviation égale à $\pm$90°) et ceux cuits parallèlement à ce méridien (déviation nulle). La datation archéomagnétique des matériaux déplacés ne peut donc plus se baser directement sur l'utilisation de l'inclinaison moyenne déduite des mesures brutes, sans tenir compte de la position relative des matériaux par rapport au Nord magnétique de l'époque. L'étude détaillée des phénomènes à l'origine de ces écarts montre qu'ils proviennent essentiellement des effets du champ démagnétisant, de l'anisotropie d'aimantation thermorémanente et du pendage ou de la pente. Nous avons pu mettre au point des modèles et des méthodes de correction dont la validité et la justesse sont tout à fait confirmées par les vérifications expérimentales que nous avons pu mener, aussi bien au laboratoire que dans un atelier de production artisanal actuel.

Cette étude détaillée des différents aspects de la datation archéomagnétique des matériaux déplacés montre qu'il est possible, lorsque la variation séculaire du CMT est bien connue, de dater avec une grande fiabilité et avec une précision de l'ordre de $\pm$20 à 30 ans des matériaux déplacés d'argile cuite tels que les tuiles, les briques, les carreaux de pavage, les *tubuli*, les *imbrices*, les éléments de briquetage et les fonds de pots. L'étude archéomagnétique des monnaies frappées a conclu qu'il n'était pas possible d'utiliser la direction de leur aimantation à des fins de datation. En effet, nous avons pu montrer que cette aimantation était acquise parallèlement, de façon statistique, à l'axe de frappe de la monnaie.

La datation par l'archéomagnétisme nécessite en toute rigueur la connaissance à tout instant en un lieu donné, des composantes Inclinaison, Déclinaison et Intensité du CMT. En faisant appel à un étalonnage préalable, la datation par l'archéomagétisme apparaît comme une méthode de datation relative. La déviation reste inutilisable puisque liée à la variation séculaire de la déclinaison. Seule l'inclinaison, en dehors de l'intensité, peut servir à la datation. Enfin, la méthode présente souvent le choix entre plusieurs dates possibles. Généralement, c'est le contexte archéologique qui permet le plus souvent de n'en retenir qu'une seule.

L'archéomagnétisme est utilisé de façon intensive dans la datation de lots de tuiles ou briques en provenance de sites de prospection. Une zone test, située en Haute-Bretagne, a fait l'objet d'un programme de recherche dont le thème était l'étude du milieu rural aux époques pré-romaine et gallo-romaine. Parmi les 1170 sites gallo-romains recensés, une centaine ont fourni des lots de fragments de tuiles ou briques suffisamment importants pour permettre une étude archéomagnétique. Une cinquantaine de ces lots donnent des résultats exploitables tant en ce qui concerne la datation que la caractérisation des productions. On a ainsi mis en évidence que la majorité des tuiles et des briques ont été fabriquées de la fin du II$^{e}$ au début du III$^{e}$ siècle ap. J.C. Il s'ensuit que la construction massive en "dur" en milieu rural en Haute-Bretagne n'intervient pas avant cette période. Cela laisse supposer une longévité des modes de vie gaulois, et en particulier de construction, beaucoup plus grande que ce que l'on croyait jusque-là, du moins dans nos régions. Outre cet apport à la datation, l'utilisation de données archéomagnétiques telles que le pourcentage des positions de cuisson, le mode de rangement, l'orientation des parois des fours par rapport au Nord magnétique de l'époque et l'intensité moyenne d'aimantation, permet d'apporter quelques lumières sur le problème de la reconnaissance d'ateliers de production à partir de l'étude archéomagnétique des matériaux retrouvés sur les sites d'utilisation.

Dans l'avenir, la datation par l'archéomagnétisme devrait connaître encore de nombreuses améliorations, en particulier au niveau de la reconstitution précise de la variation séculaire de la direction et de l'intensité du CMT. Ainsi, l'utilisation à la fois de l'inclinaison et de l'intensité de l'aimantation mesurée sur les matériaux déplacés ne pourra que contribuer à une meilleure sélection des dates possibles offertes par la méthode.

# REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**Abrahamsen N. , 1973,** Archaeomagnetic tilt correction on bricks, *Archaeometry*, 15, 2, p. 267-274.

**Adam J.P. , 1984,** *La construction romaine, matériaux et techniques*, Ed. Picard, Paris, 367 p.

**Aitken M.J. , 1970,** Dating by archaeomagnetic and thermoluminescent methods, *Phil. Trans. R. Soc. London*, A269, p. 77-88

**Aitken M.J. , 1983,** Basic techniques for archaeointensity determination, in : *Geomagnetism of baked clays and recent sediments*, (K.M. Creer, P. Tucholka and C.E. Barton, eds), Elsevier, Amsterdam, P. 78-87.

**Aitken M.J. , Alcock P. A. , Bussel G.D. and Shaw C.J. , 1981,** Archaeomagnetic determination of the past geomagnetic intensity using ancient ceramics : allowance for anisotropy, *Archaeometry*, 23, 1, p. 53-64.

**Aitken M.J. and Hawley H.N. , 1971,** Evidence for magnetic refraction in kiln structure, *Archaeometry*, 13, p. 83-85.

**Bauer L. A. , 1899,** On the secular variation of a free magnetic needle, *Phys. Rev.* , 3, p. 34-38.

**Breton J. , 1986,** *Archéomagnétisme des objets déplacés*, Rapport de stage, I.U.T. Saint-Nazaire, Département de Mesures Physiques, 32 p.

**Bucur I. , 1986,** Fourteenth century archaeomagnetic field directions from widely distributed sites in France, *Proceedings of the 24th International Archaeometry Symposium*, J.S. Olin and M.J. Blackman editors, Smithsonian Institution Press, Washington, p. 449-458.

**Bucur I. , Dufournier D. , Goulpeau L. , Langouët L. et Naveau J. , 1984,** La céramique à "oeil de perdrix" et la production de la Hardelière à Laval (Mayenne), *Archéologie médiévale*, XIV, p. 169-219.

**Bucur I. , Langouët L. ,Le Goff M. et Pozzi J.P. , 1975,** Etudes archéologiques et archéomagnétiques des briquetages gaulois et gallo-romains d'Hirel (Ille-et-Vilaine), *Dossiers du Ce.R.A.A.* , 3, p. 119-138.

**Bucur I. , Langouët L. , Le Goff M. et Pozzi J.P. , 1977,** Apport de l'archéomagnétisme dans l'étude de la technologie de briquetages, *Revue d'Archéométrie*, 1, p. 135-148.

**Collinson D.W. , 1983,** *Methods in rocks magnetism and palaeomagnetism, techniques and instrumentation*, Chapman and Hall, London, 503 p.

**Cuomo Di Caprio, 1979,** Pottery and tile-kilns in south Italy and Sicily, *B.A.R. International Series*, 68, p. 73-95.

**Daly L. , 1970,** *Etude des propriétés magnétiques des roches métamorphiques ou simplement tectonisées. Nature de leur aimantation naturelle. Détermination de leur anisotropie magnétique et application à l'analyse structurale*, Thèse de Doctorat, Paris, 340 p.

**Daly L. et Zinsser H. , 1973,** Etude comparative des anisotropies de susceptibilité et d'aimantation rémanente isotherme. Conséquences pour l'analyse structurale et le paléomagnétisme, *Ann. Géophys.* , 29/2, p. 189-200.

**De Bouard M. , 1976,** La céramique de Doué-la-Fontaine (IX°-XI° s.), *Archéologie Médiévale*, VI, p. 247-286.

**Degbomont J.M. , 1984,** *Le chauffage par hypocauste dans l'habitat privé*, Etudes et Recherches Archéologiques de l'Université de Liège, 17, 240p.

**Downey W.S. and Tarling D.H. , 1984,** Archaeomagnetic dating of Santorini volcanic eruptions and fixed destruction levels of late Minoan civilization, *Nature*, 309, p. 519-523.

**Espagnet F. , 1987,** Archéologie : Palissy aux Tuileries de Paris, *La Revue de la Céramique et du Verre*, 32, p. 12-14.

**Evans M.E. and Mareschal M. , 1986,** An archaeomagnetic example of polyphase magnetization, *J. Geomagn. Geoelectr.* , 38, p. 923-929.

**Fisher R.A. , 1953,** Dispersion on a sphere, *Proc. R. Soc. London*, Ser. A, 217, p. 295-305.

**Fox J.M.W. and Aitken M.J. , 1980,** Cooling-rate dependence of thermoremanent magnetization, *Nature*, 283, p. 462-463.

**Giot P.R. et Langouët L. , 1984,** *La Datation du Passé : La Mesure du Temps en Archéologie*, Revue d'Archéométrie, G.M.P.C.A. , 186 p.

**Gouletquer P.L. , 1970,** *Les briquetages armoricains : technologie protohistorique du sel en Armorique*, Travaux du Lab. d'Anthropologie Préhistorique, Rennes, 189 p.

**Goulpeau L. , 1980,** Fouille, datation et étude de l'édifice gallo-romain des Sables-d'Or (22), Annexe IV : Les matériaux de construction de l'édifice des Sables d'Or, *Dossiers du Ce.R.A.A.* , 8, p. 32-36.

**Goulpeau L. , 1981,** Résultats de l'étude archéomagnétique entreprise en vue de la datation d'une partie des édifices mis au jour lors des fouilles de l'école maternelle "Chappe" au Mans, *Rapport interne d'expertise.*

**Goulpeau L. , 1984,** Les possibilités de l'archéomagnétisme des matériaux déplacés, in : Datation - caractérisation des céramiques anciennes, *PACT*, 10, p. 191-202.

**Goulpeau L. et Langouët L. , 1980,** Datations d'apports de tuiles et briques sur des sites gallo-romains à l'aide de mesures archéomagnétiques opérées sur d'abondants échantillonnages, *Revue d'Archéométrie*, 4, p. 153-164.

**Goulpeau L. et Langouët L. , 1982,** Problems of interpretation of different graphs (I, ) obtained through an archaeomagnetic study of displaced materials, *Proceedings of the 22nd Symposium on Archaeometry*, Bradford, U.K. , 30th march-3rd April 1982, p. 112-121.

**Goulpeau L. et Langouët L. , 1984,** Détermination des dates de construction des édifices gallo-romains par l'archéomagnétisme des matériaux en argile (tuiles et briques), in : *La prospection archéologique en Haute-Bretagne*, Dossiers du Ce. R. A. A. , G, p. 128-133.

**Goulpeau L. , Langouët L. , Bardel J.P. et Bucur I. , 1982,** Possibilités de l'archéomagnétisme dans l'étude d'un four de tuilier, *Revue d'archéométrie*, 6, p. 13-25.

**Goulpeau L. , Langouët L. et Lanos P. , 1984,** Datation archéomagnétique des établissements gallo-romains à partir des matériaux de construction d'argile, *Bull. Soc. Sc. Bretagne*, 56, p. 107-116.

**Goulpeau L. , Langouët L. et Lanos P. , 1986,** Apports de l'archéomagnétisme à l'étude de l'évolution des technologies de fabrication des matériaux de construction en argile cuite. In : *Terres cuites architecturales au Moyen-Age*, Actes du Colloque de Saint-Omer, 7-9 juin 1985, D. Deroeux (éditeur), Arras, p. 165-173.

**Goulpeau L. , Lanos P. and Langouët L. , 1987,** The remanent magnetization of ancient struck coins, *Archaeometry*, à paraître.

**Grabovsky M.A. et Brodskaya S.J. , 1958,** Aimantation normale et aimantation thermique des roches anisotropes, (en russe), *Izvest. Akad. Nauk. SSSR* (Bull. Acad. Sc. URSS), sér. Géophys. , 8, p. 977-988.

**Hansen M. , 1958,** *Constitution of binary alloys*, 2nd Edn, New-York, MacGraw-Hill.

**Harold M.R. , 1960,** Magnetic dating : Kiln wall fall-out, *Archaeometry*, 3, p. 47-49.

**Hedley I.G. , Vuagnat P. and Wagner J.J. , 1984,** A cubic smoothing spline fit to western european archaeomagnetic data, *Terra Cognita*, 4, 3, p. 361.

**Hodder I. and Orton C. , 1976,** *Spatial analysis in archaeology*, Cambridge University Press.

**Hofmann B. , 1975,** Les matériaux de construction antiques en terre cuite, *Les Dossiers de l'Archéologie*, 9, p. 111-120.

**Hoye G.S. , 1981,** Archaeomagnetic secular variation record of Mount Vesuvius, *Nature*, 291, p. 216-218.

**Hoye G.S. , 1982,** A magnetic investigation of kiln wall distorsion, *Archaeometry*, 24, 1, p. 80-84.

**Hoye G.S. , 1983,** Magnetic properties of ancient coins, *Journ. Archaeological Science*, 10, p. 43-49.

**Kirschvink J.L. , 1982,** Palaeomagnetic evidence for fossil biogenic magnetite in western Crete, *Earth Planet. Sc. Lett.* , 59, p. 388-392.

**Langouët L. , 1984,** Un atelier de potier des environs du X° siècle au Frêche-Clos en Planguenoual (22), *Dossiers du Ce.R.A.A.* , 12, p. 1-9.

**Langouët L. , Bardel A. et Gouletquer J.L. , 1974,** Découverte de briquetages gallo-romains dans les marais de Dol, *Bull. et Mém. de la Soc. Archéol. d'Ille-et-Vilaine*, t. LXXVIII, p. 17-34.

**Langouët L. , Bardel A. et Gouletquer J.L. , 1976,** Des briquetages gallo-romains dans les marais de Dol (Ille-et-Vilaine), *Comptes-rendus du 99° Congrès National des Sociétés Savantes*, Besançon, 1974, Sciences, fasc. V, p. 31-40.

**Langouët L. , Bucur I. et Goulpeau L. , 1983**, Les problèmes de l'allure de la courbe de variation séculaire du champ magnétique terrestre en France, nouveaux résultats archéomagnétiques, *Revue d'Archéométrie*, 7, p. 37-43.

**Langouët L. , Bucur I. , Goulpeau L. et Lanos P. , 1983**, Aperçu sur les progrès récents en archéomagnétisme en France, *Archéologie Africaine et Sciences de la Nature appliquées à l'Archéologie, 1er symp. Intern.* , E.I. Bordeaux, 26-30 Sept. 1983, 10 p.

**Langouët L. , Faguet G. et Vilbert L.-R. , 1979**, Chronique de prospection archéologique 1979 dans les arrondissements de Dinan et Saint-Malo, *Dossiers du Ce.R.A.A.* , 7, p. 105-111.

**Langouët L. , Galliou P. et Gallou M. , 1984**, Analyse statistique d'un mobilier caractéristique : la céramique sigillée, *Dossiers du Ce.R.A.A.* , G, p. 90-99.

**Langouët L. et Goulpeau L. , 1975**, Sur l'utilisation statistique et cartographique des séries d'objets archéologiques, *Dossiers du Ce.R.A.A.* , 3, p. 95-118.

**Langouët L. et Goulpeau L. , 1980**, Fouille d'un foyer de briquetages à l'île à Poule, en Kerbors (22), *Dossiers du Ce.R.A.A.* , 8, p. 99-106.

**Langouët L. , Goulpeau L. et Lanos P. , 1986**, Les récents progrès dans l'étude de l'archéomagnétisme des matériaux déplacés en France, *PACT*, 15, First Southern European Conference on Archaeometry held at Delphi 9-11th november 1984, Proceedings edited by Vannis Liritzis.

**Langouët L. , Lanos P. et Goulpeau L. , 1986**, Les apports de la désaimantation thermique dans des études archéomagnétiques de matériaux déplacés, *Revue d'Archéométrie*, 10, p. 9-18.

**Langouët L. et Mouton D. , 1978**, La poterie carolingienne de Trans, *Medieval Ceramics*, 2, p. 23-29.

**Langouët L. , Mouton D. , Nourry-Denayer F. , Pozzi J.-P. , Ricq M. et Valladas H. , 1977**, La poterie carolingienne de Trans (Ille-et-Vilaine), *Dossiers du Ce.R.A.A.* , 5, p. 109-142.

**Langouët L. , Mouton D. , Nourry-Denayer F. , Pozzi J.-P. , Ricq M. et Valladas H. , 1978**, Fouille et datation d'un four médiéval à Trans (Ille-et-Vilaine), *Revue d'Archéométrie*, 2, p. 65-87.

**Lanos P. , 1983**, *Etude méthodologique de l'archéomagnétisme des tuiles et des briques*, Mémoire de D. E. A. , Université de Rennes I.

**Lanos P. , 1987**, The effects of demagnetizing fields on thermoremanent magnetization acquired by parallel sided baked clay blocks, *Geophys. Journal of R.A.S.* , à paraître.

**Lanos P. , Querré G. et Leroux G. , 1986**, Un atelier de potier carolingien à Launay-Margat en Guipel (Ille-et-Vilaine), fouille, datation et production, *Dossiers du Ce.R.A.A.* , 14, p. 53-71.

**Laubenheimer F. , Widemann F. , Attas M. , Fontes P. , Gruel K. , Leblanc J. et Lleres J. , 1979**, Atelier de potiers gallo-romain de Sallèles-d'Aude (Narbonne). Le chargement du four B5, *Acta Praehistorica et Archaeologica*, Berlin, 9/10, p. 115-124.

**Le Glay M. , 1975**, La Gaule romanisée, in : *Histoire de la France rurale*, Paris, Seuil.

**Le Goff M. , 1975,** *Inductomètre à rotation continue pour la mesure des faibles aimantations rémanentes et induites en magnétisme des roches*, Thèse, Diplom. Ing. CNAM en Physique et Métrologie, Paris.

**Le Ny F. , 1985,** *Les fours de tuiliers gallo-romains (dans les données archéologiques françaises)*, Mémoire de Maîtrise d'Histoire de l'Art et d'Archéologie, Université de Haute-Bretagne, Rennes II, 79 p. + Inventaire 435 p.

**Le Ny F. , 1986,** *Les ateliers de tuiliers gallo-romains (dans les données archéologiques françaises)*, Mémoire de D.E.A. , Université de Haute-Bretagne, Rennes II, 120 p.

**Le Ny F. , 1987,** *Les fours de tuiliers gallo-romains*, Documents d'Archéologie Française, 12, Paris.

**Léva C. , 1966,** Un four de tuilier romain à Marilles, *Bull. du Cercle Archéologique Hesbaye-Condroz*, VI, p. 113-114.

**MacWhirr A. , 1979,** Roman tile-kilns in Britain, *B. A. R. International Series*, 68, p. 97-189.

**Monnier J.-L. , 1985,** *Rapport sur la fouille effectuée sur le gisement de Karreg-ar-Yellan (Ploubazlanec, Côtes-du-Nord) en septembre 1985*, Laboratoire d'Anthropologie-Préhistoire, Protohistoire et Quaternaire Armoricains, Université de Rennes I, 25 p.

**Monnier J.-L. , 1986,** *Rapport sur la fouille effectuée sur le gisement de Karreg-ar-Yellan (Ploubazlanec, Côtes-du-Nord) en septembre 1986*, Laboratoire d'Anthropologie-Préhistoire, Protohistoire et Quaternaire Armoricains, Université de Rennes I, 18 p.

**Néel L. , 1949,** Théorie du traînage magnétique des ferromagnétiques en grains fins avec application aux terres cuites, *Ann. de Géophys.* , t. 5, p. 99-136.

**Néel L. , 1955,** Some theoritical aspects of rock magnetism, *Phil. Mag. suppl.* , 4, p. 191-242.

**Osborn J.A. , 1945,** Demagnetizing factors of the general ellipsoid, *Physical Review*, 67, p. 351-357.

**Perroud H. , 1986,** *Paléomagnétisme dans l'arc Ibéro-armoricain et l'orogénèse varisque en Europe occidentale*, Thèse Docteur-ès-Sciences, Université de Rennes I.

**Ratel, 1959,** Le site archéologique de Fontaine-Merle et son four de tuilier gallo-romain, *Mém. Commission Antiqu. de la Côte-d'Or*, tome XXIV, p. 101-113.

**Rogers J. , Fox J.M.W. and Aitken M.J. , 1979,** Magnetic anisotropy in ancient pottery, *Nature*, 277, p. 644-646.

**Sanquer R. , 1971,** Chronique archéologique : Plonevez-Porzay, *Bull. Soc. Archéol. Finistère*, tome XCVII, Brest, p. 54.

**Schurr K. , Becker H. and Soffel H.C. , 1984,** Archaeomagnetic study of medieval fireplaces at Mannheim-Wallstadt and Ovens from Herrenchiemsee (southern Germany) and the problem of magnetic refraction, *Journ. of Geophys.* , 56, p. 1-8.

**Salis J.S. , 1986,** *Variation du CMT - Direction et paléointensité - sur la période 7000 - 70 000 ans BP, dans la chîne des Puys*, Thèse de Docteur de l'Université de Rennes I, mention Sciences de la Terre, 192 p.

**Shaw J. , 1985,** Recent advances in archaeomagnetism, *Journ. Geomagn. Geoelectr.* , 37, p. 119-127.

**Stacey F.D. , 1963,** The physical theory of rock magnetism, *Adv. Phys.* , 12, p. 45-133.

**Stacey F.D. and Banerjee S.K. , 1974,** *The physical principles of rock magnetism*, Elsevier, Amsterdam.

**Stoner E.C. , 1945,** The demagnetizing factors for ellipsoids, *Phil. Mag.* , 36, p. 803-821.

**Tanguy J.C. , 1982,** *Etna, étude pétrologique et paléomagnétique, implications volcanologiques*, Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie, Paris.

**Tanguy J.C. , Bucur I. et Thompson J.F.C. , 1985,** Geomagnetic secular variation in Sicily and revised ages of historic lavas from Mount Etna, *Nature*, 318, p. 453-455.

**Tanner B.K. , MacDowall D.W. , MacCormack I.B. and Smith R.L. , 1979,** Ferromagnetism in ancient copper-based coinage, *Nature*, 280, p. 46-48.

**Tarling D.H. , 1982,** Archaeomagnetic properties of coins, *Archaeometry*, 24, 1, p. 76-79.

**Tarling D.H. , 1983,** The possible utilisation of the magnetization of archaeological metallic artefacts, *Journ. of Archaeol. Sci.* , 10, p. 41-42.

**Thellier E. , 1938,** *Sur l'aimantation des terres cuites et ses applications géophysiques*, Thèse de Doctorat, Paris ; Ann. Inst. Phys. Globe Paris, 16, p. 157-302.

**Thellier E. , 1981,** Sur la direction du champ magnétique terrestre en France durant les deux derniers millénaires, *Physics Earth and Planet. Int.* , 24, p. 89-132.

**Thellier E. et Rimbert F. , 1954,** Sur l'analyse d'aimantations fossiles par action de champs magnétiques alternatifs, *C. R. Acad. Sci.* , 239, p. 1399-1401.

**Thellier E. et Rimbert F. , 1955,** Sur l'utilisation en paléomagnétisme de la désaimantation par champs alternatifs, *C. R. Acad. Sci.* , 240, p. 1404-1406.

**Thellier E. et Thellier O. , 1951,** Magnétisme terrestre - Sur la direction du champ magnétique terrestre, retrouvée sur des parois de fours des époques punique et romaine, à Carthage, *Comptes-Rendus des Séances de l'Académie des Sciences*, 233, p. 1476-1479.

**Thellier E. et Thellier O. , 1959,** Sur l'intensité du champ magnétique terrestre dans le passé historique et géologique, *Ann. Géophys.* , 15, p. 285-376.

**Tomasevic T. , 1982,** Die Ziegelbrennöfen der Legio I Martia in Kaiseraugst /AG und die Ausgrabungen in der Liebrüti 1970-1975, Amt für Museen und Archäologie des Kantons Basel-Landschaft, Liestal.

**Veitch R.J. , Hedley I.G. and Wagner J.J. , 1984,** An investigation of the intensity of the geomagnetic field during roman times using magnetically anisotropic bricks and tiles, *Arch. Sc. Genève*, 37/3, p. 359-373.

**Zijderveld J.D.A. , 1967,** Demagnetization of rocks : analysis of results. In : *Methods in palaeomagnetism* (D.M. Collinson, K.M. Creer and S.K. Runcorn edits), p. 254-286, New-York.

# BIBLIOGRAPHIE

**Aitken M.J. , 1974,** *Physics and Archaeology*, Clarendon Press, 291 p.

**Brogniart A. , 1844,** *Traité des arts céramiques et des poteries*, Paris 1844 et réimpression Dessain et Tobra, Paris 1977.

**Goulpeau L. et Langouët L. , 1980,** Exploitation archéomagnétique de grands échantillonnages de tuiles et briques gallo-romaines récupérées en fouille ou en prospection au sol, *Rapport interne.*

**Goulpeau L. et Langouët L. , 1980,** Fouille, datation et étude de l'édifice gallo-romains des Sables d'Or. Annexe III : Datation des tuiles et des briques par l'archéomagnétisme, *Dossiers du Ce. R. A. A.* , 8, p. 29-31.

**Goulpeau L. et Langouët L. , 1982,** Etude archéomagnétique de l'hypocauste du grand caldarium du Champ-Mulon à Corseul, *Dossiers du Ce. R. A. A.* , 10, p. 41-46.

**Langouët L. et Goulpeau L. , 1984,** La datation archéomagnétique du temple du Haut-Bécherel à Corseul, *Rev. Archéol. de l'Ouest*, 1, p. 85-88.

**Néel L. , 1978,** *Oeuvres scientifiques de* 586 p.

**Tanguy J.C. , 1970,** An archaeomagne agnetic direction recorded in lava flows subsequent to the twelfth century, *Arc*

**Tarling D.H. , 1982,** *Palaeomagnetism, principles and applications in geology, geophysics and archaeology*, London, Chapman and Hall, 379 p.

**Thellier E. , 1936,** Détermination de la direction de l'aimantation permanente des roches, *C. R. Acad. Sci.* , 203, p. 743-744.

**Thellier E. , 1959,** Le champ magnétique fossile, in : Encyclopédie de la Pléiade, *La Terre*, p. 531-615.

**Thellier E. , 1966,** Le champ magnétique fossile, *Nucléus*, 7, n° 1, 2 et 3.

**Thellier E. , 1971,** Magnétisme interne, in : Encyclopédie de la Pléiade, *Géophysique*, p. 235-376.

**Weiss P. et Foëx G. , 1926,** *Le magnétisme*, Colin, Paris.

**Wolfman D. , 1984,** Geomagnetic dating methods in Archaeology, in : *Advances in archaeological method and theory*, vol. 7, ed. by Michael B. Schiffer, Academic Press, Inc. , p. 363-458.

VU :

Le Président de la thèse

N. BONHOMMET

VU :

Le Directeur de thèse

L. LANGOUET

VU et APPROUVE

RENNES, le

le Directeur de l'U.E.R.

D. GRANDJEAN

VU pour autorisation de soutenance

RENNES, le

Le président de l'Université de Rennes I,

J. P. CURTES

**RESUME**

La datation par l'archéomagnétisme repose sur la variation dans le temps du champ magnétique terrestre (CMT) et sur la propriété qu'ont certains matériaux, en particulier les terres cuites, d'acquérir une aimantation rémanente colinéaire et proportionnelle à ce champ. A la suite des travaux précurseurs d'E. Thellier, l'archéomagnétisme des matériaux déplacés, c'est-à-dire des matériaux retrouvés dans une position différente de celle qu'ils avaient lors de l'acquisition de leur aimantation, a connu récemment un nouvel essor grâce aux recherches de L. Langouët et L. Goulpeau du Laboratoire d'Archéométrie de Rennes I. Dans ce laboratoire, la datation des argiles cuites telles que les matériaux de construction et les céramiques repose sur l'exploitation de l'inclinaison moyenne déduite des mesures d'aimantation. La déclinaison n'est plus accessible du fait du déplacement des objets. Par contre, la déviation, qui exprime l'orientation dans le plan horizontal des matériaux par rapport au Nord magnétique de l'époque, est utilisée dans la caractérisation des productions et dans la correction des effets perturbateurs de la direction de l'aimantation.

La première partie de ce mémoire expose les développements apportés dans les traitements statistiques des données de mesure. Un nouveau mode de représentation des résultats permet non seulement une détermination rigoureuse de l'inclinaison moyenne servant à la datation, mais aussi de retrouver indirectement l'agencement des matériaux dans les fours lors de la cuisson.

La deuxième partie est consacrée à l'étude des perturbations de la direction de l'aimantation provoquées par les aimantations secondaires, le champ démagnétisant, l'anisotropie d'aimantation thermorémanente et les effets de pente ou de pendage. L'étude théorique des trois derniers effets a permis de mettre au point des modèles de correction dans lesquels la déviation joue un rôle essentiel. Une vérification expérimentale réalisée sur une production actuelle de carreaux de pavage provenant d'une briqueterie artisanale montre la validité de ces corrections et apporte une nouvelle démonstration de la grande précision et de la fiabilité des datations obtenues par la méthode.

Dans la troisième partie, des études effectuées sur des *tubuli*, des *imbrices*, des éléments de briquetages et des fonds de pots fournissent autant d'exemples d'application faisant intervenir les nouveaux traitements statistiques et les corrections des effets perturbateurs. En outre, une étude originale a été effectuée à propos de l'intérêt archéomagnétique de l'aimantation observée sur les monnaies. Chaque exemple s'inscrit dans le cadre d'une problématique archéologique particulière et met en évidence la collaboration nécessaire entre l'archéomagnéticien et l'archéologue pour une exploitation optimale des résultats archéomagnétiques.

Enfin, la quatrième partie de ce mémoire s'attache à développer les aspects archéologiques de la datation archéomagnétique appliquée aux tuiles, briques et carreaux de pavage. Un rappel des connaissances en matière de variation séculaire de la direction du CMT, en France, pour la période historique, indique les possibilités de datation offertes actuellement par la méthode. De plus, l'exploitation des données archéotechnologiques déduites des mesures archéomagnétiques constitue pour l'archéologie un nouveau moyen de caractériser et éventuellement de différencier des productions à partir de l'étude des matériaux retrouvés sur les sites de construction.

**Mots-Clés** : Archéomagnétisme, champ magnétique terrestre, direction d'aimantation, matériaux de construction d'argile cuite, monnaies, aimantations secondaires, champ démagnétisant, anisotropie d'aimantation thermorémanente, effets des positions de cuisson : pente et pendage, datation et archéotechnologie des argiles cuites.