

**Prépondérance très nette  
de l'aimantation rémanente naturelle  
sur l'aimantation induite  
par le champ terrestre actuel  
observée sur une cuirasse bauxitique tropicale**

par

R. RÉMIOT

**Résumé**

*Sur 276 échantillons d'une cuirasse bauxitique de Madagascar, on a observé qu'en aucun cas le rapport  $Q_n$ , défini par KOENIGSBERGER n'est inférieur à l'unité. Il atteint même des valeurs beaucoup plus fortes que celles des roches éruptives saines. Dans une étude antérieure portant sur une cuirasse ferrugineuse, nous avons trouvé des résultats analogues. Un essai d'interprétation des phénomènes en faisant intervenir l'aimantation par coups de foudre est tenté.*

**Abstract**

*Among 276 samples from a bauxitic cuirass in Madagascar, the ratio  $Q_n$  defined by KOENIGSBERGER has been found never smaller than one. This ratio reaches values much higher than those of non-altered igneous rocks. In a preceding study concerning a ferrugineous cuirass, the same results have occurred. An interpretation of the phenomena by means of thunder stroke magnetization is attempted.*

## Généralités

Dans une étude antérieure (10) sur une cuirasse ferrugineuse formée en zone forestière humide sur roche ultra basique, nous avons été frappé par la prédominance très marquée de l'aimantation rémanente naturelle sur l'aimantation induite par le champ terrestre actuel. Dans un but de généralisation éventuelle de ce résultat, nous avons entrepris un travail beaucoup plus exhaustif portant sur une cuirasse d'un type tout à fait différent. Il s'agit d'une cuirasse bauxitique recouverte de steppe herbeuse, donc située en zone plutôt sèche. Nous nous sommes d'abord intéressés dans une première phase aux directions d'aimantation rémanente naturelle (11) et avons trouvé une répartition azimutale pratiquement dépourvue de secteurs privilégiés. Quant aux inclinaisons  $I$  des vecteurs moments magnétiques rémanents naturels  $\vec{M}_R$  étudiés, un déficit très franc a été observé pour les fortes valeurs de  $I$ .

Signalons que le site d'échantillonnage choisi a fait l'objet de travaux très poussés en matière de recherche minière. Facilement repérable par le point kilométrique 112 de la route nationale Tananarive-Majunga, il peut être défini en position par les coordonnées géographiques du point central qui a servi de base à nos déterminations des divers éléments du champ magnétique terrestre :  $18^{\circ} 14'S$  et  $47^{\circ} 12'E$ . Les prélèvements ont été effectués suivant un itinéraire polygonal long de 800 m et couvrant approximativement une aire d'un hectare et demi. L'équidistance entre les groupes d'échantillons est de dix mètres. Des sous-groupes à l'intérieur d'un même groupe sont constitués par des échantillons presque jointifs. La taille moyenne d'un échantillon est d'un décimètre cube et demi. Nous ne revenons pas sur le mode de prélèvement des échantillons orientés largement décrit dans une publication antérieure (10).

## Traitement des échantillons et étude en laboratoire

Pour des raisons de programme, nous n'avons pu effectuer les études d'aimantation induite naturelle en même temps que celles relatives à l'aimantation rémanente. Ces dernières ont été réalisées à Madagascar au laboratoire de géomagnétisme du Centre ORSTOM de Tananarive.

Grâce aux bons offices de la mission du B.R.G.M. (Bureau de Recherche Géologique et Minière) installée dans la capitale malgache, nous avons pu disposer de l'équipement de son laboratoire spécialisé pour le traitement des matériaux que nous avons récoltés. Nos gros échantillons ont été broyés en poudre fine dont nous avons extrait, après homogénéisation préalable, une petite quantité pour ensachage, étiquetage et envoi à Paris. Cette façon de procéder permet de travailler sur une faible masse de matière sans risque d'altérer le caractère représentatif des résultats expérimentaux. C'est en somme la susceptibilité moyenne (ou apparente comme on dit en prospection électrique quand il s'agit de résistivité) de chaque échantillon entier, c'est-à-dire un décimètre cube et demi environ, que nous obtenons alors que la mesure porte sur approximativement deux cents grammes de poudre.

Les susceptibilités magnétiques ont été déterminées à l'aide d'un magnétomètre du type THELLIER (13) installé dans les Services Scientifiques Centraux de l'ORSTOM à Bondy (banlieue parisienne). Le champ inducteur employé est de faible valeur : un oersted ( $\frac{1}{4\pi}$  oersted =  $10^3/4\pi$  A/m). Aucune précaution spéciale n'a été prise en ce qui concerne la température de sorte que les résultats des susceptibilités sont valables pour la température du laboratoire (environ  $20^{\circ}C$ ).

## Présentation des résultats

Nous ne donnons pas les tableaux de valeurs des divers paramètres mesurés en laboratoire dont la lecture serait fastidieuse. Nous préférons adopter la présentation sous forme d'histogrammes fréquentiels que l'on peut voir en figures 1, 2 et 3.

Soit  $\sigma_R$  l'intensité d'aimantation rémanente naturelle (le terme de naturelle doit être pris ici dans le sens le plus large - nous reviendrons sur cette remarque) par gramme ou aimantation spécifique naturelle. Précisons que le symbole  $\sigma$  désigne l'aimantation spécifique que nous appelons aussi intensité d'aimantation massique tandis que l'indice R signifie rémanence naturelle. Notons également qu'il s'agit d'une valeur moyenne car le matériau étudié n'est pas forcément homogène en ce qui concerne son aimantation. On peut presque affirmer que l'hétérogénéité est plutôt la règle générale.

En dénombrant les échantillons par classes de  $\sigma_R$  de "largeurs" respectives de 10, 100 et 1000 dix millièmes d'unité électromagnétique cgs d'aimantation spécifique  $\sigma_R$  (1 uém cgs de  $\sigma_R$  vaut  $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ A.m}^2/\text{kg}$ ), on construit les trois diagrammes de la figure 1.

Un échantillon *in situ* d'aimantation rémanente naturelle spécifique  $\sigma_R$ , du fait qu'il est placé dans le champ magnétique terrestre actuel  $\vec{F}_0$  possède un moment magnétique induit  $\vec{M}_1$  tel que  $|\vec{M}_1| = \sigma_1 \cdot m$  où  $m$  est la masse gravifique de l'échantillon, et  $\sigma_1$  l'intensité d'aimantation induite par le champ terrestre actuel à la température ambiante et rapportée au gramme. Nous utilisons pour  $\sigma_1$  la même unité que pour  $\sigma_R$ .

En figure 2, on peut suivre la répartition des  $\sigma_1$  par classes de largeurs respectives de 10 et 100 millièmes d'unité uém cgs.

Les valeurs de  $\sigma_1$  sont calculées à partir des susceptibilités massiques  $\chi$  déterminées par expérience. Comme  $\sigma_1$  est égal à  $\chi F_0$  et que  $F_0$  vaut un tiers d'oersted, si l'on désire suivre sur les diagrammes de la figure 2 la répartition des susceptibilités massiques  $\chi$ , il suffira de multiplier les graduations de l'axe des abscisses par le coefficient 3. On obtiendra alors des histogrammes de fréquence de  $\chi$  par classes de  $\chi$  de largeurs respectives de 30 et  $300 \cdot 10^{-6}$  uém cgs.

J.G. KOENIGSBERGER (3) a défini le rapport :

$$Q_n = \frac{\sigma_R}{\sigma_1}$$

Les histogrammes de la figure 3 donnent la répartition de  $Q'_n = 1/Q_n$  par classes de  $Q'_n$  de largeurs respectives de 1 et 10 pour mille. Si l'on désire connaître la fréquence des  $Q_n$ , il suffira de remplacer les graduations de l'axe des abscisses par leurs inverses que l'on multipliera par mille.

Signalons enfin que les diagrammes de fréquences relatives cumulées (non reproduits ici) font apparaître une distribution normale aussi bien de  $\log \sigma_R$  que de  $\log \sigma_1$  et de  $\log Q'_n$ .

## Analyse des résultats et essais d'interprétation

Si la présentation des résultats sous forme d'histogrammes comporte des avantages certains, elle ne permet pas toujours de faire ressortir des points intéressants que l'on découvre seulement par l'examen attentif des tableaux de résultats bruts. De même, plusieurs corrélations nécessitent une confrontation permanente de ces tableaux.

Cette remarque faite, avant de passer à l'analyse des histogrammes, nous donnons quelques renseignements complémentaires qui aideront à comprendre certaines discussions ultérieures.

Les valeurs extrêmes rencontrées pour les divers paramètres étudiés sont :

$\sigma_R$	maximum	=	2400	.	$10^{-4}$	uém	cgs
$\sigma_R$	minimum	=	4	"	"	"	"
$\sigma_I$	maximum	=	6,2	"	"	"	"
$\sigma_I$	minimum	=	0,2	"	"	"	"
$\chi$	maximum	=	18	"	"	"	"
$\chi$	minimum	=	0,6	"	"	"	"
$Q'_n$	minimum	=	1‰	ou	$Q_n$	maximum	= 1000

A noter que  $\sigma_R$  maximum ne correspond pas à  $\sigma_I$  maximum. Il en est également ainsi pour le couple de valeurs  $\sigma_R$  minimum et  $\sigma_I$  minimum.

Les valeurs centrales de  $\sigma_R$ ,  $\sigma_I$  et  $Q'_n$  tirées des diagrammes de fréquences relatives cumulées sont respectivement

de	108	$\times 10^{-4}$	uém	cgs
de	100	$\times 10^{-6}$	"	"
et de	7,2	pour mille.		

En comparant les dispersions spatiales (sur le terrain) rencontrées dans :

- a — la distribution des directions d'aimantation rémanente naturelle,
- b — celle des intensités d'aimantation rémanente massique naturelle  $\sigma_R$ ,
- c — et celle des intensités d'aimantation massique  $\sigma_I$  induite par le champ terrestre actuel,

on constate :

- . que les directions des vecteurs moments magnétiques rémanents naturels  $\vec{M}_R$  dont sont porteurs les échantillons étudiés présentent une distribution azimutale extrêmement dispersée même quand on considère des vecteurs très proches (échelle du mètre et du décimètre sur la cuirasse). La répartition zénithale accuse une pauvreté fortement marquée en vecteurs  $\vec{M}_R$  à inclinaison voisine de  $\pi/2$  ;
- . que les grandeurs scalaires  $\sigma_R$  présentent sur le terrain beaucoup moins de dispersion ;
- . que la remarque précédente s'applique aux  $\sigma_I$  et  $\chi$  en prenant comme terme de comparaison les  $\sigma_R$  : des échantillons voisins possèdent en général des susceptibilités massiques relativement cohérentes.

En résumé, on peut dire que le degré de dispersion décroît de a à c.

L'examen des diagrammes statistiques des figures 1, 2 et 3 suggère les commentaires suivants :

Sur 276 échantillons étudiés, 121 seulement possèdent une aimantation spécifique  $\sigma_R$  inférieure à  $100 \cdot 10^{-4}$  ou  $10^{-2}$  uém cgs. Pour plus de cinquante six pour cent du total, les valeurs de  $\sigma_R$  dépassent celles que l'on a l'habitude de rencontrer dans les études paléomagnétiques portant sur des roches saines des catégories à forte aimantation (par exemple les roches ignées basiques). Les valeurs de  $\sigma_R$  généralement citées oscillent entre  $10^{-4}$  et  $10^{-2}$  uém cgs.

Pour expliquer ce fait, il faudra rechercher les causes, soit dans le comportement des matériaux eux-mêmes soumis à un champ magnétique agissant donné, c'est-à-dire leur susceptibilité, soit dans la force de ce champ. Ces deux paramètres une fois fixés, l'intensité d'aimantation rémanente naturelle massique  $\sigma_R$  est également fonction du mode d'acquisition de cette aimantation qui peut être une aimantation rémanente isotherme (ARI), une aimantation thermorémanente (ATR), une aimantation rémanente chimique (ARC) etc. Quant à la stabilité dans le temps de l'aimantation acquise, elle varie dans des proportions considérables d'un type d'aimantation à l'autre.

En nous intéressant maintenant aux résultats des susceptibilités magnétiques massiques  $\chi$  que nous avons déterminées, nous constatons que dans l'ensemble les valeurs de  $\chi$  ne contribuent guère à favoriser l'interprétation des fortes aimantations spécifiques  $\sigma_R$ . Les susceptibilités très moyennes trouvées ne nous ont pas surpris. En effet, d'après les publications du service géologique de Madagascar (2), le substratum est formé de granites monzonitiques migmatitiques. Malgré le nombre relativement élevé de puits foncés, les prélèvements ont été arrêtés à une profondeur à laquelle la teneur en bauxite commençait à devenir médiocre. Etant donné le caractère de prospection minière des diverses missions de reconnaissance de ce service, on ne s'est guère intéressé à l'échantillonnage de la roche mère dont nous aurions souhaité connaître la susceptibilité. Quoiqu'il en soit, on peut penser que le granite sous-jacent ne doit pas avoir une susceptibilité excessive.

L'examen global des résultats, sans faire intervenir la répartition topographique des échantillons prélevés, fait ressortir un assez large éventail de valeurs de  $\chi$ . En se donnant un intervalle raisonnable de valeurs de ce paramètre dans lequel se situeraient les susceptibilités des échantillons de la roche saine sous-jacente, pour expliquer la très grande diversité des valeurs de  $\chi$  de la couverture superficielle, on est conduit à admettre qu'en certains endroits les processus d'altération ont contribué à augmenter la concentration en matériaux magnétiques et qu'en d'autres endroits c'est l'inverse qui s'est produit. Rappelons que, dans la majeure partie des cas, les blocs très voisins possèdent des susceptibilités tout à fait comparables.

Moins de dix pour cent de l'ensemble des échantillons possèdent une susceptibilité supérieure à  $1000 \cdot 10^{-6}$  uém cgs. Si certains processus d'altération ont pu contribuer à renforcer la susceptibilité initiale, d'autres facteurs bien connus tels que les micro-organismes et le feu ne doivent pas être négligés. Le site de prélèvement est recouvert de steppe herbeuse. Cette couverture végétale n'est pas sans action sur les propriétés magnétiques de la cuirasse. Des lambeaux de forêt sont visibles au fond des vallées bordant l'aire étudiée. C'est le témoignage que cette dernière a été recouverte de forêt (2) et que la déforestation a été récente. L'origine de la déforestation peut être une longue période de sécheresse ou un incendie, il est fort probable que l'incendie ait suivi la grande sécheresse. Rien n'exclut d'autres feux de brousse ultérieurs sur la steppe actuelle. La fraction d'argile contenue dans les produits d'altération a pu être cuite, ce qui a pour effet d'augmenter la susceptibilité comme l'ont montré les travaux de E. THELLIER (14) en laboratoire. Les études de E. LE BORGNE (4) sur le terrain ont conduit peu après aux résultats similaires. Le chauffage en atmosphère réductrice suivi d'un refroidissement en atmosphère oxydante donnerait lieu à des transformations du type  $Fe_2O_3 \alpha \longrightarrow Fe_3O_4 \longrightarrow Fe_2O_3 \gamma$  stabilisé plus magnétique que  $Fe_2O_3 \alpha$ .

Enfin, rien n'empêche de penser que d'éventuels coups de foudre ont cuit le sol en certains points de leurs parcours. A propos de ce phénomène, peut-on, en débordant le cadre de cette étude, suggérer une hypothèse sur la formation de certaines cuirasses de type non classique? Il est généralement admis qu'en plus des conditions climatiques bien définies, pour qu'il y ait formation d'une cuirasse, le terrain doit avoir une faible pente (moins de dix pour cent). Or, des cuirasses fortement inclinées ont été rencontrées en Amérique Centrale. La cuisson de la fraction d'argile de la surface altérée par le feu ou la foudre ne pourrait-elle pas être prise comme facteur de cuirassement possible?

Ce sont les diagrammes de  $Q_n$  qui se révèlent les plus intéressants dans notre étude. En aucun cas,  $\sigma_R$  n'est inférieur à  $\sigma_I$ . C'est généralement le même résultat que l'on constate en paléomagnétisme avec les roches saines. Il faudra cependant préciser que dans l'étude du champ fossile courante, on s'attend à trouver une certaine homogénéité dans un site donné. Les variations en profondeur sont interprétées comme relevant de la variation séculaire du champ terrestre. Dans notre cas particulier, une étude préliminaire, qui consistait en une rapide prospection magnétique, nous a plutôt suggéré de rechercher le degré de dispersion des propriétés. Pour parfaire l'analyse statistique des données paléomagnétiques, nombreux sont les chercheurs qui poussent leurs investigations en fractionnant un échantillon récolté en sous-éléments. Nos échantillons ne supportent pas d'être sciés (c'est une opération aisée pour les roches saines) sans précautions spéciales extrêmement coûteuses.

En comparant les ensembles de valeurs de  $\sigma_R$  et de  $\sigma_I$  correspondants, on remarque qu'il n'y a pas de corrélation entre ces deux paramètres : aux fortes valeurs de  $\sigma_R$  ne correspondent pas, en général, les fortes valeurs de  $\sigma_I$  et réciproquement. La remarque que nous avons faite auparavant au sujet des valeurs extrêmes des  $\sigma_R$  et  $\sigma_I$  vaut donc pour la majeure partie des échantillons.

Nous avons vu que c'est l'aimantation rémanente qui l'emporte sur l'aimantation induite. Un examen plus approfondi des histogrammes montre qu'environ deux tiers (exactement 64,5%) des échantillons analysés possèdent un facteur  $Q_n$  inférieur à dix pour mille (c'est-à-dire  $Q_n$  supérieur à cent). Les  $Q_n$  de nos échantillons sont donc grands devant ceux des roches ignées courantes variant entre deux et dix et dépassant rarement cent (8). Ces dernières valeurs sont tirées des études paléomagnétiques, il en résulte que la partie principale de l'aimantation rémanente naturelle correspondante est d'origine thermorémanente. Dans le cas particulier des formations d'altération qui nous préoccupe, le terme de "rémanente naturelle" attaché aux  $\sigma_R$  doit être compris dans un sens beaucoup moins restrictif. Il doit englober toutes les formes d'aimantation possibles que nous allons examiner ci-dessous.

### **1 - Hypothèse d'une aimantation rémanente isotherme (ARI) sous l'action du champ magnétique terrestre :**

Les travaux de E. THELLIER en archéomagnétisme ont mis en évidence une variation, à travers les époques anciennes, du module du champ magnétique terrestre beaucoup plus importante qu'on l'avait imaginé. Ces résultats ont été confirmés dans la suite à l'étranger. Mais aucun géophysicien n'a encore émis l'hypothèse d'un champ passé suffisamment colossal pour rendre compte des fortes aimantations que nous avons rencontrées. D'ailleurs, en supposant qu'il ait existé, on ne voit pas pourquoi d'autres formations n'en porteraient pas le vestige ou auraient échappé aux investigations des chercheurs.

### **2 - Hypothèse d'une aimantation thermorémanente (ATR) sous l'action du champ magnétique terrestre :**

Les circonstances d'une aimantation thermorémanente totale (acquisition de l'aimantation par refroidissement à partir d'une température  $t$  inférieure au point de Curie jusqu'à la température ambiante dans un champ continu constant) peuvent être recherchées dans les incendies qui auraient contribué à la déforestation de la cuirasse ou dans les feux de brousse ultérieurs sur la steppe actuelle. On sait qu'à champ agissant égal, une ATR totale est beaucoup plus forte et surtout beaucoup plus stable qu'une ARI. Mais alors, étant donnée la stabilité de ce mode d'aimantation, on devrait trouver dans le large éventail des roches ignées des paléomagnéticiens des valeurs de  $Q_n$  plus fortes que celles que nous avons rencontrées : dans le premier cas, le phénomène d'ATR commence à partir du point de Curie tandis que, dans le second, rien n'indique que les éventuels incendies ou feux de brousse ont échauffé les échantillons jusqu'à la température de Curie.

### **3 - Hypothèse d'une aimantation rémanente chimique (ARC) sous l'action du champ magnétique terrestre :**

Le terme d'aimantation rémanente chimique englobe tous les processus d'acquisition d'aimantation dans une réaction chimique prise dans le sens le plus large. Ce mode d'aimantation a été signalé dès 1901 par C. MAURAIN (7) pour le fer déposé électrolytiquement à la température de 20°C. J.G. KOENIGSBERGER (3) y voyait une explication des aimantations de certaines roches sédimentaires. T. NAGATA et T. WATANABE (9) ont attribué aux fortes aimantations spécifiques rémanentes naturelles  $\sigma_R$  d'une classe de gabbro de Kamaisi au nord-est du Japon l'influence de certaines réactions chimiques. Quelques années plus tard, R. DOELL (1) a formulé l'explication de la cohérence des directions non corrigées de l'aimantation rémanente naturelle d'une formation sédimentaire plissée en imaginant l'aimantation par cristallisation qui serait celle acquise dans l'évolution même des cristaux *in situ* après dépôt.

Rappelons que toutes ces aimantations sont beaucoup plus stables que l'ARI. De plus, elles résistent beaucoup mieux aux procédés courants de désaimantation tels que la chauffe ou l'application d'un champ alternatif en champ continu nul. Par rapport à l'ATR, l'aimantation chimique se place un peu en dessous au point de vue des qualités dont nous venons de parler.

A côté des réactions chimiques accidentelles qui auraient pu se produire dans les éventuels incendies ou/et feux de brousse, notre cuirasse, depuis l'origine de sa formation, est le siège permanent de phénomènes physico-chimiques. Elle n'échappe donc pas aux mécanismes d'aimantation chimique. Des études en laboratoire ont montré que, dans un champ d'un oersted, l'ARC est dix fois plus faible qu'une ATR totale. En réunissant les remarques faites à la fin des deux paragraphes précédents, on reste toujours embarrassé dans la tentative d'expliquer nos fortes valeurs de  $Q_n$ .

Dans les trois hypothèses précédentes, le champ agissant peut être considéré, en première approximation du moins, comme uniforme. Il en résulte une cohérence des directions d'aimantation rémanente qui sont celles du champ terrestre de l'époque de la formation de la cuirasse ou de l'incendie. En envisageant le cas extrême de plusieurs feux qui ont pu ravager l'aire étudiée en des temps suffisamment espacés les uns des autres, les directions de l'aimantation rémanente naturelle qui seraient celle de la somme géométrique de plusieurs ATR à distribution directionnelle cohérente, doivent rester elles-mêmes cohérentes. Or, rien dans ce sens n'a été observé dans la présente analyse des phénomènes.

Comme on se trouve dans l'impasse en ne faisant intervenir que le champ terrestre comme champ agissant, la recherche d'un champ exceptionnel plus puissant s'impose. Les orages sont très fréquents sur les plateaux malgaches, on sera naturellement tenté de s'intéresser aux coups de foudre qui les accompagnent.

Sur le plan de la répartition des directions des vecteurs d'aimantation rémanente naturelle  $\vec{M}_R$ , les principaux arguments en faveur de cette prise en considération sont :

a. — Des études très récentes (5) ont montré que la distribution de la foudre est très complexe. Les densités de charges présentent une hétérogénéité totale aussi bien axialement que radialement (il s'agit des axes des diverses marches d'escalier de l'éclair et des rayons vecteurs dans les plans perpendiculaires à ces axes). Cette structure extrêmement compliquée d'un seul coup de foudre et de ses ramifications a pour corollaire une distribution non moins compliquée des courants et par suite des champs magnétiques agissants à la surface du sol foudroyé.

b. — On sait que l'effet de surface, lié au skin effect, décroît très vite avec la profondeur, et les résultats de nos observations sont en accord avec cette loi de variation suivant la verticale descendante à partir du niveau topographique actuel. Nous avons signalé plus haut que les directions d'aimantation rémanente sub-verticales sont fort rares. Cette constatation plaide en faveur d'une aimantation possible par la foudre. Par contre, elle enlève toute velléité d'expliquer la multiplicité des directions des vecteurs  $\vec{M}_R$ , à la réserve près relative aux fortes inclinaisons, par un remaniement éventuel. A côté du fait qu'aucune littérature n'a fait allusion à un tel remaniement, les interprétations géophysiques tirées de la présente étude semblent plutôt tendre à confirmer qu'il s'agit d'une cuirasse en place. En effet, on admet en pédologie que l'érosion sur les versants finit par démanteler une cuirasse : les éléments arrachés tombent au fond. Alors la remise en place de ces éléments dans la cuirasse remaniée s'effectuerait de façon aléatoire et il n'y aura aucune raison pour que les vecteurs  $\vec{M}_R$  de ces éléments accusent, dans la nouvelle formation, des directions préférentielles. S'agit-il tout simplement d'un brassage local de la dalle *in situ* par les racines des arbres, le raisonnement précédent reste valable quoique à un degré inférieur, car les éléments originels seraient soumis à des déplacements de moindre envergure. On pourrait aussi invoquer un remaniement par les termites ou d'autres insectes, c'est alors à l'échelle centimétrique de sorte que statistiquement les effets se compensent dans un volume de la taille de nos échantillons.

En bref, la quasi absence des directions verticales des vecteurs  $\vec{M}_R$  constitue un argument en faveur d'une cuirasse non remaniée.

Si les coups de foudre semblent favoriser l'explication de la diversité des azimuts des vecteurs  $\vec{M}_R$  et la pauvreté en vecteurs voisins de la verticale, voyons s'ils permettent également de rendre compte des fortes valeurs des modules de ces vecteurs et, dans l'affirmative, quel serait le processus d'aimantation ?

C. MAURAIN (7) a évalué à des milliers d'ampères les courants de foudre dont la durée est de quelques millisecondes. D'autres travaux qui ont suivi depuis ont abouti à admettre l'importance de ces intensités sans autres précisions numériques bien établies. En prenant l'ATR comme mécanisme d'acquisition de rémanence, cette thermorémanence ne peut être que très partielle. Soit  $t$  la température supposée inférieure au point de Curie à laquelle est porté un échantillon de la cuirasse (cuisson par exemple par la foudre ou par un incendie, cette deuxième circonstance devant être beaucoup plus rare parce qu'elle exige la réunion de deux éventualités, l'incendie pour la chauffe et la foudre pour le champ agissant) au début de l'établissement du champ, et  $t + \Delta t$  la température à la suppression de ce champ. Pour qu'il y ait ATR,  $\Delta t$  doit être négatif, ce qui élimine toute aimantation thermorémanente des éléments de sol traversés par un courant de foudre par ce même courant qui aurait échauffé ces éléments. On peut, par contre, imaginer qu'un élément porté à une température donnée par un premier coup de foudre reçoit une ATR d'un autre coup de foudre ultérieur. Etant donnée l'extrême brièveté de vie du champ agissant accidentel,  $\Delta t$  est infiniment petit de sorte que, malgré la force du champ agissant mis en œuvre, l'ATR partielle sera en définitive très petite.

Examinons maintenant le cas d'une aimantation rémanente isotherme par coup de foudre. J. ROQUET (12) a réalisé en laboratoire, à la température ambiante, l'expérience d'une ARI sur échantillon de basalte soumis à un champ continu de 179 oersteds. Un calcul basé sur les lois connues de décroissance de l'aimantation de ce type a conduit l'auteur à admettre une ARI résiduelle, au bout d'un million d'années, encore sept fois plus forte qu'une ATR totale dans le champ terrestre. Ce résultat permet de penser qu'on peut raisonnablement s'attendre, malgré la brièveté d'application du champ de foudre par rapport au temps d'application du champ continu en laboratoire (quelques millisecondes devant une fraction de minute), brièveté qui pourrait être compensée par la grandeur du champ de foudre, à des rémanences isothermes de foudre de l'ordre de grandeur compatible avec les  $\sigma_R$  que nous avons rencontrés.

## Conclusion

Cette étude confirme les résultats que nous avons trouvés pour une cuirasse tropicale d'un type tout à fait différent.

Examinant les origines des rémanences naturelles, on peut penser que, pratiquement, au cours des millénaires, la cuirasse a dû enregistrer une succession d'aimantations d'origines les plus diverses tant par les processus d'acquisition de rémanence que par la force des champs agissants eux-mêmes, qu'ils soient permanents ou accidentels comme dans les décharges orageuses. Les moments magnétiques rémanents naturels  $\vec{M}_R$  accessibles à nos expériences ne constituent qu'un vague reflet de la somme géométrique des divers effets subis, plus ou moins bien conservés à cause des phénomènes d'altération permanents mais à variation cyclique d'une part, de la loi de décroissance avec le temps de la rémanence de certains types d'aimantation peu stable d'autre part.

Pour les échantillons présentant une aimantation spécifique rémanente naturelle  $\sigma_R$  anormalement élevée, la partie principale responsable de cette rémanence pourrait être recherchée dans une ARI sous l'action des champs de courants de foudre.

## BIBLIOGRAPHIE

- (1) DOELL (R.) - 1956 - *Trans. Amer. Geophys. Union* 37.
- (2) HOTTIN (G.) - 1961 - Travaux du Bureau Géologique, Service Géologique, Tananarive, Madagascar.
- (3) KOENIGSBERGER (J.G.) - 1938 - *Terr. Magn.*, 43.
- (4) LE BORGNE (E.) - 1960 - Influence du feu sur les propriétés magnétiques du sol. *Annales de Géophysique*, t.16, fasc.2, pp.159-195.
- (5) LOEB (L.B.) - 1968 - *Journal of Geophys. Research*, 73, n°18, pp.5813-17.
- (6) MAURAIN (C.) - 1901 - *J. Physique*, 10, Paris.
- (7) MAURAIN (C.) - 1923 - *Phys. du Globe*, Lib. A. Colin, Paris.
- (8) NAGATA (T.) - 1961 - *Rock Magnetism* Maruzen Company Ltd Tokyo.
- (9) NAGATA (T.) et WATANABE (T.) - 1950 - *Geophys. Notes Tokyo Univ.*, 3, 21.
- (10) REMIOT (R.) - 1968 - Etude comparative des aimantations naturelles rémanente et induite de quelques échantillons de la cuirasse ferrugineuse d'Ambatovy. *Cah. ORSTOM sér. Géophys.*, 9, pp.17-26.
- (11) REMIOT (R.) et ANDRIAMIRADO (R.) - 1968 - Sur le magnétisme d'une cuirasse bauxitique du Tampoketsa d'Ankazobe. *Cah. ORSTOM sér. Géophys.*, 9, pp. 27-57.
- (12) ROQUET (J.) - 1954 - *Annales de Géophysique*, t. 10, fasc. 4, pp. 282-325.
- (13) THELLIER (E.) - 1967 - A "big sample" spinner magnetometer in Paleomagnetism, Elsevier Publishing Company, pp. 149-154.
- (14) THELLIER (E.) - 1938 - Sur l'aimantation des terres cuites et ses applications géophysiques. *Ann. Inst. Phys. du Globe, Univ. Paris*, Bureau Central Magnétisme Terrestre, t. 16, pp. 157-302.

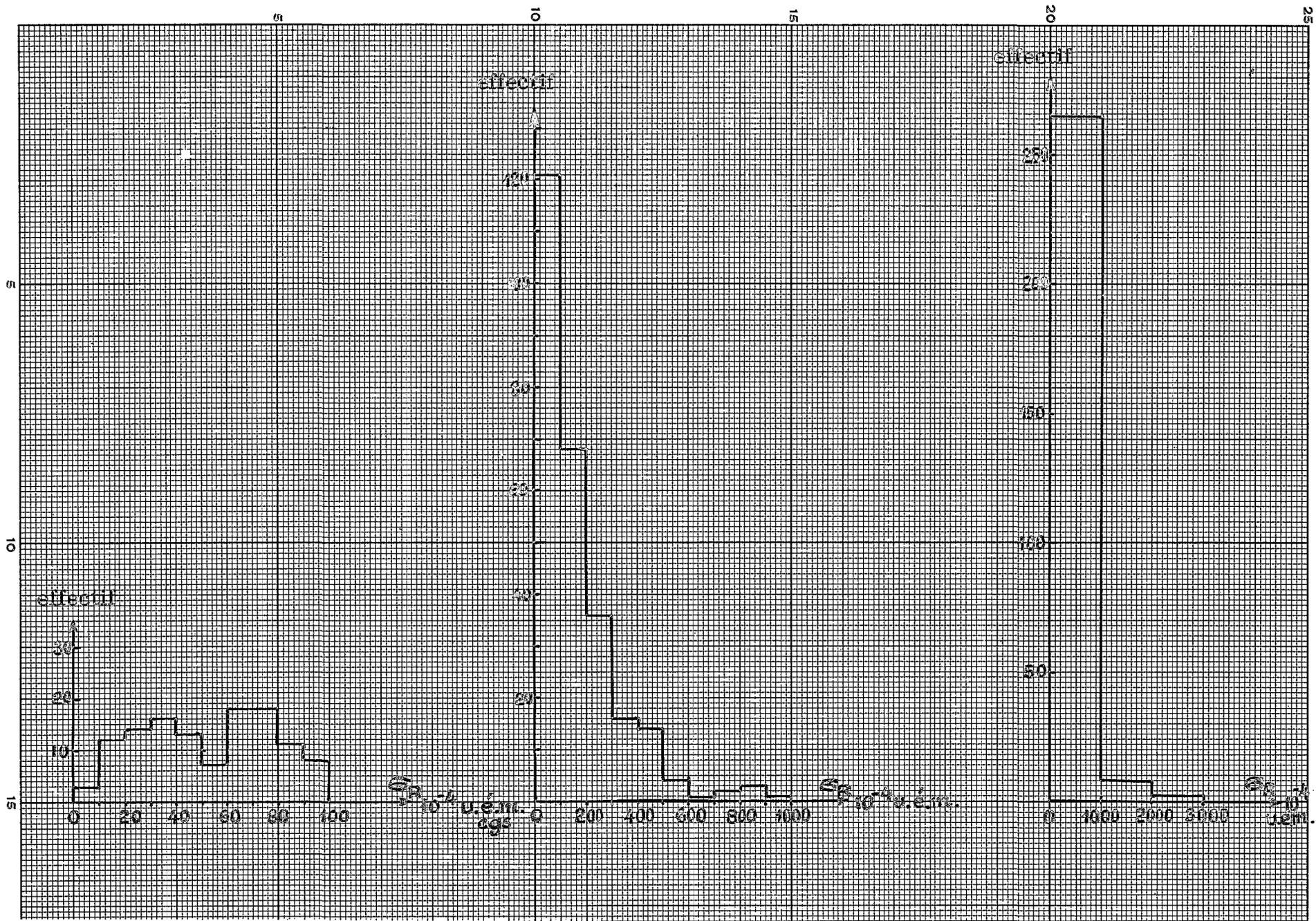


Fig. 1 — Répartition des aimantations spécifiques  $\sigma_R$  : Histogrammes par classes de  $\sigma_R$  d'intervalles respectivement égaux à 10, 100 et 1000  $\times 10^{-4}$  u.e.m cgs.

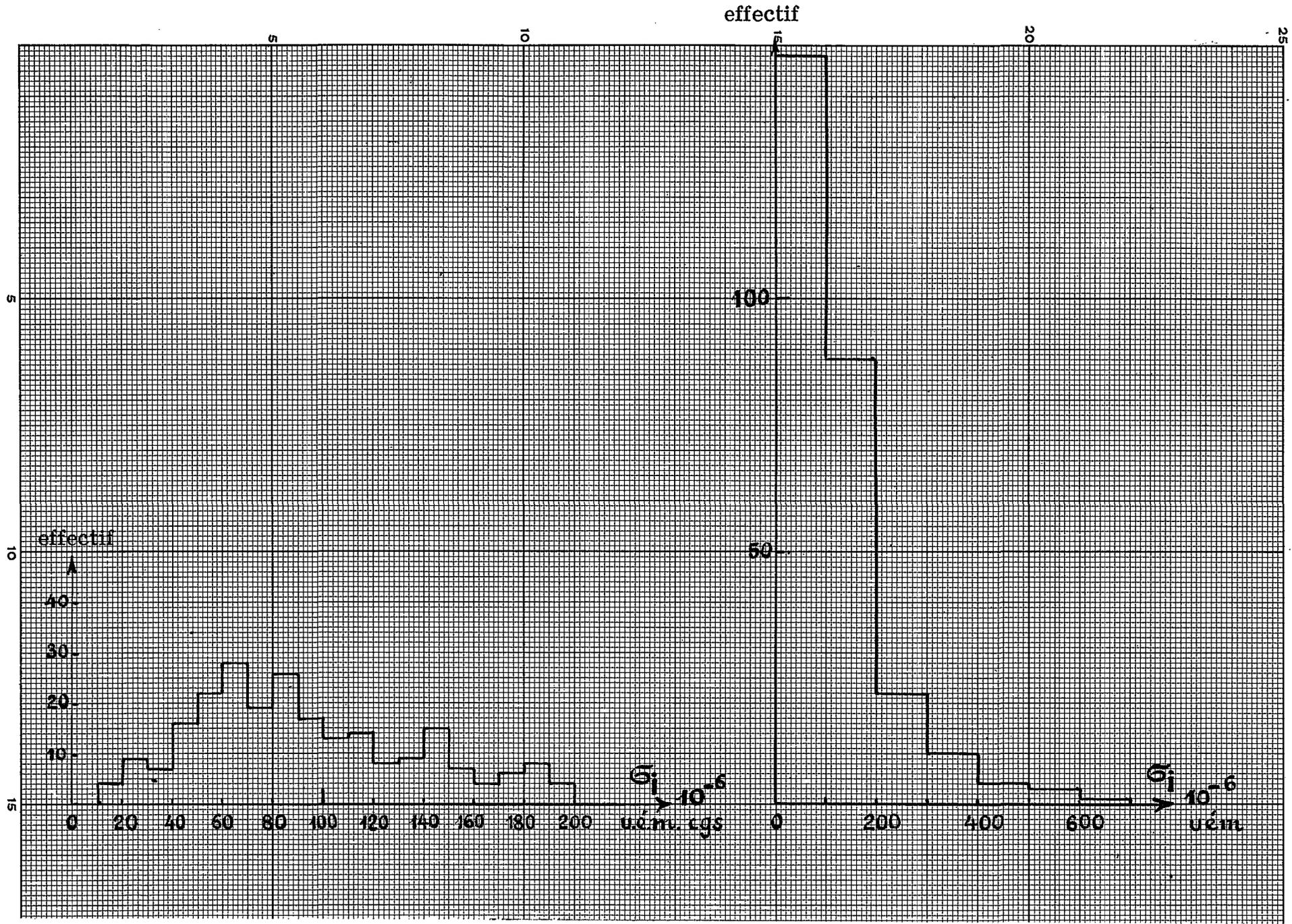


Fig. 2 — Répartition des intensités d'aimantation massique  $\sigma_j$  induite par le champ terrestre actuel : Histogrammes par classes de  $\sigma_j$  d'intervalles respectivement égaux à 10 et 100 x  $10^{-6}$  uem cgs

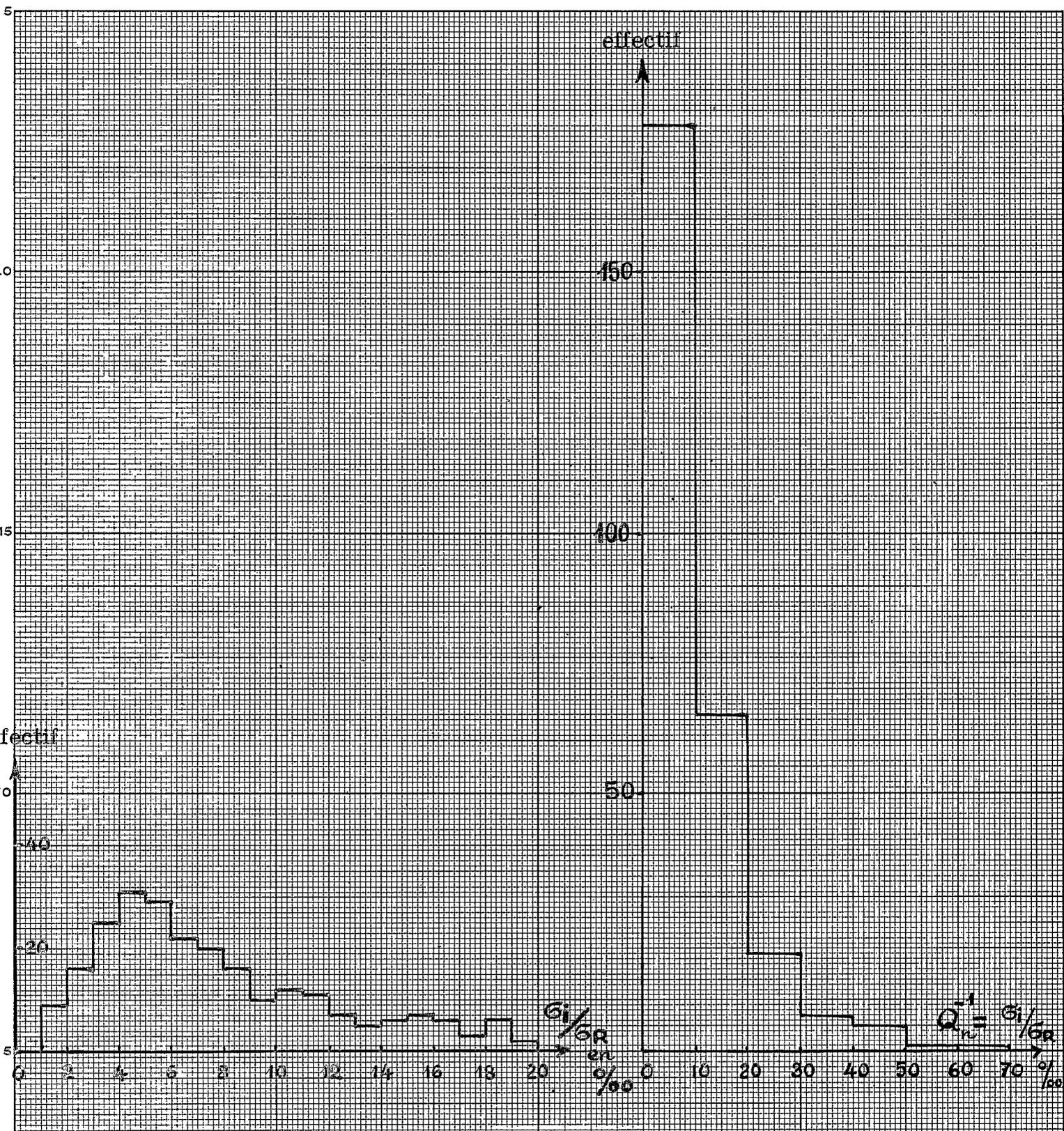


Fig. 3 — Répartition du rapport  $Q'_n = \frac{1}{Q_n} = \frac{\sigma_I}{\sigma_R}$  en tant pour mille : Histogrammes par classes de  $Q'_n$  d'intervalles respectivement égaux à 1‰ et 10‰.