

CBPF-NF-013/89

ETUDE ANALYTIQUE DE SPHERULES PROVENANT DU SITE DE  
L'EXPLOSION DE LA TOUNGOUSKA

par

Célestine JEHANNO\*, Daniel BOCLET<sup>†</sup>, Jacques DANON<sup>1†</sup>,  
Eric ROBIN\* et Robert ROCCHIA\*

<sup>1</sup>Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas - CBPF/CNPq  
Rua Dr. Xavier Sigaud, 150  
22290 - Rio de Janeiro, RJ - Brasil

\*Centre des Faibles Radioactivités  
Laboratoire Mixte CEA-CNRS  
Domaine du CNRS, 91190, Gif-sur-Yvette - France

<sup>†</sup>Service d'Astrophysique, CEN-Saclay,  
91191 Gif-sur-Yvette - France

<sup>†</sup>Observatório Nacional  
Rua José Cristino, 77  
20921 - Rio de Janeiro, RJ - Brasil

**Résumé** - Après de nombreuses expéditions sur le site de l'événement, l'explosion de la Toungouska de Juin 1908, n'a toujours pas reçu d'explication satisfaisante. Le bolide cosmique, présumé responsable de l'explosion, n'a pas été identifié mais de nombreuses sphérules magnétiques ont été trouvées au voisinage de l'épicentre. Quarante-vingt sphérules ont été étudiées et comparées aux sphérules Fe-Ni du flux permanent de micrométéorites. 90% d'entre elles n'appartiennent à aucune famille identifiée de micrométéorites; leur faible teneur moyenne en iridium laisse supposer une origine terrestre. Cinq autres sont indubitablement des micrométéorites de Fe-Ni et sont donc étrangères à l'événement de la Toungouska. Seules trois sphérules, constituées d'un seul oxyde de fer, pourraient avoir été produites par cet événement.

**Mot-clefs:** Sphérules; Micrométéorites; Toungouska.

*Abridged English version - 1. Scientific background. -* The Tunguska event, which occurred as an enormous explosion on June 30, 1908, over the basin of the River Podkamennaya Tunguska in Central Siberia (1), has not yet received a satisfactory explanation (2). A cosmic collision is suggested by the eye-witness accounts reporting a bolide entering the atmosphere with a small incidence angle. However, the numerous expeditions on the siberian site have never found any crater. This suggests that the bolide exploded in the atmosphere and that its material was spread over a wide area. Indeed, gravimetric and magnetic separations from large soil samples collected at several ten kilometers from the epicenter, allowed the extraction of spherules (3) with a relatively high iridium content, indicating a cosmic origin. The mass of this material would not exceed 2 tons over an explored area of 20000 km<sup>2</sup> (4). A uniform extrapolation to the entire Earth leads to a maximum dispersed mass of 50000 tons, not much different from the annual micrometeoroid infall (5). However, from an iridium anomaly found in an Antarctic snow-ice core and attributed to the 1908 explosion, Ganapathy estimated that the weight of the Tunguska meteor was more than 7 million tons (6). These inconsistent budgets prompted us to carry out new analyses on the available material collected at the explosion site and in Antarctic snow.

In a previous work, we reported careful measurements of the iridium content of a well dated snow core from Antarctica (8): the Tunguska event does not show in the Antarctic snow. This casts some doubt on the importance of the global scale dispersion (6).

In addition, we have investigated a sample of 80 small iron-rich spherules (80 to 150 microns) and fragments of spherules found close to the explosion site and which had been previously studied by other authors with the scanning electron microscope (8). We have compared them with the various families of iron micrometeorites recovered in deep sea sediments (9,10) and over Greenland ice cap (11,12,13).

2. Techniques.- Surface analysis with a dispersion energy X-ray spectrometer makes possible to distinguish 3 groups of spherules: a first one very rich in Ni (5 spherules, Ni >1%), another one with a low Ni content (3 spherules, 0.01% < Ni < 0.1%) and a third group with no Ni content. The three groups were irradiated for 72 hours in a neutron beam of  $2.10^{14}$  n.cm<sup>-2</sup>.sec<sup>-1</sup>. at the Laboratoire Pierre Sûe in Saclay, and analysed by  $\gamma$ -spectrometry. Individual spherules were embedded in epoxy resin, then polished and analysed at the scanning electron microscope. The weight of each spherule was determined from its iron content, by X-ray analysis and  $\gamma$ -spectrometry.

**3. Results.-** Table lists the results obtained in order of decreasing Ir content of the spherules. While Zbik (8) distinguished 5 types from morphological characteristics, we propose only 3 groups according to their chemical composition.

**Group A.** Polished sections of the five spherules from this group exhibit the well known structure of the Fe-Ni spherules from the permanent micrometeorite flux (9,10,11). These spherules, consisting of two iron oxide phases, wüstite and magnetite (plate A), have their platinum metals assembled in a Ni core or in a nugget. Two of them, TK1C and D, containing about  $400 \text{ ng.g}^{-1}$  are partly damaged spherules having lost their Ni core (plate B).

**Group B.** The three spherules of this group, compared with group A, have low Ni and Ir contents ( $\approx 100 \text{ ng.g}^{-1}$ ) but the Ir/Ni ratio is nearly chondritic. Polished sections reveal a single iron oxide phase (plate C). Iridium is homogeneously distributed. A single oxide phase is also found in one family of the Greenland micrometeorites (10,11) but with different composition (sulfur resulting from the partial decomposition of troilite and pentlandite, higher Ir and Ni content: respectively  $400 \text{ ng.g}^{-1}$  and  $6600 \mu\text{g.g}^{-1}$ ) and structure (Plate D).

**Group C.** This group with various structures and shapes (plate E and F) represents about 90% of our total sample. All consist of iron oxide and their iridium content is very low. A high precision analysis, carried out on a set of 14 spherules with a  $\gamma\text{-}\gamma$  spectrometer, yielded an average value of  $5.7 \pm 0.3 \text{ ng.g}^{-1}$  of iridium. Individual Ir contents are found up to  $40 \text{ ng.g}^{-1}$  making the boundary with group B somewhat fuzzy. Spherules of this kind do not exist in the micrometeorite populations.

**4. Discussion.-** Group A spherules are obviously Fe-Ni spherules of the micrometeorite flux. Their annual accretion rate being a few  $10^4$  particles  $\text{km}^{-2}$  (12,13), it is not surprising to find them abundantly at places where good storage conditions exist. The large areas of peaty soils explored during the various expeditions on the Tunguska site offer such conditions.

Group B spherules, without sulfur and with only  $100 \text{ ng.g}^{-1}$  of iridium, are markedly different from the single-oxide Greenland micrometeorites (table) (11,13). This points to a different origin. However, because of their iridium content they must be considered as extraterrestrial bodies.

Nothing like group C exists in the micrometeorite populations. Its significant but low iridium content, of about  $5 \text{ ng.g}^{-1}$ , far below the chondritic value but also much higher than the average Earth crust concentration, does not indicate a clear extraterrestrial origin. Generally, industrial iron oxide spherules do not contain iridium in excess of  $1 \text{ ng.g}^{-1}$  but several tens  $\text{ng.g}^{-1}$  are found in some peculiar steels. Consequently, an industrial origin is suspected for group C.

From the three groups of spherules found on the Tunguska site, the most abundant one (group C) has probably a purely terrestrial origin. Another one (group A) is definitely identified with Fe-Ni micrometeorites. The least abundant one (group B) has a likely cosmic origin. With its unusual characteristics, it is a possible relic candidate for the 1908 explosion. Since this population represents less than 5 % of our set of samples, the mass of the Tunguska meteor debris collected near the explosion site (2 tons over 20000 km<sup>2</sup>, (4)) should be reduced by at least a factor twenty.

**1-Introduction.** - L'énorme explosion qui s'est produite en juin 1908 au dessus du Bassin de la rivière Podkamennaya Toungouska en Sibérie Centrale (1) n'a toujours pas trouvé d'explication satisfaisante (2). Bien qu'une origine cosmique soit attestée par les observations visuelles d'un objet extraterrestre entrant dans l'atmosphère sous une faible incidence, les expéditions organisées par les scientifiques soviétiques n'ont pas réussi à identifier les vestiges de l'impact. L'absence de cratère a conduit à émettre l'hypothèse que le bolide, probablement d'origine cométaire, s'était désintégré et dispersé dans l'atmosphère. Un tri gravimétrique et magnétique sur des quantités importantes d'échantillons de sol prélevés à plusieurs dizaines de kilomètres de l'épicentre a permis d'extraire des sphérules (3) dont l'enrichissement en iridium indique une origine cosmique. La masse de ce matériel ne dépasserait pas 2 tonnes sur la surface de 20000 km<sup>2</sup> où il est le plus concentré (4). Même en supposant une dispersion uniforme à la surface de la planète, la masse totale serait au maximum de 50000 tonnes, chiffre à peine supérieur au flux annuel de poussières cosmiques. Pourtant, une anomalie en iridium observée par Ganapathy dans une carotte de neige de l'Antarctique (6) semblait indiquer que le matériel cosmique dispersé par le bolide représentait plus de 7 millions de tonnes. L'incohérence de ces bilans nous a conduit, en attendant le nouveau matériel qui sera collecté au cours des prochaines expéditions (2), à refaire des analyses sur le matériel actuellement disponible provenant tant du site de l'explosion que du continent Antarctique.

La compréhension de cet événement est importante. En effet, on sait que de telles catastrophes peuvent avoir des conséquences biologiques à l'échelle globale. Un phénomène de même nature, mais d'une ampleur beaucoup plus

grande, se serait produit il y a 65 millions d'années en parfait synchronisme avec la grande crise biologique de la limite Crétacé-Tertiaire. Toutefois, son étude est rendue difficile à cause de l'altération des dépôts. L'événement de la Tungouska, de moindre amplitude mais récent, offre l'opportunité d'étudier un matériel non encore altéré. Dans un premier temps nous avons recherché l'iridium dans une carotte de neige de l'Antarctique, bien datée(7). Nos mesures ne confirment pas les résultats précédemment publiés par Ganapathy (6): l'explosion de la Tunguska n'a pas laissé la moindre trace d'iridium dans la neige de l'Antarctique; ce résultat remet en cause l'ampleur de la dispersion. Nous avons aussi analysé le matériel trouvé sur le site de l'explosion. Nous disposons d'environ 80 petites sphérules (80 à 150 microns) ou fragments de sphérules déjà observés au microscope électronique à balayage (8). Nous les avons comparés aux sphérules du flux permanent de poussières cosmiques recueillies dans les sédiments marins (9,10) et sur les glaciers du Groënland (11,12,13).

**2. Techniques expérimentales.** - Une première analyse des surfaces à l'aide d'un spectromètre X à dispersion d'énergie, a permis de sélectionner trois familles: l'une très riche en nickel (5 sphérules,  $Ni > 1\%$ ), une deuxième pauvre en nickel (3 sphérules,  $0,01\% < Ni < 0,1\%$ ), et la troisième sans nickel apparent. Irradiées au Laboratoire Pierre Süe (Saclay) pendant 72 heures dans un flux de  $2 \cdot 10^{14}$  neutrons.  $cm^{-2} \cdot sec^{-1}$ , les sphérules ont été analysées au spectromètre  $\gamma$ , incluses individuellement dans de la résine epoxy, puis étudiées en sections polies au microscope électronique à balayage. Le poids des sphérules a été déterminé à partir de la teneur en fer obtenue par l'analyse X des sections polies et du poids du même élément donné par la spectrométrie  $\gamma$ .

**3. Résultats.** - Comme l'avait déjà montré Zbik (8), 5 types de sphérules peuvent être identifiés sur la base de critères morphologiques. Cependant, ces caractéristiques morphologiques reflètent plus l'histoire thermodynamique des différents grains que leur origine et il nous a semblé préférable de proposer un classement en trois groupes, établi uniquement en fonction de la composition chimique et, en particulier, de la teneur en Iridium (tableau).

**Groupe A:** Les sphérules du premier groupe, au nombre de 5, sont toutes parfaitement sphériques, et présentent en section polie la structure très caractéristique des sphérules de fer-nickel du flux permanent de poussière cosmique (9,10,11 et pl., A). Comme celles-ci, elles sont composées de deux phases d'oxydes de fer, wüstite et magnétite, et ont rassemblé l'essentiel de

leurs éléments platinoïdes dans des coeurs de nickel ou sous forme de pépites. Deux d'entre elles étaient cassées (pl., B) et avaient perdu leur coeur de nickel ce qui explique leur faible teneur en Ir de 435 et 365 ng.g<sup>-1</sup>, valeurs mesurées également dans les matrices d'oxyde de fer de sphérules cosmiques (10). De la même façon, la sphérule 1E qui, entière, contenait 3375 ng.g<sup>-1</sup> d'Ir n'en avait plus que 340ng.g<sup>-1</sup> après l'extraction du coeur de nickel au laboratoire.

Groupe B: comparées aux précédentes les 3 sphérules de ce groupe ont des teneurs faibles en nickel, en cobalt et en iridium (table 1). Cependant, le rapport Ir/Ni reste sensiblement chondritique. Les sections polies révèlent une phase unique d'oxyde de fer (magnétite ?) dans laquelle l'iridium est uniformément dispersé. Toutes ces caractéristiques les rapprochent de la deuxième population de sphérules de Fe-Ni du Groënland dites "à 1 oxyde" qui contient en moyenne 400 ng.g<sup>-1</sup> d'iridium et 6600 µg.g<sup>-1</sup> de nickel (10,11). Cependant, elles en diffèrent par l'absence de soufre ainsi que par leur morphologie et leur structure interne (pl. C et D).

Groupe C: ce groupe représente en nombre 90% de l'échantillon. L'aspect externe et interne (pl. E et F) est très variable mais toutes les sphérules sont constituées d'oxyde de fer. Les mesures d'iridium dont la teneur est très faible ont été faites avec précision sur un lot de 14 objets, à l'aide d'un spectromètre biparamétrique, et donnent une valeur moyenne de  $5,7 \pm 0,3$  ng.g<sup>-1</sup>. Les mesures individuelles montrent un échelonnement jusqu'à 40 ng.g<sup>-1</sup> qui rend quelque peu arbitraire la frontière avec le groupe précédent. Dans la collection des sphérules du Groënland il n'existe aucune population de ce type.

4. Discussion. - Toutes les caractéristiques des sphérules du groupe A sont celles des sphérules de fer-nickel du flux permanent de poussières cosmiques. Le taux d'accrétion de ces sphérules est de quelques  $10^4$  particules km<sup>-2</sup> an<sup>-1</sup> (12,13). Il est normal qu'on les retrouve partout où les conditions de stockage sont favorables. Les quantités importantes de sol ratissées au cours des différentes expéditions sur le site de la Toungouska devaient contenir un nombre appréciable de ces sphérules.

Le groupe B ne contient pas de soufre, contrairement aux sphérules "à 1 oxyde" du Groënland. Le soufre proviendrait de la décomposition incomplète des phases sulfurées des météorites (13). Ces phases sulfurées (troïlite, pentlandite) ne semblent donc pas être à l'origine des sphérules du groupe B. L'iridium étant le marqueur le plus sûr de la matière extraterrestre on est quand même amené à

leur attribuer une origine extraterrestre, mais autre que le flux permanent de micrométéorites.

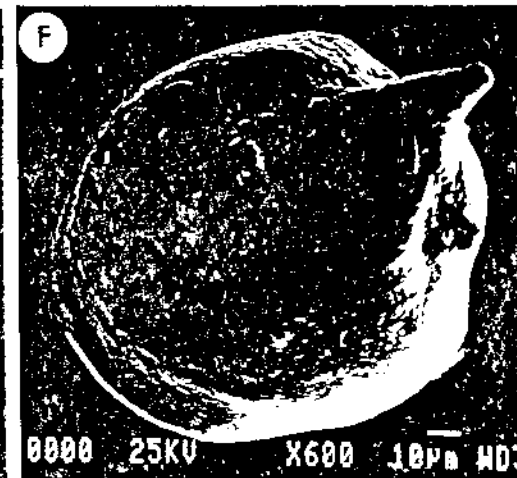
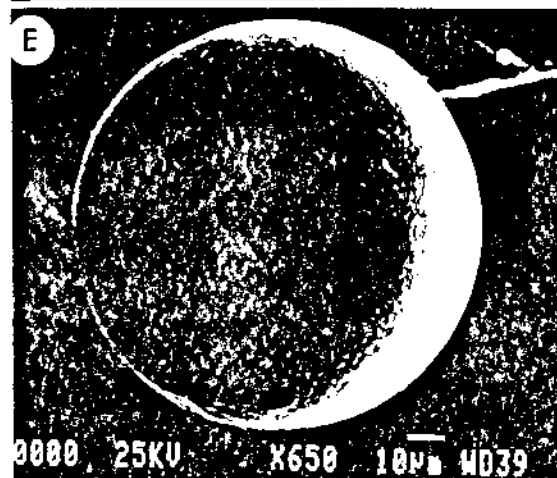
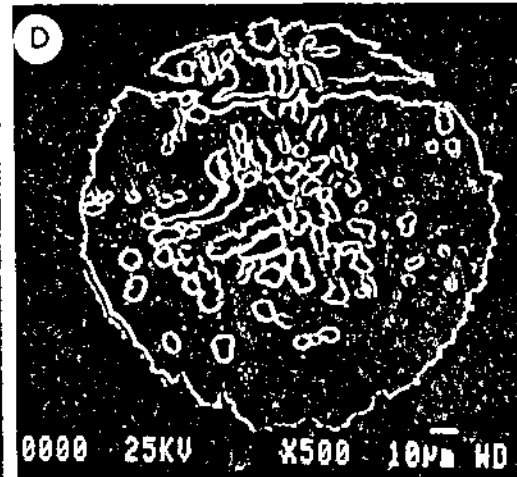
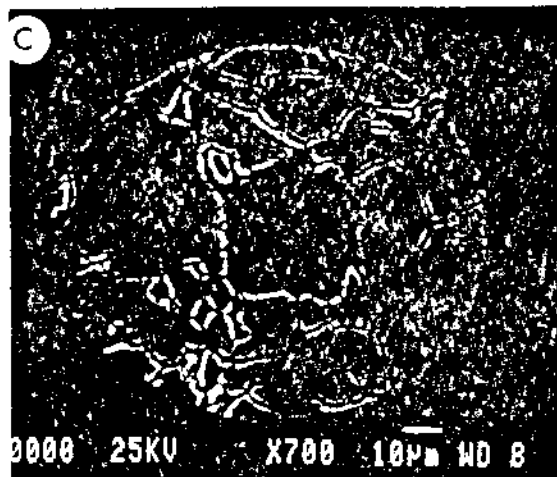
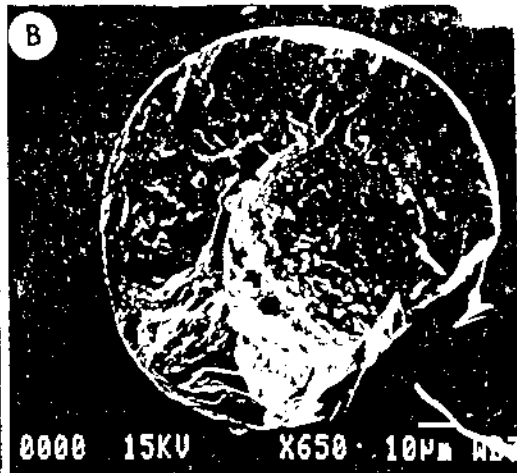
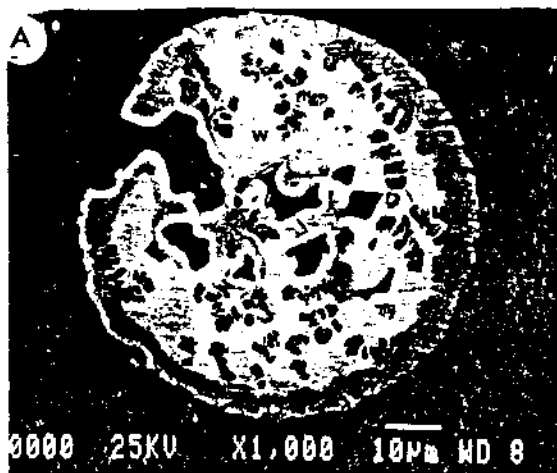
Rien de comparable à la population du groupe C n'existe dans le flux de micrométéorites. Sa teneur en iridium, ( $5\text{ng.g}^{-1}$  en moyenne) très éloignée de la teneur chondritique mais en même temps très supérieure aux teneurs de la croûte terrestre laisse planer une ambiguïté sur son origine. Les teneurs en iridium des sphérules d'oxyde de fer d'origine industrielle ne dépassent pas en général  $1\text{ng.g}^{-1}$  mais nous avons mesuré plusieurs dizaines de  $\text{ng.g}^{-1}$  dans certains aciers. Une origine terrestre ne peut donc être exclue.

Trois familles de sphérules ont été trouvées sur le site de la Toungouska. A la plus abondante (groupe C) nous sommes tentés d'attribuer, au moins provisoirement, une origine humaine. Une autre famille (groupe A) est identifiée, sans ambiguïté, à une population du flux permanent de micrométéorites. La moins abondante (groupe B) est probablement d'origine cosmique et ses caractéristiques inhabituelles la désignent comme un des produits éventuels de l'explosion de 1908. Ce groupe représente, en nombre comme en masse, moins de 5 % de notre échantillon. La masse des sphérules de fer effectivement due à l'explosion de la Toungouska pourrait donc être 20 fois plus faible que la masse estimée précédemment (2 tonnes sur  $20000\text{ km}^2$  (4)).



## Explications de la Planche

- A- Sphérule TK 1D. Coupe montrant la structure Wustite - Magnétite commune au groupe A et à la population la plus abondante des sphérules de Fe-Ni du flux cosmique.
- A- TK 1D spherule. Polished section showing the Wustite-Magnetite structure found in group A and also in the most common Fe-Ni spherules of the steady cosmic flux.*
- B- Sphérule TK 1C endommagée, cavité laissée par le coeur de nickel.
- B- Damaged TK 1C spherule with the void resulting from the nickel core loss.*
- C- Sphérule TK 2A. Structure "1-oxyde" à gros cristaux.
- C- "1-oxide" big crystal structure in TK 2A spherule.*
- D- Sphérule Fe-Ni "1-oxyde" avec résidus de soufre (flèche), du flux de poussière cosmique.
- D- "1-oxide" Fe-Ni spherule with sulfur rich inclusions (arrow) from the steady cosmic flux.*
- E et F- Sphérules du groupe C.
- E and F- Group C spherules.*



## TABLEAU

Abondance des éléments dans les 3 groupes de sphérules du site de l'explosion de la Toungouska. Les incertitudes représentent  $1\sigma$  en comptage statistique. N.D. : mesure en dessous du seuil de sensibilité. \* Mesure au spectromètre biparamétrique.

*Elemental abundance in the 3 group of spherules from the site of the Tunguska explosion. Uncertainties represent  $1\sigma$  counting statistics. N.D. : below measurement threshold. \*  $\gamma$ - $\gamma$  spectrometer measurement.*

Sphérule	Poids $\mu\text{g}$	Fer %	Nickel $\mu\text{g/g}$	Cobalt $\mu\text{g/g}$	Chrome $\mu\text{g/g}$	Iridium $\text{ng/g}$
<b>Groupe A</b>						
TK 1B	3,2	63	83060 $\pm$ 180	4528 $\pm$ 11	1778 $\pm$ 30	14190 $\pm$ 150
TK 1A	16,6	67	29100 $\pm$ 580	5550 $\pm$ 15	34 $\pm$ 11	4302 $\pm$ 45
TK 1E	2,2	64	63260 $\pm$ 620	5160 $\pm$ 46	633 $\pm$ 35	3375 $\pm$ 120
TK 1C	1,8	65	50890 $\pm$ 410	5860 $\pm$ 16	90 $\pm$ 4	435 $\pm$ 25
TK 1D	1,5	66	42250 $\pm$ 350	8780 $\pm$ 15	N.D.	365 $\pm$ 22
<b>Groupe B</b>						
TK 2C	2,9	67	1450 $\pm$ 145	1000 $\pm$ 3	14 $\pm$ 3	122 $\pm$ 6
TK2A	4,1	67	1790 $\pm$ 200	1211 $\pm$ 5	N.D.	108 $\pm$ 15
TK 2B	3,2	67	810 $\pm$ 80	624 $\pm$ 4	83 $\pm$ 9	91 $\pm$ 18
<b>Groupe C</b>						
TK 3 B	5,2	66	160 $\pm$ 80	149 $\pm$ 3	131 $\pm$ 4	41 $\pm$ 8
TK 3 G	2,5	69	280 $\pm$ 45	393 $\pm$ 3	11 $\pm$ 2	20 $\pm$ 3
TK 3 A	5,6	68	N.D.	31 $\pm$ 1	21 $\pm$ 2	11 $\pm$ 2
TK 3 F	4,7	68	200 $\pm$ 40	62 $\pm$ 2	23 $\pm$ 4	13 $\pm$ 3
TK 3 C	1,6	67	N.D.	160 $\pm$ 3	20 $\pm$ 4	7 $\pm$ 5
TK 3 E	4,5	68	320 $\pm$ 90	95 $\pm$ 2	11 $\pm$ 2	N.D.
TK 3 D	4,9	67	540 $\pm$ 120	717 $\pm$ 4	10 $\pm$ 2	N.D.
TK 3 H	5,9	67	600 $\pm$ 120	909 $\pm$ 5	20 $\pm$ 5	N.D.
14 sph. TK 3*	92,9		470 $\pm$ 50	203 $\pm$ 1	34 $\pm$ 3	5,7 $\pm$ 0,3

## Références bibliographiques

- (1) E.L. KRINOV, *Giant Meteorites* (Pergamon, New York) 1966, p. 125-265.
- (2) V. RICH, *Nature*, 335, 1988, p.6.
- (3) K. P. FLORENSKY, *Meteoritika*, 23, 1963, p.3.
- (4) N.V. VASILYEV, *Sci. USSR*, 3, 1983, p. 110-111.
- (5) F.T. KYTE, J. T. WASSON, *Science*, 232, 1986, p. 1225-1229.
- (6) R. GANAPATHY, *Science*, 220, 1983, p. 1158-1161.
- (7) R. ROCCHIA, M. DE ANGELIS, D. BOCLET, PH.BONTE, C.JEHANNO, E.ROBIN, *Conference on " Global Catastrophes in Earth History" Snowbird (Utah), October 20-23, 1988, Abstracts*, p.156.
- (8) M. ZBIK, *J. Geoph. Res*, Vol. 89, Supplement, 1984, p.B605-B611.
- (9) D.E. BROWNLEE, *The Sea*, vol. 7, 1981, (C. Emiliani, ed. Wiley, New York), p. 733-762.
- (10) Ph. BONTÉ, C. JÉHANNO, M. MAURETTE, D.E. BROWNLEE, *Lunar planet. Sci.* 17, (abstract.) 987-988, (1986)
- (11) E.ROBIN, C.JEHANNO, M.MAURETTE, *Proc. 18th Lun. Plan. Sc. Conf.*, 1987, p.593-598.
- (12) M. MAURETTE, C. JEHANNO, E. ROBIN, C. HAMMER. *Nature* 328, 1987, p699-702.
- (13) E.ROBIN, *Thèse de Doctorat, Université Paris-Sud*,1988.

**Abstract** - *Eighty years after the event, the Tunguska explosion of June 1908, has not found a satisfactory explanation. The cosmic bolide, supposed responsible for the event, has not yet been identified but numerous magnetic spherules have been recovered in the vicinity of the explosion site. Eighty spherules have been studied and compared with the Fe-Ni spherules from the steady micrometeoroid flux. Ninety percents of them cannot be identified with any known micrometeoroid families; their low average iridium content rather suggests a terrestrial origin. Five other spherules are obviously Fe-Ni spherules of the steady micrometeoroid rain and, thus, are unrelated with the Tunguska event. Only three of the 80 spherules, consisting of a single iron oxide phase, could have been produced by the event.*