

## Contribution à l'étude du fer météorique de Morasko (Pologne)

par BERNARD CERVELLE et MADELEINE GASPERIN,  
Laboratoire de minéralogie et de cristallographie, associé au C. N. R. S. (1).

R. JEANROT,

Bureau de Recherches Géologiques et Minières (2).

et ANDRÉ SANDREA,

Laboratoire de géologie appliquée, associé au C. N. R. S. (1).

**Résumé.** — Des études morphologiques (microscope électronique à balayage), chimiques (microsonde électronique), radiocristallographiques (cristal tournant, Weissenberg), et optiques (microrélectométrie), ont été effectuées sur un fragment de la météorite de Morasko.

En plus des ferro-nickels (kamacite, taenite, plessite) assez classiques, cette météorite contient des plages millimétriques de cohénite  $(\text{Fe, Ni})_3\text{C}$  et de schreibersite  $(\text{Fe, Ni})_3\text{P}$ ; les courbes de dispersion des réflectances ( $\lambda$  : 400-700 nm) de tous ces minéraux sont fournies. Ce sont des données nouvelles pour deux d'entre eux. Cohénite : R compris entre 48,7 et 61,1 %. Schreibersite à 40 % de nickel :  $R_0$  varie de 45 % ( $\lambda = 400$  nm) à 56 % ( $\lambda = 700$  nm) ;  $R'_e$  varie de 47 % à 57,9 %.

Des clichés de poudre ont permis de mesurer les  $d_{hkl}$  de la cohénite, tandis que les paramètres  $a$  et  $c$  de la schreibersite ont été déterminés sur un monocristal :  $a = 0,99$  Å et  $c = 4,45$  Å.

*Studies of a Morasko (Poland) iron meteorite fragment.*

**Abstract.** — Studies of morphology (S. E. M.), chemistry (electron microprobe), radiocystallography (rotation cr., Weissenberg) and optics (microreflectometry) have been made on a fragment of the Morasko meteorite.

Besides the classical nickel-iron phases (kamacite, taenite and plessite), the fragment contains millimeter sized grains of cohenite  $(\text{Fe, Ni})_3\text{C}$  and of schreibersite  $(\text{Fe, Ni})_3\text{P}$ . Reflectance dispersion curves ( $\lambda = 400-700$  nm) of the minerals are provided. This is new data for the two ; cohenite : R between 48.7 and 61.1 % ; schreibersite (with 40 % Ni),  $R_0$  from 45 % ( $\lambda = 400$  nm) to 56 % ( $\lambda = 700$  nm) ;  $R'$  varies from 47-57.9 %

The  $a$  and  $c$  parameters of schreibersite (40 % Ni) were determined by monocristal-line X-ray method ( $a = 9.09$  Å,  $c = 4.45$  Å).

### INTRODUCTION.

Trouvé en 1914, dans les environs de la bourgade de Morasko (52° 29' lat. N - 16° 55' long. E), le premier morceau de 78 kg d'un fer météorique a suscité des recherches qui ont abouti à la découverte de 27 autres fragments pesant de 7 g à 75 kg. Le poids total des 28 échantillons recueillis est de l'ordre de 290 kg. Les détails de la découverte initiale, des recherches ultérieures ainsi que la description des sites des divers points d'impact ont été publiés par J. Pokrzywnicki (1964).

Un fragment en a été confié aux collections fran-

çaises. Il s'agit de la moitié de l'échantillon n° 13 pesant 74,10 g et mesurant 6 cm sur 3 cm (fig. 1).



FIG. 1. — Fragment n° 13, section polie, lum. réfléchie.

(1) Université Paris VI, 4, place Jussieu, 75 230 Paris Cedex 05.

(2) B. R. G. M., B. P. 6009, 45 018 Orléans Cedex.

La présence, dans cet échantillon, de plages macroscopiques de cohénite et de schreibersite noyées dans une matrice de ferro-nickel nous a incités à étudier quelques propriétés chimiques, morphologiques, radiocristallographiques et optiques de ces différents minéraux, autant que possible par des méthodes non destructives (microsonde électronique, microscopie électronique à balayage, micro-réfectométrie, microdurimétrie et rayons X).

#### MÉTHODES EXPÉRIMENTALES PARTICULIÈRES.

##### 1. Préparation de l'échantillon.

Les écarts de dureté entre la cohénite et la schreibersite d'une part, et les ferro-nickels d'autre part, ne facilitent pas la préparation de larges sections polies exemptes de relief.

Les études nécessitant une bonne planéité de la surface des échantillons ont donc été faites sur des éclats polis séparément, en utilisant une méthode moderne de polissage avec des pâtes diamantées (cf. par ex. López-Soler *et al.*, 1971). Dans cette technique, le polissage final (phase diamant  $1/4 \mu\text{m}$  sur drap de nylon) fournit un poli de qualité optique, exempt de relief. Son défaut, pour l'observation, est de masquer certains détails, généralement mis en valeur par des différences de relief.

Pour certaines études, un polissage supplémentaire à l'alumine (granulométrie  $0,2 \mu\text{m}$  sur tissu synthétique floqué) s'est donc révélé être plus fructueux du fait de la sensibilité de cette technique à de légères différences de dureté.

Quel que soit le mode de polissage appliqué, les plages étudiées ont été repérées de manière que les différentes propriétés mesurées puissent être comparées entre elles : c'est ainsi, par exemple, que les réflectances ont été mesurées sur les plages analysées à la microsonde électronique.

##### 2. Mesure des réflectances.

Le principe de la mesure d'une réflectance (anciennement pouvoir réflecteur) est classique (Cervelle, 1971). Rappelons que la réflectance est le rapport de l'intensité réfléchie à l'intensité incidente, pour une onde plane, homogène, monochromatique et rectilignement polarisée, tombant sous incidence normale sur une plage monocristalline polie, exempte de reliefs et de rayures.

Le microréfectomètre utilisé est équipé d'un photomultiplicateur à anticathode du type S 20. Le monochromateur, à prisme, possède une bonne définition spectrale entre 400 et 800 nm ( $\Delta\lambda = 4 \text{ nm}$  pour  $\lambda \text{ Na}$  et  $12 \text{ nm}$  pour  $\lambda \text{ Li}$ ).

L'étalon était une section polie de carbure de tungstène synthétique, calibrée par la firme Carl Zeiss (étalon international WC 048, réflectance moyenne 45 %). Les mesures ont été faites avec un objectif  $\times 16$ , ouverture numérique 0,40. Le champ de mesure était de l'ordre de  $40 \mu\text{m}$ . Pour les

minéraux anisotropes, chaque plage monocristalline a été mesurée pour les deux directions principales des vibrations privilégiées du cristal, correspondant au maximum et au minimum d'intensité réfléchie lors d'une rotation complète de la platine du microscope.

Ce sont les réflectances extrêmes des plages les plus anisotropes (les plus biréfléchantes) qui sont fournies dans le tableau I.

Enfin les mesures ont été effectuées de 400 à 700 nm, tous les 20 nm, ce qui a permis de tracer les courbes de dispersion spectrale des réflectances mesurées (tableau I, fig. 2, fig. 8). La précision, compte non tenu de l'état de surface de la section polie, est estimée à  $\pm 0,5 \%$  (« standard déviation »).

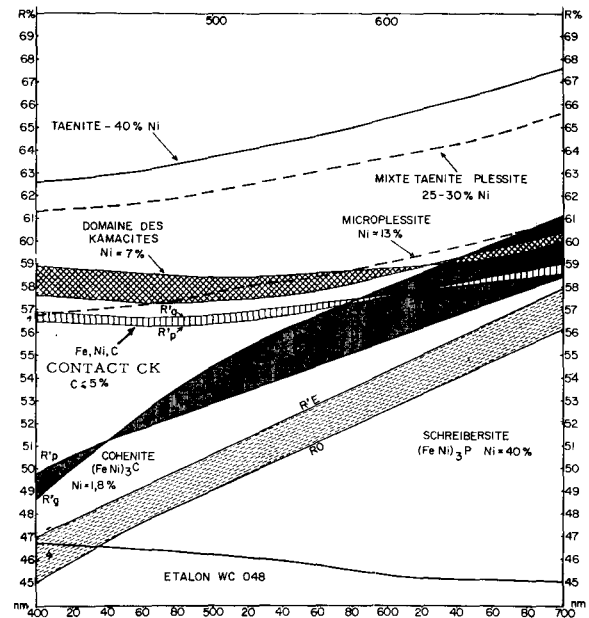


Fig. 2. — Courbes de dispersion des réflectances des minéraux constituant le fragment n° 13 de la météorite de Morasko.

##### 3. Autres méthodes.

Toutes les analyses chimiques ont été faites ponctuellement, à la *microsonde électronique*. Certaines préparations ont également été soumises aux attaques nitriques pour des examens de morphologie et de microtopographie au *microscope électronique à balayage* (MEB).

#### RÉSULTATS.

L'échantillon se présente comme une masse d'alliage de fer et de nickel, parsemée de plages irrégulières millimétriques de cohénite  $(\text{Fe, Ni})_3\text{C}$  et de schreibersite  $(\text{Fe, Ni})_3\text{P}$ .

##### 1. Ferro-nickel.

L'examen au microscope polarisant en lumière réfléchie a permis de reconnaître la kamacite, tra-

TABLEAU I.  
Réflectances (%) des minéraux

Échantillon n° 13 de la météorite de Morasko pour 16 longueurs d'onde (en nanomètres).

		LONGUEURS D'ONDE (nm)																
		400	420	440	460	480	500	520	540	560	580	600	620	640	660	680	700	
Ferro-nickel (Fe, Ni)	Taenite Ni ≥ 40 %	R	62,6	62,7	62,9	63,1	63,4	63,7	64,0	64,3	64,6	65,0	65,4	65,8	66,2	66,6	67,1	67,6
	Taenite Ni ≈ 20-30 %	R	61,3	61,4	61,5	61,7	61,9	62,2	62,5	62,8	63,1	63,4	63,7	64,0	64,3	64,7	65,1	65,6
	Microplessite Ni ≈ 13 %	R	56,8	56,9	57,0	57,2	57,4	57,7	58,0	58,2	58,4	58,7	59,0	59,3	59,7	60,2	60,8	61,4
	Domaine des Kamacites Ni ≈ 7 %	R <sub>m</sub>	57,6	57,5	57,4	57,4	57,3	57,4	57,5	57,6	57,8	58,1	58,5	58,9	59,3	59,6	60,0	60,4
		R <sub>M</sub>	58,9	58,8	58,7	58,6	58,5	58,4	58,4	58,5	58,6	58,7	58,8	58,9	59,0	59,2	59,5	60,0
Contact CK Fe : 90,5 % ; Ni : 4,5-5,2 % ; Co : 0,4 % ; C : 4,5 %		R' <sub>g</sub>	56,9	56,8	56,7	56,6	56,7	56,8	56,9	57,0	57,2	57,4	57,6	57,8	58,0	58,2	58,4	58,6
		R' <sub>p</sub>	56,5	56,4	56,3	56,3	56,2	56,3	56,5	56,7	56,9	57,2	57,5	57,8	58,1	58,4	58,7	59,0
Cohenite (Fe, Ni) <sub>3</sub> C Morasko : Ni = 1,8 %		R' <sub>p</sub>	49,8	50,6	51,2	51,8	52,3	52,8	53,3	53,9	54,5	55,1	55,7	56,2	56,8	57,4	57,9	58,4
		R' <sub>g</sub>	48,7	50,0	51,2	52,4	53,6	54,5	55,3	56,1	56,7	57,3	57,9	58,5	59,1	59,8	60,5	61,1
Cohenite terrestre (Ovifak) Ni = 0,95 %		R' <sub>p</sub>	48,0	48,5	49,0	49,5	50,0	50,6	51,3	52,1	52,9	53,6	54,4	55,2	56,0	56,7	57,4	58,2
		R' <sub>g</sub>	46,7	48,4	49,8	51,0	52,1	53,1	54,1	54,9	55,7	56,3	56,9	57,6	58,2	58,9	59,6	60,3
Schreibersite (Fe, Ni) <sub>3</sub> P Ni ≈ 40 %		R <sub>o</sub>	45,0	45,9	46,8	47,6	48,3	49,0	49,8	50,5	51,2	51,9	52,6	53,3	54,0	54,7	55,4	56,1
		R' <sub>e</sub>	47,0	47,7	48,4	49,1	49,8	50,6	51,4	52,1	52,8	53,5	54,3	55,0	55,8	56,5	57,2	57,9

N. B. 1) Les notations R'<sub>p</sub> et R'<sub>g</sub> indiquent les réflectances extrêmes d'une même section d'un minéral anisotrope, g et p qualifiant respectivement la plus grande et la plus petite réflectance sur la majeure partie du spectre.

2) Les notations R<sub>m</sub> et R<sub>M</sub> indiquent les réflectances extrêmes mesurées sur plusieurs sections d'un même minéral isotrope de composition chimique variable, M et m qualifiant respectivement le maximum et le minimum de réflectance sur la majeure partie du spectre.

versée par des corps flabelliformes de taenite atteignant  $0,2 \times 0,7$  mm.

La *kamacite* est polycristalline (ce qui constitue un indice de pression : 750 Kbar environ) (Heymann *et al.*, 1966). Les joints de grains sont peu visibles, les bandes de Neumann absentes, dans ce fragment, conséquence probable d'une recristallisation (Buchwald, 1966).

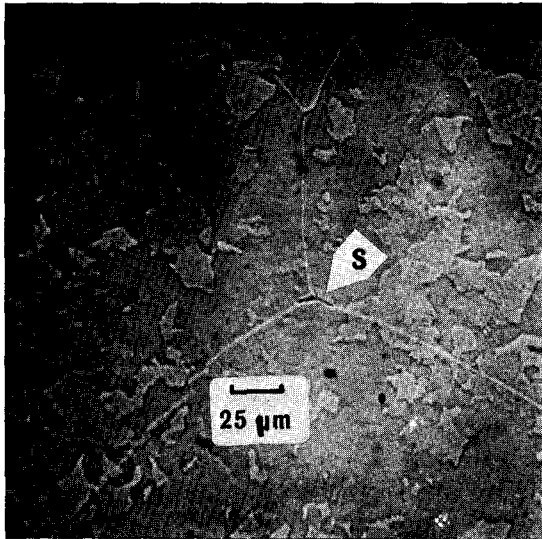


FIG. 3. — Section polie à l'alumine, montrant trois joints de grains de kamacite. S = schreibersite. (Microscope pol., lum. réfléchie, immersion huile.)

La figure 3 montre un ancien joint mis en évidence par le polissage alumine de trois grains de kamacite dont l'intersection est soulignée par un vermicule de schreibersite.

La composition chimique, déterminée à la sonde électronique, de la kamacite, varie de :

Fe : 92 %		Fe : 93,3 %
Ni : 7,3 %	à	Ni : 6,8 %
Co : 0,5 %		Co : 0,5 %

Cette analyse concerne un grain inclus dans une plage de cohénite. Outre les anciens joints cicatrisés, le polissage à l'alumine de la kamacite a fait apparaître des inégalités de niveaux entre les grains : les différences extrêmes, mesurées par interférométrie, sont de l'ordre de  $1,2 \mu\text{m}$ . Cela atteste de différences de dureté entre les grains.

Qualitativement, les images MEB par électrons rétrodiffusés (fig. 4), les figures d'attaque au nital (fig. 5) et, quantitativement, les mesures de microduretés Vickers (VHN : microdurimètre polarisant Leitz, charge de 100 g, temps de descente 12 s), montrent des différences de dureté, de grain à grain, de l'ordre de 8 %. Ces différences, de même que la valeur relativement élevée (VHN = 300) de la microdureté de la kamacite de Morasko, peuvent s'expliquer par un rééquilibrage incomplet, lors du

réchauffement du fer, soit après sa séparation du corps parent provoquée par un choc intense, soit au moment du contact avec le sol terrestre, ayant entraîné une fragmentation de la météorite et la formation d'un cratère (Buchwald, 1974, com. pers.).

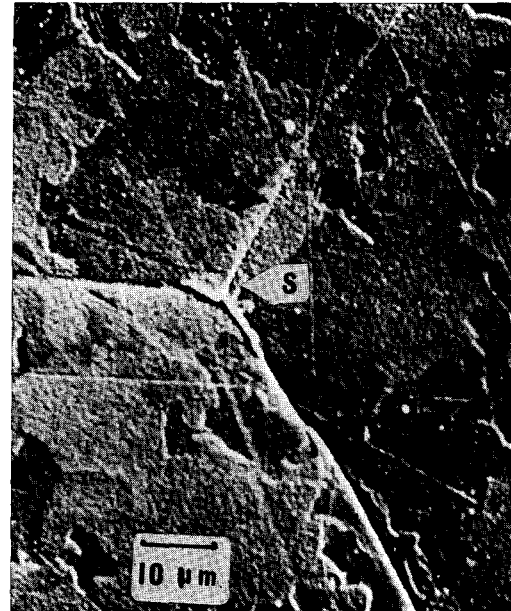


FIG. 4. — Même section que fig. 3 vue au M. E. B., montrant les différences de relief.

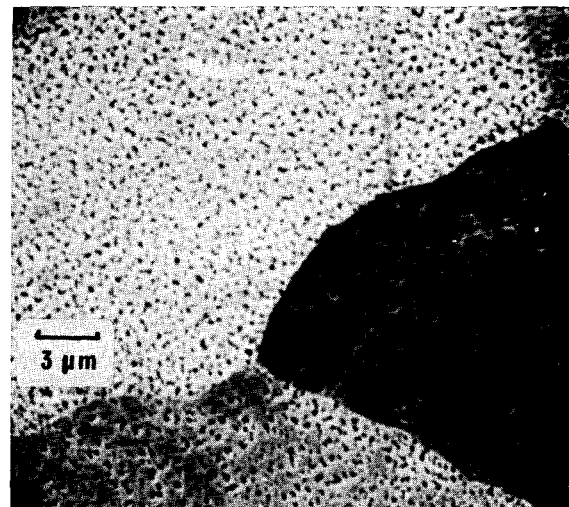


FIG. 5. — Même section que fig. 3, attaquée au nital (1 % 4 mn), montrant les différentes densités d'attaque de trois grains.

(M. E. B. électrons rétrodiffusés.)

Les réflectances de plusieurs grains de kamacite, avec des caractères aussi différents qu'il a été possible de trouver, se situent dans un domaine assez étroit, compris entre 57 et 59 % ( $\lambda = 500$  nm).

Le tableau I rassemble tous les résultats des mesures de réflectances, la figure 2 montre les courbes de dispersion spectrale de ces réflectances entre 400 et 700 nm. Il semble que, entre 400 et 600 nm, la réflectance de la kamacite soit d'autant plus élevée que la teneur en nickel est plus forte. Mais les différences de teneurs en nickel (0,5 %) et de réflectance (1 %) des différents grains de kamacite sont trop faibles pour que les résultats soient vraiment significatifs.

La taénite de la météorite de Morasko se présente, d'une manière classique (fig. 6), en bandes plus ou moins larges. Elles se caractérisent par une bordure à haute teneur en nickel :

Fe : 58,5 — 60 %  
Ni : 42 — 40,5 %  
Co : 0,1 %

et par un cœur d'autant moins riche en nickel que la bande de taénite est plus large.

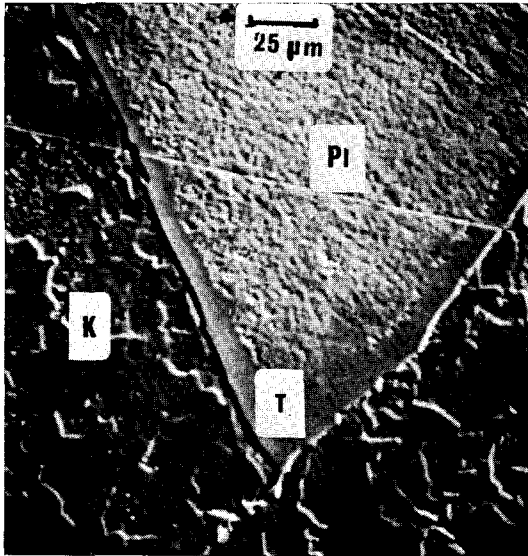


FIG. 6. — K = kamacite ; T = taénite ; Pl = plessite ; polissage alumine + attaque nital (0,5 %, 30<sup>s</sup>) (vue au M. E. B.)

Pour une largeur d'environ 300 µm, la teneur en nickel est de 30-31 % au cœur de la bande. Elle descend jusqu'à 13 % au cœur d'une bande de 500 µm de large.

Les examens au MEB, les figures d'attaque nitrrique et les analyses à la microsonde électronique montrent que ces taénites zonées ont des cœurs de plessite, de microplessite et dans un cas, une zone nuageuse (« cloudy taénite » : Scott, 1973).

La microdureté Vickers, assez élevée ( $\approx 350$ ), des franges de taénite appelle la même remarque concernant la recristallisation après choc que pour la kamacite.

Les valeurs des réflectances et leurs courbes de dispersion spectrale sont présentées dans le tableau I et la figure 2.

## 2. Cohénite.

La cohénite  $(\text{Fe, Ni})_3\text{C}$  se présente en larges plages de dimensions millimétriques. Au microscope polarisant en lumière réfléchie, elles apparaissent sous trois aspects :

a) de grandes masses finement cristallisées en mosaïques, aux individus de 20 à 25 µm (fig. 10) ;

b) des monocristaux traversés par des veinules de cristallites secondaires de même nature, situées le long de fissures cicatrisées (fig. 7 a) ;

c) des éléments de 300 à 800 µm formés de mâcles polysynthétiques antiparallèles (fig. 7 b) comparables aux « bitter-lamellae » décrites par Heide (1966) et qui témoignent, de même que les cristallites, d'un effet de choc suivi d'une recristallisation partielle (Lipschutz, 1967).

Les analyses chimiques à la microsonde ont fourni pour valeurs moyennes :

Fe : 91 %  
Ni : 1,8 %  
Co : 0,2 %  
C : 6,0-6,5 %

Les réflectances  $R_p$  et  $R_s$  de ce minéral orthorhombique ont été mesurées sur un élément de mâcle ultérieurement analysé à la microsonde électronique (Ni = 1,8 %). Un cristal de cohénite provenant d'un gisement terrestre (Ovifak, Groenland) contenant 0,95 % de nickel a été également mesuré au microréfectomètre. Les résultats sont présentés dans le tableau I.

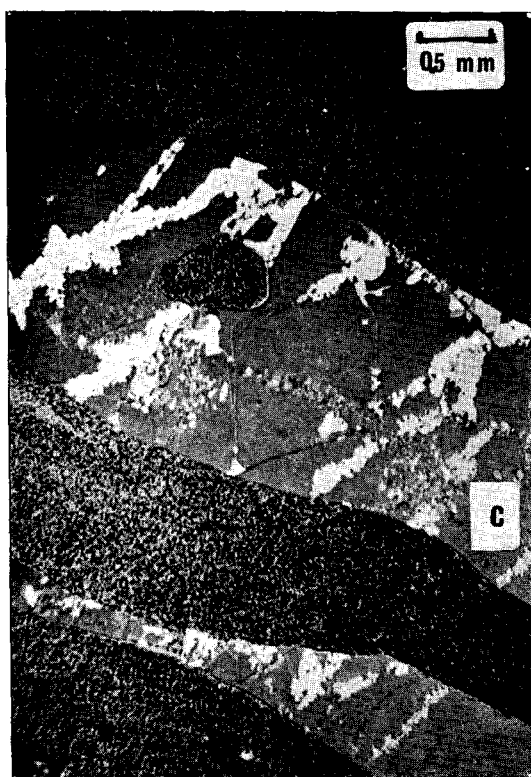
La comparaison des courbes de dispersion des  $R_p$  et  $R_s$  de la cohénite météoritique et de la cohénite terrestre montre que la réflectance varie dans le même sens que la teneur en nickel (fig. 8).

Les propriétés optiques de ce minéral constituent des données nouvelles.

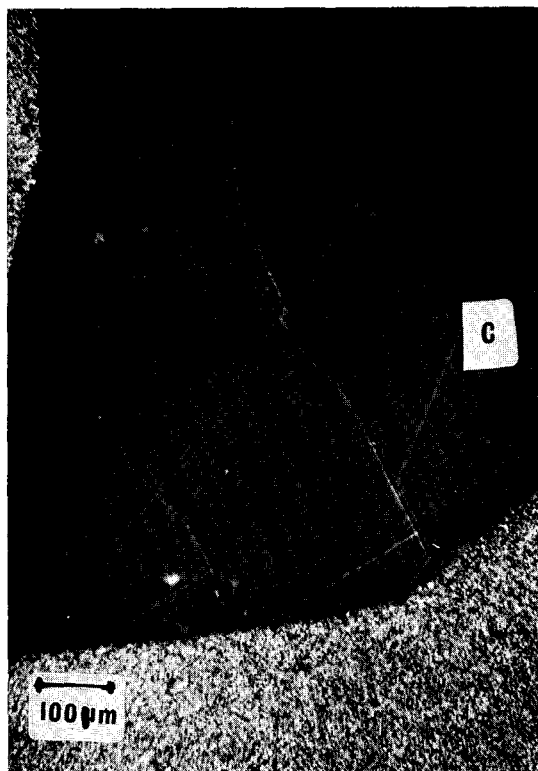
TABLEAU II.

Diagramme de poudre de la cémentite ( $\text{Fe}_3\text{C}$ , Lipson *et al.*, 1940) et de la cohénite  $(\text{Fe, Ni})_3\text{C}$ , de Morasko.

$h k l$	$\text{Fe}_3\text{C}$	$(\text{Fe, Ni})_3\text{C}$
0 2 0	2,54	2,54
1 1 2)	2,38	2,38
0 2 1)	2,26	2,26
2 0 0	2,20	2,22
1 2 0	2,10	2,10
1 2 1	2,06	2,07
2 1 0	2,02	2,03
0 2 2	2,01	2,01
1 0 3	1,97	1,976
2 1 1	1,87	1,872
1 1 3)	1,85	1,852
2 0 2)	1,76	1,76
1 2 2	1,68	1,682
2 1 2		
0 0 4)		
0 2 3)		



a



b

FIG. 7. — a) cohénite recristallisée le long des fissures ;  
b) cohénite mâclée.

Microscope pol. lumière réfléchie, polariseurs croisés.

Dans l'étude aux rayons X, il n'a pas été possible de trouver un éclat monocristallin assez grand pour un diagramme de Weissenberg. Seuls des clichés de poudre (chambre Seeman Bohlin, Ø 360 mm ;  $K\alpha$  du fer, étalon interne Si) ont pu

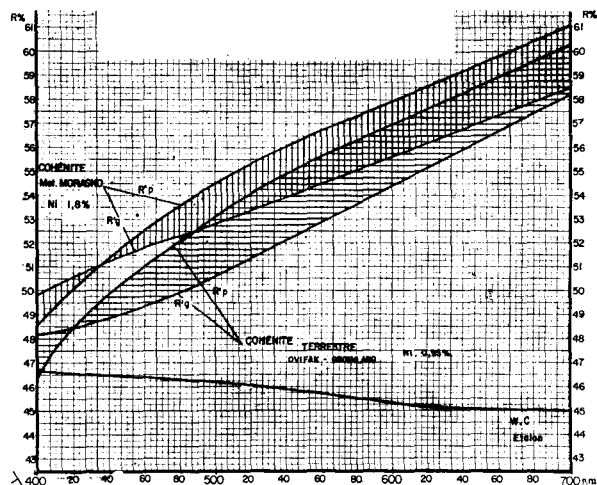


FIG. 8. — Comparaison des courbes de dispersion des réflectances principales de deux cohénites différentes.

être réalisés. Le dépouillement de ce diagramme de poudre est reproduit dans le tableau II. A titre de comparaison, y figure également celui de la cémentite,  $Fe_3C$ , établi par Lipson et Petch (1940).

La substitution très partielle de Fe par 1,8 % de nickel n'a pas provoqué de changement notable dans les valeurs de  $d_{hkl}$ .

### 3. Contact cohénite-kamacite (CK).

Une plage légèrement anisotrope, se présentant sous forme d'une frange de 30 à 40  $\mu m$  de large sise en bordure d'un contact cohénite-kamacite, a également été repérée, en deux exemplaires (fig. 9). Sa dureté, mesurée au microdurimètre, est inférieure à celle de la cohénite mais très supérieure à celle de la kamacite.

Sa réflectance a été mesurée pour les deux directions des vibrations principales (tableau I, figure 2). Sa biréflexance, de l'ordre de 0,5 %, est trop faible pour être significative, car elle peut être due à un effet de relief laissé par le polissage sur une bande de 30  $\mu m$  de large. L'analyse chimique a donné :

Fe :	90,5 %
Ni :	4,5-5,2 %
Co :	0,4 %
C :	4-5 %

La teneur en carbone de cette bordure est inférieure d'environ 2 % à celle de la cohénite et sa teneur en nickel supérieure de 3 %.

L'origine de cette plage minérale, appelée contact CK dans ce travail, peut se trouver dans une décomposition partielle de la cohénite à haute température

( $\sim 900^\circ\text{C}$ ) au moment de l'impact de la météorite sur le sol terrestre, décomposition qui aurait provoqué une diffusion du carbone dans la kamacite (Buchwald, 1974, com. pers.).

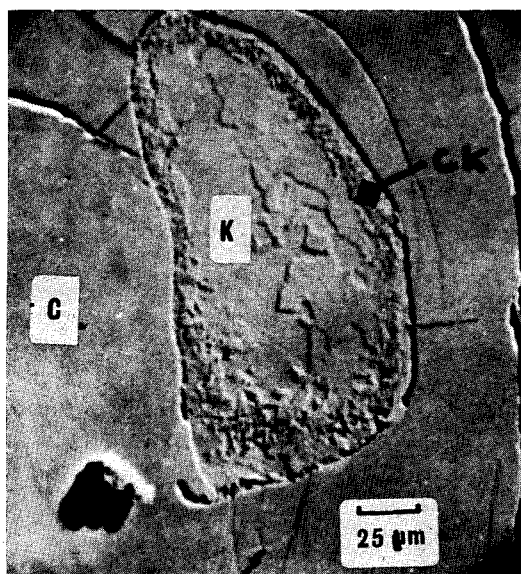


FIG. 9. — Inclusion de kamacite au contact de la cohénite.  
C = cohénite ; K = kamacite ; CK = bordure carbonée.  
(Microscope polarisant, lum. réfléchie.)

#### 4. Schreibersite.

Ce minéral  $(\text{Fe, Ni})_3\text{P}$ , quadratique, se présente, dans le fragment n° 13 de la météorite de Morasko, sous trois aspects :

- grandes masses de plusieurs mm<sup>2</sup>, à texture de fragmentation recristallisée ;
- veinules sinueuses de 300-400  $\mu\text{m}$  de long sur 15-20  $\mu\text{m}$  de large ;
- quelques rares monocristaux intacts.

La schreibersite est presque toujours étroitement liée à la cohénite (fig. 10). La rhabdite n'a pas été vue dans les sections polies étudiées. Des analyses à la microsonde ont donné, pour différentes plages, des compositions variant peu :

Fe	: 45,7-45,9 %
Ni	: 40,3-40,0 %
Co	: 0,1 %
P	: 14,5-14,8 %

Il s'agit donc d'une schreibersite riche en nickel. L'un des monocristaux, présentant une section basale isotrope, a permis de mesurer la réflectance  $R_0$  relative à la vibration ordinaire. La figure 2 présente la courbe de dispersion de  $R_0$  ainsi que la courbe de dispersion  $R'_0$  de la réflectance maximale trouvée dans les schreibersites de cette météorite. Les valeurs, constituant pour ce minéral des données nouvelles, ont été reportées dans le tableau I.

Un monocristal a été extrait de la section polie pour effectuer des diagrammes de cristal tournant

et de Weissenberg. Ils confirment l'appartenance du minéral au groupe I  $\bar{4}$ .

Le dépouillement de ces diagrammes a fourni les valeurs des paramètres :

$$a = 9,09 \text{ \AA} \text{ et } b = 4,45 \text{ \AA}$$

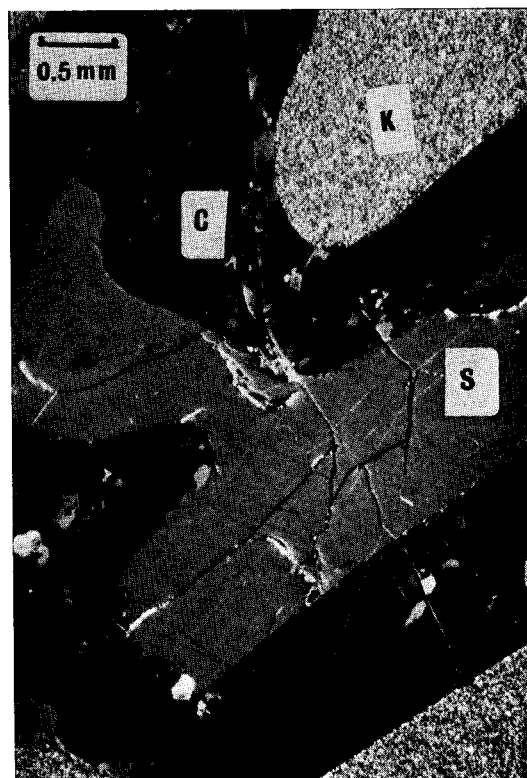


FIG. 10. — C = cohénite recristallisée ;  
S = schreibersite ; K = kamacite.  
(Microscope pol., lum. réfléchie, polariseurs croisés.)

Ces résultats sont à rapprocher des données rassemblées par Buchwald (1966) concernant d'autres termes de la série des phosphures  $(\text{Fe, Ni})_3\text{P}$  présents dans différentes météorites métalliques.

#### CONCLUSION.

Cette étude des propriétés optiques, radiocristallographiques et chimiques des minéraux constituant le fragment n° 13 de la météorite métallique de Morasko ne permet pas de tirer des conclusions définitives sur son histoire cosmique. V. F. Buchwald, dans une communication personnelle, classe ce fer météorique parmi les octaédrites à gros grains du groupe I (Wasson *et al.*, 1967 ; Wasson, 1969) et la juge tout à fait comparable à la météorite de Canyon Diablo (Buchwald, 1971 ; SCOTT, 1971).

La présence, dans la météorite de Morasko, de grandes plages monocristallines de cohénite et de schreibersite a permis de compléter leurs données radiocristallographiques, et de mesurer, pour la

première fois à notre connaissance, leurs propriétés optiques en lumière réfléchie. Les résultats de ces mesures constituent des données nouvelles pour ces deux minéraux qu'il est rare de trouver en cristaux aussi gros dans du matériel terrestre.

D'une manière générale, la mesure systématique des réflectances des différents minéraux (sulfures de fer, ferro-nickel, carbure et phosphure de fer, etc...) constituant les météorites métalliques devrait per-

mettre une meilleure approche de leurs caractères et donc faciliter leur classification.

#### REMERCIEMENTS.

Les auteurs remercient vivement M. V. F. Buchwald qui a bien voulu relire le manuscrit de ce travail et y apporter des critiques constructives.

*Manuscrit reçu le 17 décembre 1973.  
Accepté pour publication le 29 janvier 1974.*

#### BIBLIOGRAPHIE

- BUCHWALD, V. F. (1966). — *Acta. polytechn. Scandinavica*, 51, 46 p.
- BUCHWALD, V. F. (1967). — *Analecta geologica*, 2, 75 p.
- BUCHWALD, V. F. (1971). — *Chem. d. Erde, Dtsch.*, 30, p. 53-57.
- CERVELLE, B. (1971). — Thèse d'État, Paris, et *Bull. B. R. G. M., Section II*, 5, 9-34.
- HEIDE, F. (1966). — *Naturwissenschaften Dtsch.*, 53, 499-500.
- HEYMANN, D., LIPSCHUTZ, M. E., NIELSON, B. et ANDERS, E. (1966). — *J. geophys. Res. U. S. A.*, 71, p. 619-641.
- LIPSCHUTZ, M. E. (1967). — *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 31, p. 621.
- LIPSON, H. et PETCH, N. J. (1940). — *J. Iron Steel Inst. G. B.*, 142, p. 95.
- LÓPEZ-SOLER, A. et BOSCH-FIGUEROA, J. M. (1971). — *Acta geol. Hisp.*, VI, p. 74-77.
- POKRZYWNICKY, J. (1964). — *Stud. geol. polon.*, XV.
- RUNDQUIST, D. V. et LARSSON, H. K. (1959). — *Acta. chem. Scandinavica*, 13, p. 551.
- SCOTT, E. R. D. (1971). — *Nature (Phy. Sci.)*, 229, p. 61-62.
- SCOTT, E. R. D. (1973). — *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 37, p. 83-94.
- WASSON, J. T. (1969). — *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 33, p. 859-876.
- WASSON, J. T. et KIMBERLIN, J. (1967). — *Geochim. Cosmochim. Acta.*, 31, p. 2065-2093.