

Sur le Mode de Formation

DES

MÉTÉORITES PIERREUSES

(CHONDRITES)

PAR

A.-F. RENARD

Membre de l'Académie des Sciences.

(Extrait du n° 11 [1900] du *Bulletin de la Société belge d'astronomie.*)

BRUXELLES

Société Belge d'Astronomie

1900

SUR LE MODE DE FORMATION DES MÉTÉORITES PIERREUSES (CHONDRITES)

Dans la notice relative à la météorite tombée à Lesves le 21 avril 1896, j'exprimais l'opinion que cet aérolithe devait sa structure à des phénomènes cataclastiques (1). Depuis la publication de cette description sommaire de la météorite dont il s'agit, j'ai poursuivi mes recherches et je crois pouvoir appliquer cette manière de voir à la plus grande partie des météorites chondritiques ; je suis conduit ainsi à rejeter l'origine polygène qu'on avait attribuée à la généralité des chondrites. Le titre de cette communication et ce qu'on vient de dire indiquent nettement le point de vue auquel je me place pour expliquer la nature et le mode de formation de ces météorites, à la fois les plus fréquentes et les plus problématiques.

On sait que, pour rendre compte de diverses particularités de leur structure, on a généralement invoqué pour les chondrites une origine pyroclastique : elles se seraient formées par l'agglomération de particules volcaniques, comme nous voyons se former les tufs. Je propose d'expliquer les particularités de leur structure en admettant que ces aérolithes ont été soumis à des actions de métamorphisme dynamique pendant qu'ils faisaient encore partie du corps cosmique, dont ils sont des fragments. Ces météorites ne seraient donc pas toutes constituées par des substances projetées à la manière des produits subaériens de nos volcans terrestres, des cendres et des tufs plus ou moins consolidés ; mais un grand nombre de chondrites seraient des éclats de roches cristallines dont la structure a été modifiée par cataclase.

(1) *Bulletin de l'Académie royale de Belgique*, t. XXXI, p. 654.

Cette application du métamorphisme mécanique à l'étude de ces corps cosmiques permet d'établir une analogie de plus entre les météorites et les roches terrestres. Je ne vais pas jusqu'à nier l'existence de roches tufacées dans la série des météorites chondritiques étudiées jusqu'ici. Il est certain qu'elles *peuvent* être pyroclastiques, effusives, intrusives ou intra-telluriques; mais je crois pouvoir montrer qu'un grand nombre de ces météorites envisagées comme étant de nature tufacée ne sont pas pyroclastiques, et qu'en tout état de cause, le métamorphisme dynamique a laissé sur presque chacune d'elles son empreinte. En tenant compte de cette action modificatrice, on interprète facilement des faits restés obscurs jusqu'ici, on écarte des causes d'erreurs et les divergences d'opinion qui se sont produites au sujet de ces roches et on généralise en l'étendant aux corps cosmiques un ordre de faits reconnus jusqu'ici aux seules roches terrestres.

Dans ce résumé sommaire je ne puis indiquer tous les arguments invoqués en faveur de l'origine polygène des chondrites : je renvoie à l'ouvrage de Tschermak, *Die mikroskopische Beschaffenheit der Meteoriten*, 1885, où l'on trouve exposées toutes les raisons qui paraissent militer en faveur de cette théorie. Dans les pages qui servent d'introduction à cette collection unique de photographies de météorites, on trouvera les faits qui conduisent à admettre que les chondres sont des gouttelettes de matière lavique projetée, que la pâte ou masse fondamentale des chondrites est de nature tufacée, etc. C'est l'hypothèse d'une formation volcanique dans le sens strict du terme que Tschermak adopte; pour lui, les chondrites sont des produits volcaniques consolidés à la manière des tufs. D'autres, Kenn-gott Wadsworth, Brezina, Foullon, etc., n'ont pas admis cette interprétation; pour eux, les éléments des chondrites ont cristallisé *in situ* et ne portent pas de trace de clasticité. Comme ces savants, je crois que les chondres sont formés en place, de même que la masse fondamentale; mais je suis porté à penser qu'on a laissé jusqu'ici dans l'ombre un caractère saillant : c'est que ces aérolithes montrent qu'ils ont été soumis à des phénomènes de pression intense qui peut avoir été poussée jusqu'à la pulvérisation intime des minéraux constitutifs. Ce trait de la structure, une fois nettement reconnu, permet d'interpréter, mieux qu'on ne l'a fait, l'origine de ces roches cosmiques. Si, à ma connaissance, on n'a pas encore tenté d'aborder ce problème en faisant entrer en ligne de compte le métamorphisme dynamique, c'est

peut-être parce que cette théorie assez récente n'était pas admise dans la science au moment où furent publiés les mémoires des savants qui viennent d'être cités. J'admets toutes les raisons sur lesquelles s'appuyent ceux qui acceptent la formation *in situ* des éléments minéralogiques des chondrites, et j'insiste sur les faits suivants qui plaident en faveur de cette interprétation : les chondres ne sont jamais des fragments arrondis de roches ; ce sont des minéraux de même nature que la masse fondamentale ; toutes les espèces qui constituent les météorites dont il s'agit, sauf peut-être la troïlite, ont une tendance à cristalliser en affectant des formes plus ou moins sphériques ; dans les phénocristes et dans la masse fondamentale on ne voit rien qui rappelle nettement les particules volcaniques projetées à l'état meuble lors des éruptions : on n'y trouve pas, notamment, de lapilli, de fragments vitreux avec leur cassure et leur forme spéciale, de cendres, de cristaux revêtus de matière vitreuse ; on n'y constate ni la structure bulleuse ni celle dite ponceuse. Le verre qu'on y observe est, ou bien un produit de fusion de la croûte, ou bien il est interstitiel ; jamais il n'est fragmentaire. Sans s'appesantir sur ces particularités et sans détailler toutes les différences que présentent les produits volcaniques incohérents et les météorites dont on les a rapprochés, je conclus en disant que les chondrites sont, pour la majorité des cas, de nature cristalline ; ce sont des roches massives. Mais comment interpréter l'aspect clastique qu'ils présentent presque tous et qui doit avoir fait naître l'opinion que les pierres sont polygènes ? Il suffit d'un coup d'œil sur les remarquables photographies micrographiques de l'atlas de Tschermak pour se convaincre du caractère clastique des chondrites ; mais on constate bientôt que les fractures qui sillonnent les phénocristes ne sont pas dues au transport : les fissures très fines et les crevasses plus larges qui les traversent ont été incontestablement provoquées par des actions qui se sont produites lorsque les éléments minéralogiques constituant ces roches étaient déjà réunis dans la roche. C'est ce qui découle à l'évidence du fait qu'un grand nombre de cristaux brisés montrent presque juxtaposés leurs fragments détachés ; ces pièces de rapport prouvent, par leur position relative, que nous n'avons affaire ici qu'à des phénomènes de dislocation et qu'il est impossible de faire intervenir la trituration et le transport. (Voir en particulier les fig. I, 3 ; II, 2, 3, 4 ; III, 4 ; IV, 4 ; VI, 2, 4, etc., de l'atlas de Tschermak). Je rappelle, en outre, que j'ai constaté dans la météorite de Lesves des extinctions roulantes et la *structure en mor-*

tiers; autour d'une grande section cristalline d'aspect ruiniforme, à bords fissurés, gisent des fragments détachés réduits en poussière et qui forment comme le ciment des grains de la plus grande dimension. Ces détails micrographiques sont incontestablement ceux qu'on constate dans les cas de métamorphisme mécanique provoqué dans les roches terrestres sous l'influence des mouvements orogéniques. Les roches péridotiques terrestres, celles qui se rapprochent le plus des corps cosmiques dont il s'agit et qui ont été soumises à cette action modificatrice, nous montrent des faits analogues. J'interprète de la même manière la structure des chondrites et l'aspect tufacé de leur masse fondamentale. Ces météorites étaient à l'origine holocristallines, très probablement des roches profondes ou intrusives, qui, broyées sous l'influence des actions dynamiques, ont été modifiées au point de présenter une pseudo-masse fondamentale d'où se détachent les restes des grains cristallins primitifs. Ceux-ci n'ont pas été entièrement pulvérisés, l'effort mécanique se traduit pourtant par les fissures qui les traversent et les dislocations qu'ils ont éprouvées. Lorsque ces phénomènes se produisent dans les roches terrestres, ils sont généralement accompagnés ou suivis d'actions chimiques qui restituent à la masse broyée une certaine continuité. Si les météorites pierreuses n'ont pas subi cette récimentation; si les particules constitutives sont en quelque sorte restées incohérentes, au point qu'on a pu prendre ces aérolithes pour des éclats d'une roche tufacée, c'est que l'eau, ce véhicule de presque toutes les réactions minérales, manquait dans ces masses et que les actions oxydantes y étaient réduites au minimum.

Il est presque inutile de rappeler qu'on peut rencontrer des chondrites qui sont de nature tufacée et que depuis longtemps on a trouvé des météorites bréchiformes. Mon but n'a pas été d'infirmier ni de confirmer ces faits; il s'est proposé d'interpréter la structure pseudoclastique que beaucoup d'entre elles présentent, comme ayant été provoquée par le métamorphisme dynamique, appliquant ainsi à ces corps cosmiques le même mode d'interprétation qui a permis de dévoiler l'origine d'un grand nombre de roches terrestres, envisagée jusqu'ici comme indéchiffrable.

J'ai voulu contrôler par l'expérience les observations sur la cataclase des météorites pierreuses, et réaliser dans le laboratoire des phénomènes analogues à ceux que la pression a produits dans ces roches cosmiques. Ce qui m'engageait surtout à tenter ces essais, c'est que les phénomènes à reproduire se présentaient comme relativement

simples, plus simples en tout cas que ceux provoqués dans les roches terrestres par les mouvements orogéniques. On sait, en effet, que trois facteurs entrent en jeu dans les phénomènes du métamorphisme dynamique auxquels sont soumises les roches profondes : une pression énergétique s'exerçant dans tous les sens, analogue donc à une pression hydrostatique, une température élevée et enfin l'action des eaux circulant dans ces roches. Or, comme nous l'avons dit à l'instant, on déduit des faits observés par l'examen lithologique des météorites, que nous pouvons faire abstraction des deux derniers facteurs : les minéraux même les plus hydratables qui constituent ces corps cosmiques, ne portent jamais la trace de l'action de l'eau, rien n'indique que les phénomènes de pression aient été accompagnés pour les météorites d'une élévation notable de température. Nous n'avons donc, pour reproduire la cataclase des météorites, qu'à mettre en jeu une pression énergétique, autant que possible analogue à la pression hydrostatique. Pour réaliser ces expériences, j'ai eu recours au bienveillant concours de M. le Dr Stöber, qui s'occupe en ce moment d'études relatives aux phénomènes produits par la pression dans les corps cristallisés. A cet effet, il a fait construire sur ses données, par la firme Kärger, de Berlin, une puissante presse en acier spécialement destinée à ces recherches, et qui se prête parfaitement aux expériences que j'avais en vue. Sans entrer dans la description de l'appareil à compression que M. Stöber donnera lorsqu'il publiera les résultats de ses études personnelles, je me borne à constater que cette presse, à l'aide de laquelle on peut atteindre 5 à 6,000 atmosphères, est, à mon avis, appelée à rendre de grands services dans les laboratoires géologiques.

J'ai choisi pour la soumettre à l'expérience une roche remarquablement cristalline que j'avais recueillie comme échantillon isolé près d'un gîte de kaolin, à Matagne-la-Petite (1).

(1) Je suis porté à assimiler ce grès aux blocs épars à la surface du sol, qu'on rencontre en particulier aux environs de Dourbes et de Fagnolle, et dont M. Bayet s'est occupé dans sa *Première note sur quelques dépôts tertiaires de l'Entre-Sambre-et-Meuse* (BULLETIN DE LA SOCIÉTÉ BELGE DE GÉOLOGIE, DE PALÉONTOLOGIE ET D'HYDROLOGIE, t. X, 1896, p. 135). Je tiens à remercier ce savant pour les indications qu'il m'a obligeamment données sur la roche dont il s'agit. Je crois pouvoir admettre qu'à l'origine elle était probablement une masse sableuse dont les grains irréguliers amoncelés auront été cimentés par des infiltrations de matière siliceuse, qui s'orientait sur les grains primitifs, de manière à reconstituer la forme cristalline et à donner

Cette roche est en grès blanc ressemblant comme aspect à un calcaire saccharoïde à grains fins ; cependant les grains constitutifs n'ont pas une structure microgranitoïde ; chacun d'eux est un cristal irrégulièrement terminé à vrai dire, mais montrant des faces de prisme et, plus vaguement, celles de la pyramide. On constate, en outre, que tous ces cristaux ébauchés ont une orientation plus ou moins parallèle, comme on peut le voir dans le photogramme 3, qui représente, en lumière polarisée, une section mince du grès, tel qu'il se montre avant d'avoir été soumis à la pression. Cependant, cette orientation n'a pas une constance absolue, ainsi qu'on l'observe dans le même photogramme, où des cristaux plus ou moins perpendiculaires aux premiers sont représentés par de petites plages presque circulaires ou même vaguement hexagonales, au lieu de se montrer en lamelles allongées éteignant en long. Telle est la transparence des lames minces de cette roche composée presque exclusivement de quartz hyalin et de quelques rares granules de glauconie ; telle est la limpidité de ces cristaux incolores juxtaposés, qu'il devient assez difficile de les distinguer les uns des autres lorsqu'on les observe en lumière ordinaire ; pour se rendre compte de la structure et de la nature minéralogique, il faut recourir à l'emploi de la lumière polarisée, comme il a été fait pour le photogramme 3. J'aurais pu opérer sur une autre roche, mais j'en aurais difficilement rencontré qui fût plus propre à révéler les modifications qui allaient se produire dans la structure pendant l'expérience. Un fragment de ce grès d'environ 10 millimètres de base sur 20 de hauteur fut enveloppé entièrement dans un cylindre d'alliage de Rose, de 15 millimètres de diamètre sur 55 de haut. La pierre ainsi recouverte par l'alliage fut introduite dans l'orifice cylindrique de l'appareil et soumise pendant trois heures environ à une pression qu'on peut évaluer à 5,000 atmosphères. Sous cette pression, l'alliage se comportant comme un liquide, on peut dire qu'on s'approche sensiblement des conditions de la pression hydrostatique. Lorsque après l'expérience on dégage le fragment de grès de son enveloppe métallique, sa forme n'est nullement modifiée ; son aspect externe est resté absolument le même ;

à l'ensemble l'aspect remarquablement cristallin de cette roche. Je n'insiste pas davantage sur l'origine et l'âge de ce grès, n'ayant pas d'opinion définitive à cet égard, et cette question n'ayant pas de rapport direct avec celle que je traite dans cette notice ; mais je signale en passant le grand intérêt que présente l'étude de ces fragments de grès cristallisé.

la roche n'est pas sensiblement plus friable, seulement on observe une tendance à un feuilletage grossier, normal à la direction de la pression exercée par la vis. Suivant ce plan, le fragment se brise avec plus ou moins de facilité en lames épaisses de 2 millimètres environ ; mais, sauf cette espèce de clivage presque latent, rien n'est modifié à l'aspect extérieur.

Il en est tout autrement de la structure interne (voir photogramme 4). Si l'on examine au microscope une lame taillée dans le fragment qui a été comprimé, on voit d'une manière frappante les effets de cette compression : plus une seule plage cristalline n'a conservé son intégrité ; jusqu'au cœur même du fragment, toutes se sont brisées et plus ou moins disloquées. En comparant les deux photogrammes 3 et 4, juxtaposés sur la planche, on voit le contraste le plus frappant : le premier est incontestablement celui d'une roche cristalline, le second est celui d'un grès clastique, et si l'on ignorait que celui-ci n'est autre chose que la première roche broyée par cataclase, on n'hésiterait pas à le prendre pour un amas de grains de sable irréguliers agglomérés comme ceux d'un grès sédimentaire.

Dans cette expérience, on a donc produit artificiellement la structure cataclastique au degré où elle se montre dans les météorites, et l'on peut conclure de ce que nous observons dans ce grès que c'est à la même cause qu'est dû l'aspect clastique des météorites pierreuses. Pour celles-ci comme pour la roche arénacée, il y a des analogies incontestables de structure ; dans les deux cas, on constate le broyage de tous les cristaux sur place, leurs tronçons gisent les uns près des autres avec légers déplacements, s'emboîtant presque comme des pièces de rapport, et ces phénomènes de pression ont à eux seuls suffi à voiler la structure primitive. On a donc reproduit par ces expériences des faits analogues à ceux constatés dans les chondrites, où ni la température ni l'hydratation n'ont joué un rôle important lors du métamorphisme, mais où la pression seule doit être entrée en jeu. Dans le grès toutefois, le broyage a déterminé la formation de grains d'une dimension un peu plus uniforme que dans les météorites ; la structure en mortier n'est pas aussi nettement indiquée peut-être mais il n'est pas difficile de trouver l'explication de ces différences, si l'on tient compte de la nature du minéral et de ses dimensions uniformes dans la roche sur laquelle a porté l'expérience ; si l'on tient compte, en outre, que les grains brisés n'ont pu subir de déplacements latéraux. Pour avoir des analogies beaucoup plus complètes

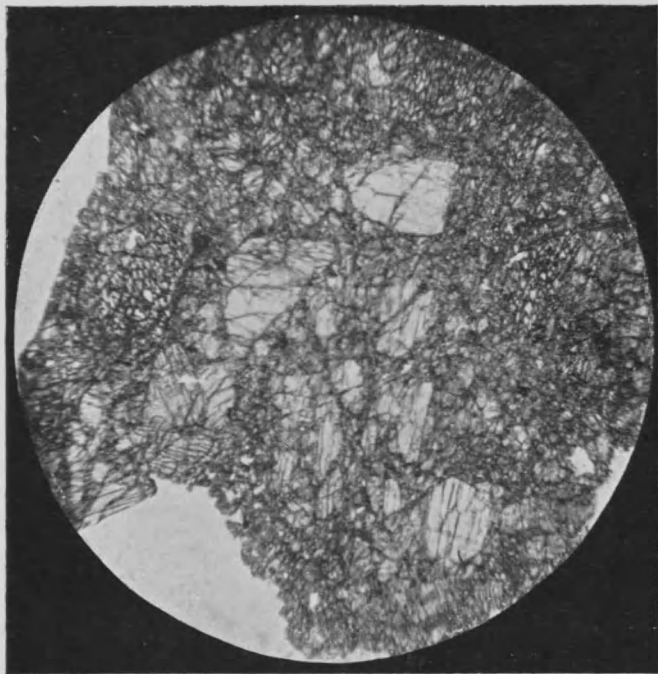
encore, pour reproduire en particulier l'aspect tufacé, il faudrait évidemment agir sur des roches silicatées de composition semblable à celle des météorites pierreuses, et de structure spéciale. C'est dans cette voie que M. Stöber et moi nous poursuivrons ces recherches. Nous nous attacherons aussi à prolonger la durée de l'expérience ; nous avons dû l'interrompre après trois heures, afin de ne pas déformer l'appareil. Il est très probable que si nous avions maintenu pendant plus longtemps sous pression les fragments de grès sur lesquels nous avons expérimenté, nous eussions provoqué des extinctions roulantes. Je ne voudrais pas affirmer que cette déformation optique ne se soit pas produite dans ces essais ; mais je n'ai pas pu la constater avec certitude, à cause des difficultés qui s'opposent à amener à une minceur suffisante ces grains brisés et simplement juxtaposés.

Quoi qu'il en soit de ces différences de détail, nous croyons avoir montré par l'expérience comment, sous l'influence de la pression, une roche cristalline peut se transformer en une masse d'aspect classique à laquelle on pourrait attribuer une origine sédimentaire. Sans nous arrêter à montrer ce que ces essais peuvent avoir d'intéressant pour l'étude des roches terrestres, bornons-nous à constater combien ils appuient l'interprétation que j'ai donnée de la structure des chondrites et des météorites pierreuses en général.

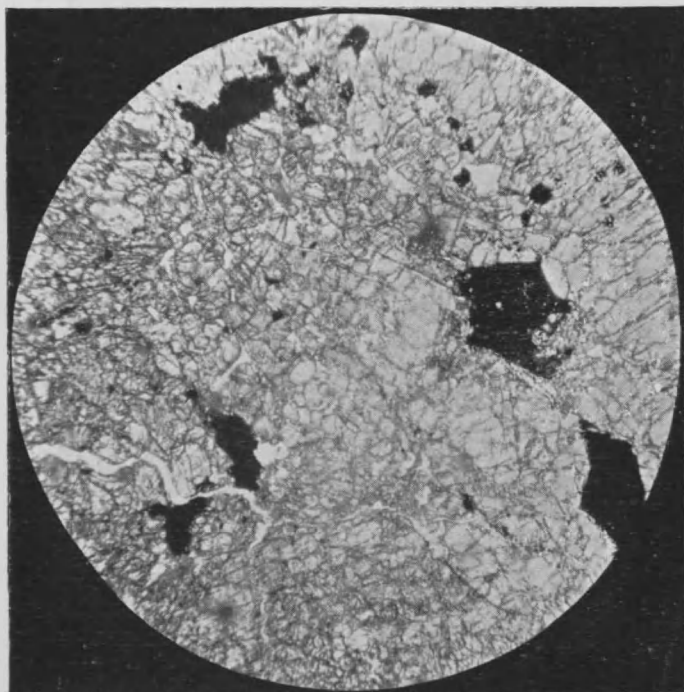
Personne plus que moi n'est convaincu des difficultés qui entourent le problème que j'ai tenté d'aborder, mais si le point de vue auquel je me suis placé est le vrai, on pourrait considérer la question encore pendante des conditions de formation des chondrites comme ayant fait un grand pas.

Il est presque inutile de rappeler qu'on peut rencontrer des météorites de ce type qui sont de nature tufacée, et que depuis longtemps on a trouvé des météorites bréchiformes ; mon but n'a pas été d'infirmer ou de confirmer ces faits ; j'ai voulu rattacher à sa cause la structure pseudoclastique, si je puis m'exprimer ainsi, qui a induit en erreur certains observateurs ; je me suis proposé d'interpréter cette structure comme étant provoquée par le métamorphisme dynamique, appliquant ainsi pour la première fois à la généralité de ces corps cosmiques un mode d'interprétation qui a permis de dévoiler l'origine d'un grand nombre de roches terrestres, envisagées jusqu'ici comme indéchiffrables.

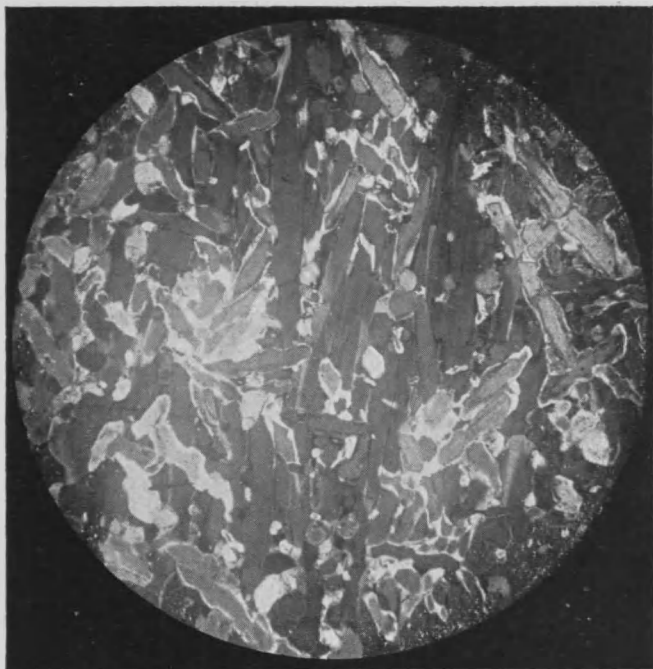
Outre l'intérêt qui s'attache aux faits que mettent en lumière les observations dont je viens de donner un exposé sommaire, il en est un



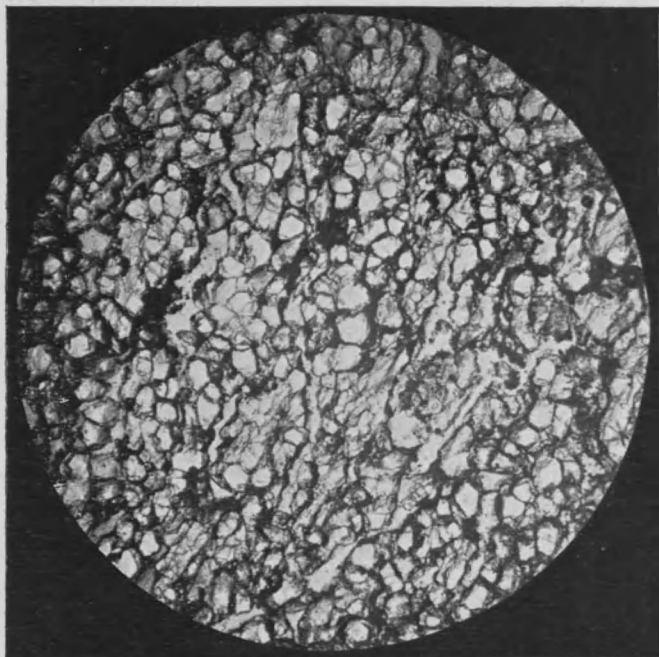
PHOTOGRAMME 1



PHOTOGRAMME 2



PHOTOGRAMME 3



PHOTOGRAMME 4

autre d'un ordre plus général et sur lequel j'insiste en terminant : c'est l'universalité du métamorphisme mécanique. Il convient de l'envisager comme un phénomène cosmique et l'on ne peut manquer d'être frappé, en voyant l'unité, déjà constatée sur tant de points entre les roches terrestres et les masses extra-terrestres, se confirmer encore au point de vue d'un mode de structure que les investigations les plus modernes, peut-on dire, ont révélé dans les masses rocheuses de notre planète.

EXPLICATION DES PHOTOGRAMMES

PHOT. 1. — Météorite d'Ibbenbühen. Structure en mortier entre les grands ragments de cristaux de bronzite. Ces fragments, au nombre d'une dizaine, constituent les débris disloqués en place d'un ou deux cristaux, ainsi qu'on peut le reconnaître par leur forme, leur aspect, leur disposition relative et leurs propriétés optiques communes. On observe des phénomènes analogues dans la photographie de la même météorite publiée dans l'Atlas de Tschermak, fig 3, pl. VI. Lum. ord., 20/1. Échantillon du Musée de Vienne. Nous avons reproduit cette photographie de la météorite d'Ibbenbühen, bien que celle-ci n'appartienne pas aux chondrites, pour montrer que la structure cataclastique n'est pas exclusivement propre aux météorites de ce dernier type.)

PHOT. 2. — Météorite de Lesves. Structure cataclastique tellement prononcée qu'on peut à peine reconnaître dans la microphotographie les formes primitives des plages cristallisées qui ont été broyées en place. Lum. ord., 58/1.

PHOT. 3. — Grès blanc cristallin recueilli à Matagne. Ce photogramme représente la roche avant d'être soumise à la pression. Les plages allongées plus ou moins parallèles, éteignant en long, sont des sections de quartz parallèles à l'axe *c*; d'autres sections arrondies, vaguement hexagonales, sont taillées plus ou moins normalement à cet axe; d'autres plages enfin ont une orientation irrégulière. On voit que tous les éléments de cette roche ont des formes cristallographiques assez nettement accusées. Lum. pol. Nic. à 45°, 17/1.

PHOT. 4. — Grès blanc cristallin de Matagne après avoir été soumis à la pression : toutes les sections cristallines sont brisées et disloquées; la roche apparaît comme si elle était formée d'une accumulation de grains de sable irrégulièrement agglomérés, comme ceux d'un grès sédimentaire. Lum. ord., 17/1.
