

Mesure de la microdureté Vickers des minéraux opaques et son intérêt en minéralogie,

par G. TOUBEAU,
Aspirant du F.N.R.S.

La dureté des minéraux opaques n'a jamais été déterminée avec une précision qui autorise le choix de cette propriété comme critère de détermination spécifique.

Divers essais de classification des minéraux opaques en fonction de leur dureté ont eu lieu cependant. MOHS [7] ⁽¹⁾ fournit des valeurs incohérentes excluant toute possibilité de classement valable. MURDOCH [5] groupe les minéraux en trois classes : duretés faible, moyenne et forte. En 1925, TALMAGE [10] met au point une méthode qui aboutit à ranger les minéraux dans sept classes; cette méthode présente deux inconvénients majeurs : elle ne permet pas la mesure sur des plages minérales de petites dimensions et, d'autre part, les mesures sont longues et délicates; de plus, elle ne fournit, comme toutes les autres méthodes, qu'une classification qualitative et ne donne aucune indication sur la dureté absolue des espèces minérales.

La mise au point du microduromètre a permis de remédier à ces inconvénients. Les premiers essais effectués à l'aide de cet appareil ont porté sur des minéraux transparents [4] [13]. En 1950, ROTH-MEYER [9] s'attache à déceler les variations de dureté et de forme des empreintes dues à l'anisotropie du cristal et à déterminer l'orientation des faces cristallines par les lignes de glissement qu'il fait apparaître. La technique n'est cependant applicable qu'aux monocristaux (Al, Pb, Cu, Zn, etc.).

Une première classification des minéraux opaques a été basée sur la microdureté Knoop définie par la relation empirique suivante :

$$H. K. \text{ (kg/mm}^2\text{)} \equiv \frac{14.230 \times t}{l^2}$$

relation dans laquelle « *t* » est la charge utilisée en grammes et « *l* » la longueur en microns de la plus grande des diagonales

(1) Les chiffres entre [] renvoient à la bibliographie *in fine*.

de l'empreinte produite par un diamant pyramidal à base rhombe. Cette classification est due à ROBERTSON et VAN METER [8]. Incomplète et imprécise, elle ne peut constituer un moyen efficace de détermination.

NAKHLA [6] publie en 1956 une note très intéressante sur la microdureté Vickers des minéraux opaques. On y trouve de nombreuses valeurs mesurées en corrélation avec la classification de TALMAGE. L'auteur souligne une relation apparente entre la microdureté du minéral et la charge P utilisée pour la production des empreintes. Il se livre encore à diverses considérations sur les relations qui semblent exister entre la microdureté et la texture des associations minérales.

Enfin, en 1958, BOWIE et TAYLOR [1] établissent une échelle des microduretés Vickers d'un emploi malaisé pour la détermination spécifique des minéraux opaques vu l'introduction dans cette échelle de valeurs moyennes.

Notre étude poursuit un double but. D'une part, établir une échelle précise des *valeurs cohérentes et spécifiques* des microduretés Vickers, échelle qui constitue un outil pratique de diagnose pour le minéralogiste. D'autre part, mettre en évidence le caractère *vectoriel* de cette propriété physique.

La présente note résume les travaux effectués en vue de réaliser ce double objectif.

PREMIÈRE PARTIE.

ÉTABLISSEMENT D'UNE ÉCHELLE DES MICRODURETÉS VICKERS.

1. Principe de la mesure.

Une surface polie du minéral à étudier, soigneusement dressée, est placée sur la platine à chariot du microduromètre. A l'aide d'un diamant pyramidal à base quadratique dont l'angle dièdre de deux faces vaut 136° , on produit une empreinte carrée dont on mesure optiquement la longueur des diagonales à l'aide d'un micromètre oculaire. Le microduromètre a été conçu de manière à ce que la profondeur de l'empreinte soit égale au septième de la longueur de la diagonale, moyennant l'emploi d'une charge P choisie en fonction du minéral à étudier.

Désignons par P grammes la charge appliquée et par d microns la moyenne des longueurs des deux diagonales (moyenne effec-

tuée pour tenir compte d'un éventuel défaut d'horizontalité du statif de l'appareil ou d'un dressage imparfait de la surface polie).

La microdureté Vickers est donnée empiriquement par la relation suivante :

$$H. V. (kg/mm^2) \equiv \frac{1854,4 \times P}{d^2}$$

2. Précision de la mesure.

a) Moyennant un centrage rigoureux de l'appareil, la sûreté d'impact du diamant pyramidal est de 2 à 3 microns.

b) L'évaluation de la longueur des diagonales se fait à l'aide d'un micromètre placé à la base de l'oculaire. Ce micromètre est divisé en intervalles de $0,5 \mu$ permettant d'évaluer le dixième de micron.

On admet que, pour les empreintes de petites dimensions (inférieures à 10μ), l'erreur maximum commise sur la mesure de d est de $\pm 0,2 \mu$, soit $\pm 2 \%$, ce qui entraîne sur la valeur de la microdureté une erreur de $\pm 4 \%$. Pour des empreintes supérieures à 25μ , l'erreur diminue et vaut au maximum ± 2 à 3% .

Il existe une relation entre le poids P utilisé pour la production de l'empreinte et la longueur de la diagonale, ce que NAKHLA indique clairement [6]; mais on ne peut se déclarer d'accord avec cet auteur lorsqu'il lie la valeur de la microdureté du minéral à celle de la charge utilisée sans apporter les correctifs nécessaires.

a) En effet, pour un même minéral, il n'est pas rare de trouver des valeurs variant du simple au triple suivant la valeur de la charge P utilisée.

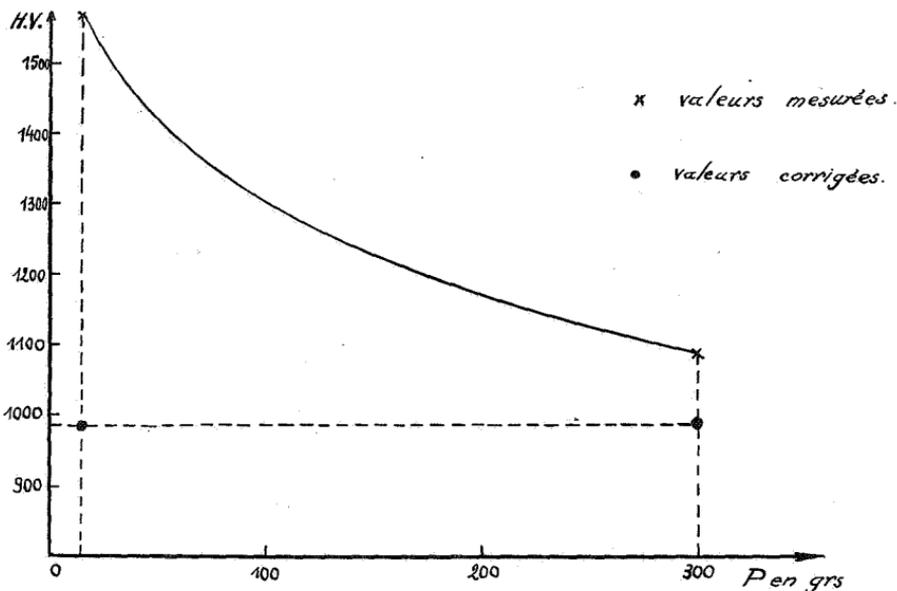
b) Ces différences s'expliquent aisément si l'on souligne le fait suivant. Lorsqu'on utilise des *poids faibles* pour produire l'empreinte dans des *minéraux durs*, la valeur obtenue pour la microdureté est en fait celle de la pellicule superficielle de la surface polie, microdureté qui diffère considérablement de la microdureté réelle du minéral car elle est fonction de l'état de la surface. D'autre part, la faible pénétration du diamant pyramidal ne permet pas de réaliser la condition fondamentale

pour obtenir des valeurs cohérentes de la microdureté, à savoir : *la profondeur de l'empreinte doit être au moins égale au septième de la longueur de la diagonale.*

Pour illustrer la différence fondamentale qui existe entre la microdureté superficielle et la microdureté interne d'un minéral, nous traiterons le cas des essais effectués sur la magnétite. L'application d'un poids de 15 gr a donné une microdureté Vickers de 1578 (soit $d = 4,2 \mu$) et celle d'une charge de 300 gr une microdureté de 1089 (soit $d = 22,6 \mu$). L'expérience a permis de montrer que, moyennant l'addition d'une longueur constante $c = 1,1 \mu$ aux valeurs mesurées des diagonales, les *valeurs corrigées* étaient les suivantes :

P en gr.	d en microns.	H.V. en kg/mm ² .
15	5,3	990
300	23,7	990

La figure ci-après résume les résultats de cette expérience.



c) En ce qui concerne les *minéraux tendres*, l'emploi de charges P trop élevées donne des empreintes de très médiocre qualité ne permettant pas d'évaluer avec précision la longueur des diagonales, ce qui entraîne des erreurs considérables sur les valeurs des microduretés.

Ainsi donc, la cohérence des valeurs de microdureté obtenues par l'emploi de charges faibles et fortes sera obtenue en éliminant les effets de surface, c'est-à-dire en ajoutant aux valeurs de d mesurées une longueur constante c qui sera déterminée expérimentalement pour chaque minéral étudié. Très généralement cependant, la détermination de c n'est pas nécessaire. Quelques essais préliminaires permettent de fixer rapidement la valeur de la charge P donnant pour le minéral étudié des valeurs cohérentes et spécifiques de la microdureté.

Nos essais ont conduit à adopter l'échelle des charges ci-après, échelle établie en corrélation avec les microduretés croissantes des minéraux opaques (voir tableau 1) :

- minéraux de la classe 1 : 15 et 25 gr;
- minéraux des classes 2 et 3 : 50 et 100 gr;
- minéraux des classes 4 et 5 : 100 et 200 gr;
- minéraux des classes 6 et 7 : 200 et 300 gr;
- minéraux de la classe 8 : 300 et 500 gr.

3. Résultats expérimentaux.

Nous avons résumé l'ensemble de nos résultats dans le tableau 1 et sous forme d'une échelle des microduretés Vickers des minéraux opaques. Nous avons rangé ces minéraux en huit classes :

- classe 1 : $0 < H.V. < 200$;
- classe 2 : $200 < H.V. < 400$;
- classe 3 : $400 < H.V. < 600$;
- classe 4 : $600 < H.V. < 800$;
- classe 5 : $800 < H.V. < 1000$;
- classe 6 : $1000 < H.V. < 1200$;
- classe 7 : $1200 < H.V. < 1400$;
- classe 8 : $H.V. > 1400$.

Afin d'obtenir une échelle aussi complète que possible, nous avons également introduit dans ce tableau les valeurs cohérentes de microduretés de certains minéraux opaques fournies par NAKHLA [6] et par BOWIE et TAYLOR [1].

L'examen de ce tableau conduit aux premières constatations suivantes :

a) Tous les oxydes, mis à part les oxydes de manganèse, la cuprite et l'hématite, ont une microdureté Vickers supérieure à 1000.

b) Dans certaines séries isomorphes, le remplacement de Sb par As entraîne toujours une augmentation de dureté. Il en est ainsi notamment pour les séries pyrargyrite-proustite et tetrahédrite-tennantite.

c) Parmi les éléments du groupe de transition, le cobalt donne des composés beaucoup plus durs que le fer et le nickel. Les microduretés des composés dans lesquels interviennent ces éléments de transition sont d'ailleurs extrêmement variables.

La microdureté élevée de la plupart des oxydes et de la pyrite s'explique vraisemblablement par le caractère ionique de la liaison atomique. Lorsqu'il s'agit de composés dans lesquels l'équilibre atomique est réalisé à l'intervention de liaisons métalliques et de liaisons homopolaires, la dureté, comme la plupart des propriétés physiques, dépendra de la plus ou moins grande déformabilité et de la polarisation dans l'édifice cristallin des atomes S ou de groupements tels que S_2 , Sb_2 , As_2 , AsS , SbS , etc.

d) Le tableau 2 compare les échelles de dureté et de microdureté obtenues à l'aide de différentes méthodes; les minéraux ont été classés par ordre de dureté croissante.

La corrélation avec les échelles de MOHS et de microduretés Knoop est pratiquement impossible. Par contre, on peut corréler comme suit les échelles de TALMAGE et des microduretés Vickers :

Échelle de TALMAGE.	Échelle des H.V.
Classes A-B-C.	Classe 1.
Classe D.	Classe 2.
Classe E.	Classes 3 et 4.
Classe F.	Classes 5 et 6.
Classe G.	Classes 7 et 8.

e) L'échelle des microduretés Vickers du tableau 2 montre que certains minéraux accusent de très grandes variations de microdureté. Ces variations sont de deux types nettement différents quant à leur origine.

— A certains minéraux, la structure confère une anisotropie très marquée quant aux propriétés physiques : conductibilité électrique, dureté, etc.

Exemples : Orpiment, molybdénite, stibine, covelline, enargite, mispickel, glaucodot.

— D'autres minéraux appartiennent à des séries isomorphes ou accusent un chimisme très variable; la composition chimique influence alors d'une manière directe la microdureté du minéral.

Exemples : Séries isomorphes : wolframites, columbo-tantalites.

Chimisme variable : Carrollite, skutterudite, smaltine, ilménite, chromites.

4. Intérêt de la méthode.

La mesure de la microdureté Vickers des minéraux opaques est aisée, rapide, précise et comme telle constitue un moyen de diagnose beaucoup plus souple que la méthode de TALMAGE. Elle se révèle particulièrement efficace lorsqu'on l'utilise en parallèle avec les méthodes optiques (microscopie en lumière réfléchie, figures de convergence) et les méthodes chimiques (analyses par voie sèche, microtests chimiques).

Elle permet la mesure sur des plages minérales de petites dimensions avec une sûreté d'impact de 1 à 2 microns pour la production des empreintes.

Elle facilite la détermination des minéraux opaques appartenant à une même famille. Nous noterons plus particulièrement les familles de la skutterudite, de la linnéite, des chromites, la série isomorphe tétrahédrite-tennantite, etc.

Le mesure de la microdureté Vickers peut fixer la teneur du minéral en certains éléments dans les séries isomorphes. Dans cet ordre d'idées, HENRIQUES [3] a montré que la microdureté de la blende ferrique était directement fonction de la teneur en fer de cette blende. D'intéressantes études pourraient être entreprises sur des séries isomorphes telles que pyrrargyrite-proustite, wolframites, columbo-tantalites, etc.

La sensibilité de la méthode permet même de préciser la nature des cations intervenant dans des minéraux de compo-

sition chimique voisine. A titre d'exemple, nous donnerons les valeurs obtenues en opérant sur divers types de loëllingite :

- Loëllingite nickellifère (Fe, Ni)As₂ ... H.V. = 680 à 700.
- Loëllingite FeAs₂ H.V. = 724 à 772.
- Loëllingite cobaltifère (Co, Fe)As₂ ... H.V. = 920 à 975.

Au point de vue industriel, la méthode rend également les plus grands services : détermination de la nature d'impuretés dans des verres, étude de concentrés obtenus par séparation magnétique, étude de l'influence de la vitesse de refroidissement sur la dureté d'un aggloméré de magnétite synthétique, etc.

DEUXIÈME PARTIE.

MISE EN ÉVIDENCE DU CARACTÈRE VECTORIEL DE LA MICRODURETÉ DES MINÉRAUX OPAQUES.

1. Principe de la méthode.

Moyennant certaines modifications techniques, le microduromètre permet encore la mise en évidence du caractère vectoriel de la microdureté Vickers des minéraux opaques.

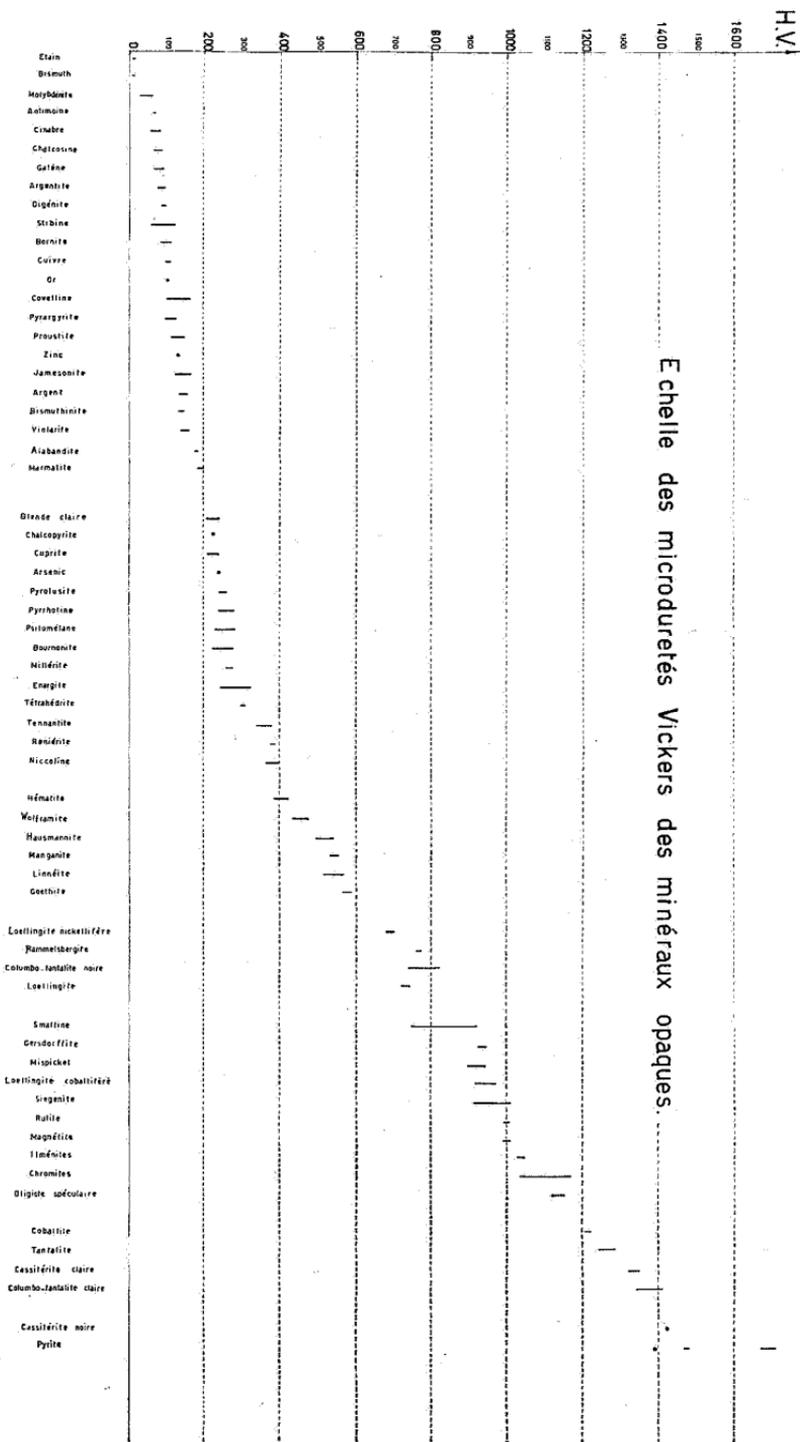
Dans ce but, une platine de microscope a été adaptée sur le chariot du microduromètre; l'axe de rotation de la platine est amené en coïncidence avec l'axe de l'appareil par rotation des broches micrométriques. Deux polaroïdes croisés, placés respectivement devant la source lumineuse et derrière l'oculaire du microduromètre transforment ce dernier en microscope polarisant.

Le mode opératoire est alors le suivant :

a) Choisir une plage aussi homogène que possible du minéral à étudier et en repérer les directions principales.

b) A partir de l'une de ces directions principales effectuer de 10° en 10° « l'essai à la rayure ».

c) Évaluer l'épaisseur de la rayure produite dans la direction envisagée. La précision de la mesure est du même ordre de grandeur que celle obtenue pour la mesure des longueurs des diagonales d'empreintes à section carrée.



d) Tracer la courbe $H.V. = f(\alpha)$, α étant l'angle que fait le polariseur avec l'une des directions principales de la surface polie. On obtient le même résultat en traçant la courbe $(25 - d) = f(\alpha)$, d étant la largeur de la rayure mesurée en microns.

2. Résultats expérimentaux.

A. — Minéraux isotropes. — En l'absence de clivages, la courbe obtenue est un cercle.

Si le minéral étudié possède des clivages, la courbe obtenue est un cercle avec des minima de dureté accusés suivant les directions de clivage. Nous avons ainsi mis en évidence :

- les deux clivages à 90° de la galène (fig. 1);
- les deux clivages à 120° de la blende (fig. 2).

B. — Minéraux anisotropes. — Si la surface polie est perpendiculaire à un axe optique du minéral, la courbe $H.V. = f(\alpha)$ est encore un cercle (fig. 3).

Les sections orientées différemment donneront des ellipses de microdureté (fig. 4) présentant d'éventuels minima suivant les directions de clivage (fig. 5).

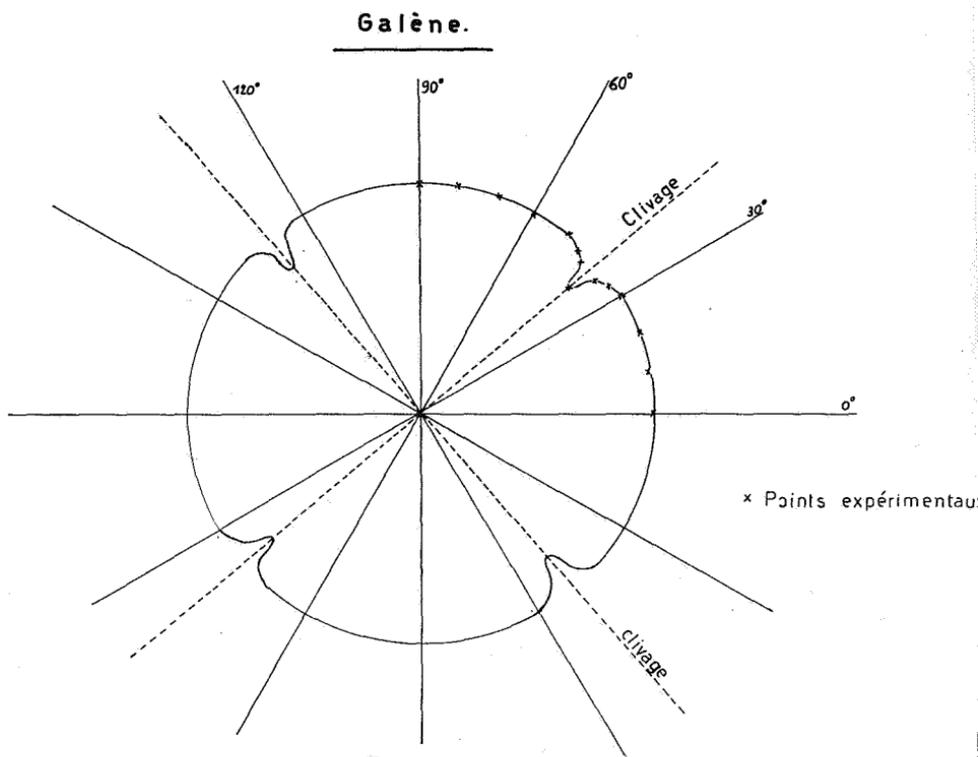
La courbe se rapprochera d'autant plus d'un cercle que l'anisotropie de la surface polie sera faible (fig. 6).

3. Intérêt de la méthode.

Cette nouvelle application de l'essai à la rayure est surtout intéressante en ce qu'elle permet de reconnaître la direction des clivages d'un minéral opaque même lorsque ces clivages ne sont pas apparents sur la surface polie. La mesure de l'angle de ces clivages est parfois utile pour la diagnose.

Si l'on dispose de surfaces polies taillées avec une orientation donnée, il est possible de mesurer les microduretés principales du minéral opaque. La chose est particulièrement aisée dans le cas des minéraux uniaxes.

Enfin, la méthode peut servir à détecter des anisotropies de texture nées d'un traitement mécanique ou d'un procédé de fabrication défectueux, dans des substances normalement isotropes (verres, acier, etc.).



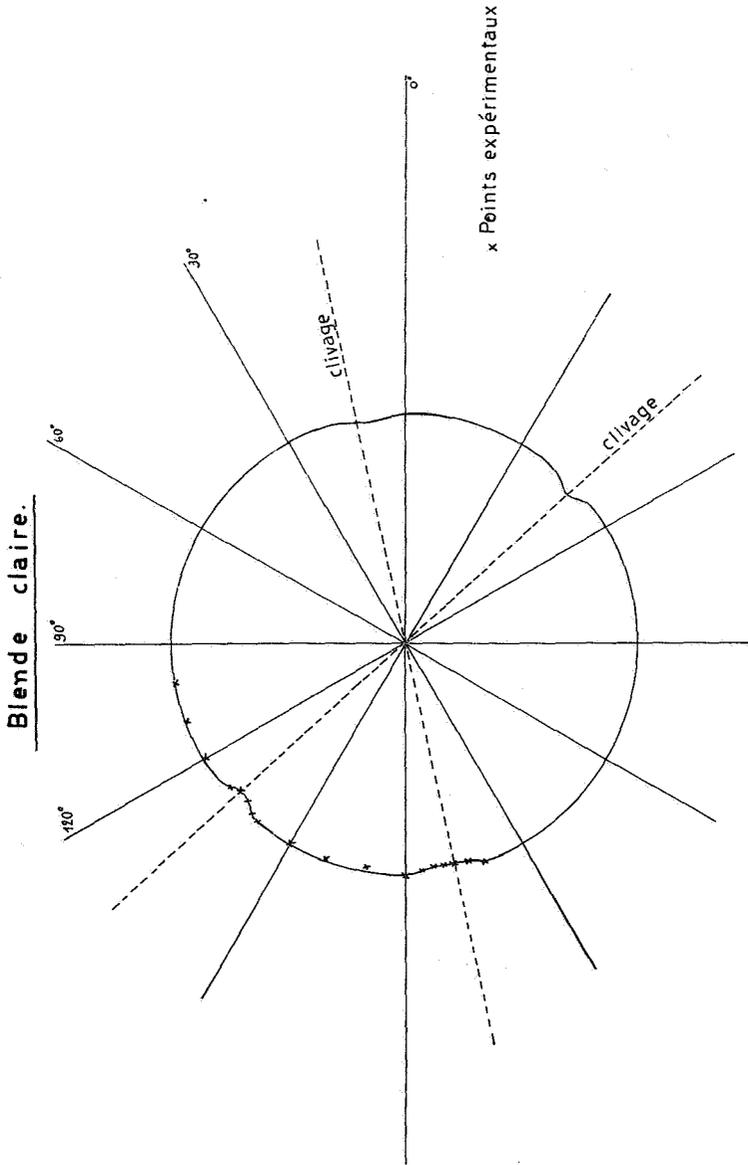


Figure 2.

Rutile, section \perp à l'axe optique.

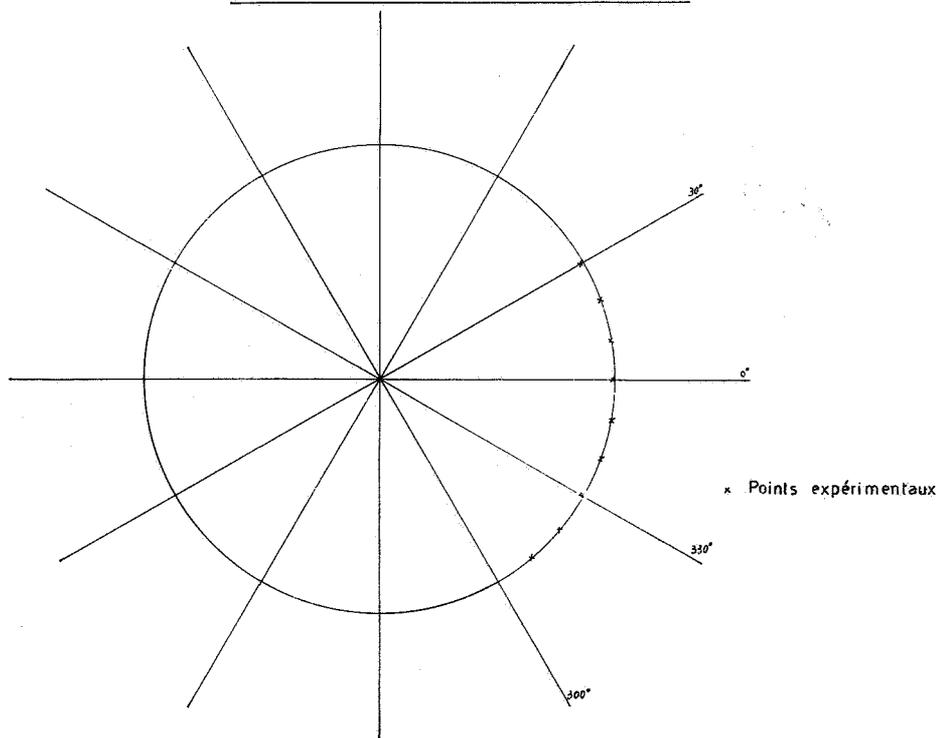


Figure 3.

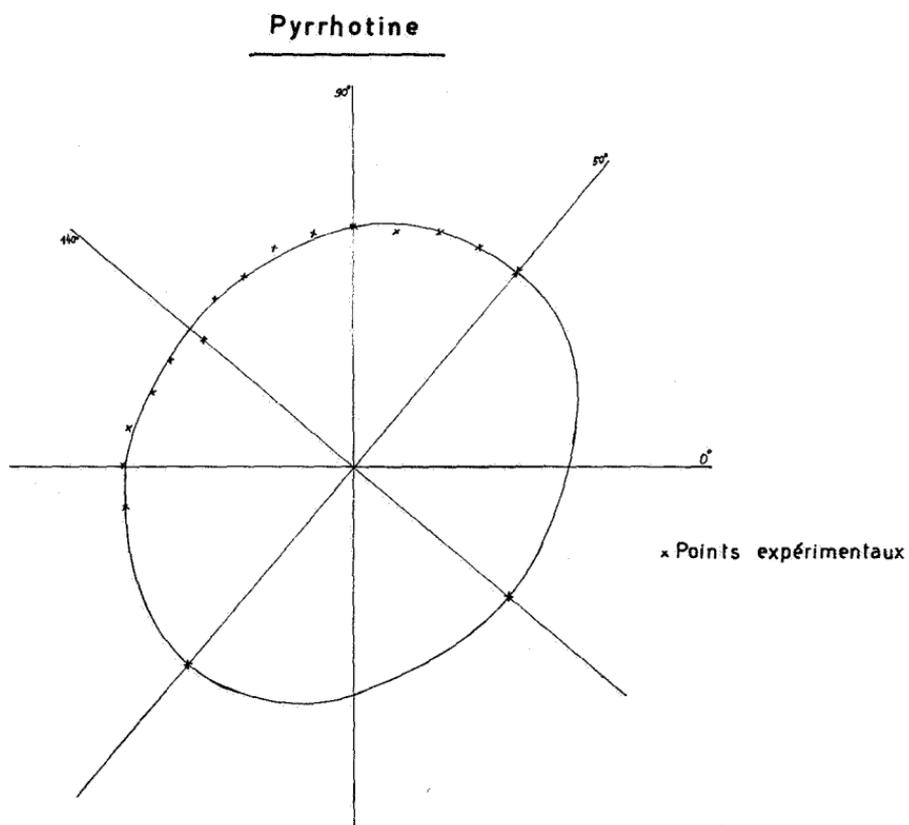


Figure 4.

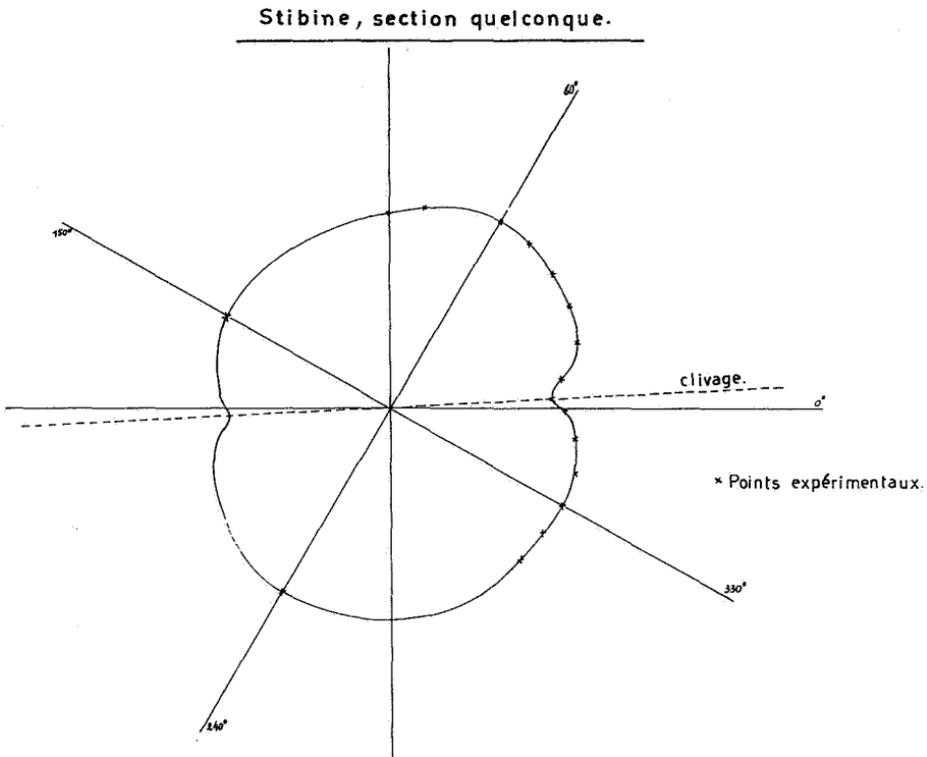


Figure 5.

Stibine, section normale à l'allongement.

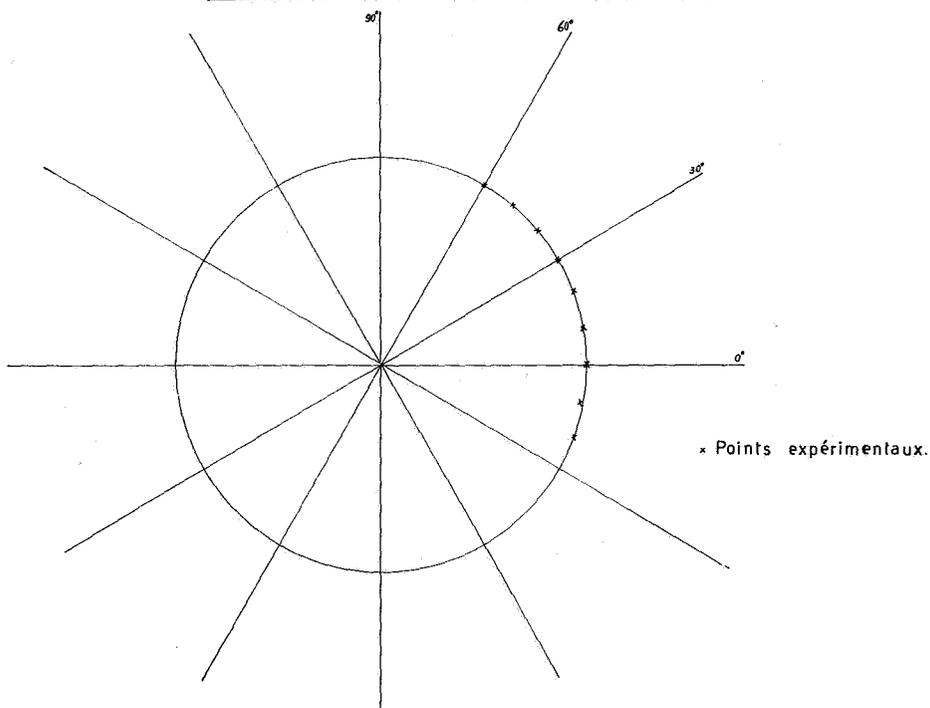


Figure 6.

BIBLIOGRAPHIE.

1. BOWIE, S. and TAYLOR, K., 1958, A system of ore mineral identification. (*Mining Magazine*, vol. 96, pp 265-277 et 337-445.)
2. EVANS, R. C., 1954 Chimie et structure cristalline. Dunod, Paris.
3. HENRIQUES, A., 1957, The Vickers hardness of zinc blende. (*Ark. Mineral. Geol. Sverige*, 2, n° 3, pp. 283-297.)
4. MITSCHKE, R. et ONITSCH, E. M., 1948, La microdureté des minéraux. (*Mikroskopie, Oest.*, nos 9-12, vol. 3, pp. 257-309.)
5. MURDOCH, J., 1916, Microscopic determination of the opaque minerals. John Wiley & Sons, New-York, p. 28.
6. NAKHLA, F. M., 1956, The hardness of metallic minerals in polished sections. (*Econom. geology*, 51, n° 8, pp. 811-827.)
7. PALACHE, C., 1944, The system of mineralogy. Vol. 1. John Wiley & Sons.
8. ROBERTSON, F. et VAN METER, W. J., The Kentron microhardness tester, a quantitative tool in opaque minerals identification. (*Econ. Geol.*, 46, n° 5, pp. 541-550.)
9. ROTH-MEYER, H., 1950, Variation de la microdureté dans les monocristaux en fonction de l'orientation d'un pénétrateur pyramidal. (*C. R. Acad. Sc. de Fr.*, 231, n° 18, pp. 906-908.)
10. TALMAGE, S. B., 1925, Quantitative standards for hardness of ore minerals. (*Econom. Geol.*, vol. 20, pp. 531-553.)
11. SHORT, M. N., 1940, Microscopic determination of the ore minerals. (*U. S. Geol. Sur. Bull.*, 914, pp. 63-66.)
12. TAYLOR, E. V., 1949, Correlation of Mohs scale of the hardness with the Vickers hardness numbers. (*Amer. mineral.*, 28, pp. 718-721.)
13. TERTSCH, H., 1950, Observation sur la microdureté Vickers de la calcite. (*Mikroskopie, Oester.*, 5, nos 7 et 8, pp. 172-183.)
14. WINCHELL, H., 1945, The Knoop microhardness tester as mineralogical tool. (*Amer. mineral.*, 30, pp. 582-595.)

TABLEAUX

TABLEAU 1. — Échelle des microduretés Vickers.

	Formules	Valeurs mesurées
Classe 1 : 0 < H.V. < 200.		
Étain	Sn	10-11-15
Bismuth	Bi	10,5-11,3-12,5
Orpiment	As ₂ S ₃	23-52
Molybdénite	MoS ₂	39-30-66,2-69,5
Réalgar	AsS	53-60
Antimoine	Sb	68,6-64,2-61,3
Cinabre	HgS	79,5-63,7-77,1-66,8
Chalcosine	Cu ₂ S	71,3-66,8-85,1-68,1-70
Galène	PbS	79,3-77,9-78,5-89,8-67,5
Argentite	Ag ₂ S	77,2-85,1-87,6-85-91,4
Digénite	Cu _{2-x} S	90,5-94,6-86,7-95,2-90-87,2
Stibine	Sb ₂ S ₃	62,9-67,4-62,2-74,8-78,4-104-112-117
Bornite	Cu ₄ FeS ₅	110-97,7-100-102-93,4
Cuivre	Cu	102-101-109
Or	Au	96-102
Covelline	CuS	160-121-98,4-119-99,4
Sylvanite	(Ag, Au)Te ₂	102-125
Pyrargyrite	Ag ₆ Sb ₂ S ₆	96,5-110-113-116
Proustite	Ag ₆ As ₂ S ₆	121-110-143
Platine	Pt	125-127
Zinc	Zn	130
Jamesonite	Pb ₄ FeSb ₆ S ₁₄	118-137-156
Argent	Ag	128-151-134,5
Bismuthinite	Bi ₂ S ₃	143-132-137
Boulangerite	Pb ₅ Sb ₄ S ₁₁	157-183

	Formules	Valeurs mesurées
Violarite	$(\text{Ni, Fe})_3\text{S}_4$	175-167,5-164
Alabandite	MnS	183-175-176
Marmatite	$(\text{Zn, Fe})\text{S}$	188-197-195-197-202

Classe 2 : 200 < H.V. < 400.

Blende claire	ZnS	208-225-239-214-225-227
Chalcopyrite	CuFeS_2	223-227-229-225-227-225
Cuprite	Cu_2O	223-212-249-223-225
Pentlandite	$(\text{Fe, Ni})_9\text{S}_8$	—
Arsenic	As	232-237
Pyrolusite	MnO_2	244-257-257-260
Pyrrhotine	$\text{Fe}_x\text{S}_{x+1}$	283-283-280-277-268-240-258
Psilomélane	$\text{BaMn}_2\text{Mn}_3\text{O}_{16}[\text{OH}]_4$	229-283
Bourbonite	$\text{Cu}_2\text{Pb}_2\text{Sb}_2\text{S}_6$	274-250
Millérite	NiS	274-264-263
Énargite	$\text{Cu}_6\text{As}_2\text{S}_8$	297-325-311
Tétrahédrite	$\text{Cu}_{12}\text{Fe}_2\text{Sb}_4\text{S}_{13}$	301-303-309
Tennantite	$\text{Cu}_{12}\text{Fe}_2\text{As}_4\text{S}_{13}$	380-344
Reniérite	—	333-387-345-367
Famatinitite	$\text{Cu}_6\text{Sb}_2\text{S}_8$	333-397
Niccoline	NiAs_2	367-376-367-396-423
Carrollite	Co_2CuS_4	351-566

Classe 3 : 400 < H.V. < 600.

Wolframite	$(\text{Fe, Mn})\text{WO}_4$	436-459-520-467-459
Hématite	Fe_2O_3	401-387-420
Hausmannite	Mn_3O_4	542-509-495,5

	Formules	Valeurs mesurées
Manganite	Mn_2O_3	537-557
Linnéite	Co_3S_4	548-514-548-554-536-572
Breithauptite	NiSb	542-584
Goethite	$FeO(OH)$	572-593-588

Classe 4 : 600 < H.V. < 800.

Skuttérodite	$(Co, Ni)As_3$	589-724
Loëllingite nickellifère	$(Fe, Ni)As_2$	681-701-689-700
Rammelsbergite	NiAs	772-766
Columbo-tantalite noire	$(Fe, Mn)(Ta, Cb)_2O_6$ $(Fe, Mn)(Cb, Ta)_2O_6$	763-823-763-926-741-804-792
Loëllingite	$FeAs_2$	724-772

Classe 5 : 800 < H.V. < 1000.

Smaltine	$(Co, Ni)As_{3-x}$	752-920-743-870-824-803-833
Gersdorffite	NiAsS	946-927
Mispickel	$FeAsS$	900-927-927-996
Loëllingite cobaltifère	$(Co, Fe)As_2$	975-920-975
Siegenite	$(Co, Ni)_3S_4$	982-1006-946-1017-955-985-975

Classe 6 : 1000 < H.V. < 1200.

Magnétite	Fe_3O_4	988-988-1003
Rutile	TiO_2	1003-1006-996-996
Ilménite	$FeTiO_3$	1097-1032-1051-1070
Glaucodot	$(Co, Fe)AsS$	1071-1210
Chromite	$FeCr_2O_4$	1171-1171-1072-1038-1050-1157

	Formules	Valeurs mesurées
Marcassite	FeS_2	1113
Oligiste spéculaire	CoAsS	1145-1134-1120-1144-1120

Classe 7 : 1200 < H.V. < 1400.

Cobaltite	CoAsS	1215-1204
Tantalite	$(\text{Fe, Mn})(\text{Ta, Cb})_2\text{O}_6$	1247-1283
Cassitérite claire	SnO_2	1336-1324-1350

Classe 8 : H.V. > 1400.

Columbo-tantalite claire	$(\text{Fe, Mn})(\text{Ta, Cb})_2\text{O}_6$ $(\text{Fe, Mn})(\text{Cb, Ta})_2\text{O}_6$	1340-1350-1410
Cassitérite noire	SnO_2	1424
Pyrite	FeS_2	1390-1471-1483-1753-1780

Tableau comparatif des différentes échelles de dureté et de microdureté.

Minéraux et éléments	Formules	Échelle de Mohs	Échelle de Talmage	Microdureté Knoop	Microdureté Vickers
Étain	Sn	—	—	—	10 à 15
Bismuth	Bi	—	A	—	12
Orpiment	As ₂ S ₃	—	—	—	23 à 52
Molybdénite	MoS ₂	1-1,5	B	10 à 80	30 à 69,5
Realgar	AsS	1,5-2	B	47	53 à 60
Antimoine	Sb	3-3,5	B	89	64,7
Cinabre	HgS	—	—	—	65 à 78,3
Chalcosine	Cu ₂ S	2,5-3	B	58	69 à 85,1
Galène	PbS	2,5-2,75	B	75	78,6
Argentite	Ag ₂ S	—	A	26	77 à 91
Digénite	Cu _{2-x} S	2,5-3	B	1	90,7
Stibine	Sb ₂ S ₃	2	B	—	62 à 117
Bornite	Cu ₄ FeS ₅	3	B	98	93 à 110
Cuivre	Cu	2,5-3	B	73	104
Or	Au	2,5-3	B	79	99
Covelline	CuS	1,5-2	B	101	98 à 160
Sylvanite	(Ag, Au)Te ₂	1,5-2	C	147 à 230	113
Pyrargyrite	Ag ₈ Sb ₂ S ₆	2,5	B	103	113
Proustite	Ag ₆ As ₂ S ₆	—	C	—	124

Platine	Pt	4 à 4,5	—	—	126
Zinc	Zn	—	—	—	130
Jamesonite	$Pb_4FeSb_6S_{14}$	2,5	B	126	118 à 156
Argent	Ag	2,5-3	B	106 à 143	138
Bismuthinite	Bi_2S_3	—	B	—	137
Boulangérite	$Pb_5Sb_4S_{11}$	2,5-3	B	—	170
Violarite	$(Ni, Fe)_3S_4$	—	C	—	169
Alabandite	MnS	—	C	—	179
Marmatite	(Zn, Fe)S	—	—	—	197
<hr/>					
Blende claire	ZnS	3,5-4	C	209	223
Chalcopyrite	$CuFeS_2$	3,5-4	C	175	225
Cuprite	Cu_2O	3,5-4	D	229	226
Pentlandite	$(Fe, Ni)_9S_8$	3,5-4	D	239 à 363	—
Arsenic	As	—	C	—	235
Pyrolusite	MnO_2	—	—	—	254
Pyrrhotine	Fe_xS_{x+1}	3,5-4	D	267 à 296	270
Psilomélane	$Ba.Mn_2Mn_8O_{16}(OH)_4$	—	D	—	256
Bournonite	$Cu_2Pb_2Sb_2S_6$	—	C	—	262
Millérite	NiS	—	E	—	267
Énargite	$Cu_6As_2S_8$	3	D	154 à 378	297 à 325
Tétrahédrite	$Cu_{12}Fe_2Sb_4S_{13}$	3-4,5	D	266 à 339	304

400 > H.V. < 002

Minéraux et éléments	Formules	Échelle de Mohs	Échelle de Talmage	Microdureté Knoop	Microdureté Vickers	
Tennantite	$Cu_{12}Fe_2As_4S_{13}$	—	D	—	362	
Reniérite	—	—	—	—	339 à 377	
Famatinite	$Cu_8Sb_2S_8$	—	—	—	333 à 397	
Niccoline	$NiAs_2$	5-5,5	E	239 à 477	376	
Carrolite	Co_2CuS_4	—	—	—	351 à 566	
Wolframite	$(Fe, Mn)WO_4$	5-5,5	E	332 à 402	436 à 520	
Hématite	Fe_2O_3	5-6	G	533 à 794	403	
Hausmannite	Mn_3O_4	5,5	D	445 à 562	515	
Manganite	Mn_2O_3	—	E	—	547	
Linnéite	Co_3S_4	—	—	—	545	
Breithauptite	$NiSb$	—	—	—	563	
Goéthite	$FeO(OH)$	5-5,5	E	422 à 551	584	
Skuttérodite	$(Co, Ni)As_3$	—	—	—	589 à 724	
Loëllingite nickellifère	$(Fe, Ni)As_2$	—	F	—	681 à 700	
Rammelsbergite	$NiAs$	—	E	—	769	
Columbo-tantalite noire	$(Fe, Mn)(Cb, Ta)_2O_6$	—	—	—	750 à 926	
Loëllingite	$FeAs_2$	—	F	—	748	

009 < .H.V. < 400

800 > .H.V. > 609

Smaltine	(Co, Ni)As _{3-x}	5,5-6	F	837 à 1098	748 à 920	800 < H.V. < 1000
Gersdorffite	NiAsS	—	F	—	936	
Mispickel	FeAsS	5,5-6	F	633 à 1148	900 à 996	
Loëllingite cobaltifère	(Co, Fe)As ₂	—	F	—	920 à 975	
Siegenite	(Co, Ni) ₃ S ₄	—	—	—	949 à 997	
<hr/>						
Magnétite	Fe ₃ O ₄	5,5-6,5	F	429 à 574	988 à 1003	1000 < H.V. < 1200
Rutile	TiO ₂	—	—	—	996 à 1004	
Ilménite	FeTiO ₃	5-6	G	919 à 965	1032 à 1097	
Glaucodot	(Co, Fe)AsS	—	—	—	1071 à 1210	
Chromite	FeCr ₂ O ₄	5,25	G	1098	1038 à 1171	
Marcassite	FeS ₂	6-6,5	E	712 à 1038	1113	
Oligiste spéculaire	Fe ₂ O ₃	—	—	—	1130	
<hr/>						
Cobaltite	CoAsS	—	G	—	1209	1200 < H.V. < 1400
Tantalite	(Fe, Mn) (Ta, Cb) ₂ O ₆	—	—	—	1265	
Cassitérite claire	SnO ₂	—	G	—	1337	
<hr/>						
Columbo-tantalite claire	(Fe, Mn) (Ta, Cb) ₂ O ₆	—	—	—	1345 à 1410	H.V. > 1400
Cassitérite noire	SnO ₂	—	G	—	1424	
Pyrite	FeS ₂	6-6,5	F	577	1390 à 1780	