



HAL
open science

Étude du type structural de γ -FeO(OH)(s) et comparaison avec la structure de Cu(OH)₂(s)

Yannick Cudennec, André Lecerf

► **To cite this version:**

Yannick Cudennec, André Lecerf. Étude du type structural de γ -FeO(OH)(s) et comparaison avec la structure de Cu(OH)₂(s). Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série IIc, Chimie, 2001, 4 (12), pp.885-891. 10.1016/S1387-1609(01)01303-2 . hal-02537369

HAL Id: hal-02537369

<https://hal.science/hal-02537369v1>

Submitted on 8 Apr 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude du type structural de $\gamma\text{-FeO(OH)}_{(s)}$ et comparaison avec la structure de $\text{Cu(OH)}_{2(s)}$

[Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIC - Chemistry](#)

[Volume 4, Issue 12](#), December 2001, Pages 885-891

Yannick Cudennec, André Lecerf

Groupe de recherche en chimie et métallurgie, Insa-Rennes, 20 av. des buttes de Coësmes, 35043 Rennes cedex, France.

[https://doi.org/10.1016/S1387-1609\(01\)01303-2](https://doi.org/10.1016/S1387-1609(01)01303-2)

Abstract – Structural comparison between $\text{Cu(OH)}_{2(s)}$ and $\gamma\text{-FeO(OH)}_{(s)}$. Comparison of crystal structures of $\text{Cu(OH)}_{2(s)}$ and $\gamma\text{-FeO(OH)}_{(s)}$ shows a structural analogy between these two solid phases, despite the difference of formulas. That is due especially to the way in which polyhedra are connected, giving rise to a two-dimensional structure composed of wavy sheets. $\gamma\text{-FeO(OH)}_{(s)}$ named lepidocrocite, is obtained probably by a topotactic reaction which we propose a hypothesis, from divalent iron hydroxide $\text{Fe(OH)}_{2(s)}$ whose structure displays also a two-dimensional framework of brucite type. The lepidocrocite structural type obtained by this way, allows strong deformations of octahedral surroundings of cations, contrarily to the brucite type. Deformations can be due to the loss of hydrogen atoms in the oxi-hydroxide phase or to the strong Jahn-Teller effect which affects divalent copper in the case of copper hydroxide. If an analogy between the structures of $\text{Cu(OH)}_{2(s)}$ and brucite is not possible, this analogy exists with lepidocrocite even if copper has a pentahedral surrounding whereas trivalent iron one is octahedral. In the other hand, in the two crystal structures, an oxygen atom has a peculiar surrounding composed of only two cations and one hydrogen. That explains why this structural type presents a low stability.

copper hydroxide / iron oxide hydroxide / lepidocrocite / structural comparison

Résumé – Malgré leur stoechiométrie différente, $\text{Cu}(\text{OH})_{2(s)}$ et $\gamma\text{-FeO}(\text{OH})_{(s)}$ présentent une analogie structurale. Elle se manifeste essentiellement dans le mode d'enchaînement des polyèdres qui aboutit à une structure bidimensionnelle composée de feuillets ondulés. $\gamma\text{-FeO}(\text{OH})_{(s)}$ appelée lépidocrocite, est obtenue probablement par une réaction topotactique dont nous proposons une hypothèse, à partir de l'hydroxyde de fer divalent $\text{Fe}(\text{OH})_{2(s)}$ qui possède également une structure feuilletée, isotype de la brucite. La structure de type lépidocrocite ainsi obtenue peut tolérer des déformations importantes de l'environnement octaédrique des cations contrairement au type structural de la brucite. Cette déformation est due à une dissymétrie entre les oxygènes induite par l'absence d'un hydrogène pour l'oxyhydroxyde ou à l'effet Jahn-Teller important présenté par le cuivre divalent dans la structure de l'hydroxyde de cuivre. Si une analogie structurale est impossible entre $\text{Cu}(\text{OH})_{2(s)}$ et la brucite elle existe en revanche avec la lépidocrocite même si le cuivre divalent se trouve dans un environnement pentaédrique alors que le fer trivalent se trouve dans un environnement octaédrique. Les deux structures sont caractérisées par un atome d'oxygène possédant un environnement exotique constitué par deux cations seulement et un hydrogène. Cela a pour conséquence de rendre relativement instable ce type structural.

cuivre hydroxyde / fer oxyde hydroxyde / lépidocrocite / comparaison structurale

1. Introduction

Dans la littérature chimique, la structure de $\text{Cu}(\text{OH})_{2(s)}$ a été décrite comme présentant une analogie avec un oxyde-hydroxyde de fer trivalent: $\gamma\text{-FeO}(\text{OH})_{(s)}$ [1], existant dans la nature sous le nom de lépidocrocite. Cette analogie a été constatée sur la base de données cristallographiques anciennes et s'est appuyée sur le fait que le groupe spatial Cmcm (N° 63) était identique pour les deux composés et que les paramètres de la maille ainsi que les

paramètres de positions atomiques des atomes indépendants étaient voisins (voir Tableaux I et II). En outre, les deux structures, peu stables, se caractérisent par la présence de feuillets ondulés reliés entre eux par des liaisons hydrogène plus ou moins fortes ce qui est plutôt original pour le composé du fer car les oxydes ou oxyde-hydroxydes cristallisent généralement dans des structures tridimensionnelles. Dans une étude plus récente [2], le choix du groupe spatial Cmc_m a été remis en cause pour Cu(OH)_{2(s)} et le groupe non centrosymétrique Cmc2₁ (N° 36) lui a été préféré.

Dans le prolongement des travaux que nous avons déjà publiés sur l'hydroxyde de cuivre [3, 4, 5], le but de cette publication est d'étudier la structure de la lépidocrocite γ -FeO(OH)_(s) qui constitue l'une des trois variétés d'oxyde-hydroxyde de fer trivalent avec la goethite α -FeO(OH)_(s) et l'akaganéite β -FeO(OH)_(s), de comparer la structure de Cu(OH)_{2(s)} avec celle de γ -FeO(OH)_(s) afin de mieux définir l'analogie structurale existant entre ces deux phases dont la stoechiométrie est pourtant différente et d'essayer de comprendre pourquoi ces deux phases, malgré leurs différences, cristallisent dans un même type structural. Ce type structural peut être considéré comme dérivant du type brucite bien qu'il s'en écarte notablement à première vue. Pour étayer cette hypothèse nous proposons une réaction topotactique permettant d'expliquer le passage du type brucite au type lépidocrocite.

2. Structure de γ -FeO(OH)

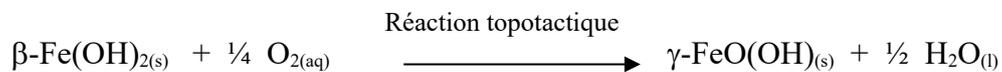
La structure de γ -FeO(OH)_(s) a été déterminée en 1935 [6] (voir tableau I). Depuis, peu de travaux structuraux ont été publiés. On peut néanmoins citer une publication datant de 1978, dans laquelle les auteurs proposent le groupe spatial Cmc2₁ à la place du groupe Cmc_m, mais leur étude entreprise sur poudre par diffraction de neutrons sans produit deutéré, aboutit à un coefficient R trop élevé (8,51%) pour valider ce changement de groupe [7]. En revanche des travaux concernant des composés isotypes de la lépidocrocite existant dans le cas de

l'aluminium trivalent γ -AlO(OH) (boehmite) [8-9] et du scandium γ -ScO(OH) [9] ont confirmé le choix du groupe Cmc. Néanmoins, le positionnement de l'hydrogène dans cette structure n'a pas été déterminé avec certitude et l'hypothèse formulée en 1935 [6] était toujours reprise dans une publication beaucoup plus récente en 1986 [10].

La structure, reportée à la Figure 1b, est constituée de feuillets ondulés. Le fer trivalent se trouve dans un environnement octaédrique déformé (Fig. 2b), comprenant quatre oxygènes O2 dont deux sont situés à 2,00 Å et les deux autres à 2,01 Å ainsi que deux groupements OH⁻ (oxygène O1), situés à 2,00 Å . D'après ces distances pratiquement égales on peut remarquer que la déformation de l'octaèdre est essentiellement de nature angulaire puisqu'il existe un angle de 151,12 degrés. L'oxygène O2 possède un environnement tétraédrique déformé constitué de quatre cations ferriques. En revanche l'oxygène O1 comprend deux cations et un hydrogène. L'hypothèse de positionnement de l'hydrogène dans la structure de la lépidocrocite formulée par Ewing en 1935 correspond à un placement de celui-ci en 4a: 0, 0, 0 du groupe spatial Cmc (voir tableau II), ce qui se traduit par une liaison H linéaire entre deux atomes O1 distants de 2,70 Å; l'atome d'hydrogène se situant alors à égale distance (1,35 Å) de chaque oxygène O1 engagé dans cette liaison. Cette hypothèse nous paraît peu vraisemblable. Elle a d'ailleurs été contestée dans le cas de la Boehmite γ -AlO(OH) en 1958 [11]. En effet une étude de résonance magnétique nucléaire montre que dans ce cas la liaison hydrogène ne peut être linéaire. En nous basant sur des considérations d'ordre géométrique et par comparaison avec d'autres structures analogues [12], nous proposons une hypothèse de positionnement en 4c : 0; 0,495; 0,25 du groupe Cmc (voir tableau II). Cette hypothèse aboutit à une distance O1-H1 de 1,00 Å et surtout à l'établissement de deux liaisons H de force moyenne par hydrogène avec deux oxygènes O1 différents (X2 O1---H1-O1 : 2,12 Å), ce qui est beaucoup plus favorable pour stabiliser la structure (Fig.2b).

3. Hypothèse de réaction topotactique donnant naissance à $\gamma\text{-FeO(OH)}_{(s)}$ à partir de $\text{Fe(OH)}_{2(s)}$

De nombreux travaux indiquent que la lépidocrocite $\gamma\text{-FeO(OH)}_{(s)}$, variété rare dans la nature, se forme à partir de $\text{Fe(OH)}_{2(s)}$ [13, 14, 15] (figure 3a). Cet hydroxyde de fer divalent possède une structure en couche, isotype de la brucite [16, 17]. Nous pensons que la formation de $\gamma\text{-FeO(OH)}_{(s)}$ doit se faire par oxydation de l'hydroxyde ferreux mettant probablement en jeu une réaction topotactique.



Cela expliquerait que cette variété possède également une structure en couche alors que les deux autres variétés α et $\beta\text{-FeO(OH)}_{(s)}$ (respectivement: goethite et akaganéite) cristallisent dans une structure tridimensionnelle. L'oxydation du fer ferreux a pour conséquence le départ de la moitié des atomes d'hydrogène ainsi que la coupure d'une liaison Fe-OH sur les trois liaisons restantes (Fig.3b). L'oxygène O2 ayant perdu son hydrogène, établit alors par compensation, une nouvelle liaison avec un quatrième atome de fer appartenant au même feuillet, en conséquence le groupement OH ne se trouve plus relié qu'à deux atomes de fer au lieu de trois (Fig.3c). Une déformation de la structure suivant les flèches indiquées sur cette dernière figure, se traduit par une diminution du paramètre c et une augmentation du paramètre b et permet d'obtenir la structure de la lépidocrocite (Fig.3d). L'hypothèse de transformation topotactique ainsi décrite est résumée dans les tableaux III et IV.

4. Description de la structure de $\text{Cu(OH)}_{2(s)}$

La structure de $\text{Cu(OH)}_{2(s)}$ a fait l'objet de nombreux travaux [1-5]. Nous nous bornerons à une description sommaire de cette structure en insistant néanmoins sur les environnements de

l'oxygène et plus particulièrement sur celui de l'oxygène O1 qui a un rôle essentiel dans l'instabilité de ce solide.

La structure est orthorhombique de groupe spatial $Cmc2_1$. Les paramètres de mailles sont reportés dans le tableau I où ils sont comparés avec ceux de la lépidocrocite. Elle est constituée de feuillets ondulés (Fig.1a). La cohésion entre les feuillets est assurée par un tissu de liaisons hydrogène dont certaines sont relativement fortes. Sur la figure 2a sont représentés les environnements des atomes de cuivre et d'oxygène. Le cuivre divalent se trouve dans un environnement pentaédrique défini par cinq groupements OH^- situés à 1,95; 1,95; 1,97; 1,97 et 2,36 Å du cation central. Le sixième OH^- se trouve à une distance du cuivre beaucoup trop importante pour pouvoir être considéré comme appartenant au polyèdre de coordination (Cu-O : 2,92 Å). L'oxygène O2 se trouve dans un environnement tétraédrique classique très déformé, constitué par trois atomes de cuivre situés à 1,95; 1,95 et 2,36 Å et un atome d'hydrogène à 1,07 Å. En revanche l'oxygène O1 possède un environnement exotique dans la mesure où il ne comprend que deux cuivres situés à 1,97 et 1,97 Å et un atome d'hydrogène à 1,00 Å. Néanmoins, on peut remarquer que cet oxygène est engagé dans trois liaisons hydrogène dont une est forte (O1---H1-O1 : 1,92 Å) et les deux autres moyennes (2X O1---H2-O2 : 2,26 Å). De plus chaque hydrogène H2 établit deux liaisons H avec deux oxygènes O1 différents. Ce tissu serré de liaisons H contribue à la stabilisation relative de la structure de cet hydroxyde. Nous pensons malgré tout que cet environnement particulier de l'oxygène O1 est responsable de la faible stabilité de la structure de $Cu(OH)_2$ par comparaison avec la stabilité des hydroxydes de type brucite dans lequel les oxygènes se trouvent dans un environnement tétraédrique peu déformé constitué de trois cations divalents et d'un hydrogène (voir Fig.4c) [12]. Cette instabilité de $Cu(OH)_2$ explique d'ailleurs l'évolution rapide de ce composé vers l'oxyde de cuivre CuO, caractérisé par des environnements plus classiques: plan carré pour le cuivre divalent et tétraédrique pour l'oxygène (Fig. 4b).

5. Comparaison des structures de $\text{Cu}(\text{OH})_2$ et de $\gamma\text{-FeO}(\text{OH})$

Les paramètres de maille des deux structures sont comparés dans le tableau I. Le paramètre c subit une augmentation sensible dans le cas du cuivre car il correspond à la direction des liaisons Cu-O longues déformées par un effet Jahn-Teller important qui n'existe évidemment pas dans le cas du fer trivalent. En effet, le paramètre c de 3,87 Å pour le composé du fer devient égal à 5,2564 Å pour celui du cuivre. Ce phénomène a pour conséquence d'écarter les plans carrés de cuivre au sein d'un même feuillet avec un léger basculement de ceux-ci jusqu'à l'obtention d'un environnement pentaédrique pour le cuivre. Cet écartement permet alors une meilleure imbrication des feuillets dans la structure de $\text{Cu}(\text{OH})_2$. Il s'ensuit que le paramètre b , perpendiculaire au plan des feuillets, est moins grand pour le composé du cuivre: 10,593 Å au lieu de 12,51 Å pour le composé du fer. En outre, pour les deux composés ce paramètre correspond au double de la distance inter feuillets. Cela est dû au fait que les feuillets sont décalés de $a/2$ suivant la direction a . Les positions atomiques sont comparées dans le tableau II. Pour l'atome métallique et les oxygènes O1 et O2, les positions sont très semblables même si O2 est légèrement décalé suivant c dans la structure de l'hydroxyde de cuivre par rapport à la cote $z = 0,25$. En revanche dans cette même structure, l'hydrogène H1 est très décalé suivant l'axe c ($z = 0,4118$ au lieu de 0,25) ce qui n'est pas surprenant car il est repoussé par l'autre hydrogène H2. Dans ce cas la présence de cet hydrogène H2 empêche qu'une liaison H double s'établisse avec deux oxygènes O1 équidistants, comme dans le composé du fer. Il se forme alors une liaison H pratiquement linéaire: O1-H1---O1, puisque l'angle obtenu est égal à 167,03°.

Il est évident que le passage de la structure de type brucite à la structure lépidocrocite s'explique par la dissymétrie introduite par la disparition de la moitié des hydrogènes. En effet la structure de type brucite est très symétrique ce qui impose que les environnements

octaédriques $M(OH)_6$ soient très peu déformés (voir Fig. 5a). De plus l'environnement tétraédrique de l'oxygène constitué par 3 cations et un hydrogène, caractéristique de la structure brucite n'est plus possible (voir figure 2b).

En revanche pour ce qui concerne l'hydroxyde de cuivre, l'obtention d'une structure de type brucite est impossible car les composés du cuivre divalent présentent un effet Jahn-Teller très important. L'enchaînement des polyèdres rencontré dans la lépidocrocite (Fig.5b) permet cette déformation importante aboutissant même à un environnement pentaédrique pour le cuivre (Fig. 5c) et c'est la raison pour laquelle une analogie structurale apparaît entre les deux phases.

Conclusion

L'étude comparée des structures de $\gamma\text{-FeO(OH)}$ et de Cu(OH)_2 montre qu'il existe une analogie certaine entre ces deux phases. Elle se manifeste essentiellement dans le mode d'enchaînement des polyèdres qui aboutit à une structure bidimensionnelle composée de feuillets ondulés, même si l'on considère que le cuivre divalent se trouve dans un environnement pentaédrique alors que l'environnement du fer trivalent est octaédrique. Les deux composés possèdent un oxygène dont l'environnement est particulier puisqu'il ne comporte que deux cations et un hydrogène (Fig.2a et b). Cet environnement constitue une cause d'instabilité pour la structure, pondérée partiellement par l'établissement d'un tissu de liaisons hydrogène relativement fortes. Cette instabilité est manifeste dans le cas de Cu(OH)_2 qui évolue facilement vers l'oxyde CuO plus stable (ténorite à l'état naturel) où l'oxygène se trouve dans un site tétraédrique constitué de quatre cuivres [4, 5] (Fig. 4b). Dans ces conditions, il n'est pas étonnant que l'hydroxyde de cuivre divalent n'existe pratiquement pas dans le milieu naturel. Ce n'est en effet qu'en 1981 qu'il a été découvert dans une mine du Québec; ce nouveau minéral ayant pris le nom de son découvreur F.Spertini : spertiniite [18].

La lépidocrocite est également très rare dans le milieu naturel où les autres variétés α -FeO(OH) (goethite) et β -FeO(OH) (akaganéite) sont rencontrées plus communément. Cette rareté peut aussi s'expliquer par le fait que la lépidocrocite se forme à partir de Fe(OH)_{2(s)}. La transformation s'effectue par une réaction topotactique qui préserve la structure feuilletée de la brucite. Néanmoins il existe d'autres composés isotypes de la lépidocrocite dans le cas de l'aluminium trivalent (γ -AlO(OH) : boehmite) et du scandium trivalent (γ -ScO(OH)) [8] ce qui incite à penser que ce type structural qui dérive de la brucite, présente malgré tout une certaine universalité.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Alain JIGOREL, ingénieur de recherche à l'INSA de Rennes pour les informations qu'il nous a apportées au sujet de la lépidocrocite.

Références

- [1] Jaggi H., Ostwald H.R., Acta Crystallogr. 14 (1961) 1041-1045.
- [2] Ostwald H.R., Reller A., Schmalte H.W., Dubler E., Acta Crystallogr. C 46 (1990) 2279-2284.
- [3] Cudennec Y., Lecerf A., Riou A., Gérault Y., Eur. J. Solid State Inorg. Chem. 25 (1988) 351-358.
- [4] Cudennec Y., Lecerf A., Gérault Y., Eur. J. Solid State Inorg. Chem. 32 (1995) 1013-1022.
- [5] Cudennec Y., Riou A., Lecerf A., Gérault Y., C. R. Acad. Sci. Paris, Série IIc, 3 (2000) 661-666.
- [6] Ewing F.J., J. Chem. Physics, 3 (1935) 420-424.
- [7] Christensen H., Christensen A. N., Acta Chem. Scand., A(32) (1978) 87-88.
- [8] Reichertz P.P., Yost W.J., J. Chem. Physics, 14(8) (1946) 495-501.
- [9] Milligan W.O., McAtee J.L., J. Phys. Chem., 60 (1956) 273-277.

- [10] Ishikawa T., Nitta S., Kondo S., J. Chem. Soc., Faraday Trans.1, 82 (1986) 2401-2410.
- [11] Holm C.H., Adams, C.R., Ibers J.A., J. Phys. Chem., 62 (1958) 992-994.
- [12] Cudennec Y., Riou, A., Gérard A., Lecerf A., J. Solid State Chem. 151 (2000) 308-312.
- [13] Caillère S., Hénin S., Minéralogie des argiles, Masson et Cie, Editeurs, (1963) 278.
- [14] Dinauer R.C., Minerals in soils environments, Soils Science Society of America, Madison, Wisconsin USA, (1977) 152.
- [15] Sherman D.M., Waite T.D., Amer. Min., 70 (1985) 1262-1269.
- [16] Lutz H.D., Möller H., Schmidt M., J. Mol. Struct., 328 (1994) 121-132
- [17] Parise J.B., Marshall W.G., Smith R.I., Lutz H.D., Möller H., Amer. Min. 85 (2000) 189-193.
- [18] Grice J.D., Gasparrini E., Canadian Mineralogist., 19 (1981) 337-340.

Composé	a (Å)	b(Å)	c(Å)	Groupe spatial
Cu(OH) _{2(s)}	2,9471	10,593	5,2564	Cmc2 ₁ (N° 36)
γ-FeO(OH)	3,06	12,51	3,87	Cmcm (N° 63)

Tableau I. Comparaison des paramètres de maille

Atomes	x	y	z	Atomes	x	y	z
4c Fe	0,5	0,678	0,25	4a Cu	0,5	0,682	0,25
4c O1	0	0,575	0,25	4a O1	0	0,5583	0,2534
4c O2	0	0,782	0,25	4a O2	0	0,7994	0,1967
4c H1	0	0,495	0,25 (notre travail)	4a H1	0	0,5058	0,4118
4a H1	0,5	0	0 [6]	4a H2	0	0,9001	0,1914
	groupe	Cmcm			groupe	Cmc21	
		γ-FeO(OH) [6] *				Cu(OH) ₂ [2]	

* Afin de pouvoir comparer les positions atomiques avec celles de Cu(OH)₂, le groupe spatial conventionnel Cmcm a été retenu plutôt que celui choisi par EWING [6] Amam et l'origine a été décalée de a/2 suivant le paramètre a.

Tableau II : Comparaison des positions atomiques

\vec{a}'	$\vec{a} = \vec{b}'$ (a = b')
\vec{b}'	$\vec{b} = 2 \vec{c}'$ (b/2 = c')
\vec{c}'	$\vec{c} = 2 \vec{a}' + \vec{b}'$ (c = a'√3)
$\gamma = 120^\circ$	/

Tableau III : Hypothèse de transformation topotactique

β-Fe(OH) ₂ P-3m1	γ-FeO(OH) Cmcm
-----------------------------	----------------

$\beta\text{-Fe(OH)}_2$	$\gamma\text{-FeO(OH)}$	Remarques
$a' = 3,265 \text{ \AA}$ $a' \sqrt{3} = 5,655 \text{ \AA}$	$c = 3,87 \text{ \AA}$	<ul style="list-style-type: none"> - Passage maille hexagonale à une maille orthorhombique. - Contraction de $-31,5\%$ due à la déformation de la structure suivant c permettant aux groupements OH de se placer dans l'espace inter-feuillets.
$b' = 3,265 \text{ \AA}$	$a = 3,06 \text{ \AA}$	<ul style="list-style-type: none"> - Contraction de $-6,3\%$ due essentiellement au remplacement de Fe^{2+} par Fe^{3+}. $R(\text{Fe}^{2+}) = 0,74 \text{ \AA}$ $R(\text{Fe}^{3+}) = 0,64 \text{ \AA}$
$c' = 4,601 \text{ \AA}$	$b / 2 = 6,255 \text{ \AA}$	<ul style="list-style-type: none"> - Doublement du paramètre correspondant à deux fois la distance inter-feuillet car il existe un décalage des feuillets de $a/2$ suivant a. - Dilatation de la structure suivant b de $35,9\%$ à cause des groupements OH pointant vers le feuillet adjacent.

Tableau IV : Evolution des paramètres au cours de la transformation topotactique

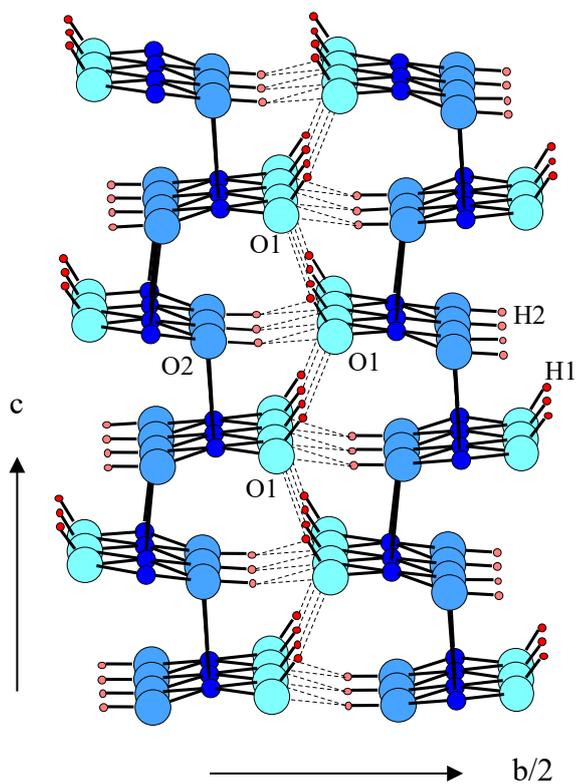


Fig. 1a

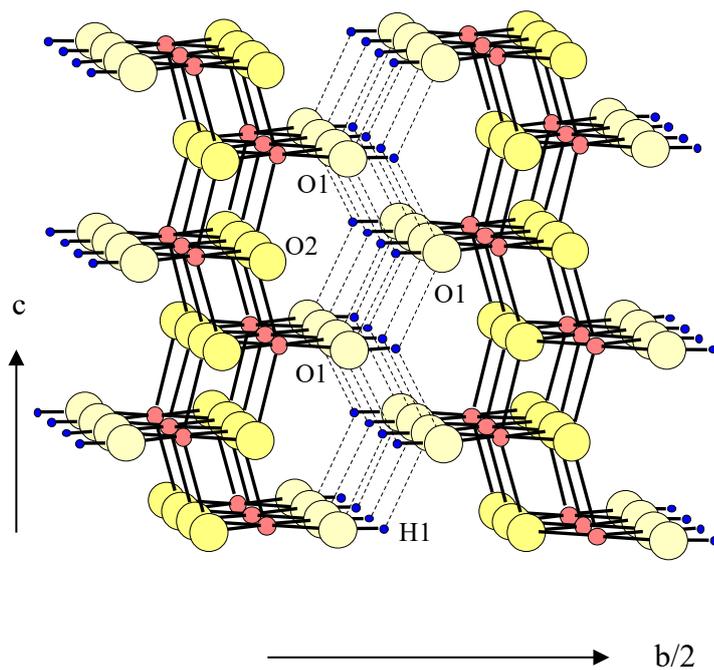


Fig. 1b

Figure 1. Comparaison structurale

a) Structure de $\text{Cu}(\text{OH})_2$

b) Structure de $\gamma\text{-FeO}(\text{OH})$

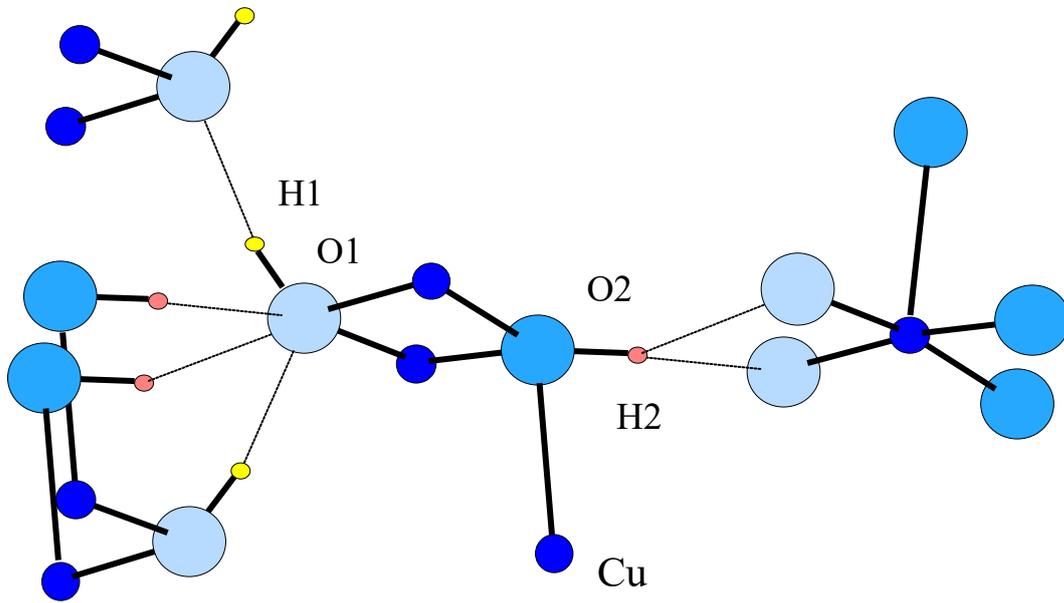


Fig.

2a

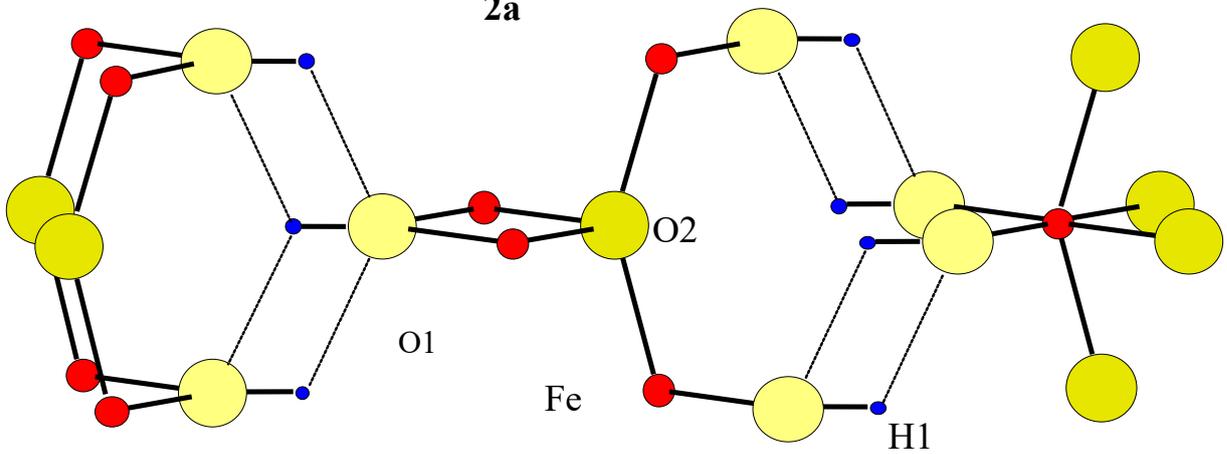


Fig. 2b

Figure 2. Comparaison des environnements

- a) Structure de $\text{Cu}(\text{OH})_2$
- b) Structure de $\gamma\text{-FeO}(\text{OH})$

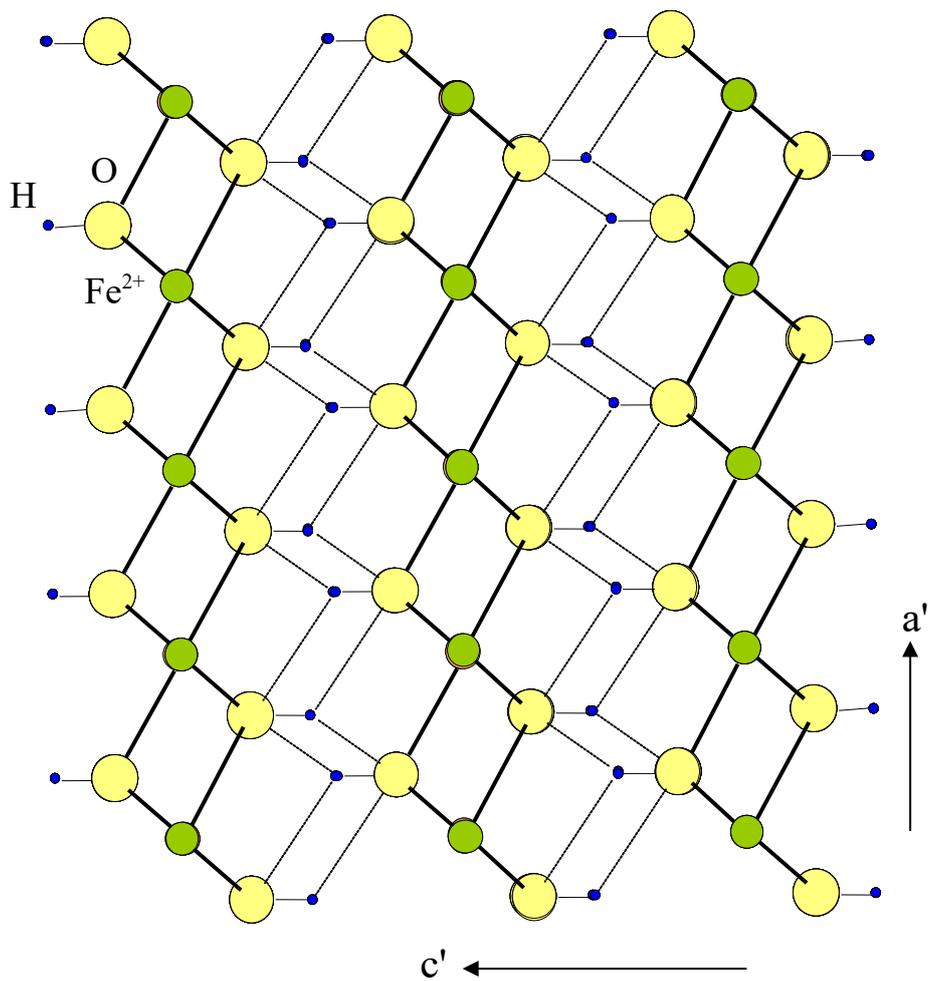


Figure 3a. Structure de $\beta\text{-Fe}(\text{OH})_2$

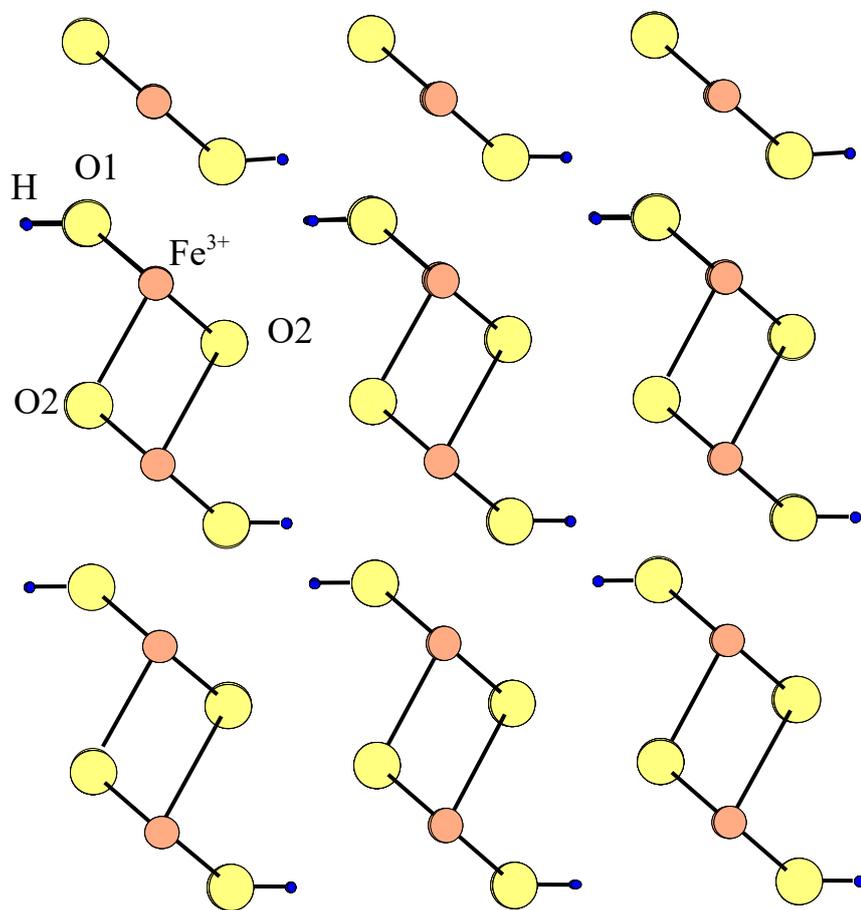


Figure 3b. Transformation topotactique

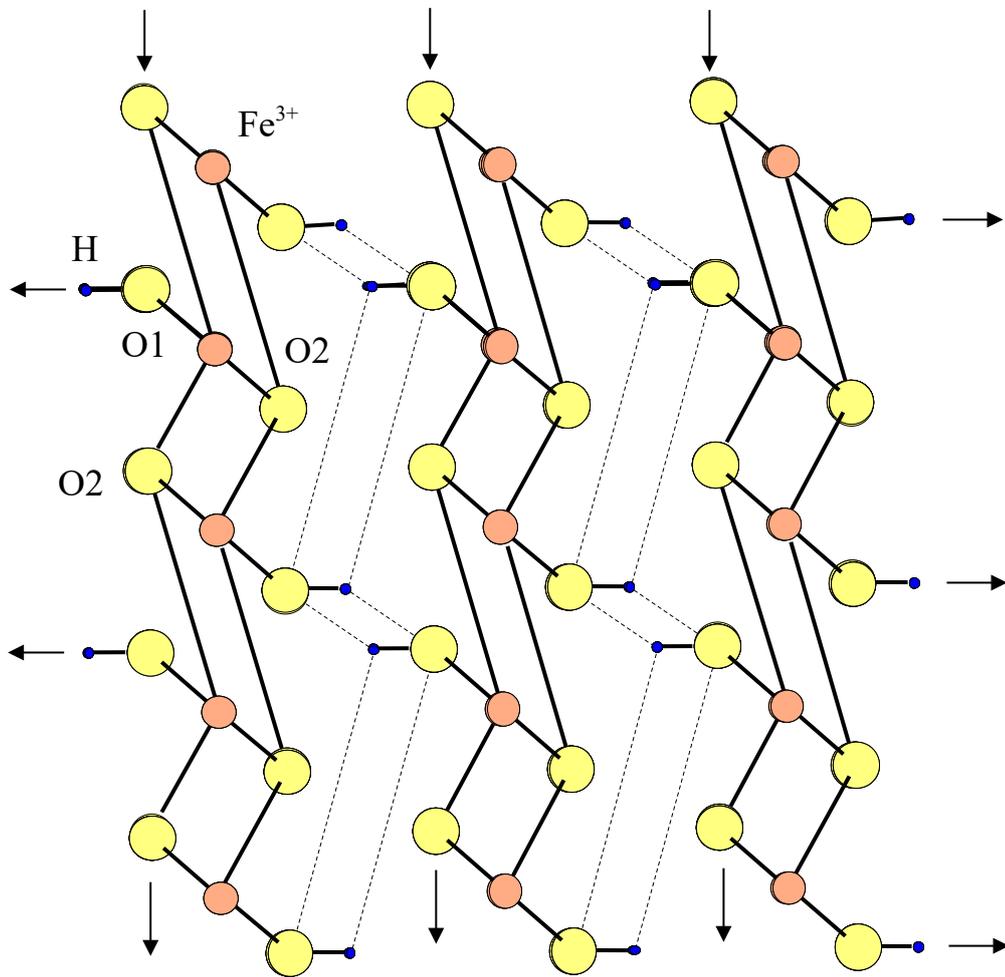


Figure 3c. Transformation topotactique

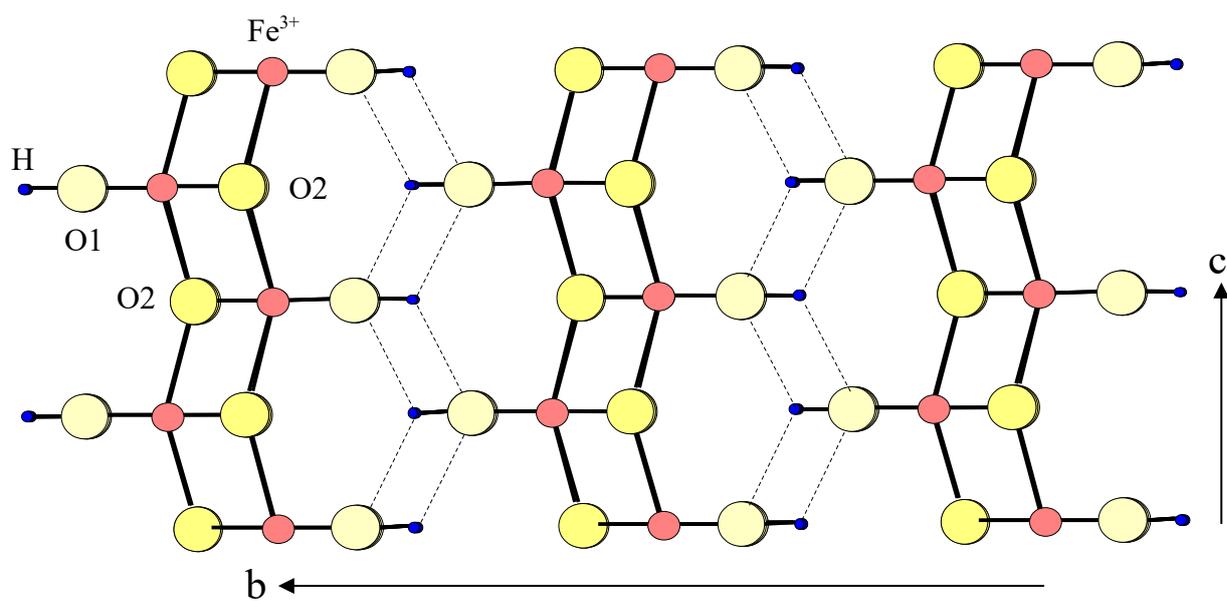


Figure 3d. Structure de $\gamma\text{-FeO(OH)}$

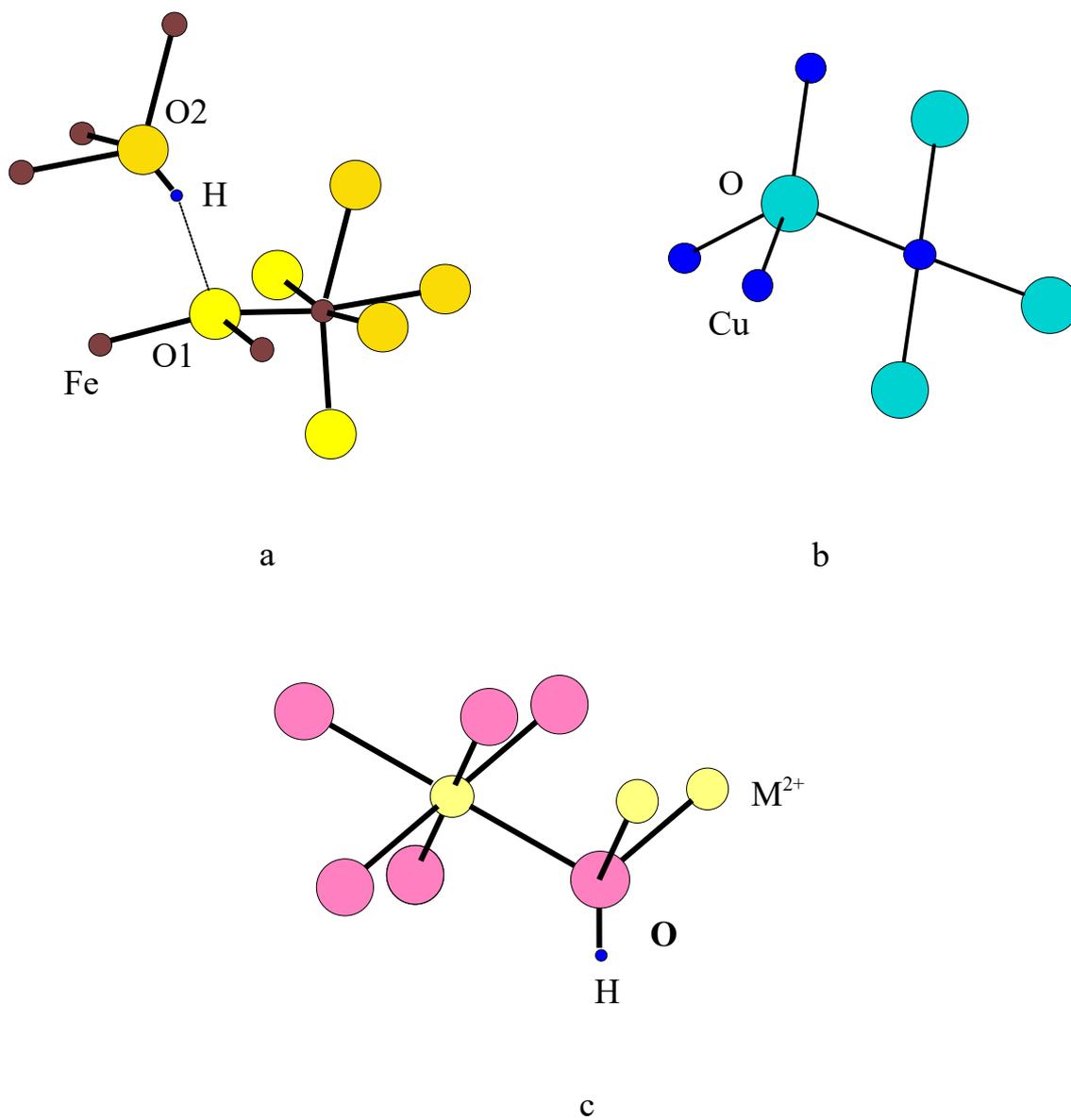


Figure 4. Environnements stables

- a) α -FeO(OH) : goethite
- b) CuO : ténorite
- c) type brucite

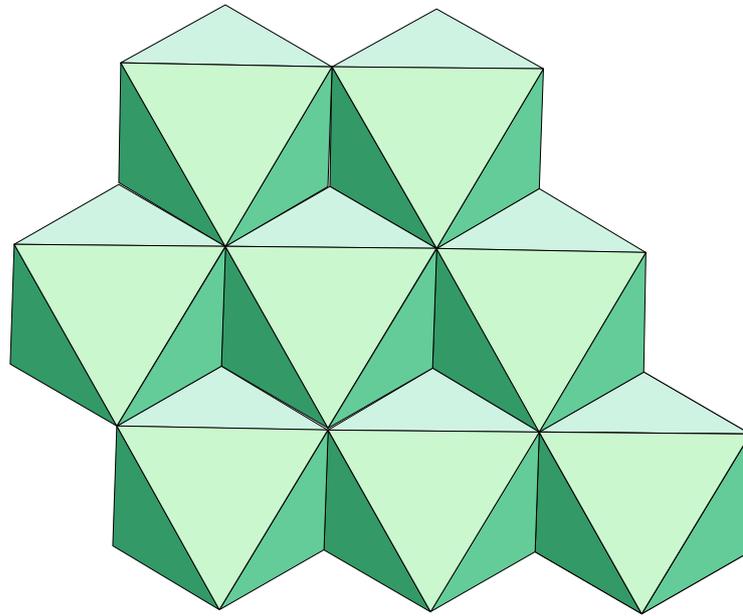


Figure 5a. $\beta\text{-Fe(OH)}_2$ type brucite

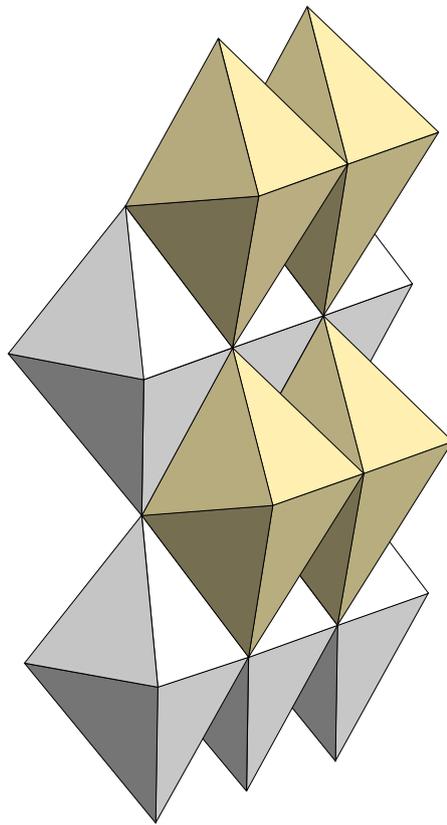


Figure 5b. γ -FeO(OH) lépidocrocite

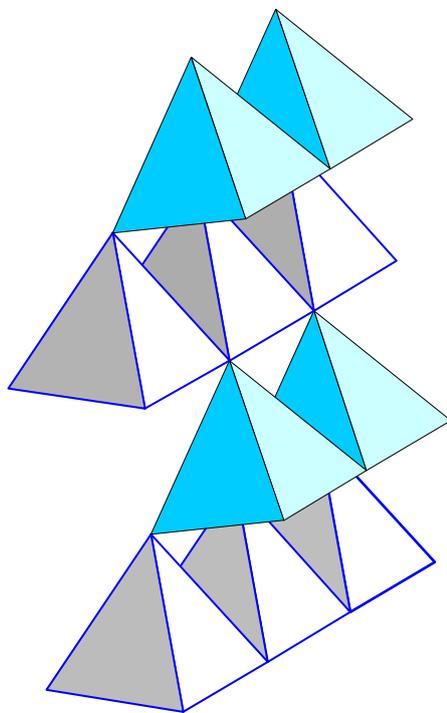


Figure 5c. Cu(OH)_2 Spertiniite

