

La structure d'AlPO_{4.5} (AFI) calciné imprégné par un colorant (thio-indigo) ou un oxydant puissant (KMnO₄) : nombre et position d'eau

Birama TRAORE^{1*}, Sibiri Datoma TRAORE¹, Mohamed SOUHASSOU², Florence PORCHER²
et Pierre DURAND²

¹ *Laboratoire de Chimie, Université des Sciences, des Techniques et des Technologies de Bamako (USTTB),
Faculté des Sciences et Techniques (FST), BP E3206 Bamako, MALI*

² *Laboratoire de Cristallographie, Résonance Magnétique et Modélisations (CRM2),
Université de Lorraine (UL), Faculté des Sciences et Technologies, UMR CNRS n°7036, BP 70239-54506
Vandœuvre-lès-Nancy Cedex, France*

* Correspondance, courriel : t_birama@yahoo.com

Résumé

Notre travail porte sur la détermination de la structure d'AlPO_{4.5} calciné d'une part et d'autre part sur la détermination de la structure d'AlPO_{4.5} calciné et imprégné par une solution de thio-indigo ou par une solution de permanganate de potassium. Le thio-indigo et le permanganate de potassium sont des polluants que l'on retrouve dans les eaux usées de teinturerie et domestique au MALI. Nous avons calcinés les cristaux d'AlPO_{4.5} afin de les débarrassés des agents structurants. Des cristaux calcinés ont été imprégnés dans une solution éthanoïque concentrée de thio-indigo et d'autres dans une solution aqueuse concentrée de permanganate de potassium. La diffraction des rayons X sur monocristal a été utilisée pour déterminer la structure des cristaux d'AlPO_{4.5} calcinée et calcinée imprégnée. Les déterminations des structures d'AlPO_{4.5} calcinée et calcinée imprégnée montrent que deux molécules d'eau sont localisées en position spéciale (1/2 ; 1/2 ; z_i) (avec z_i dépendant de la molécule d'eau) le long d'un axe 2 dans l'anneau à 4 T de la charpente d'AlPO_{4.5}. Elles sont fortement agitées avec un faible taux d'occupation de site et une distance variant entre elles de 1,520Å to 2,334Å ; une est liée à l'atome d'aluminium et l'autre à l'atome de phosphore. Le thio-indigo et le permanganate de potassium ne peuvent pas détériorer la charpente d'AlPO_{4.5} calcinée. Ainsi, l'AlPO_{4.5} étant un matériau poreux peut servir à la filtration des eaux usées par le thio-indigo et le permanganate de potassium.

Mots-clés : AlPO_{4.5}, calcination, imprégnation, diffraction des rayons X, structure, eau.

Abstract

The structure of AlPO_{4.5} (AFI) charred impregnated by a dye (thio-indigo) or a high oxidizer (KMnO₄) : number and position of water

Our research is based on the structure determination of AlPO_{4.5} charred on one hand and on the other hand the structure determination of AlPO_{4.5} charred and impregnated by a solution of thio-indigo or by a solution of potassium permanganate. Thio-indigo and potassium permanganate are pollutant meeting in used dry

cleaning and domestic waters of MALI. We calcined $\text{AlPO}_{4.5}$ crystals in order to rid them of structures agents. Some charred crystals have been impregnated in concentrate solution of thio-indigo and another in concentrate solution of potassium permanganate. X-ray diffraction on single crystal have been used to determinate the structure of $\text{AlPO}_{4.5}$ charred and charred impregnated. The structures determination of $\text{AlPO}_{4.5}$ charred and charred impregnated show that two waters molecules are localized on a special position $(1/2 ; 1/2 ; z_i)$ (z_i depend of the water molecule) along 2 fold axis of 4 T ring in $\text{AlPO}_{4.5}$ framework. They are highly agitated with low occupancy factor and the distance between them varied from 1.520Å to 2.334Å; one is link to the alumina atom and the other to the phosphorous atom. Thio-indigo and potassium permanganate can not damage $\text{AlPO}_{4.5}$ framework. Thus, porous material $\text{AlPO}_{4.5}$ can serve for the filtration of used waters by Thio-indigo and potassium permanganate.

Keywords : $\text{AlPO}_{4.5}$, calcination, impregnation, X-ray diffraction, structure, Water.

1. Introduction

Les aluminophosphates sont de deux grands types les AlPO_{4-n} de charpente neutre et APOs de charpente négative. Les AlPO_{4-n} possèdent autant d'aluminium que de phosphore (rapport Al/P est 1) [1]. $\text{AlPO}_{4.5}$ de code AFI est un AlPO_{4-n} de pour formule chimique : $[\text{Al}_{12}\text{P}_{12}\text{O}_{48}](\text{C}_{12}\text{H}_{28}\text{N}^+)(\text{H}_2\text{O})_x(\text{OH}^-)$. La structure d' $\text{AlPO}_{4.5}$ possède un réseau unidimensionnel de canaux alignés selon [001]. Ces canaux sont rectilignes, avec une ouverture limitée par des anneaux à 12 T qui ont un diamètre de 7,3Å, à 6 T et à 4 T [2]. A partir de ces canaux, $\text{AlPO}_{4.5}$ peut servir à l'absorption et à l'élaboration de matériaux polyfonctionnels (générateur d'harmonique, catalyseur sélectif, etc.) une fois dopé [3, 4]. $\text{AlPO}_{4.5}$ résiste à la grande pression de certaines molécules incorporées dans sa structure [5, 6], par contre, sa structure est déformée à très haute pression si elle contient le brome, l'iode [7, 8]. Certaines recherches prouvent qu'AFI contient une chaîne hélicoïdale de molécules d'eaux [9] et des études de simulation dynamique moléculaire ont montrés comment se fait l'absorption isotherme de l'eau dans AFI [10]. Des études montrent aussi qu'AFI sert à fabriquer souvent des nanoparticules à travers ces pores et surtout dans l'anneau à 12T [11, 12]. Les membranes d'AFI sont utilisées dans le domaine de la santé pour absorber l'eau et servir au traitement des blessures en favorisant la formation rapide des caillots [13]. Une étude récente vient de prouver la synthèse des nanocristaux d'AFI par méthode hydrothermale [14]. L' $\text{AlPO}_{4.5}$ étant un matériau poreux à usages multiples, nous avons choisi de déterminer comment se comporterait $\text{AlPO}_{4.5}$ face à des polluants d'eaux usées du MALI. Pour cela, nous avons pris le thio-indigo un colorant utilisé en teinturerie artisanale au MALI et un oxydant puissant le permanganate de potassium qui se retrouve dans les eaux usées domestiques de rinçage des légumes (salade, tomate, etc.) [15 - 17]. Afin de mieux étudiés l'impact de ces polluants sur $\text{AlPO}_{4.5}$, nous avons calciné les cristaux d' $\text{AlPO}_{4.5}$ et ensuite imprégné des cristaux calcinés par des solutions concentrés de ces polluants à température ambiante. Les objectifs visés étaient de déterminer comment réagirait les cristaux d' $\text{AlPO}_{4.5}$ durant la purification de certaines eaux usées du MALI et au-delà à déterminer la structure d' $\text{AlPO}_{4.5}$ calcinée.

2. Matériel et méthodes

2-1. Matériel

Les cristaux d'AFI utilisés sont de taille (150 µm x 20 µm x 20 µm) et viennent de la synthèse de type Robson [18, 19]. La calcination a été faite à l'aide d'un four programmable. Le colorant thio-indigo est utilisé en

teinturerie artisanale tandis que l'oxydant puissant utilisé est le permanganate de potassium sollicité au MALI pour désinfecter les légumes, etc. Un diffractomètre pour monocristal de la marque Bruker-Nonius équipé du programme de pilotage Kappa APEX II a été utilisé pour étudier la structure des monocristaux d'AlPO_{4.5} calciné et calciné imprégné. Les rayons X sont de source molybdène ($\lambda = 0,707 \text{ \AA}$).

2-2. Méthodes

2-2-1. Calcination

Les cristaux d'AFI sont calcinés dans l'air avec pour programme de température :

- Une montée rapide en température de 22°C à 550°C pendant 100 heures,
- Un palier à 550°C pendant 6 heures pour s'assurer que toutes les molécules organiques sont calcinées,
- Et un retour à la température de 25°C pendant 24 h.

2-2-2. Imprégnation

Des cristaux calcinés sont imprégnés dans une solution éthanolique de thio-indigo et d'autres dans une solution aqueuse de permanganate de potassium à la température ambiante durant quelques jours jusqu'à séchage.

2-2-3. Diffraction des rayons X

Des monocristaux d'AFI calcinés, calcinés imprégnés par la solution éthanolique de thio-indigo et calcinés imprégnés par la solution aqueuse de permanganate de potassium sont sélectionnés en fonction de leur taille et forme. Ils sont utilisés individuellement dans la diffraction des rayons X de source de radiation au molybdène. Les structures de ces différents monocristaux sont déterminées par le logiciel Wingx après traitement des données de diffraction par le programme Kappa APEX II.

3. Résultats et discussion

Les déterminations structurales montrent qu'AFI calciné, calciné imprégné par la solution éthanolique de thio-indigo et calciné imprégné par la solution aqueuse de permanganate de potassium ont une structure similaire. Les coordonnées atomiques et agitations thermiques de respectives de la structure d'AFI calciné, d'AFI calciné imprégné par le thio-indigo et d'AFI calciné imprégné par le permanganate de potassium sont données dans les **Tableaux 1 à 3**.

Tableau 1 : Coordonnées atomiques et agitations thermiques d'AFI calciné

atome	x	y	z	sof	U ₁₁	U ₂₂	U ₃₃	U ₂₃	U ₁₃	U ₁₂	U _{eq}
Al	0.45720(8)	0.33859(5)	0.42550(9)	1.00000	0.04233(9)	0.04541(7)	0.04050(9)	-0.00702(1)	-0.00747(8)	0.02396(7)	0.04185(4)
P	0.45277(2)	0.32821(1)	0.05400(6)	1.00000	0.03405(0)	0.03625(9)	0.04162(8)	0.00037(8)	-0.00267(5)	0.01784(4)	0.03719(6)
O1	0.41834 (8)	0.21273(7)	0.00357(2)	1.00000	0.05137(8)	0.04263 (2)	0.12336(1)	-0.01150(3)	0.00843(4)	0.02431(7)	0.07210(9)
O2	0.45219(5)	0.32725(3)	0.22750(3)	1.00000	0.12586(4)	0.18400(4)	0.04518(0)	-0.01034(2)	0.00036 (3)	0.07596 (4)	0.11902(4)
O3	0.36606(4)	0.35705(9)	-0.00060(2)	1.00000	0.04884(4)	0.05211(9)	0.11598(2)	0.00320(1)	-0.01128(8)	0.03186(6)	0.06936(1)
O4	0.56767(7)	0.41105(0)	-0.00474(7)	1.00000	0.04485(0)	0.04836(6)	0.11457(7)	0.01448 (3)	0.01958(8)	0.01717(0)	0.07199(1)
Ow1	0.50000(0)	0.50000(0)	0.81227(7)	0.50000							0.40268(0)
Ow2	0.50000(0)	0.50000(0)	0.05207(7)	0.50000							0.71987(0)

Tableau 2 : Coordonnées atomiques et agitations thermiques d'AFI calciné imprégné par le thio-indigo

Atome	x	y	z	sof	U11	U22	U33	U23	U13	U12	Ueq
P	0.45251(0)	0.32784(0)	0.26394(2)	1.00000	0.03259(9)	0.03471(1)	0.04398(3)	0.00205(9)	-0.00068(1)	0.01775(9)	0.03668(3)
Al	0.45689(6)	0.33780(6)	0.63568(6)	1.00000	0.04213(7)	0.04489(2)	0.04501(8)	-0.00936(6)	0.00701(6)	0.02490(6)	0.04261(8)
O1	0.36623(8)	0.35739(2)	0.20907(6)	1.00000	0.04799(7)	0.05561(2)	0.12639(0)	0.00232(0)	0.00884(3)	0.03460(5)	0.07279(7)
O2	0.41681(9)	0.21188(0)	0.20417(2)	1.00000	0.04514(3)	0.04325(1)	0.15123(8)	-0.00796(2)	0.00703(4)	0.02290(5)	0.07951(7)
O3	0.56793(7)	0.41058(0)	0.20518(4)	1.00000	0.03618(4)	0.04127(9)	0.14092(1)	0.01239(5)	0.01884(2)	0.01706(7)	0.07381(8)
O4	0.45259(3)	0.32011(7)	0.44272(4)	1.00000	0.15658(0)	0.22668(7)	0.05976(5)	-0.01128(3)	0.00570(0)	0.11484(3)	0.13922(0)
Ow1	0.500000(0)	0.500000(0)	0.78840 (2)	0.50000							0.38538(1)
Ow2	0.500000(0)	0.500000(0)	0.51012(8)	0.50000							0.35877(9)

Tableau 3 : Coordonnées atomiques et agitations thermiques d'AFI calciné imprégné par le permanganate de potassium

Atome	x	y	z	sof	U11	U22	U33	U23	U13	U12	Ueq
P	0.45286(4)	0.32825(2)	0.05637(0)	1.00000	0.0331(3)	0.03703(1)	0.04695(7)	0.00159(7)	0.00069(5)	0.01702(4)	0.03929(6)
Al	0.45675(9)	0.33798(7)	0.42865(9)	1.00000	0.03788(8)	0.04187(5)	0.04152(0)	-0.00571(7)	0.00374(3)	0.01997(5)	0.04041(3)
O1	0.41958(7)	0.21275(4)	0.00230(4)	1.00000	0.05142(1)	0.04031(1)	0.12627(0)	-0.00127(2)	0.01384(4)	0.02505(9)	0.07172(0)
O2	0.45694(1)	0.33747(3)	0.23016(4)	1.00000	0.12382(7)	0.22105(3)	0.03553(8)	-0.00572(7)	0.00155(1)	0.07860(9)	0.13018(6)
O3	0.36649(4)	0.35807(0)	0.00154(5)	1.00000	0.04758(3)	0.04884(7)	0.11749(1)	0.00557(6)	0.00668(9)	0.02982(5)	0.06877(8)
O4	0.56921(6)	0.41229(2)	0.00172(9)	1.00000	0.03469(6)	0.04537(4)	0.14534(7)	0.02419(2)	0.01511(0)	0.01254(8)	0.07846(8)
Ow1	0.500000(0)	0.500000(0)	0.14819(7)	0.50000							0.71200(0)
Ow2	0.500000(0)	0.500000(0)	0.33030(1)	0.50000							0.15547(0)

Ces monocristaux ont en commun la charpente d'AFI et en plus possède deux molécules d'eau (nommé Ow1 et Ow2) dans l'unité asymétrique. Les molécules d'eau sont situées sur un site de symétrie 2 aux positions $(1/2, 1/2, z_i)$ avec z_i dépendant de chaque molécule d'eau. La distance entre Ow1 et Ow2 est 2.204Å. Ces molécules d'eau sont logées dans l'anneau à 4 T. La présence de ces molécules d'eau peut s'expliquer le fait que les diffractions ont été faites à température ambiante si bien que les molécules d'eau viennent de l'humidité atmosphérique. Les facteurs d'accords de ces déterminations structurales sont les suivantes :

Tableau 4 : Facteurs d'accords des déterminations structurales

Cristal	AFI calciné	AFI calciné imprégné par la solution éthanolique de thio-indigo	AFI calciné imprégné par la solution aqueuse de permanganate de potassium
Rf	0.0699	0.0937	0.1019

Les facteurs d'accord des monocristaux calcinés imprégnés sont légèrement élevés comparativement à celui du monocristal calciné. Cela pourrait nous laisser dire que l'imprégnation influence la structure. Ceci n'est pas le cas, car on ne retrouve dans aucun des deux cas la présence ni du thi-indigo, ni du permanganate de potassium dans la charpente d'AFI. C'est surtout l'agitation thermique des molécules d'eau qui s'accroît, mais elles restent toujours sur le même axe 2 dans l'anneau à 4 T. En comparant ce positionnement des molécules d'eau dans AFI, aux résultats d'autres chercheurs qui montrent l'eau confinée dans AFI à 300 K se présente sous forme de deux hélices de glace [9, 20]. Ces résultats viennent de la diffraction neutronique d'AFI or nos résultats viennent de la diffraction des rayons X (source de radiation au molybdène). Nos résultats sont basés sur le fait qu'après élucidation à chaque fois de la charpente d'AFI, il reste des pics dont ; de par leur distance par rapport aux atomes voisins et leur intensité ne sont pas à négligés. En leur assignant à des molécules d'eau sachant qu'il n'y a pas d'agent structurant, les résultats obtenus s'avèrent intéressant car les pics restant n'ont pas de densité électronique significative et l'analyse des distances avec leur proche n'est pas bonne. Nous avons dans cette figure une vue suivant l'axe [001] d'AFI calciné contenant les deux molécules d'eau.

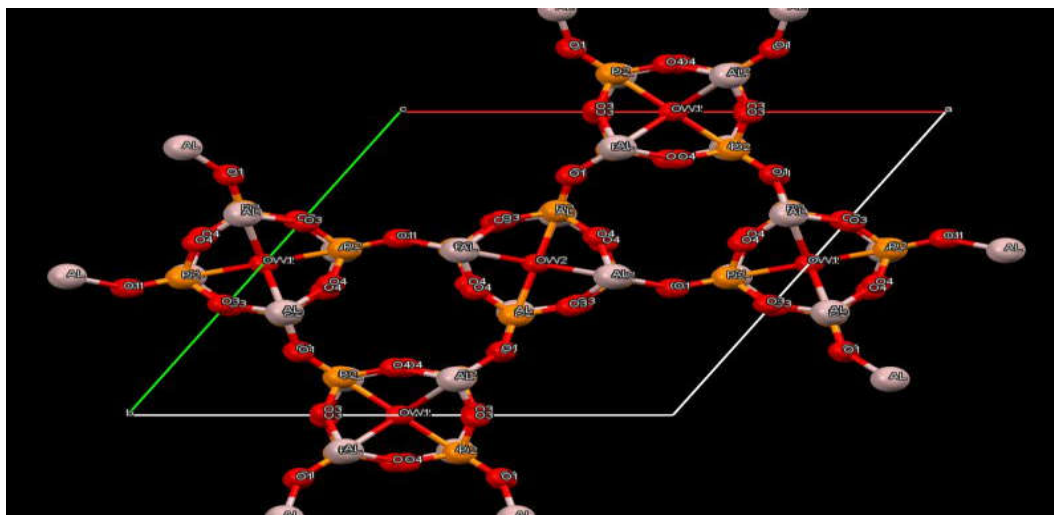


Figure : Vu du packing d'AF1 calciné contenant les molécules d'eau parallèlement à l'axe [001]

Les distances des liaisons interatomiques dans AF1 calciné sont données dans le **Tableau 5** :

Tableau 5 : Distances des liaisons interatomiques dans AF1 calciné

Liaison	P-O1	P-O2	P-O3	P-O4	P-Ow2	Al-O1	Al-O2	Al-O3	Al-O4	Al-Ow1	Al-Ow2
Distance en Å	1.4903(7)	1.4703(1)	1.5017(4)	1.4936(4)	2.1080(6)	1.7318(8)	1.6832(0)	1.7138(9)	1.7156(8)	2.2057(7)	2.2571(1)

Nous avons les distances P-Oi et Al-Oi qui sont en conformité avec les résultats de [21]. Les distances P-Ow2 et Al-Ow1, Al-Ow2 supérieures à 2Å ont été déjà citées dans la littérature dans l'étude des aluminophosphates hydratés avec l'aluminium octaédrique et le phosphore de coordinance 5. Les angles des liaisons interatomiques auxquelles participent les molécules d'eau dans AF1 calciné sont données dans le **Tableau 6**.

Tableau 6 : Angles de liaisons interatomiques dans AF1 calciné contenant les molécules d'eau

Liaisons interatomiques	Ow2-P-O2	Ow2-P-O1	Ow2-P-O4	Ow2-P-O3
Angle en °	90.86 (3.58)	160.39 (3.72)	61.94 (1.35)	62.90 (1.23)

Ow1-Al-O2	Ow1-Al-O3	Ow1-Al-O4	Ow1-Al-O1	Ow2-Al-O2	Ow2-Al-O3	Ow2-Al-O4	Ow2-Al-O1	Ow2-Al-Ow1
68.73 (1.51)	77.22 (0.80)	75.28 (0.83)	174.31 (1.53)	122.88 (3.06)	56.97 (0.48)	56.05 (0.38)	131.30 (3.07)	54.15 (1.98)

L'atome d'aluminium est en configuration octaédrique du fait qu'il est lié aux 4 atomes d'oxygène (appelé Oi ou Oj) et en plus aux 2 atomes d'oxygène des 2 molécules d'eaux (appelé Owi). Cette configuration est réconforté par les variations d'angle autour de l'aluminium (Les angles Oi-Al-Oj varient entre 104.25° et 113.06° ; les angles Owi-Al-Oi varient entre 56.05° et 174.31° et l'angle Ow2-Al-Ow1 est égal à 54.15°) ce qui avait été annoncé auparavant par G. POULET parlant du phénomène d'hydratation des aluminophosphates [22]. L'atome de phosphore quant à lui, est lié aux 4 atomes d'oxygène et en plus à l'oxygène d'Ow2 d'où à une coordinance 5. Les angles Ow2-P-Oi varient entre 61.94° et 160.39°, les angles Ow2-P-O3, Ow2-P-O4 sont de l'ordre de 62° et les angles Ow2-Al-O3, Ow2-Al-O4 de l'ordre de 56° sont faibles. Cette proximité de Ow2 des atomes d'oxygènes O3 et O4 explique la grande agitation thermique de la molécule Ow2. Les angles Al-Oi-P varient entre 147.55° et 174.96°. Ce type d'angle est presque plat avec l'atome O2 pour lequel l'angle

Al-O2-P est 174.96° . Cela justifie en partie la grande agitation thermique d'O2 par rapport à O1, O3 et O4. La configuration octaédrique de l'aluminium dans $\text{AlPO}_{4.5}$ avait été montrée par la technique de résonance magnétique nucléaire ^1H , ^{27}Al , ^{31}P . Cette étude disait qu' $\text{AlPO}_{4.5}$ contenait deux types de molécules d'eau dont un type relié à l'atome d'aluminium lui permettant d'être octaédrique [22, 23]. Après l'affinement des différentes structures d'AFI calciné et calciné imprégné avec la présence des molécules d'eau dans la charpente d'AFI, on obtient le **Tableau 7** donnant les 4 premiers pics restant les plus intenses.

Tableau 7 : Liste des 4 premiers pics après l'affinement de la structure d'AFI calciné contenant les molécules d'eau

Q	x	y	z	Peak	Dist.1	Dist.2	Dist.2	Dist.4
Q1	0.5025	0.3627	0.2389	0.71	0.6202	1.67Al	1.68P	2.000w1
Q2	0.4170	0.3393	0.2399	0.66	0.5902	1.67Al	1.68P	2.000w1
Q3	0.1430	0.1716	0.2455	0.60	3.5203	3.5403	3.6702	3.6901
Q4	0.4471	0.2055	0.0391	0.49	0.5801	1.59Al	1.65P	2.2902

En interprétant ce **Tableau**, nous confirmons que les pics résiduels ne sont plus significatifs car non seulement leur densité électronique est petite, mais en plus ces pics résiduels sont très proches des atomes voisins.

4. Conclusion

Les déterminations structurales montrent que la charpente d'AFI calcinée et calciné imprégné soit par le thio-indigo ou soit par le permanganate de potassium comporte deux molécules d'eau désordonnées, situées sur une position spéciale $(1/2, 1/2, z_i)$ et distante de 2.204\AA dans l'anneau à 4T. La structure d'AFI calciné a donc pour formule chimique $[\text{Al}_{12}\text{P}_{12}\text{O}_{48}] \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. Les cristaux d'AFI calciné et imprégné par une solution éthanolique de thio-indigo ou par une solution aqueuse de permanganate de potassium conservent toujours leur charpente. Alors Les eaux polluées par le thio-indigo ou le permanganate de potassium n'affectent pas la structure d'AFI calciné.

Références

- [1] - S. T. WILSON, B. M. LOK, C. A. MESSINA, T. R. CANNAN and E. M. FLANIGEN, *J. Am. Chem. Soc.*, 104 (1982) 1146
- [2] - J. M. BENNETT, J. P. COHEN, E. M. FLANIGEN, J. J. PLUTH and J. V. SMITH, "Crystal structure of tetrapropylammonium hydroxide-Aluminium phosphate number 5", *ACS Symp. Ser.*, 218 (1983) 109 - 118
- [3] - J. A. STOEGER, C. M. VEZIRI, M. PALIMINO, A. CORMA, N. K. KANELLOPOULOS, M. TSAPATIS and G. N. KARANIKOLOS, "On stability and performance of highly c-oriented columnar $\text{AlPO}_{4.5}$ and $\text{CoAlPO}_{4.5}$ membranes", *Microporous and Mesoporous Materials*, 147 (2012) 286 - 294
- [4] - S. C. LAHA, G. KAMALAKAR and R. GLASER, *Micropor. Mesopor. Mater.*, 90 (2006) 45
- [5] - P. LOTTI, G. D. GATTA, D. COMBONI, M. MERLINI, L. PASTERO and M. HANFLAND, "AlPO_{4.5} zeolite at high pressure : Crystal-fluid interaction and elastic behavior" *Science direct, Microporous and Mesoporous Materials*, Vol. 228, (2016) 158 - 167
- [6] - Z. LIU, Z. YAO, M. YAO, J. LY, S. CHEN, Q. LI, H. LY, T. WANG, S. LU, R. LIU, B. LIU, J. LIU, Z. CHEN, B. ZOU, T. CUI and B. LIU, "High-pressure behavior of bromine confined in the one-dimensional channels of zeolite $\text{AlPO}_{4.5}$ single crystals" *The Journal of Chemical Physics*, 145 (12) (2016) 124319
- [7] - Z. YAO, J. Y. LY, B. LIU, B. B. LIU and B. YANG, "New structural phase obtained by exerting high pressure on $(\text{Br}_2)_n@$ AFI composite material", *Modern Physics Letters B*, Vol. 32, N° 16 (2018) 1850171

- [8] - S. CHEN and al., "A high pressure Raman study on confined individual iodine molecules as molecular probes of structural collapse in the $\text{AlPO}_{4.5}$ framework" *Phys. Chem.*, (2018)
- [9] - P. DEMONTIS, J. G. GONZALEZ and G. B. SUFFRITTI, "Water Adsorbed in $\text{AlPO}_{4.5}$ and SSZ-24 Studied by Molecular Dynamics Simulation", *J. Phys. Chem. C*, 116 (20) (2012) 11100 - 11109
- [10] - Y. G. BUSHUEY, G. SASTRE, J. V. de J. ORTIZ, J. GALVEZ, "Water-Hydrophobic Zeolite Systems", *Journal of Physical Chemistry C*, 116 (47) (2012) 24916 - 24929
- [11] - ZK TANG, H. D. SUN, J. WANG, J. CHEN and G. LI, "Mono-sized single-wall carbon nanotubes formed in channels of $\text{AlPO}_{4.5}$ single crystal", *Applied Physics Letters*, (1998)
- [12] - X. XU, S. RUAN, J. ZHAI, L. LI, J. PEI and Z. TANG, "Facile active control of a pulsed erbium-doped fiber laser using modulation depth tunable carbon nanotubes", (2018)
- [13] - W. LIANG, S. YU, K. TANG and J. LIU, "Oriented zeolite AFI membranes: anti-water and quick blood-clot", *IOP Conference Series : Materials Science and Engineering*, (394) (2018) 022048
- [14] - A. ALNAAMA, "Synthesis and characterization of nanocrystalline aluminophosphate $\text{AlPO}_{4.5}$ molecular sieve", *Journal of engineering*, Vol. 24, N°3 (2018) 161 - 175
- [15] - H. FOMBA, www.jstm.org, Environnement, La teinture : une source de pollution des eaux, 12 : 12 (15/08/2016)
- [16] - Journal Essor du Mali, Pollution : la teinture, nuisible à l'environnement, (04/08/2009)
- [17] - ROTH, Fiche de données de sécurité sur le permanganate de potassium, numéro article P752, (05/02/2019)
- [18] - E. AUBERT, « Etude des interactions de molécules hôtes dans les zéolithes synthétiques par diffraction des rayons X à haute résolution », Université Henri Poincaré, Nancy I, 24 (2003)
- [19] - J. CARO, I. GIRNUS, "Verified syntheses of zeolitic materials, AFI $\text{AlPO}_{4.5}$ ", *Ed. Robson H., Elsevier, Amsterdam*, (2001) 90 - 91
- [20] - N. FLOQUET, J. P. COULOMB, N. DUFAU, and G. ANDRE, "Structure and Dynamics of Confined Water in $\text{AlPO}_{4.5}$ Zeolite", *J. Phys. Chem. B*, 108 (35) (2004) 13107 - 13115
- [21] - G. J. KLAP, H. V. KONINGSVELD, H. GRAAFSMA and A. M. M. SCHREURS, "Absolute configuration and domain structure of $\text{AlPO}_{4.5}$ studied by single-crystal X-ray diffraction", *Microporous and Mesoporous Materials*, 38 (2000) 403 - 412
- [22] - G. POULET, "Phénomène d'hydratation des aluminophosphates : étude couplée expérience - théorie", Lyon, (2003) 26 - 28
- [23] - I. KUSTANOVICH and D. GOLDFARB, *J. Phys. Chem.*, 95 (1991) 8818