

Verres, vitrocéramiques et céramiques transparentes à base de TeO_2 pour l'optique: compréhension des phénomènes ordre-désordre

Gaëlle DELAIZIR, Sébastien Chenu, Jean-René Duclère, Maggy Colas, Julie Cornette,
Yann Launay, François Brisset, Mathieu Allix, Cécile Genevois, Emmanuel Veron,
Pierre-Eugène Coulon, Philippe Thomas

Le 3 juillet 2019

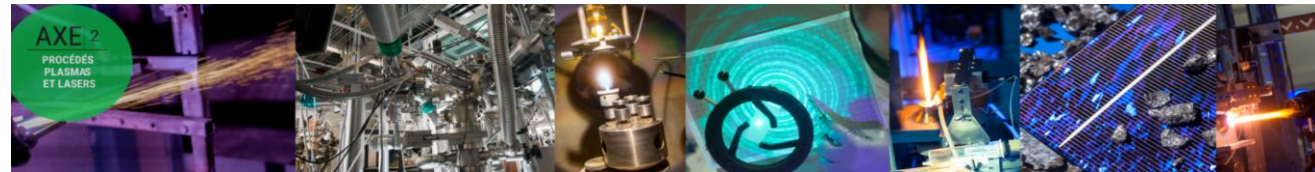


Le laboratoire IRCER en quelques mots...

Axe 1 - procédés céramiques



Axe 2 - procédés plasmas et lasers



Axe 3 - organisation structurale multiéchelle des matériaux



Axe 4 - céramiques sous contraintes environnementales



1 plateforme de caractérisations (CARMALIM)

SOMMAIRE

Introduction

I – Vitrocéramiques transparentes tellurites

- A-1 Elaboration des vitrocéramiques
- A-2 Caractérisations thermiques/structurales et microstructurales/optiques

II – Céramiques transparentes tellurites obtenues par cristallisation complète et congruente du verre

- A-1 Etude des transitions de phase et analyses micro/nanostructurales
- A-2 Elaboration des céramiques transparentes dopées Nd^{3+}
- A-3 Démonstration de l'émission laser

Conclusions/Perspectives

SOMMAIRE

Introduction

I – Vitrocéramiques transparentes tellurites

- A-1 Elaboration des vitrocéramiques
- A-2 Caractérisations thermiques/structurales et microstructurales/optiques

II – Céramiques transparentes tellurites obtenues par cristallisation complète et congruente du verre

- A-1 Etude des transitions de phase et analyses micro/nanostructurales
- A-2 Elaboration des céramiques transparentes dopées Nd^{3+}
- A-3 Démonstration de l'émission laser

Conclusions/Perspectives

Contexte

Quelques mots sur les verres...

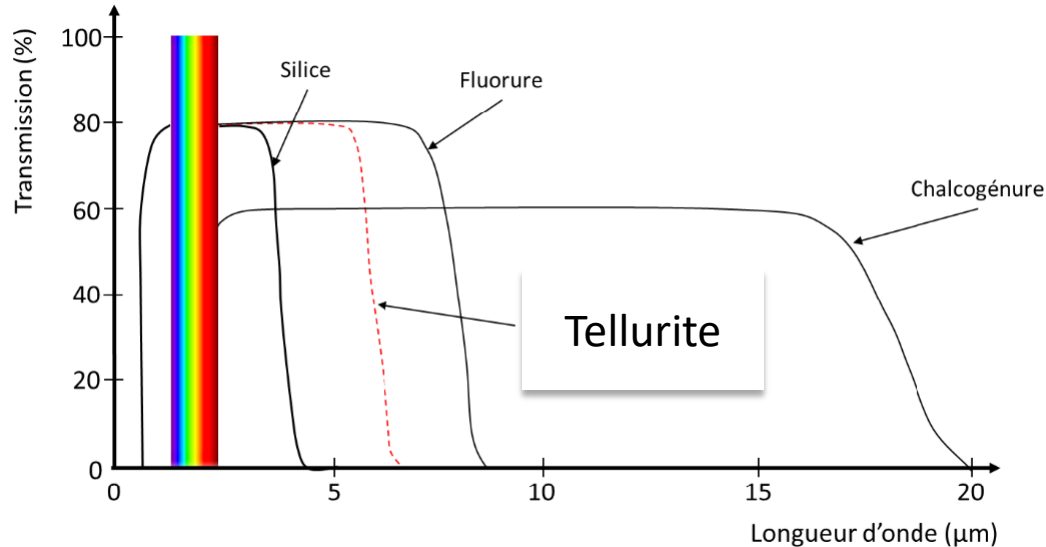


Tableau périodique des éléments
et quelques-unes de leurs applications pratiques

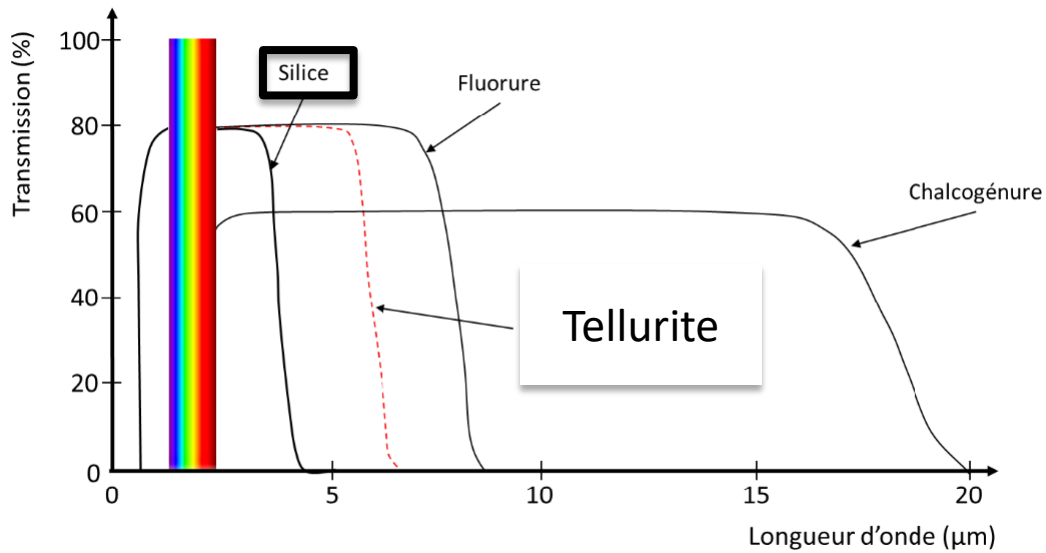
remplissage des électrons au niveau s
remplissage des électrons au niveau p
remplissage des électrons au niveau d
remplissage des électrons au niveau f

- Un verre est un matériau amorphe (structure désordonnée) obtenu à partir du refroidissement rapide d'un liquide et présentant le phénomène de transition vitreuse T_g
- Chaque verre présente une fenêtre de transmission

Contexte

Quelques mots sur les verres...

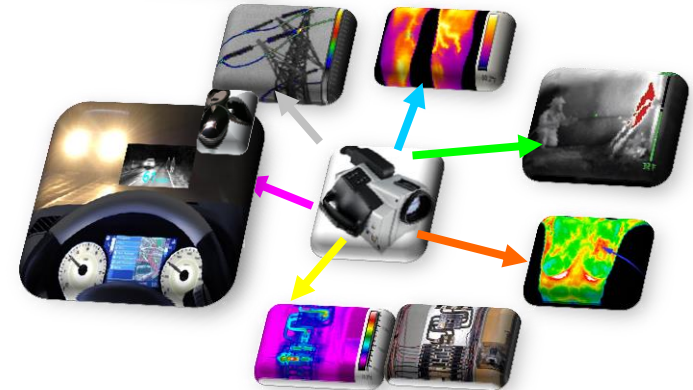
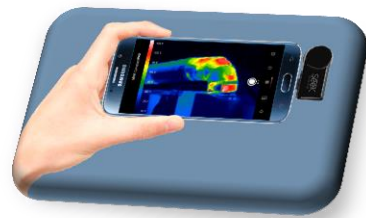
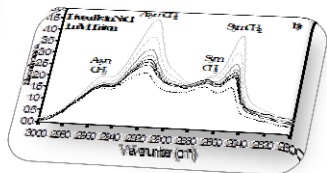
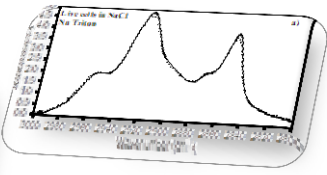
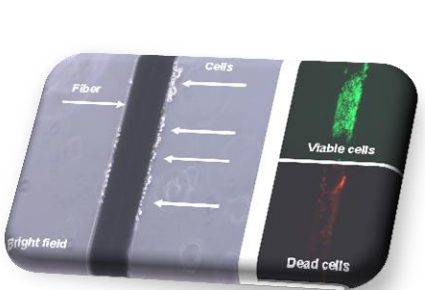
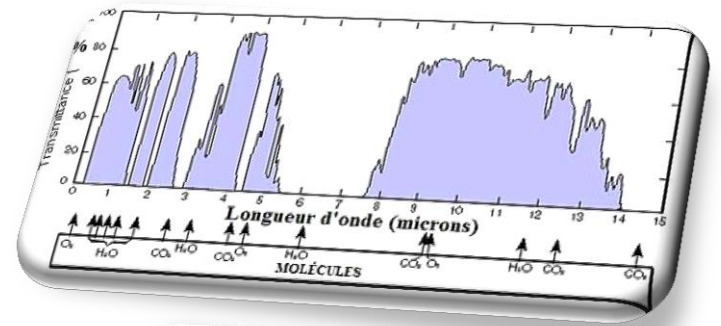
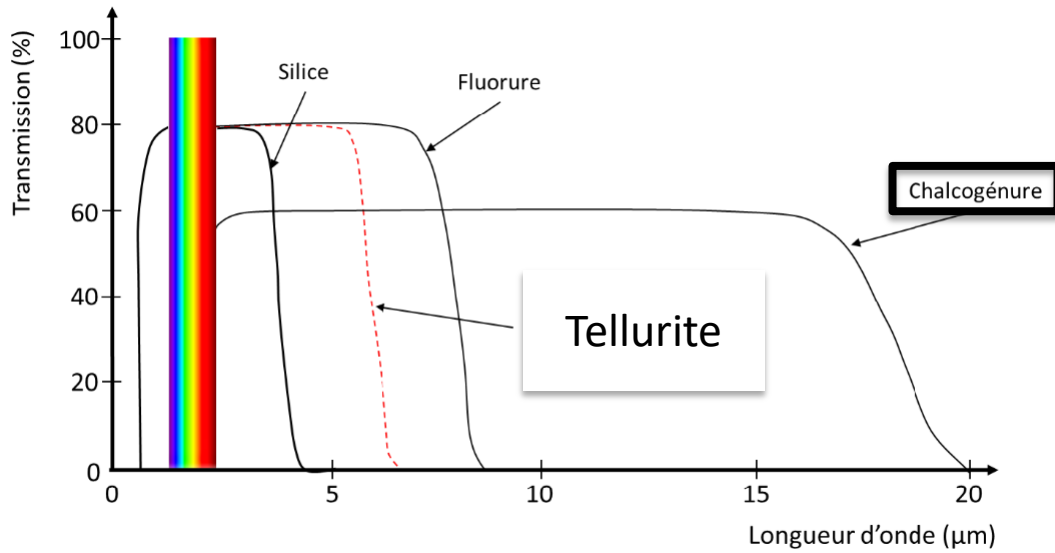
Verres à base de silice



Contexte

Quelques mots sur les verres...

Verres de chalcogénures

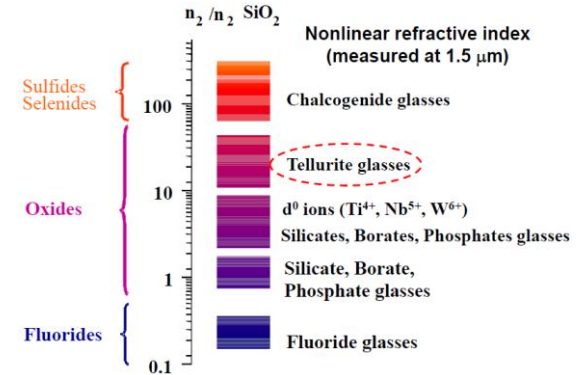
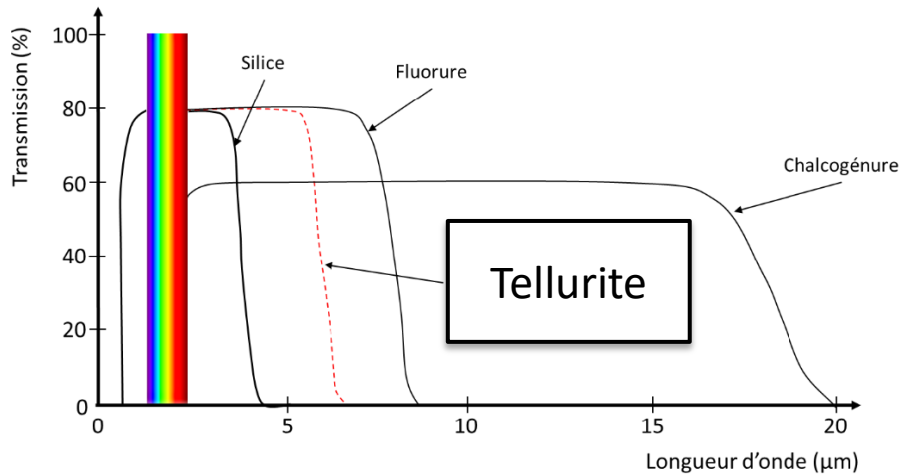


Contexte

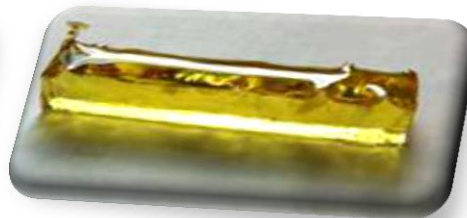
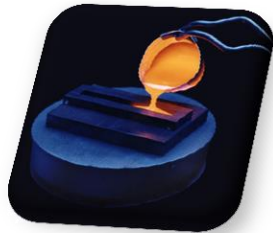
Quelques mots sur les verres...

Verres de tellurites (à base de TeO_2)

- Fenêtre de transmission du visible jusqu'à 5-6 μm
- Verre à bas point de fusion ($< 900^\circ\text{C}$) et synthèse facilitée sous air
- Indices de réfraction linéaires et non linéaires élevés ($n \approx 2,0 - 2,2$)



M. Dussauze et al. *Int. J. Appl. Glass Sci.* (2012)

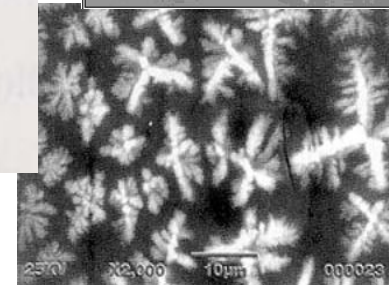
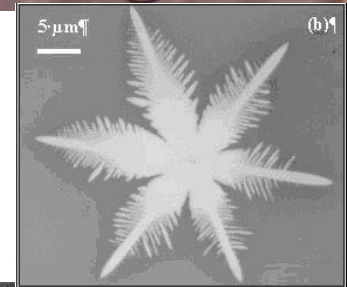
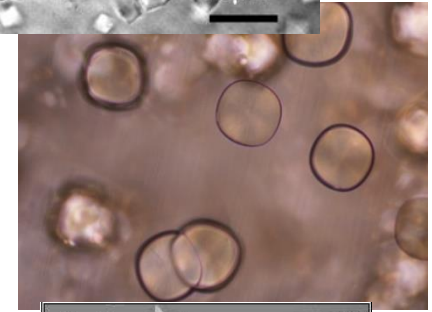
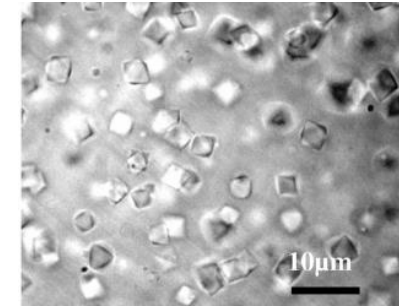
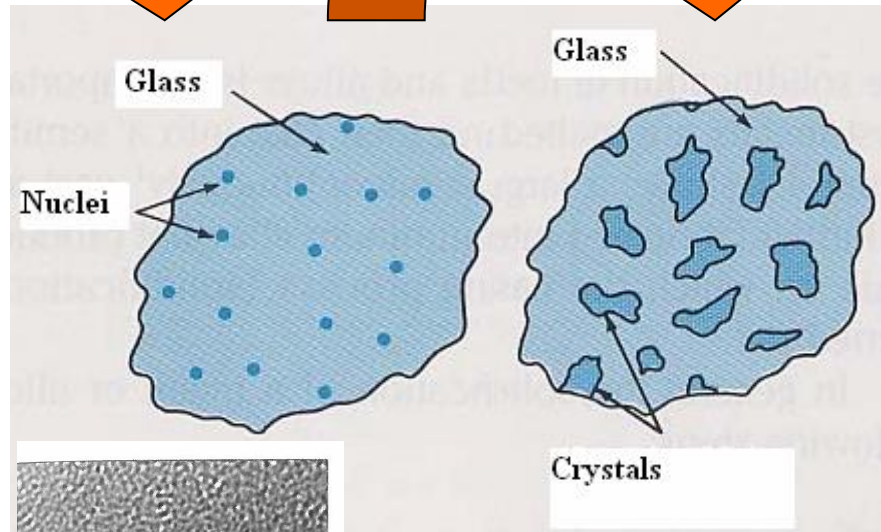
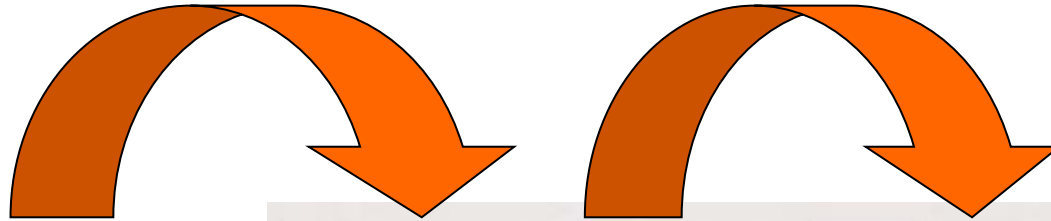
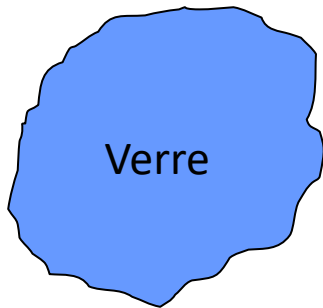


Contexte

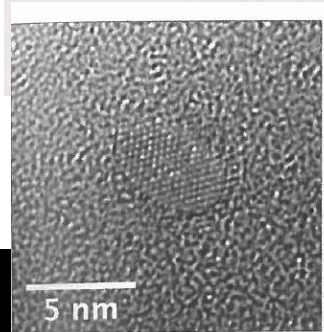
Quelques mots sur les vitrocéramiques...

Traitement thermique $T > T_g$

Traitement thermique ($T > T_g$)



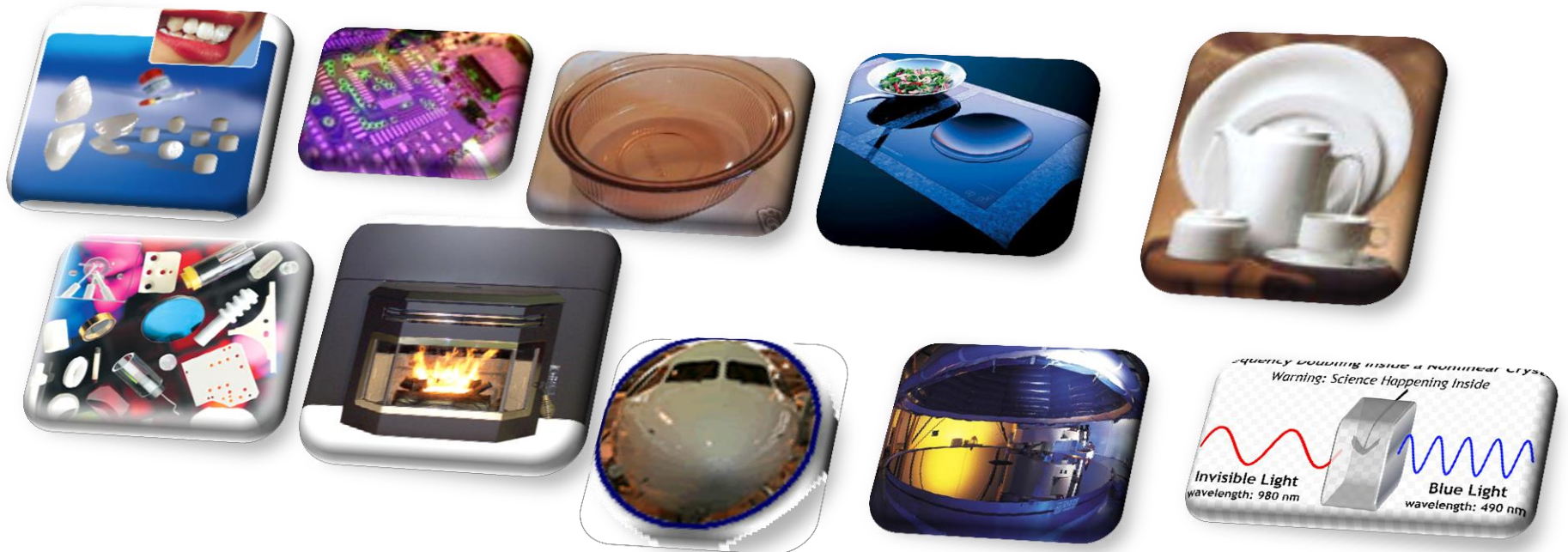
Microscopie Electronique en Transmission (MET)



Contexte

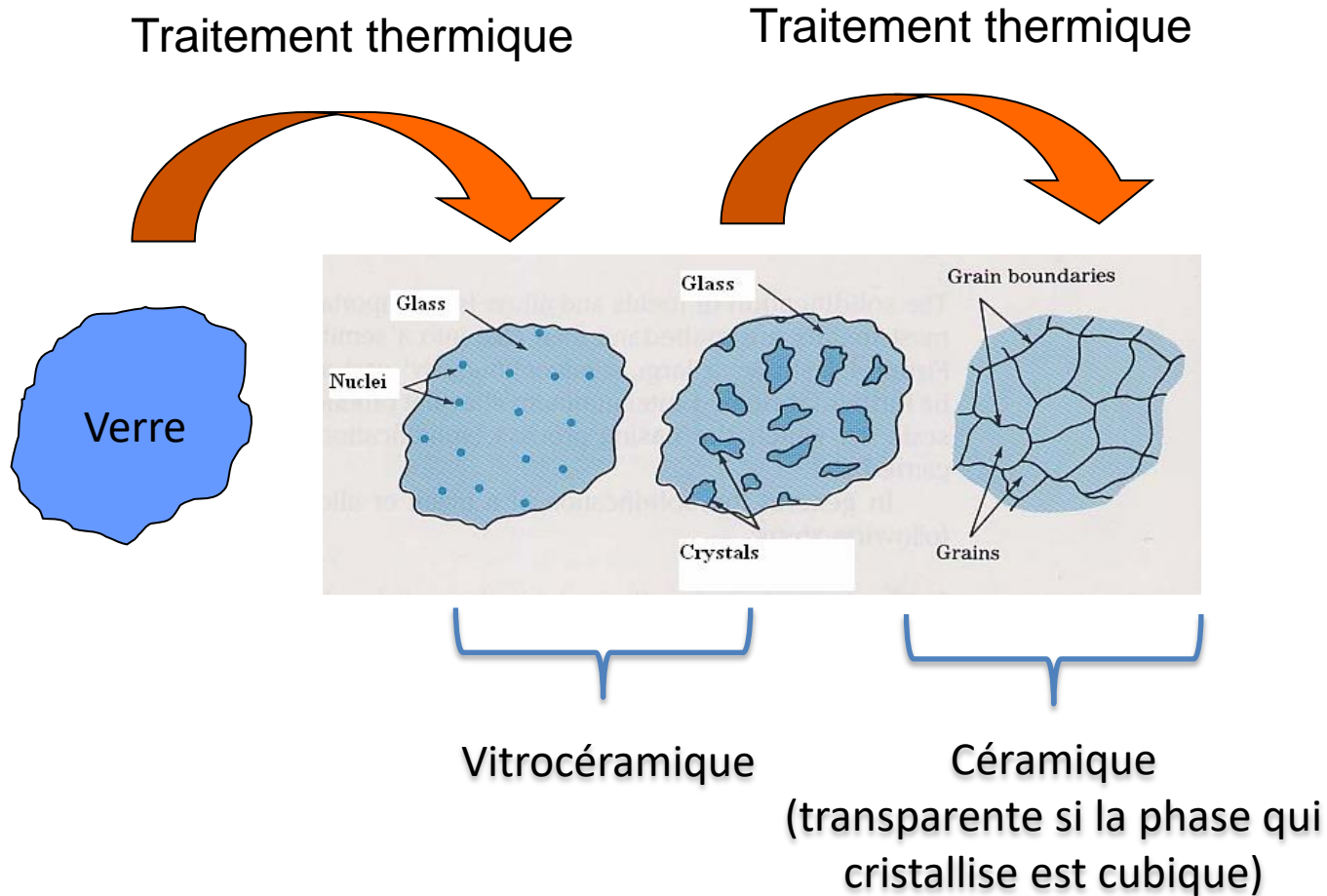
Quelques mots sur les vitrocéramiques...

- **Avantages des vitrocéramiques:**
 - Mise en forme aisée
 - Augmentation des propriétés mécaniques
 - Ajustement du coefficient de dilatation thermique, α
 - Matériau non centro-symétrique (dépend de la phase cristalline) => propriétés optiques non linéaires
 - Propriétés optiques (luminescence)



Contexte

Quelques mots sur les céramiques



Contexte

Quelques mots sur les céramiques transparentes



Contexte

Quelques mots sur les céramiques transparentes

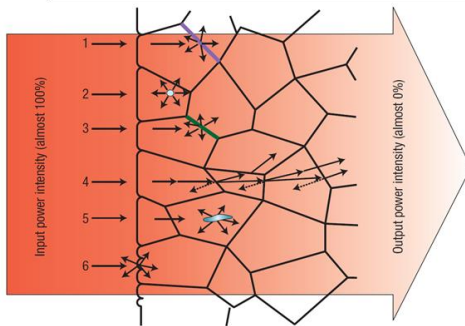


FRITTAGE

Majoritairement symétrie cubique...

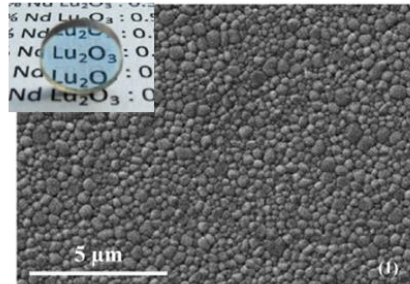
- YAG ($Y_3Al_5O_{12}$)
- Spinnelle ($MgAl_2O_4$)
- Y_2O_3 , Lu_2O_3
- ZrO_2 , ...

...mais aussi anisotrope



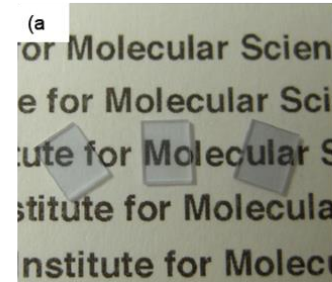
A. Ikesue et al. *Nature Photonics* (2008)

Frittage SPS, HUP, HIP



R. Boulesteix et al. *Scripta Mater.* (2014)

Céramique anisotrope Nd:FAP (orientation des grains sous champ magnétique)



Y. Sato et al. *Opt. Mater. Express* (2014)

Frittage sous vide



T. Epicier et al. *J. Mater. Chem.* (2012)

Cahier des charges

- ✓ Joints de grains fins
- ✓ Porosité < 0,01%
- ✓ Absence de phase(s) secondaire(s)
- ✓ Précurseurs de haute pureté
- ✓ Polissage optique

Contexte

Quelques mots sur les céramiques transparentes

Simple
Peu coûteuse
Sans pression appliquée

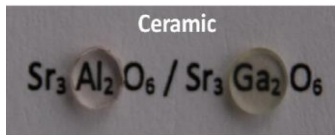
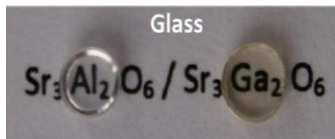
Propriétés
optiques des
céramiques

Facilité de mise
en forme du verre

Voie non-
conventionnelle

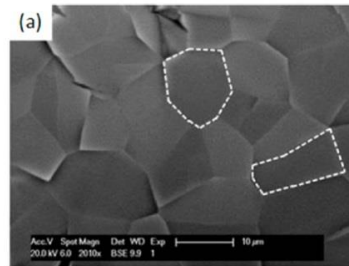
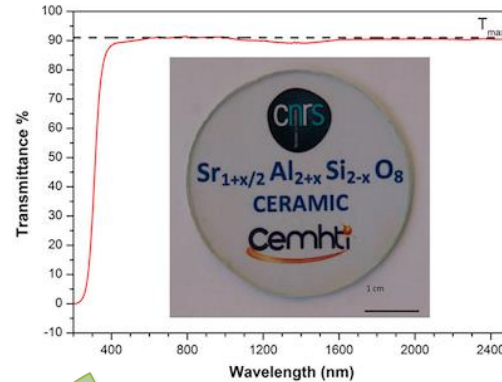
**CRISTALLISATION
COMPLETE DU VERRE**

Aluminate et gallate de strontium

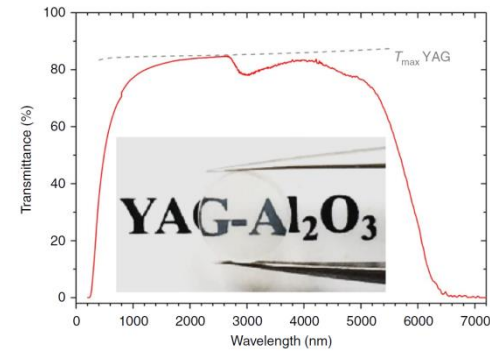


S. Alahraché et al. Chem. Mater. (2013)

Silico-aluminate



Nanocéramiques YAG-
 Al_2O_3



X. Ma et al. Nat. Commun. (2018)

Contexte

Quelques mots sur les céramiques...

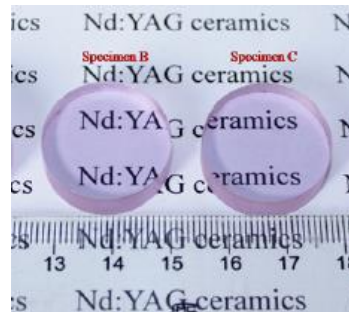
Applications des céramiques transparentes

Fenêtres IR



J. Cheng et al. J. Mater. Sci. Lett. (2001)

Milieu amplificateur laser



W. Liu et al. Ceram. Int. (2012)

Scintillateurs



N. Cherepy et al. SPIE. (2010)

Armures transparentes



A. Goldstein et al. JECS (2012)

SOMMAIRE

Introduction

I – Vitrocéramiques transparentes tellurites

- A-1 Elaboration des vitrocéramiques
- A-2 Caractérisations thermiques/structurales et microstructurales/optiques

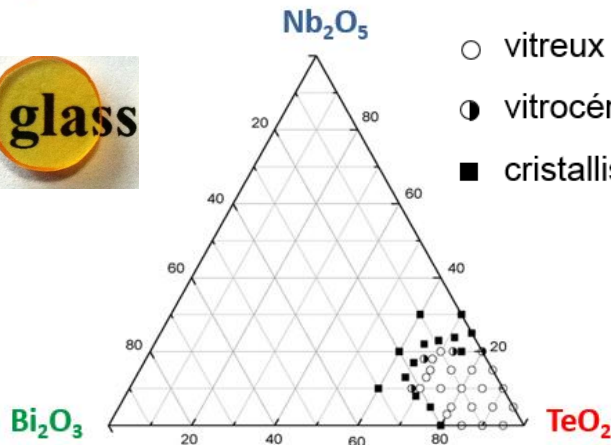
II – Céramiques transparentes tellurites obtenues par cristallisation complète et congruente du verre

- A-1 Etude des transitions de phase et analyses micro/nanostructurales
- A-2 Elaboration des céramiques transparentes dopées Nd^{3+}
- A-3 Démonstration de l'émission laser

Conclusions/Perspectives

Vitrocéramiques transparentes tellurites

Choix de la composition vitreuse : système $\text{TeO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5$



- vitreux
- ◐ vitrocéramique
- cristallisée

2 compositions vitreuses étudiées :

- 85,72 TeO_2 - 7,14 Bi_2O_3 - 7,14 Nb_2O_5
($\text{Bi}_{0,5}\text{Nb}_{0,5}\text{Te}_3\text{O}_8$: phase cubique)
- 75 TeO_2 - 12,5 Bi_2O_3 - 12,5 Nb_2O_5



Propriétés d'optique
non-linéaire



Propriétés
thermomécaniques



Cristallisation
en volume

Cristallisation congruente et la phase qui cristallise est de symétrie **cubique**

Y. Wang et al., *Materials Chemistry and Physics*, **113**, 407-411 (2009)

J. Galy et al., *C. R. Acad. Sci., Ser. C*, **270**, 1987-1990 (1970)

M. Allix et al., *Advanced Materials*, **24**, 5570-5575 (2012)

Vitrocéramiques transparentes tellurites

Choix de la composition vitreuse : système $\text{TeO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5$

Protocole expérimental

Synthèse du verre : fusion du mélange de précurseurs à 850°C pendant 30 min dans un creuset Pt suivie d'une trempe

Traitement thermique $T > T_g$

85,72 TeO_2 - 7,14 Bi_2O_3 - 7,14 Nb_2O_5

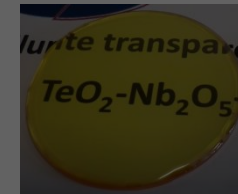
(Verre: $T_g \sim 350^\circ\text{C}$, $T_c \sim 410^\circ\text{C}$)

vitrocéramique



75 TeO_2 - 12,5 Bi_2O_3 - 12,5 Nb_2O_5

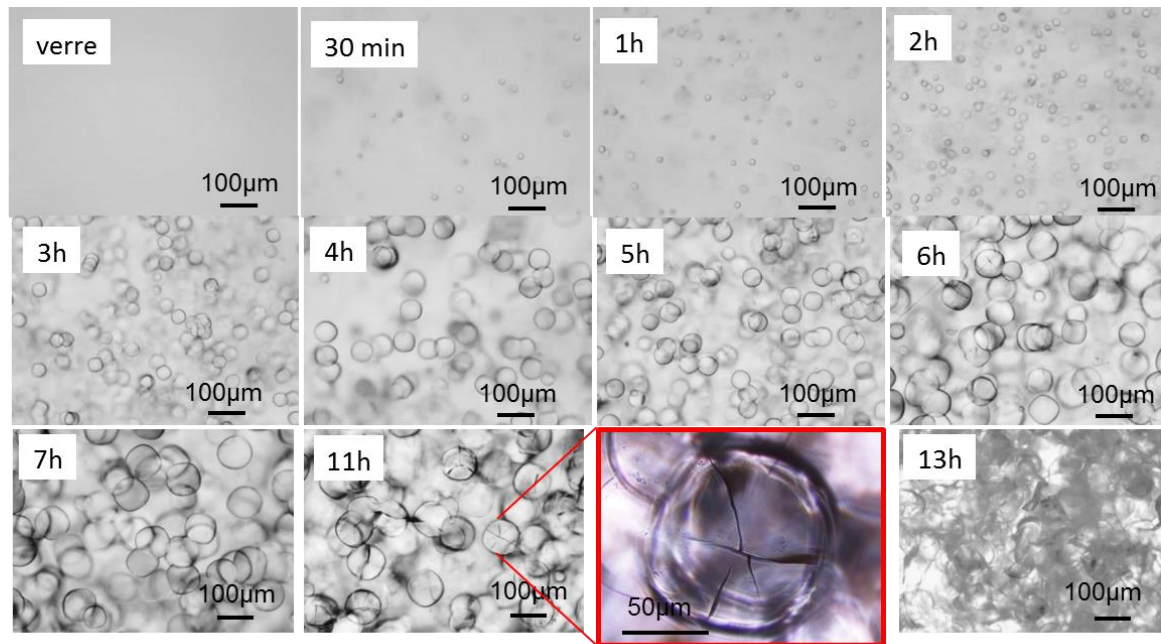
céramique



Vitrocéramiques transparentes tellurites

Choix de la composition vitreuse : système $\text{TeO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5$

Microscopie optique : traitement thermique à 380°C



3 étapes : 1) $0 < t < 2\text{h}$: ↗ densité de cristaux, taille constante

2) $t > 2\text{h}$: ↗ densité et taille des cristaux

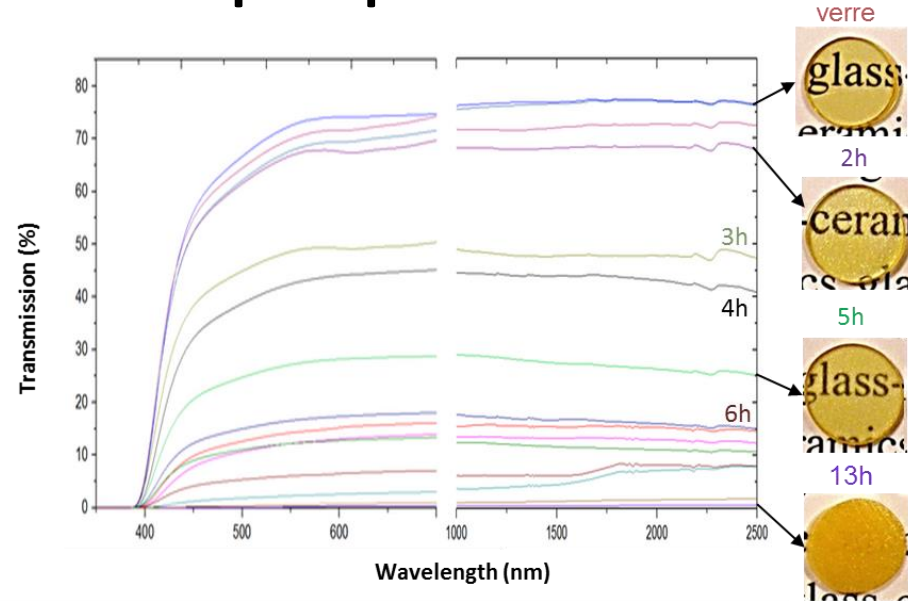
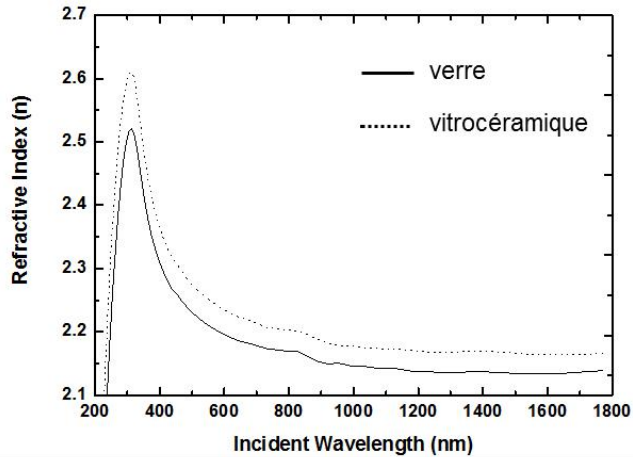
3) $t > 7\text{h}$: fissuration des sphérulites (contraintes mécaniques)

→ Formation de sphérulites dans tout le volume

Vitrocéramiques transparentes tellurites

Système $\text{TeO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5$

Propriétés optiques



➤ Léger Δn entre le verre et la vitrocéramique ($\sim 0,03$ à 1064 nm)

➔ réflexions de Fresnel aux interfaces sphérulites/verre

➤ $30\text{min} < t < 2\text{h}$: vitrocéramiques très transparentes

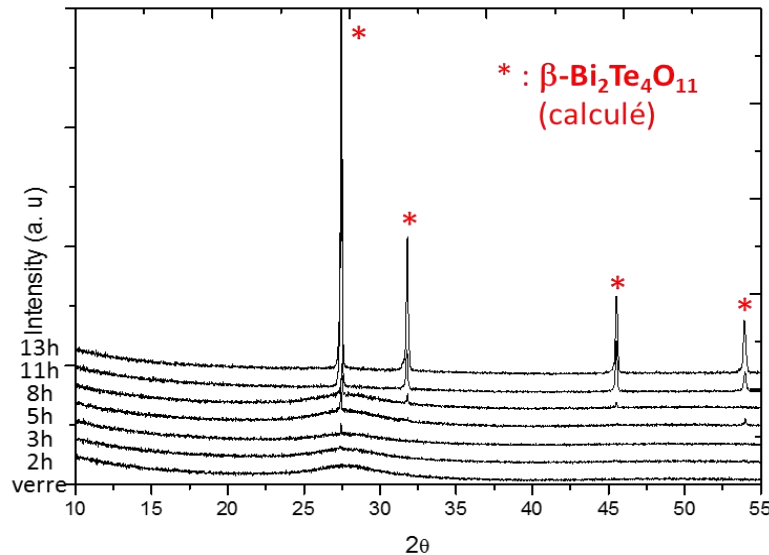
➤ $t > 7\text{h}$: fissuration des sphérulites ➔ opacification des échantillons

45/65

Vitrocéramiques transparentes tellurites

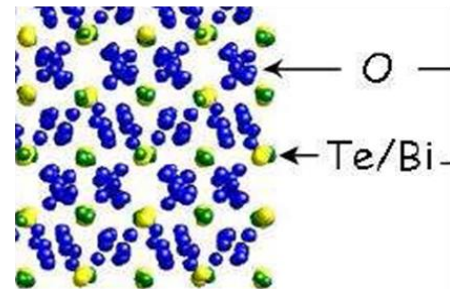
Système $\text{TeO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5$

Propriétés structurales : DRX



Très surprenant, le Bi et le Nb étant introduits avec les mêmes proportions !

- La **phase** qui **cristallise** semble être un « **anti-verre** » (phase isostructurale à $\beta\text{-Bi}_2\text{Te}_4\text{O}_{11}$)
- Anti-verre → **désordre anionique** mais cations ordonnés → **pics de Bragg observables**



[10] : O. Masson, *Journal of Solid State Chemistry*, **177**, 2168-2176 (2004)

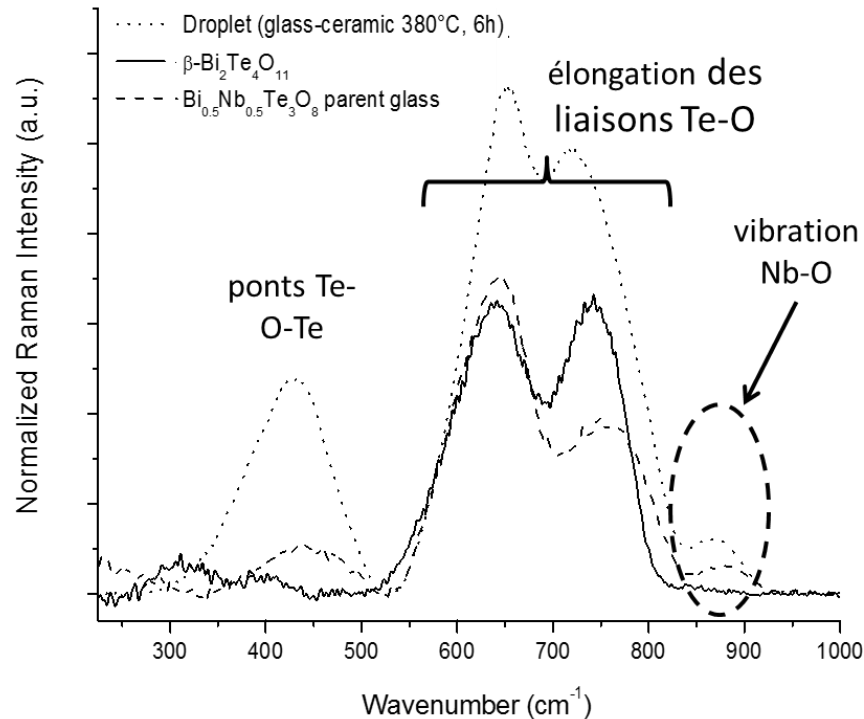
$\beta\text{-Bi}_2\text{Te}_4\text{O}_{11}$: structure type fluorine (CaF_2) avec des lacunes d' O^{2-} [10]

6/65

Vitrocéramiques transparentes tellurites

Système $\text{TeO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5$

Structure locale : spectroscopie Raman



➤ Bandes de vibration aussi larges dans les sphérulites que dans le verre

➔ Véritable preuve d'une phase « anti-verre »

➤ Cette phase « anti-verre » est clairement différente de β-Bi₂Te₄O₁₁ (vibration Nb-O)

➔ Nouvelle phase « anti-verre » de composition

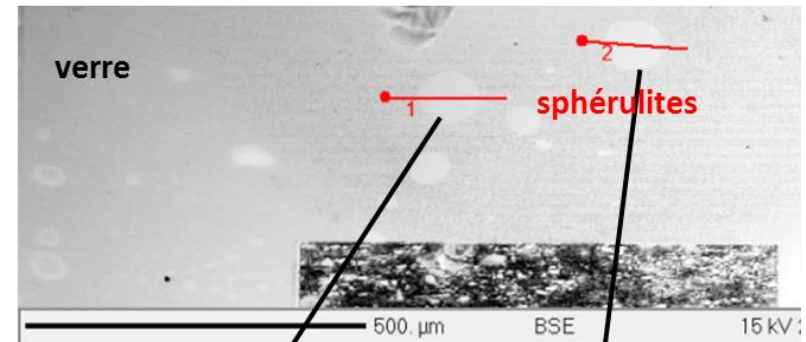
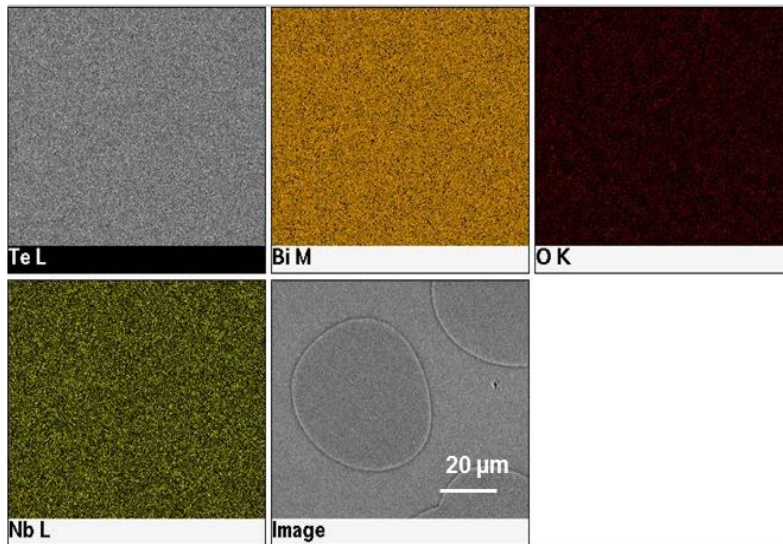
Bi_{0.5}Nb_{0.5}Te₃O₈ !

Vitrocéramiques transparentes tellurites

Système $\text{TeO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5$

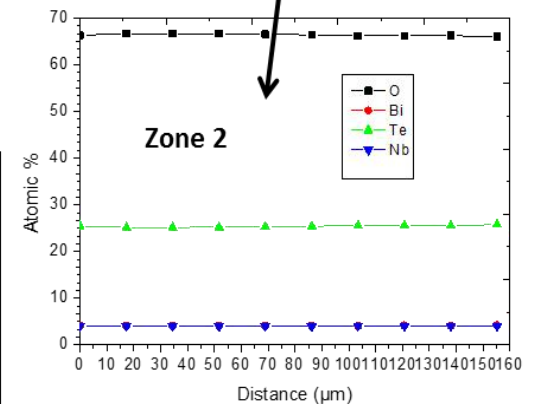
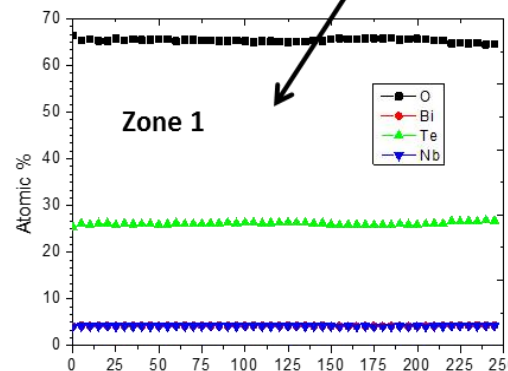
Analyse chimique : MEB-EDX, microsonde

Vitrocéramique : 380°C-6h



Les sphérulites ont la même composition chimique que la matrice vitreuse (66,7% O - 25%

mesure réalisée par Y. Launay
(IRCER, Limoges)

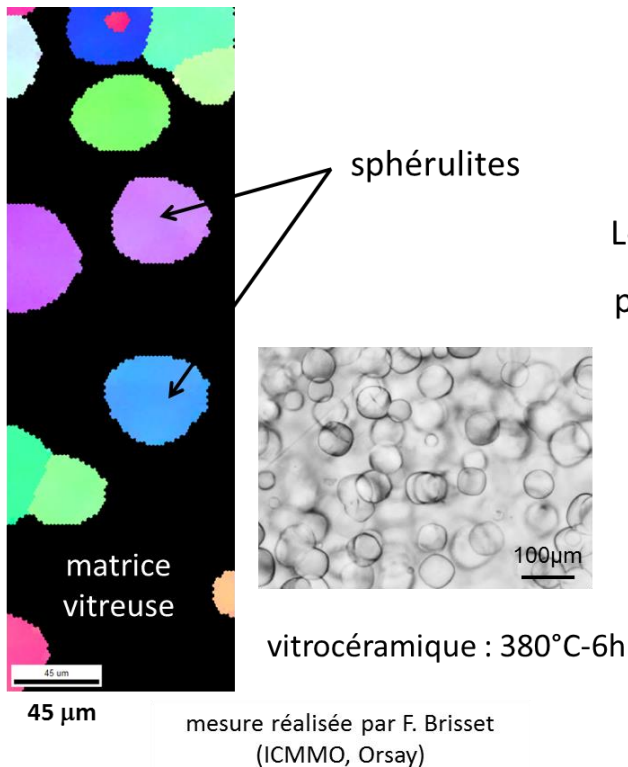


mesure réalisée par E. Leroy
(ICMPE, Thiais)

Vitrocéramiques transparentes tellurites

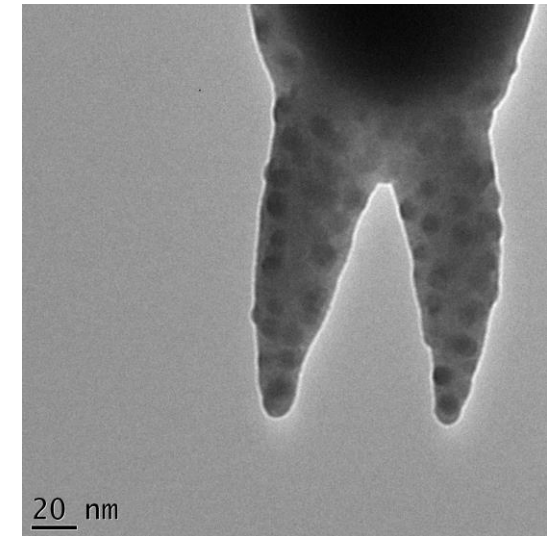
Système $\text{TeO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5$

Microstructure : Diffraction des électrons rétrodiffusés (EBSD)



Les caractérisations faites par EBSD prouvent que les **sphérulites** sont :

- **totale**ment cristallisées (indépendamment de leur taille)
- **orientées aléatoirement**



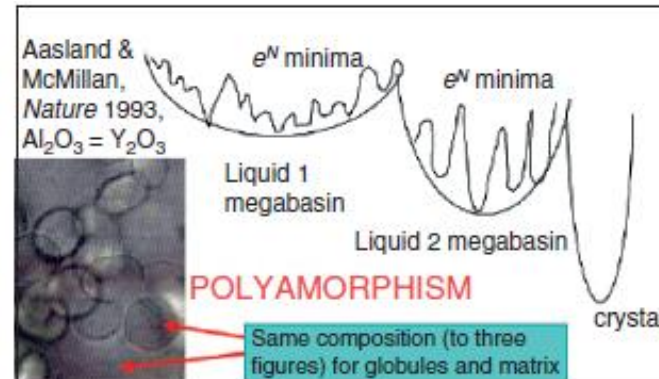
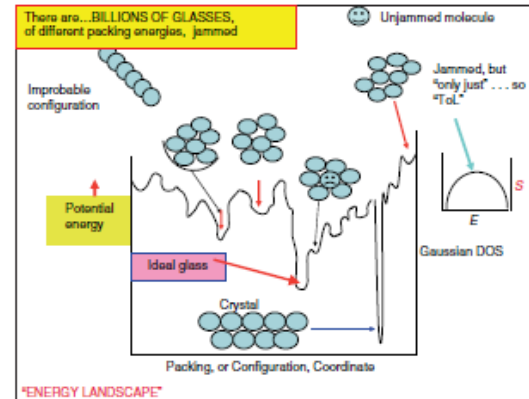
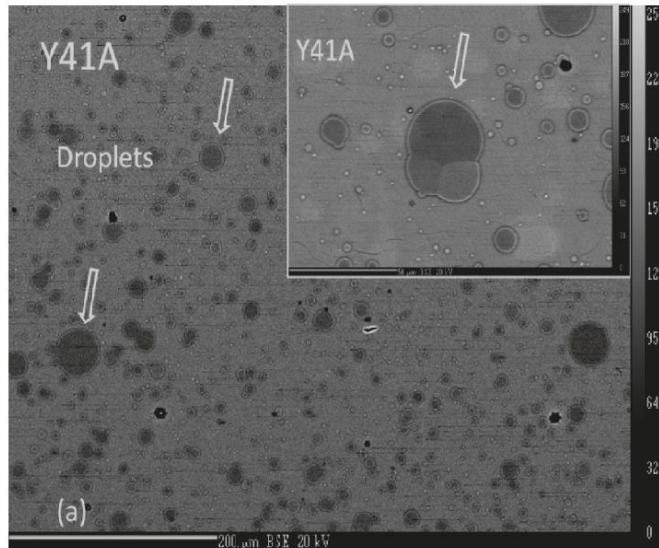
A. Bertrand et al., *Crystal Growth & Design*, **15**, 5086-5096 (2015)

Vitrocéramiques transparentes tellurites

Système $\text{TeO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5$

Vers du polyamorphisme?

Au sein d'un même matériau, 2 verres de même composition mais de densités différentes co-existent.



P. Mc Millan, Nature, 369 (1994)

C. A. Angell, MRS BULLETIN, vol 33 (2008)

SOMMAIRE

Introduction

I – Vitrocéramiques transparentes tellurites

- A-1 Elaboration des vitrocéramiques
- A-2 Caractérisations thermiques/structurales et microstructurales/optiques

II – Céramiques transparentes tellurites obtenues par cristallisation complète et congruente du verre

- A-1 Etude des transitions de phase et analyses micro/nanostructurales
- A-2 Elaboration des céramiques transparentes dopées Nd^{3+}
- A-3 Démonstration de l'émission laser

Conclusions/Perspectives

Vitrocéramiques transparentes tellurites

Choix de la composition vitreuse : système $\text{TeO}_2\text{-Bi}_2\text{O}_3\text{-Nb}_2\text{O}_5$

Synthèse du verre : fusion du mélange de précurseurs à 850°C pendant 30 min dans un creuset Pt suivie d'une trempe

Traitement thermique (en 1 ou 2 étapes)

85,72 TeO_2 -
7,14 Bi_2O_3 - 7,14
 Nb_2O_5

vitrocéramique



75 TeO_2 - 12,5 Bi_2O_3 -
12,5 Nb_2O_5

céramique



...cristallisation complète et congruente du verre

Mélange de précurseurs



Fusion/trempe



VERRE

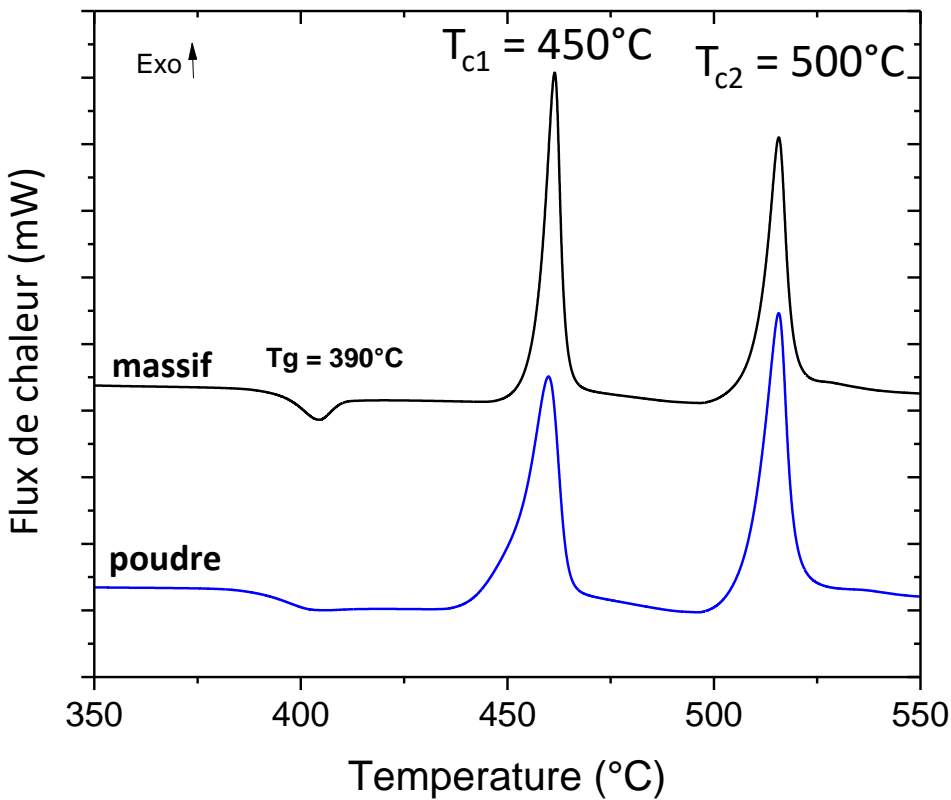
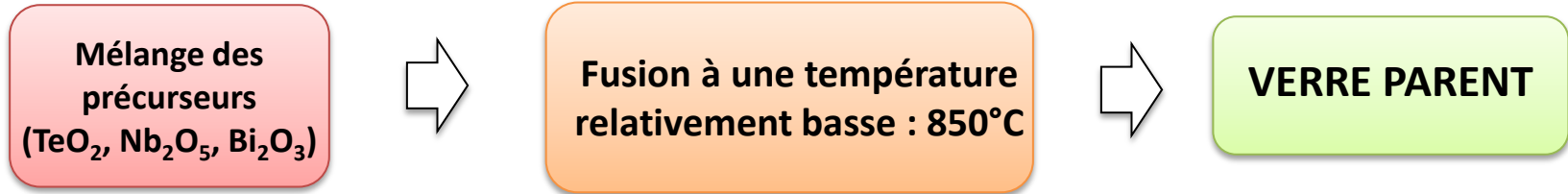


Cristallisation complète et congruente



Céramiques transparentes

Caractéristiques du verre 75 TeO₂ - 12,5 Nb₂O₅ - 12,5 Bi₂O₃

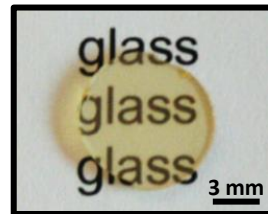
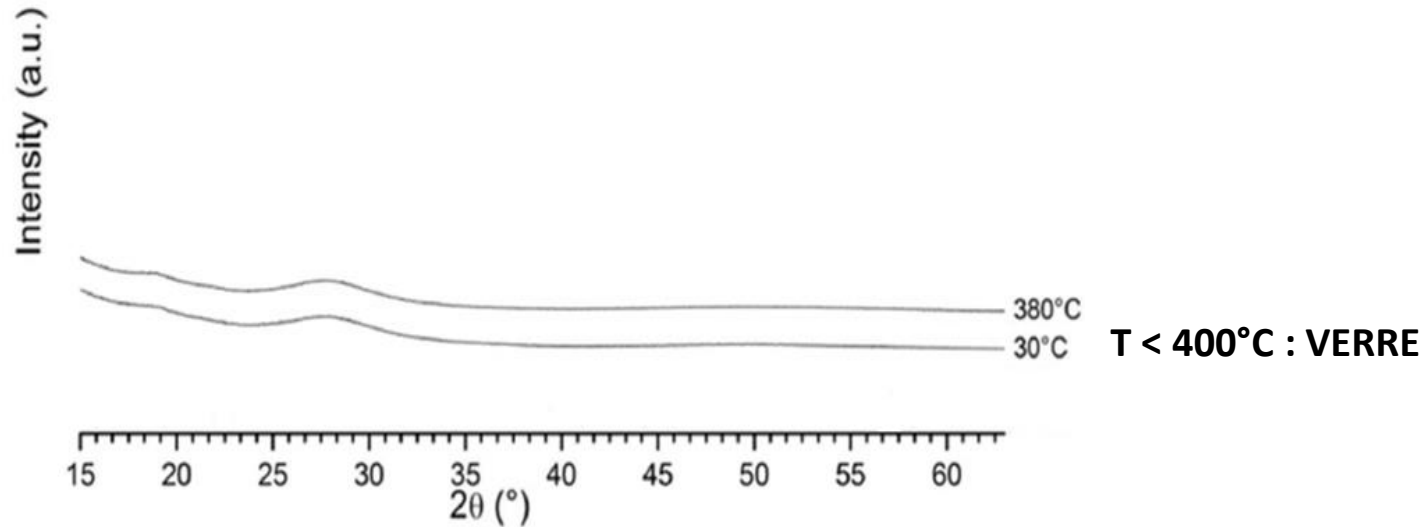


Courbes DSC similaires entre le verre sous forme de poudre et de massif



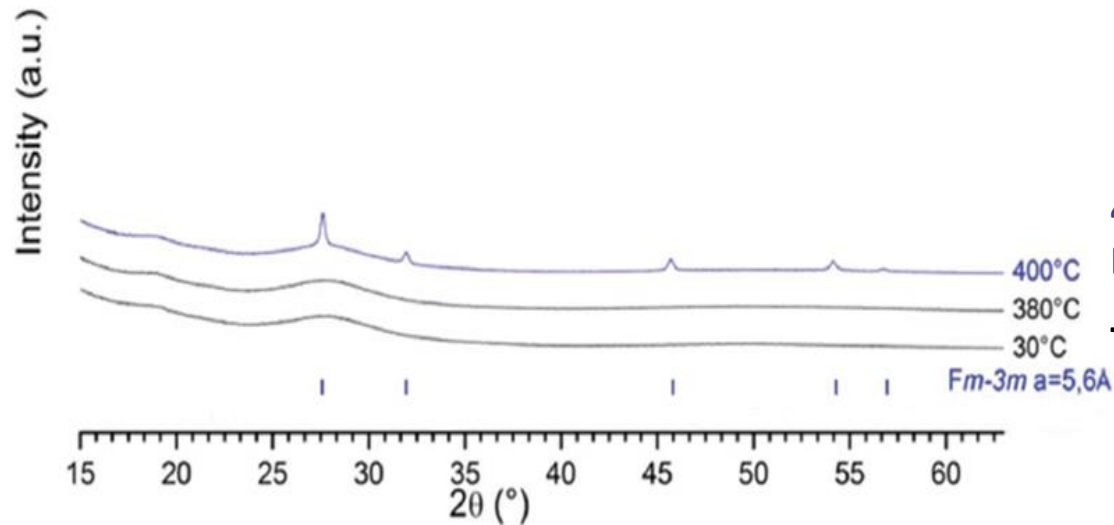
Cristallisation en volume

Thermodiffraction des rayons X

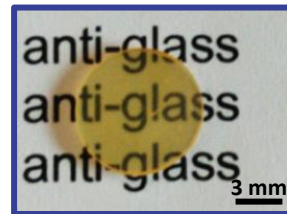
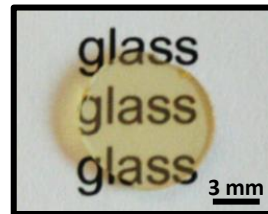


A. Bertrand et al. *Adv. Opt. Mater.* (2016)

Thermodiffraction des rayons X

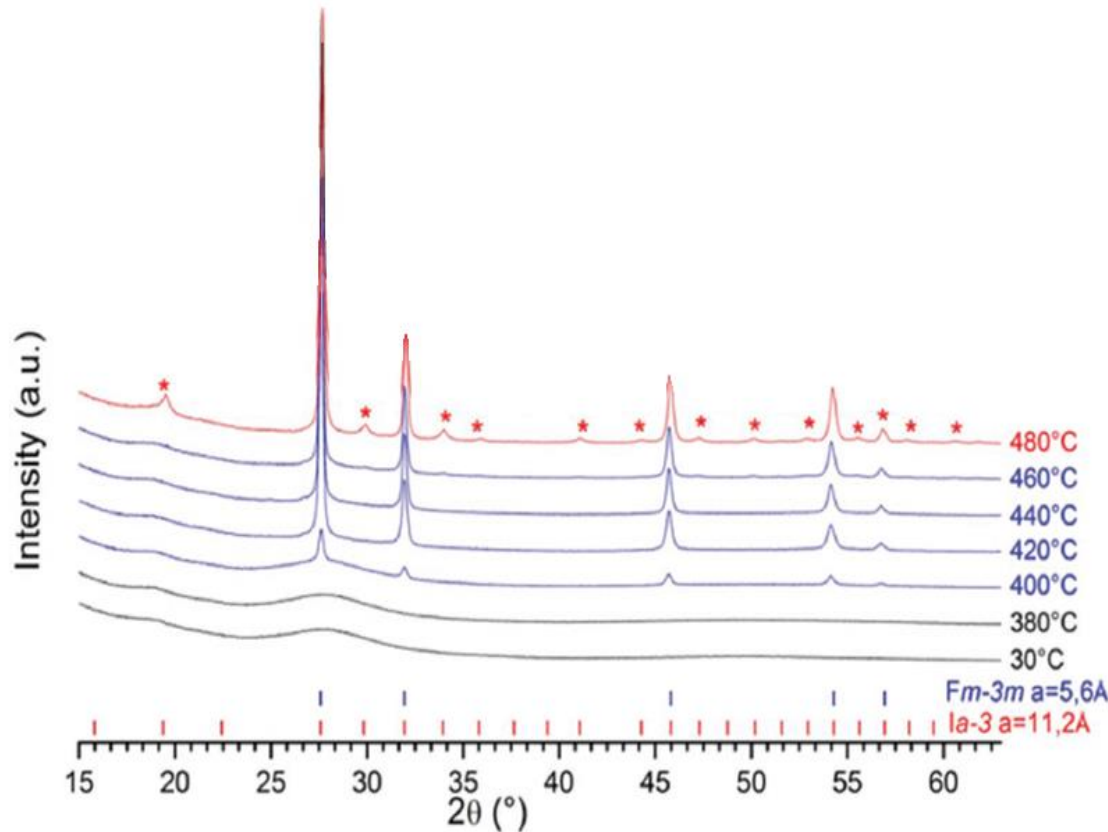


400°C : 1^{er} polymorphe de la phase cubique
 $\text{Bi}_{0,8}\text{Nb}_{0,8}\text{Te}_{2,4}\text{O}_8$: phase ANTI-VERRE
T < 400°C : VERRE



A. Bertrand et al. *Adv. Opt. Mater.* (2016)

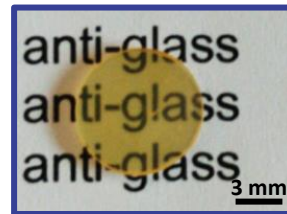
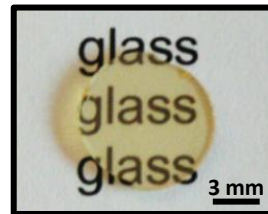
Thermodiffraction des rayons X



480°C : Transformation en un 2nd polymorphe de $\text{Bi}_{0,8}\text{Nb}_{0,8}\text{Te}_{2,4}\text{O}_8$

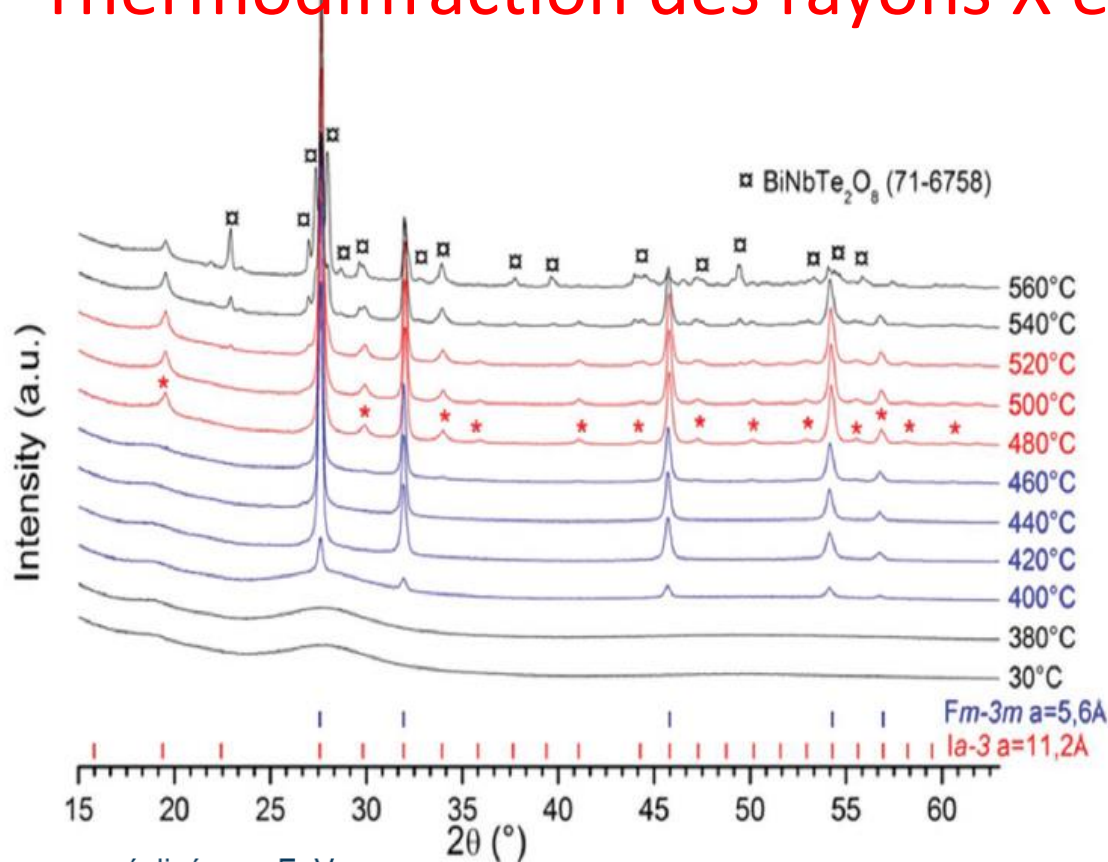
400°C : 1^{er} polymorphe de la phase cubique $\text{Bi}_{0,8}\text{Nb}_{0,8}\text{Te}_{2,4}\text{O}_8$: phase ANTI-VERRE

T < 400°C : VERRE



A. Bertrand et al. *Adv. Opt. Mater.* (2016)

Thermodiffraction des rayons X et transmission optique



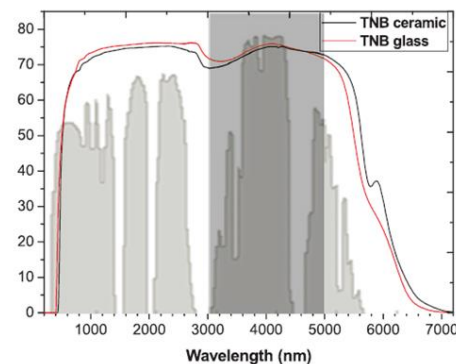
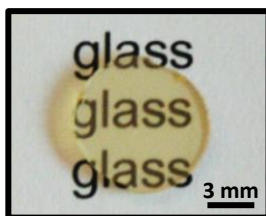
$T > 520^\circ\text{C}$: phases secondaires ($\text{BiNbTe}_2\text{O}_8$)

480°C : Transformation en un 2nd polymorphe de $\text{Bi}_{0,8}\text{Nb}_{0,8}\text{Te}_{2,4}\text{O}_8$

400°C : 1^{er} polymorphe de la phase cubique $\text{Bi}_{0,8}\text{Nb}_{0,8}\text{Te}_{2,4}\text{O}_8$: phase ANTI-VERRE

$T < 400^\circ\text{C}$: VERRE

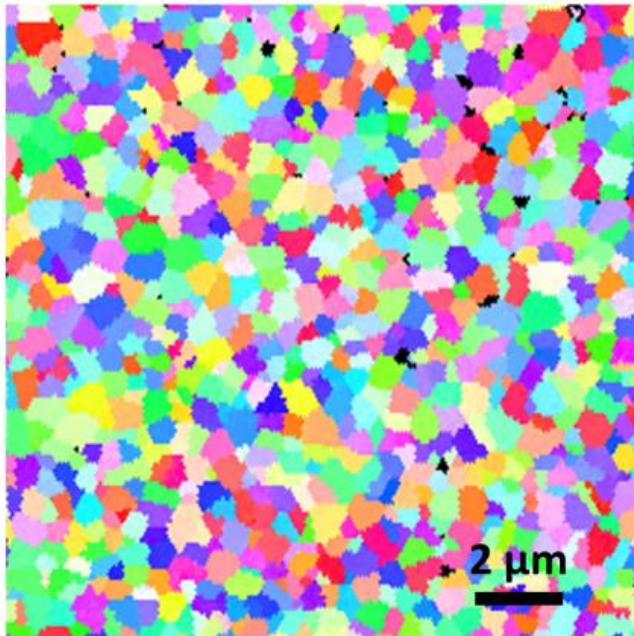
mesure réalisée par E. Veron
(CEMHTI, Orléans)



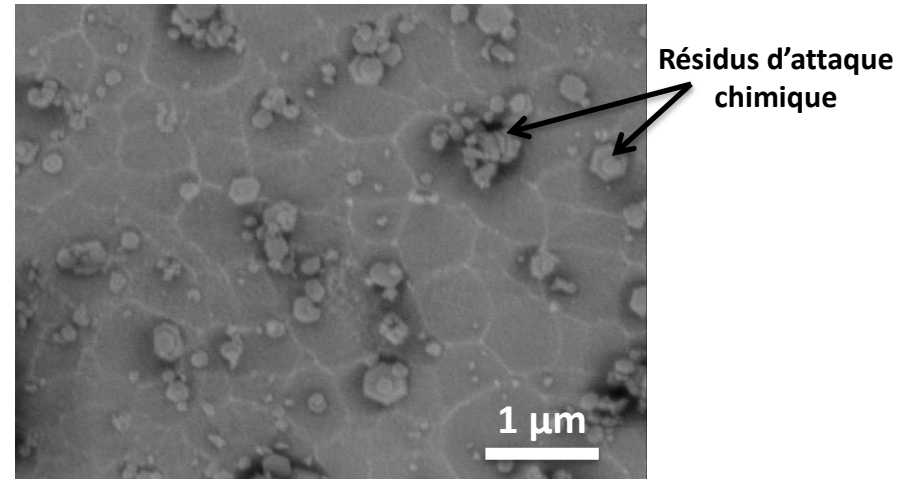
A. Bertrand et al. *Adv. Opt. Mater.* (2016)

Anti-verre : $(\text{Bi}_{0,8}\text{Nb}_{0,8}\text{Te}_{2,4})\text{O}_8$

Cartographie EBSD



Micrographie MEB



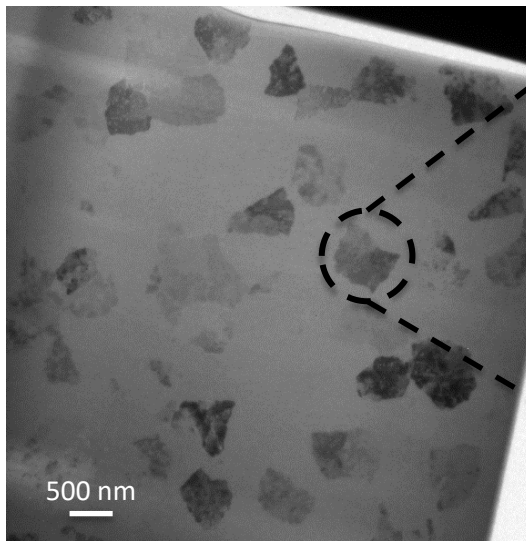
- Présence de **grains** et de **joints de grains**
- Taille des grains : **submicronique**
- **Augmentation de la densité**

	Verre	Anti-verre
Densité	$5,97 \pm 0,03$	$6,17 \pm 0,04$

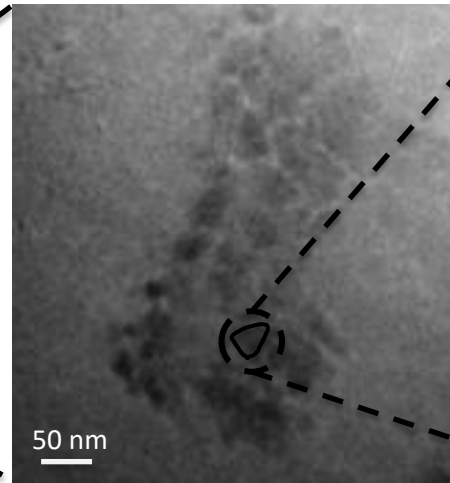
Anti-verre : $(\text{Bi}_{0,8}\text{Nb}_{0,8}\text{Te}_{2,4})\text{O}_8$

Clichés MET

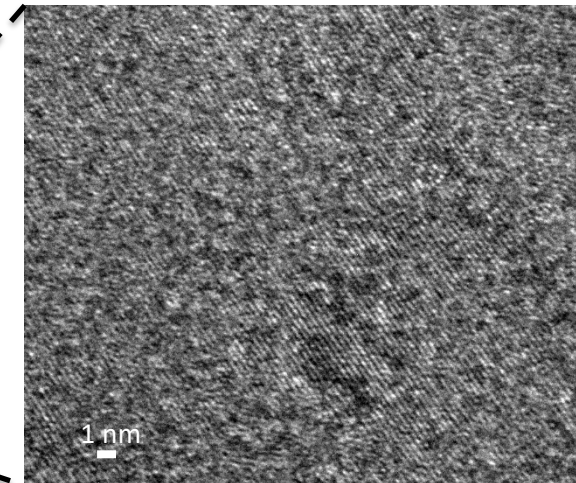
Cliché MET haute résolution



Champ clair



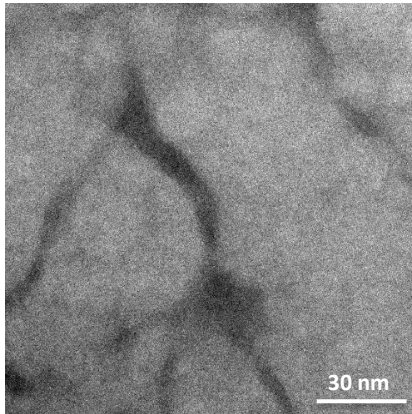
Grains nanométriques



- Organisation multi-échelle complexe

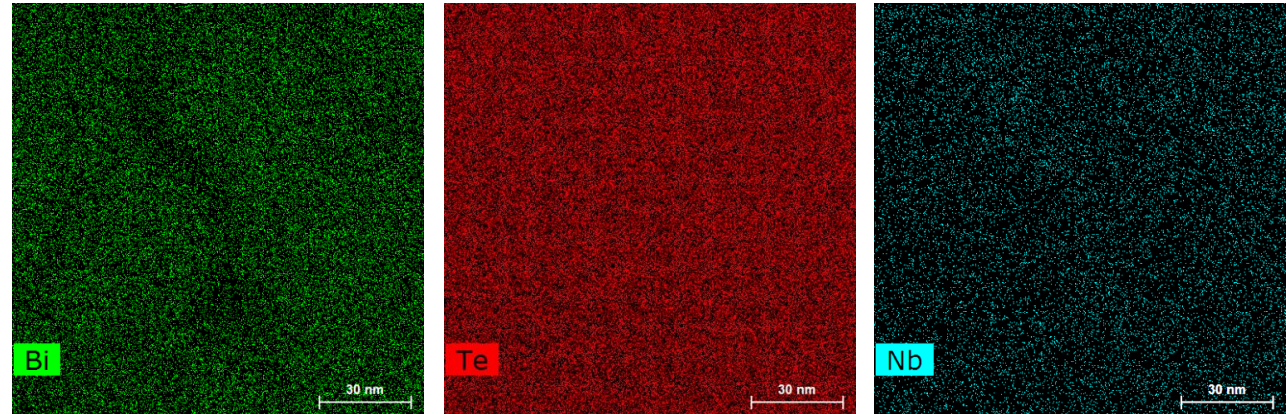
Anti-verre : $(\text{Bi}_{0,8}\text{Nb}_{0,8}\text{Te}_{2,4})\text{O}_8$

STEM-HAADF



Champ sombre

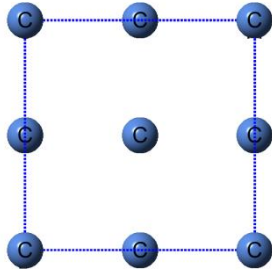
STEM-EDX



Jonctions entre nanodomaines
pauvres en bismuth

➤ Cristallisation congruente à l'échelle nanométrique ?

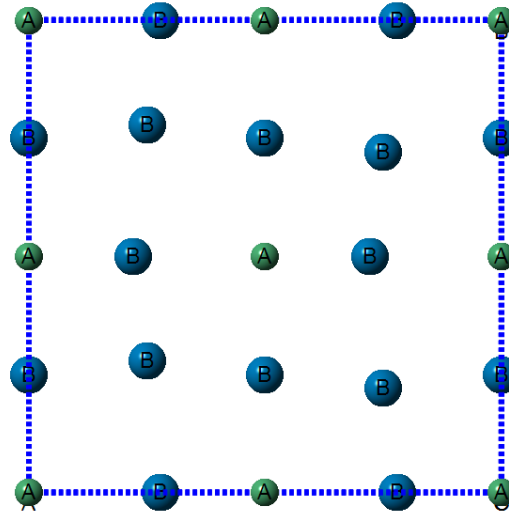
2nd polymorphe : $\text{Bi}_{0,8}\text{Nb}_{0,8}\text{Te}_{2,4}\text{O}_8$



1^{er} POLYMORPHE (anti-verre)

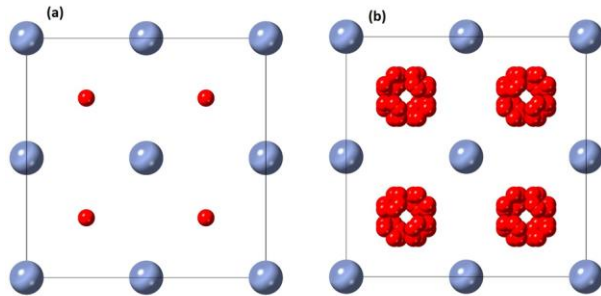
Fm-3m ; 5,6 Å

T°C



2nd POLYMORPHE

Ia-3 ; 11,2 Å



Affinement Rietveld de la structure

2nd polymorphe : $\text{Bi}_{0,8}\text{Nb}_{0,8}\text{Te}_{2,4}\text{O}_8$

Collaboration avec M. Allix



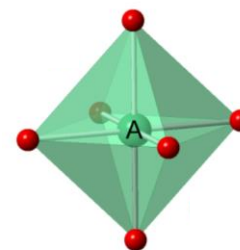
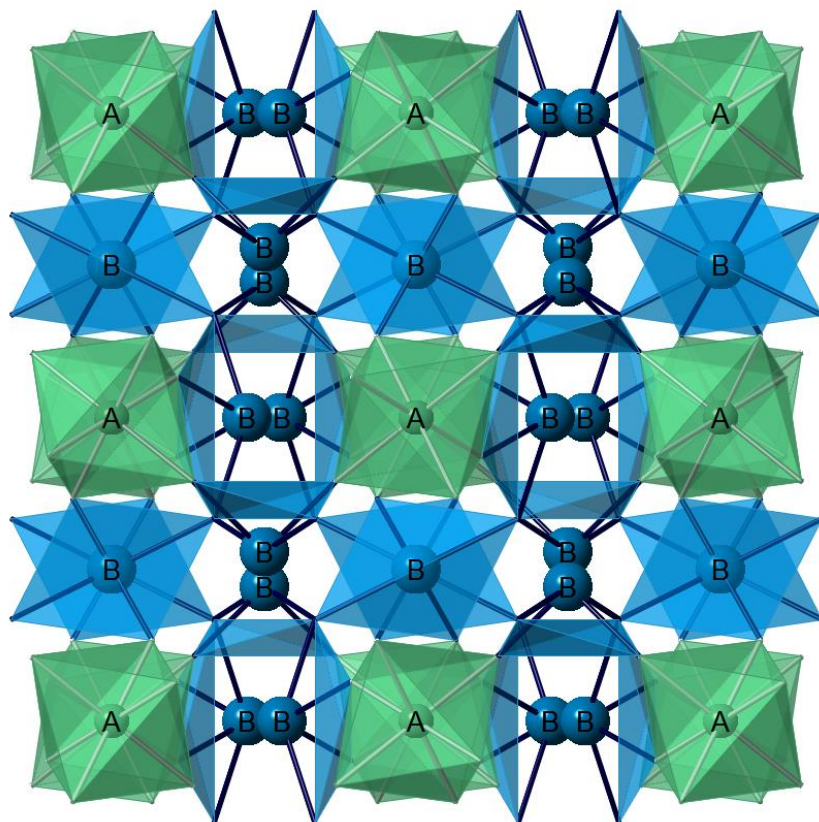
➤ 2 sites cationiques (A : 8a et B : 24d)

A

B₃

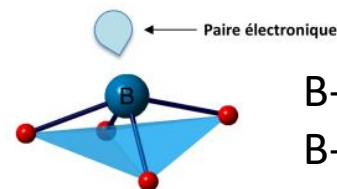
O₈

➤ 2 sites anioniques (48e et 16c)



$$\text{A-O1} = 2,05 \text{ \AA}$$

octaèdres AO_6 reliés à 6 disphénoïdes BO_4



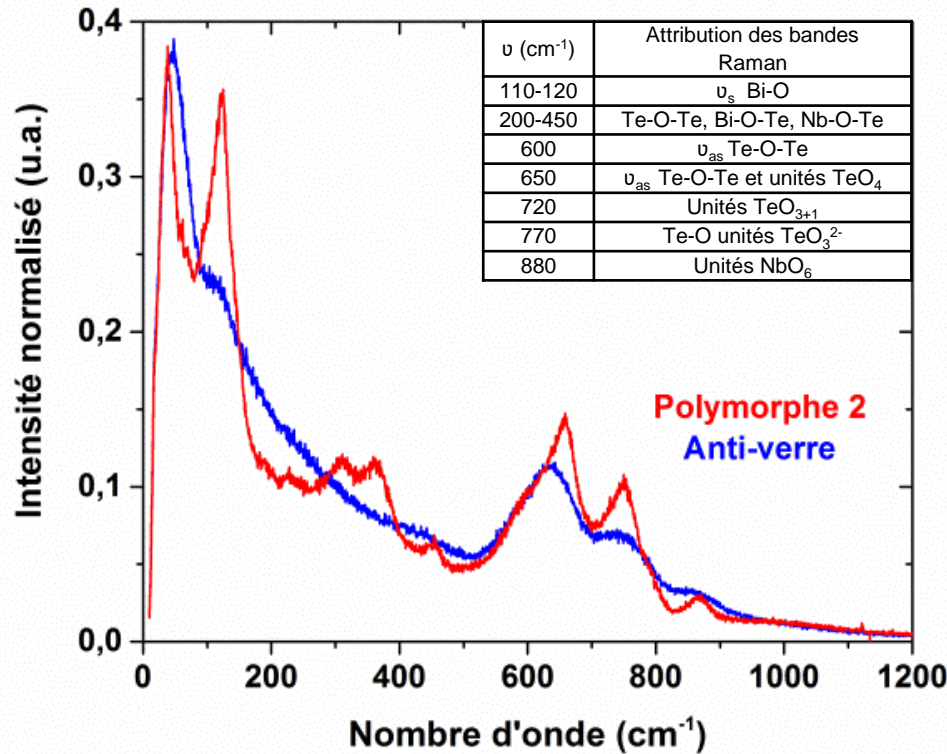
$$\text{B-O1} = 1,97 \text{ \AA}$$

$$\text{B-O2} = 2,17 \text{ \AA}$$

disphénoïdes BO_4 reliés à 2 octaèdres AO_6
et 2 disphénoïdes BO_4

2nd polymorphe : $\text{Bi}_{0,8}\text{Nb}_{0,8}\text{Te}_{2,4}\text{O}_8$

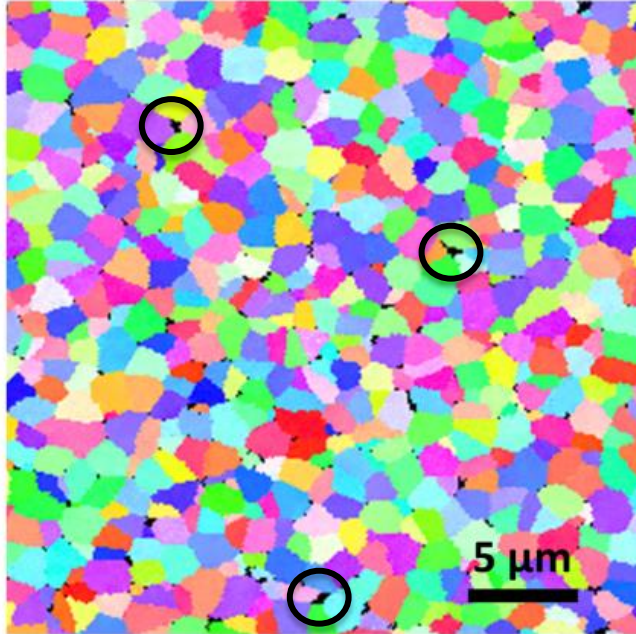
Raman



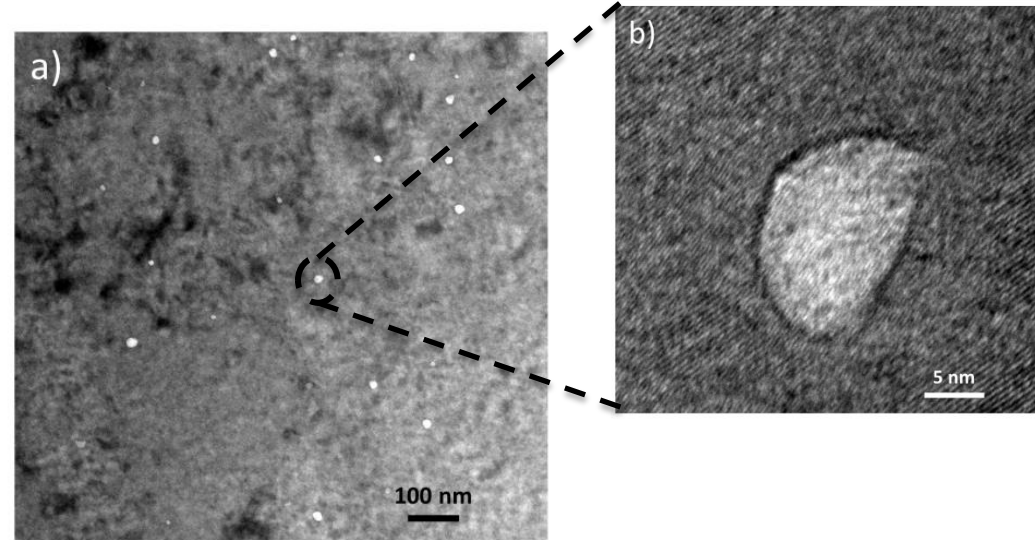
- Affinement des bandes : **mise en ordre partielle** des cations
- Larges bandes : **désordre** sur le sous-réseau anionique

Clichés MET

Cartographie EBSD



- Grains micrométriques et submicroniques
- Présence de zones sombres
- Arrachements lors du polissage



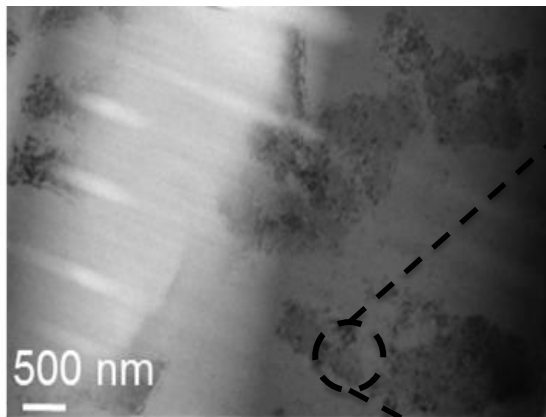
- Présence de **nanoporosités**

	Verre	Polymorphe 2
Densité	$5,97 \pm 0,03$	$6,24 \pm 0,03$

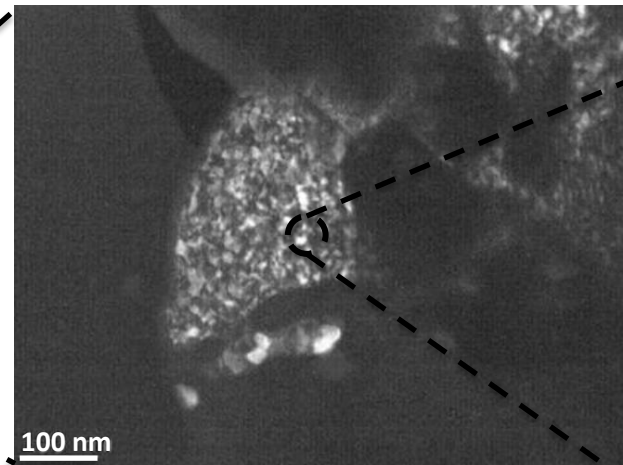
- **Augmentation de la densité**

2nd polymorphe : $\text{Bi}_{0,8}\text{Nb}_{0,8}\text{Te}_{2,4}\text{O}_8$

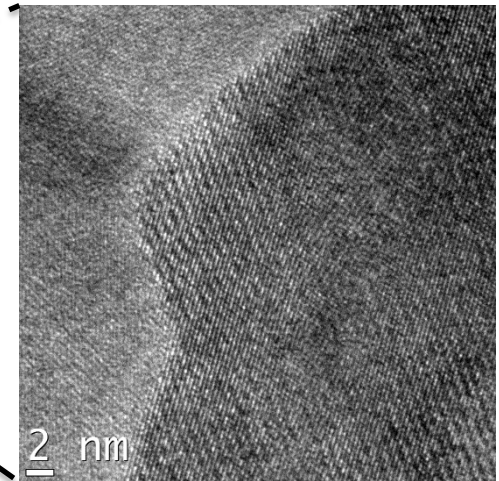
Clichés MET



Champ sombre



Cliché MET haute résolution

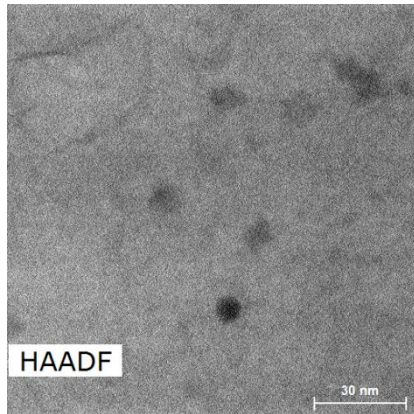


➤ Multitude de **nanocristaux**

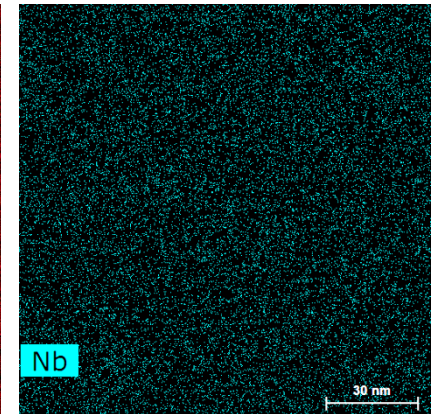
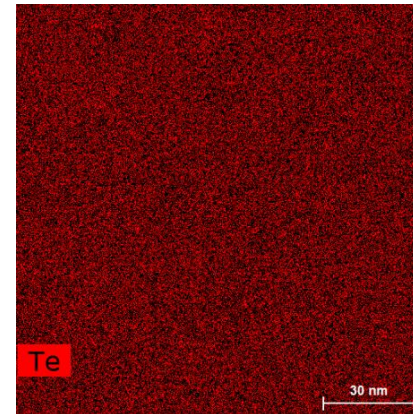
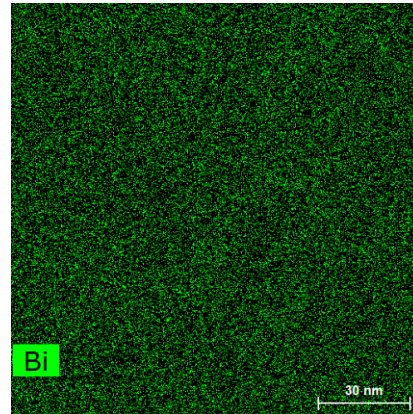
Organisation **multi-échelle complexe**

2nd polymorphe : $\text{Bi}_{0,8}\text{Nb}_{0,8}\text{Te}_{2,4}\text{O}_8$

STEM-HAADF



STEM-EDX



Composition chimique homogène

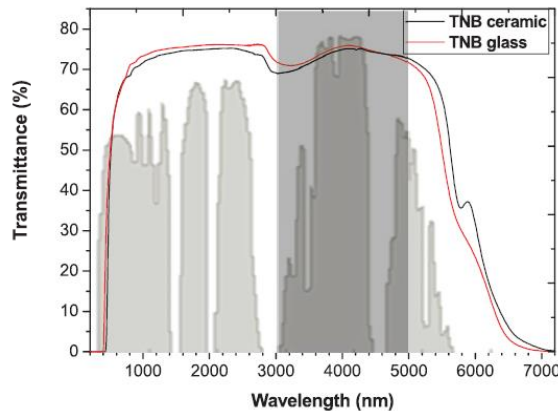
➤ Cristallisation congruente à l'échelle nanométrique

Céramiques massives dopées Nd³⁺

Céramique non dopée



A. Bertrand et al. *Adv. Opt. Mater.* (2016)



Transparent dans le **Visible** et le **MIR**

Cristallisation (**510°C - 1h30**)



Céramique dopée Nd³⁺

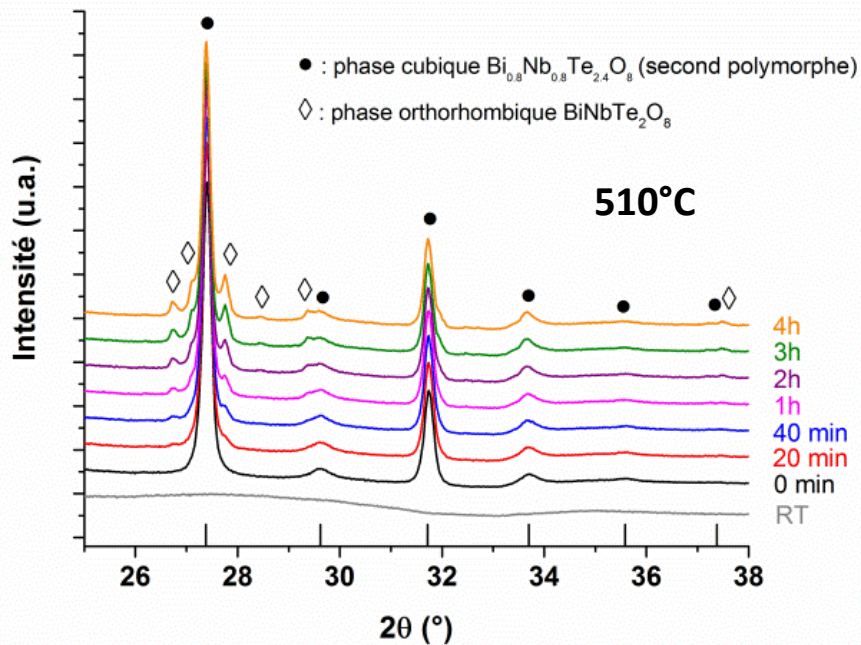


- **Emission laser recherchée**
- **Cavité laser millimétrique**

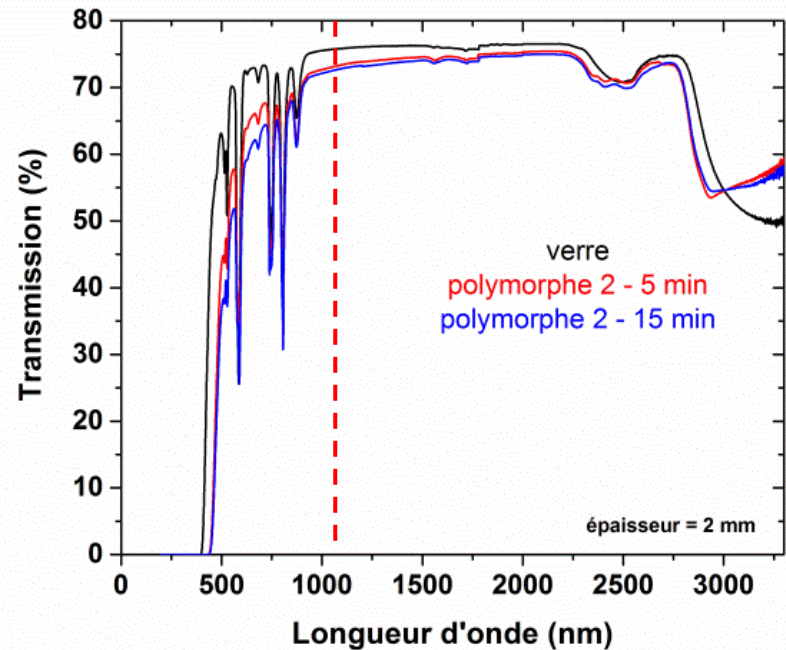
Adapter le traitement thermique

Optimisation de la durée du palier

Thermodiffraction des rayons X



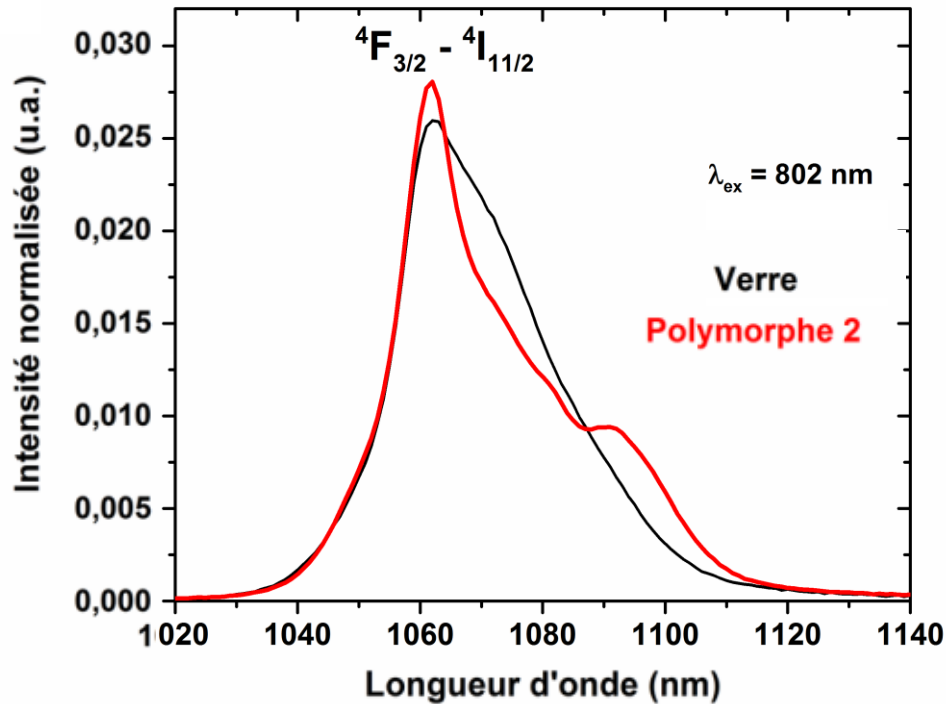
Spectres de transmission optique



- **Phase cubique dès 0 min**
- **Durée de palier : 5 min et 15 min**
- **Décomposition partielle** en phase $\text{BiNbTe}_2\text{O}_8$ (orthorhombique)
- **Légère diffusion de la lumière** pour les céramiques
- **Traitement thermique < 20 min**
- **Différence d'indices de réfraction**

Propriétés de photoluminescence

Spectre d'émission



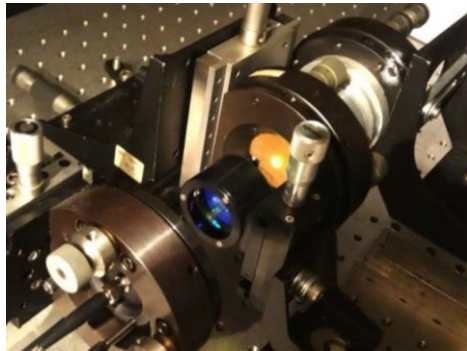
Temps de vie

	Verre	2 nd polymorphe
Temps de vie (μs)	154 \pm 2,5	137 \pm 2,5

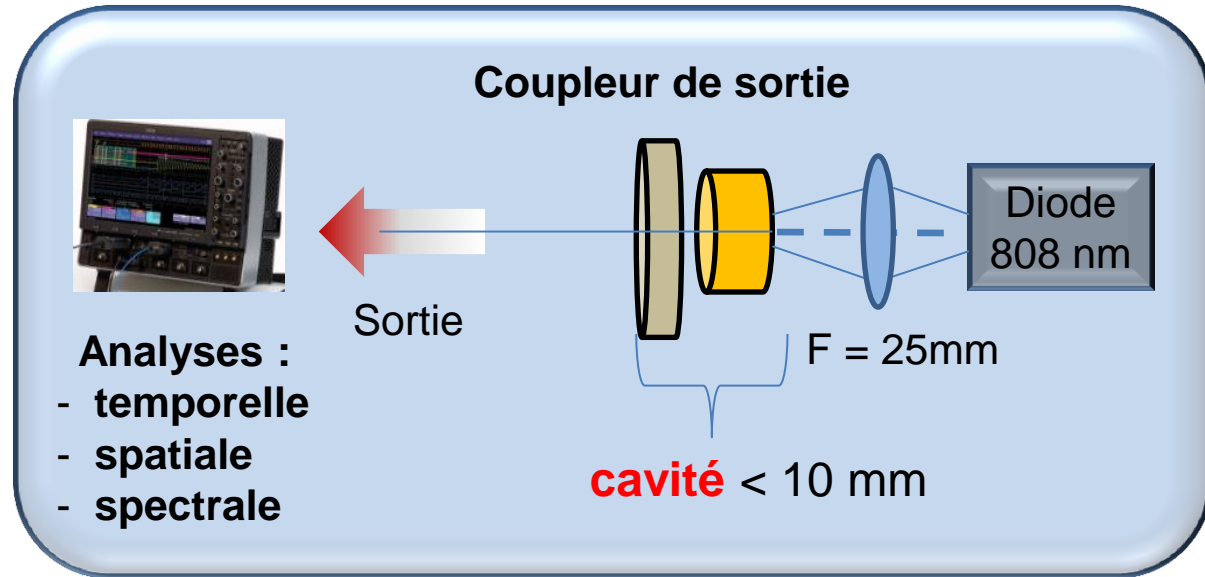
Légère diminution du temps de vie

- Bande d'émission à **1064 nm**
- **Affinement** de la bande d'émission : **mise en ordre** des cations
- **Epaulement** : effets de levée de dégénérescence du **champ cristallin**

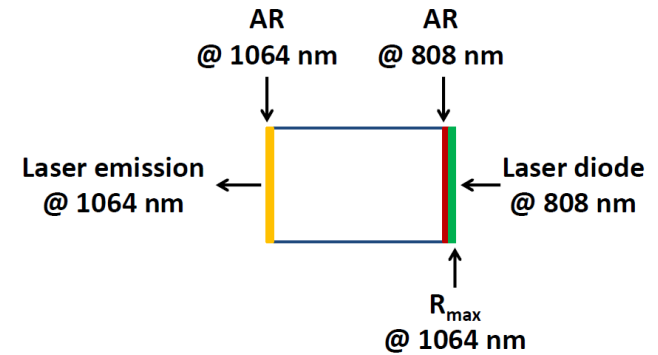
Mise en évidence de l'émission laser



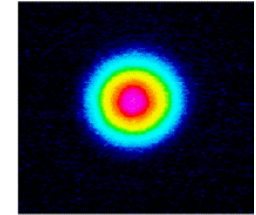
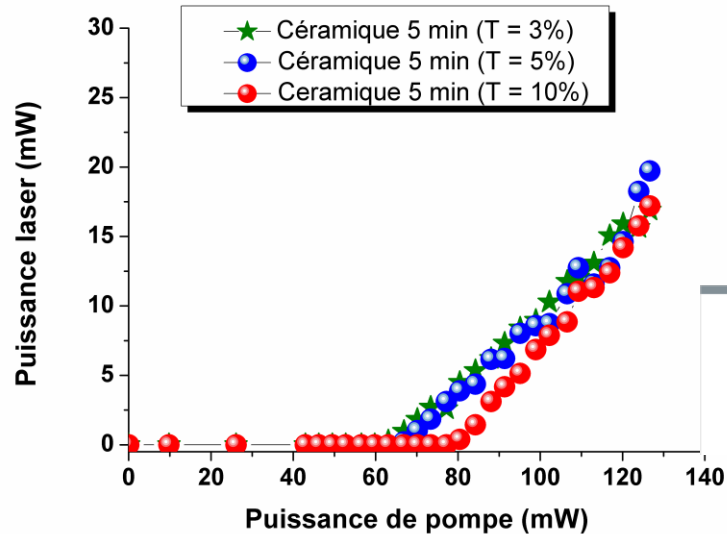
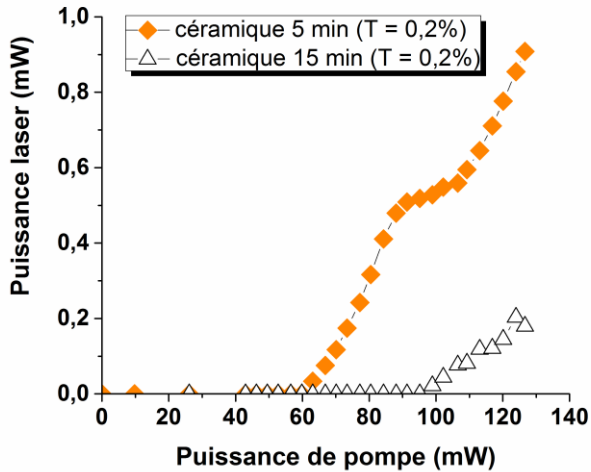
Céramique dopée Nd³⁺



- Diode laser de pompe émettant à **808 nm**
- Faisceau de pompe est **focalisé** dans l'échantillon
- **Revêtements spécifiques** recouvrant les faces de l'échantillon



Mise en évidence de l'émission laser



M. Dolhen et al. Sci. Rep. (2018)

- **Emission laser** autour de **1063,5 nm**
- **Profil du faisceau** reste **monomode**
- **Seuils de puissance laser** : 63 mW (5 min) < 99 mW (15 min)
- **Puissance maximale** : **30 mW**
- Meilleur **rendement de pente** ~ **50 %** obtenu pour un matériau tellurite laser

B.D.O. Richards et al. Springer Series in Mater. Sci. (2017)

SOMMAIRE

Contexte

I – Vitrocéramiques transparentes tellurites

- A-1 Elaboration des vitrocéramiques
- A-2 Caractérisations thermiques/structurales et microstructurales/optiques

II – Céramiques transparentes tellurites obtenues par cristallisation complète et congruente du verre

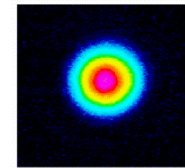
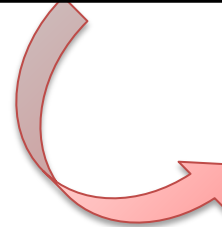
- A-1 Etude des transitions de phase et analyses micro/nanostructurales
- A-2 Elaboration des céramiques transparentes dopées Nd^{3+}
- A-3 Démonstration de l'émission laser

Conclusions/Perspectives

CONCLUSION : vitrocéramiques et céramiques tellurites



Grains et joints de grains



- Céramique « **optiquement active** »
- Rendement de pente de **50%**

- **Meilleure compréhension** de la structure et micro/nanostructure des deux polymorphes
- Présence de **nanoporosités**
- Mise en ordre **partielle cationique**

✓ **EMISSION LASER**

FULL PAPER

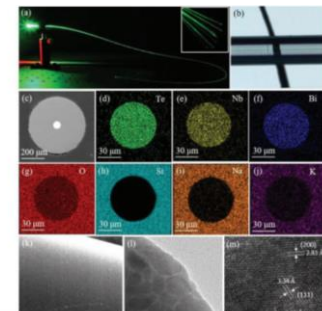
Optically Active Materials

ADVANCED
SCIENCE

www.advancedscience.com

Pressureless Crystallization of Glass for Transparent Nanoceramics

Shaofei Wen, Yunpeng Wang, Bijiao Lan, Weida Zhang, Zhuo Shi, Shichao Lv, Yujun Zhao, Jianrong Qiu, and Shifeng Zhou*

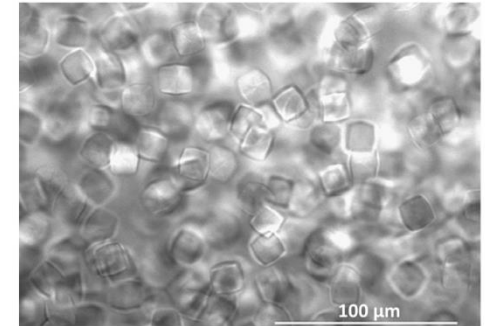


MERCI POUR VOTRE ATTENTION



Conditions de transparence d'une vitrocéramique

$$I = \frac{(1 + \cos^2 \theta)}{L^2} \frac{8\pi^4}{\lambda^4} r^6 \left(\frac{M^2 - 1}{M^2 + 1} \right)^2 I_0$$



[100]

$M (n_{\text{verre}}/n_{\text{cristaux}}) \approx 1$: indices de réfraction du verre et des cristaux proches

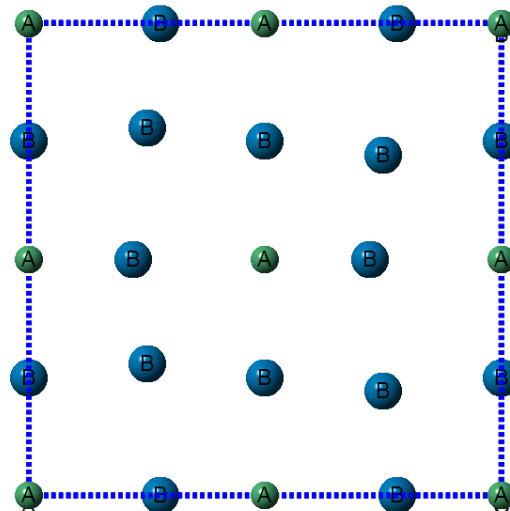
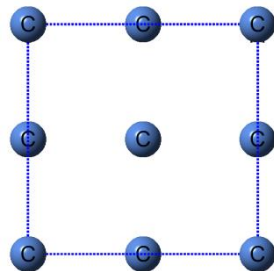
$\frac{r^6}{\lambda^4} \ll 1$ (environ 100 nm)



$$n_{\text{TWL}} \approx n_{\text{LiNbO}_3}$$

Cristaux $\text{BaZnTe}_2\text{O}_7$: composition proche de la matrice vitreuse TBZ

Verre

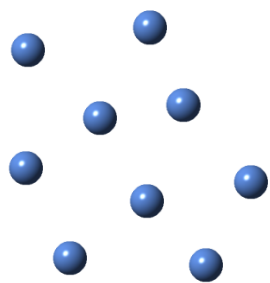


Phase intermédiaire (antiverre)

Fm-3m, 5.6Å

Céramique

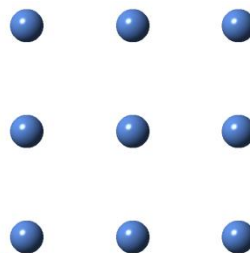
Ia-3, 11.2Å



Mise en ordre
topologique



● Bi/Nb/Te

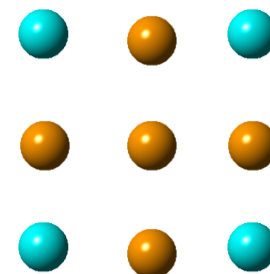


Mise en ordre
chimique



● Bi/Nb

● Bi/Te



Verre

Phase intermédiaire
(antiverre)

Céramique