

# Verres spéciaux

- Verres d'oxydes
- Verres d'oxynitrures
- Verres de fluorures
- Verres de chalcogénures

# Introduction

- Verre un des plus anciens matériaux
- Préhistoire: confection d'outils en obsidienne (verre naturel)
- - 5000 ans: fabrication du verre ( $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O}$ )
- Verres courants sont à base d'oxydes
- Nouveaux verres:

pour l'optique: fluorures et chalcogénures

pour le stockage des déchets nucléaires: oxydes et oxynitrides...

# Verres d'oxydes

1950: problème de confinement des déchets nucléaires

→ incorporation dans des matrices de verres d'oxydes

Pourquoi? · Verre peut intégrer dans sa structure les éléments contenus dans ces déchets.

· Grande variété de composition de verres

· Verre est stable chimiquement et très peu soluble dans l'eau

· Verre est stable thermiquement

· amorphe → pas de transformations induites par les radiations

# Verres d'oxydes

## Choix des **verres borosilicatés**

Pourquoi? Il fallait une composition vitreuse:

- ayant des  $T^\circ$  d'élaboration pas trop élevées (pour éviter la volatilisation des radioéléments)
- capable d'incorporer les déchets sans séparation de phase
- conduisant à des verres durables (résistance à la lixiviation par l'eau)

Mise en œuvre industrielle d'un procédé de vitrification utilisant le borosilicate est réalisée en France depuis 1978.

# Verres d'oxydes

Le retraitement du combustible usé permet de séparer les éléments encore fissibles (plutonium et uranium) des produits de fission et des actinides mineurs (Np, Am, Cm) qui se retrouvent sous forme de solutions nitriques.

Ces solutions contiennent jusqu'à 40 éléments différents très radioactifs (émetteurs de particules  $\alpha$ ,  $\beta$  et  $\gamma$ ) ayant des durées de vie plus ou moins longues ( $2.14 \cdot 10^6$  années isotope  $^{237}\text{Np}$  du neptunium) et doivent être vitrifiées.

# Mise au point de la composition chimique des verres de confinement

1ère étape La composition du verre doit être adaptée à chaque classe de déchets à vitrifier. Pour cela, on étudie le diagramme de phase quaternaire afin de déterminer les zones de formation des verres.

Les quatre sommets du quaternaire sont:

$\text{SiO}_2$  formateur de réseau

Oxyde constituant principal du déchet

$\text{B}_2\text{O}_3$  qui abaisse la température d'élaboration

$\text{Na}_2\text{O}$  modificateur de réseau

# Mise au point de la composition chimique des verres de confinement

- 2ème étape: La seconde phase consiste à optimiser la formule en ajoutant des cations particuliers: CaO, ZnO, Li<sub>2</sub>O, ZrO<sub>2</sub> de façon à avoir un verre satisfaisant. Il doit être peu visqueux pour faciliter la mise en forme.
- En fonction de la composition finale désirée, on mélange la « fritte » de verre (70%) avec le calcinat provenant des solutions de produits de fission (30%).
- Fusion et coulage

# Mise au point de la composition chimique des verres de confinement

Afin de tester les meilleurs verres de confinement, on utilise une composition simulée appelée « Eau légère » dans laquelle l'uranium et le thorium simulent les actinides, le nickel représente le palladium et le manganèse et le cobalt simulent le ruthénium et le rhodium, tous éléments radioactifs présents dans les déchets.

3ème étape: Les essais en actif (en laboratoire chaud).

.



**Tableau 10.1** Composition type de la fritte de verre et du verre simulé «Eau Légère» (dit R7T7), en % massique d'oxydes. (En encadré les terres rares et les actinides. Le verre contient 11,25 % de produits de fission et 0,85 % d'actinides, en masse d'oxydes.)

Fritte de verre (% massique d'oxydes)		Verre simulé «Eau Légère» (% massique d'oxydes)			
SiO <sub>2</sub>	58,84	SiO <sub>2</sub>	45,48	CoO	0,12
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,15	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,02	Cs <sub>2</sub> O	1,42
Na <sub>2</sub> O	7,00	Na <sub>2</sub> O	9,86	BaO	0,60
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,28	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,91	Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,20
CaO	5,23	CaO	4,04	La <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,90
Li <sub>2</sub> O	2,56	Li <sub>2</sub> O	1,98	Ce <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,93
ZnO	3,24	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,91	Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1,59
ZrO <sub>2</sub>	0,70	NiO	0,74	Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,44
		Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,51	UO <sub>2</sub>	0,52
		ZnO	2,50	ThO <sub>2</sub>	0,33
		P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,28	Ag <sub>2</sub> O	0,03
		SrO	0,33	CdO	0,03
		ZrO <sub>2</sub>	2,65	ZnO <sub>2</sub>	0,02
		MoO <sub>3</sub>	1,70	Sb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01
		MnO <sub>2</sub>	0,72	TeO <sub>2</sub>	0,23

rhodium

Pd

Actinides

ruthénium

# Caractéristiques physicochimiques

**Tableau 10.2** Quelques propriétés physiques comparées de verres industriels et du verre «Eau Légère».

	Verre «Eau Légère»	Pyrex	Verre à vitre
densité	2,75	2,23	2,46
viscosité à 1100 °C [poises]	90	≈ 80 000	≈ 4000
température de transition vitreuse $T_g$ [°C]	505	565	535
coefficient dilatation [ $10^{-6} \cdot K^{-1}$ ]	8,7	3,2	9,3
conductivité thermique à 25°C [ $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$ ]	1,05	1,09	1,05
module de Young [ $10^{10} \cdot Pa$ ]	9,0	6,1	7,3
ténacité [ $10^6 \cdot Pa \cdot m^{1/2}$ ]	0,95	0,85	0,76

Verres doivent garder leurs propriétés sous auto-irradiation

# Verres d'oxydes

- Outre les borosilicates, on a étudié plusieurs verres de type phosphates (  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{ZnO}-\text{P}_2\text{O}_5$  ) ayant des températures de fusion plus basses mais étant souvent moins stables thermiquement et moins durables
- Les borosilicates ont fait leurs preuves en tant que matériaux de confinement et sont en phase d'optimisation.

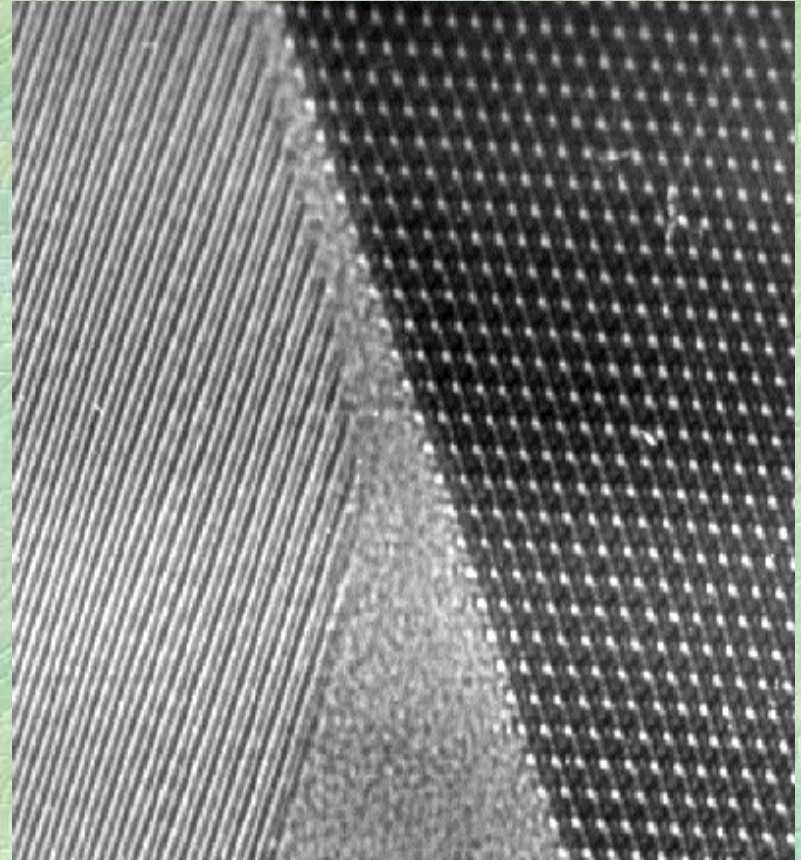
# Verres d'oxynitrides

Résultent d'une substitution partielle des atomes O par des atomes N dans le réseau des verres silicates ou alumino-silicates  $\Rightarrow$  M-Si-Al-O-N

Découverts comme phase amorphe intergranulaire dans les céramiques à base de nitrure de silicium

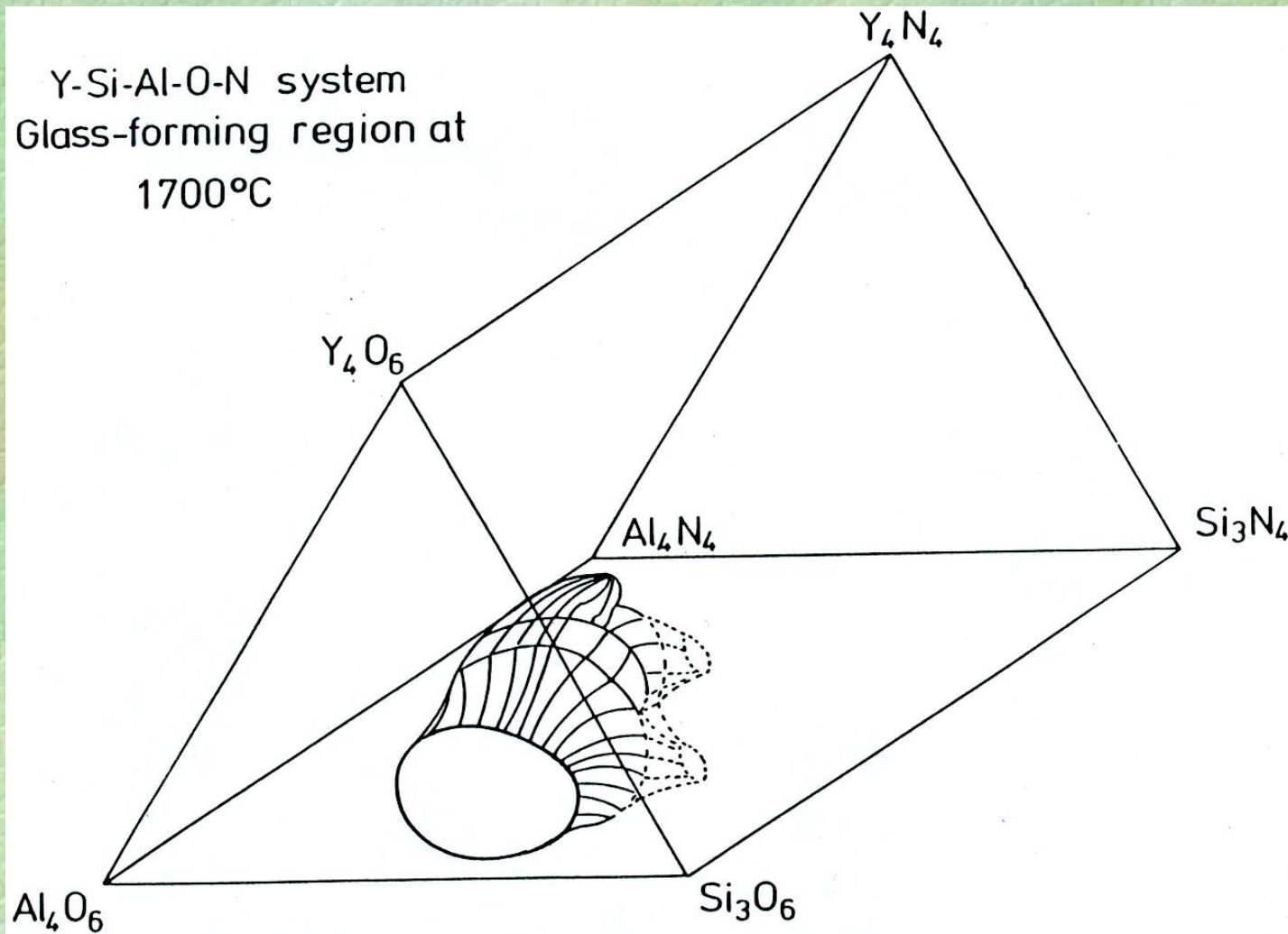


# Verres d'oxynitrures

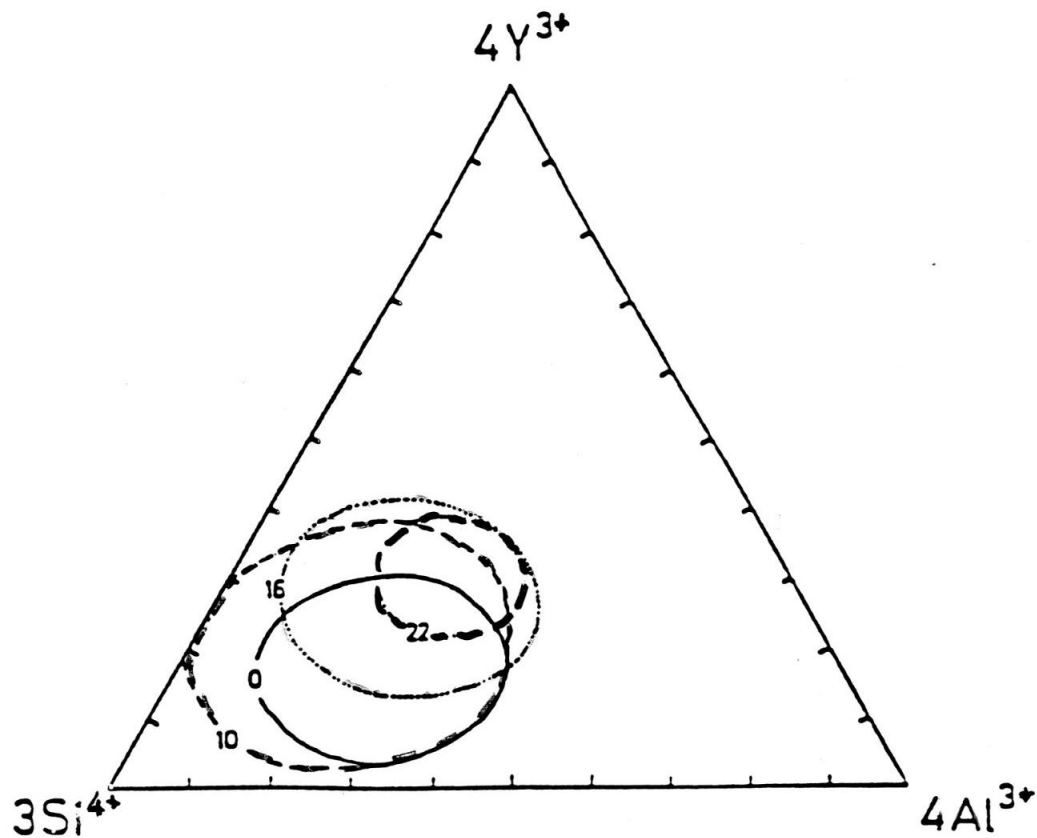


*Phase intergranulaire: verre formé à partir des aides au frittage du  $\text{Si}_3\text{N}_4$  tels que  $\text{Y}_2\text{O}_3$  ou d'autres terres rares*

# Composition des verres d'oxynitrides



# Composition des verres d'oxynitrides



# Verres d'oxynitrures

2 familles de verre:

- \* Alumino-silicates

- \* Phosphates

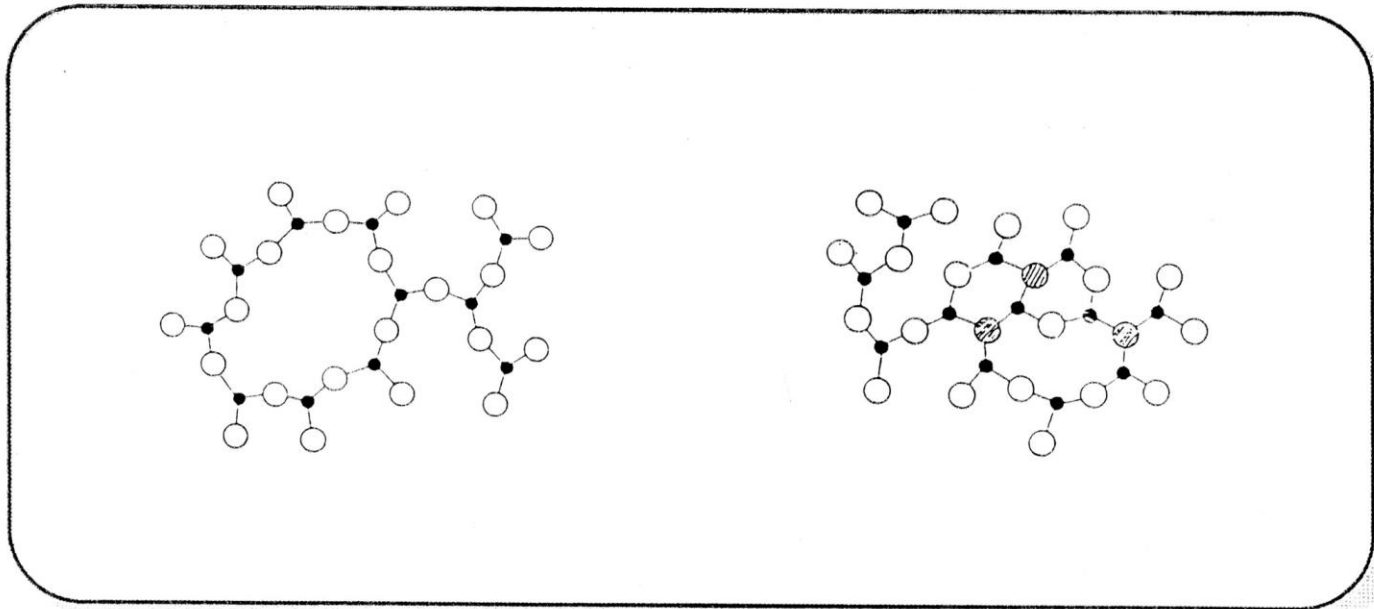
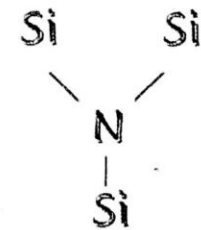
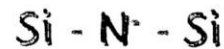
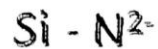
Tétraèdres  $XO_4$  ( $X=(Si,Al)$  ou  $P$ ) deviennent des tétraèdres mixtes  $(Si,Al)(O,N)_4$  et  $P(O,N)_4$

Remplacement d'atomes d'**oxygène** qui partagent **2 liaisons** par des atomes d'**azote** qui partagent **3 liaisons**



# Verres d'oxynitrides

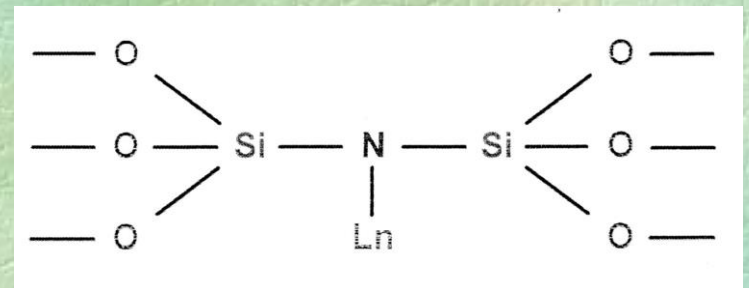
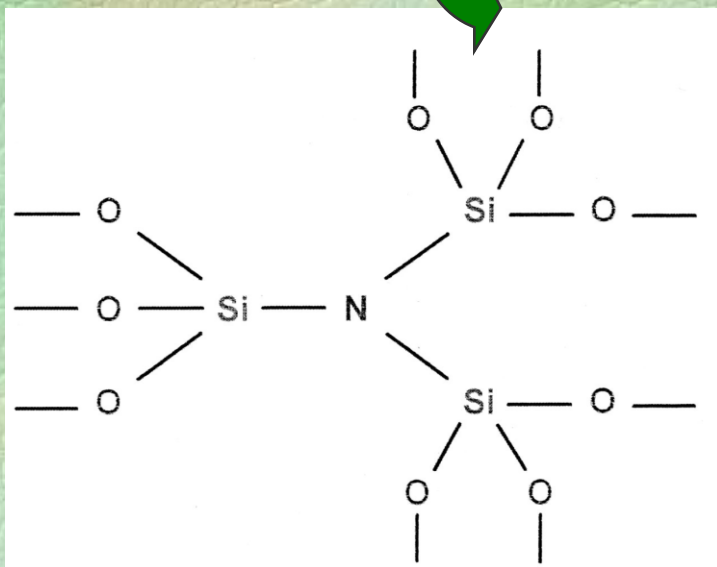
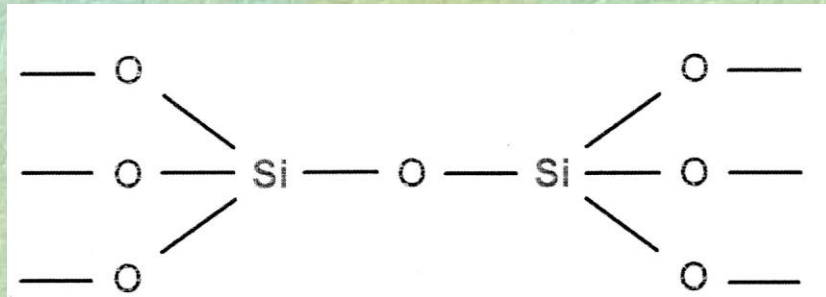
Incorporated nitrogen atoms may form the following structural groups



Schematic Comparison of Silicate and Silicon oxynitride glass networks

# Verres d'oxynitrures

Groupements  $[\text{SiO}_4]$



groupements  $[\text{SiO}_3\text{N}]$

# Méthodes d'élaboration des verres d'oxynitrides

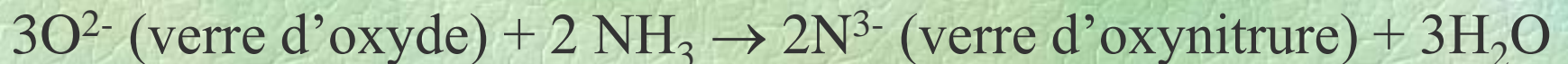
- Fusion suivi d'une trempe sous atmosphère inerte d'un solide contenant un composé de type nitrure:

AlN pour les verres sialons,

oxynitride de phosphore pour les verres azotés phosphatés.

OU

- Chauffage sous courant d'ammoniac d'un verre oxyde



# Caractéristiques des verres d'oxynitrides

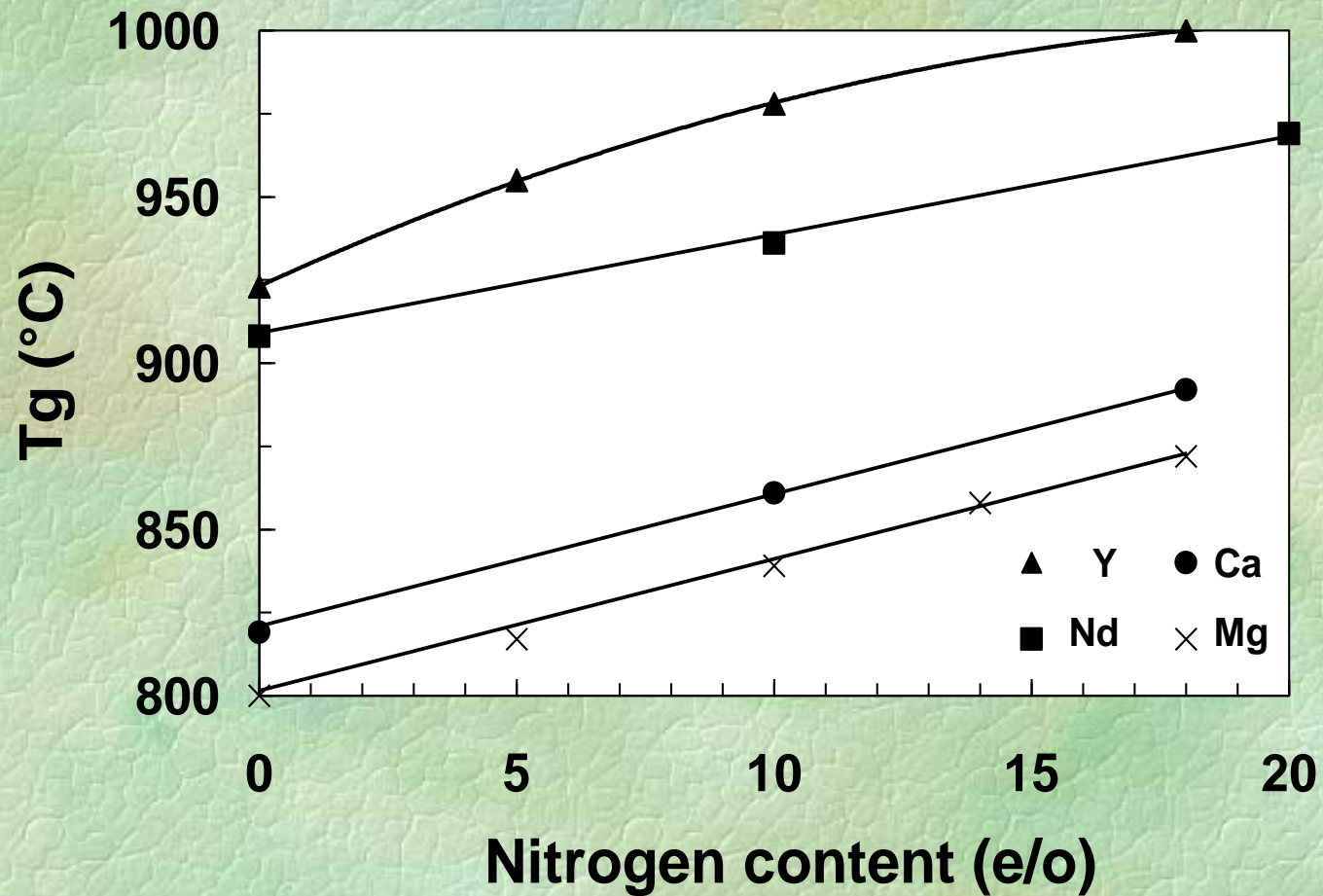
Propriétés des verres dépendent de la composition:

1°) l'azote augmente la température de transition vitreuse ( $T_g$ ) comparée aux verres d'oxydes

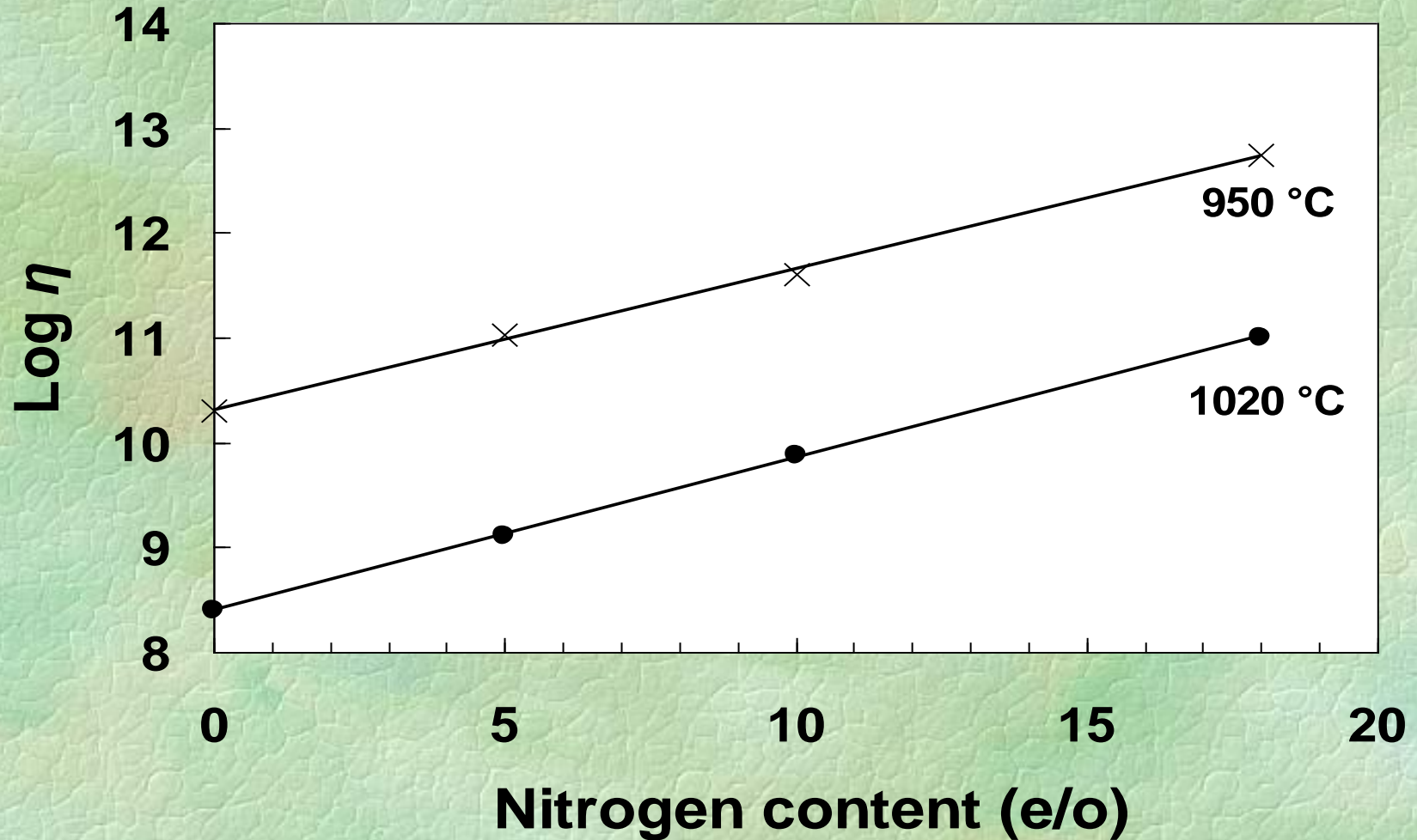
2°) l'azote augmente la viscosité du verre

Les propriétés à haute température des céramiques en nitrure de silicium sont contrôlées en partie par la viscosité des verres oxynitrides

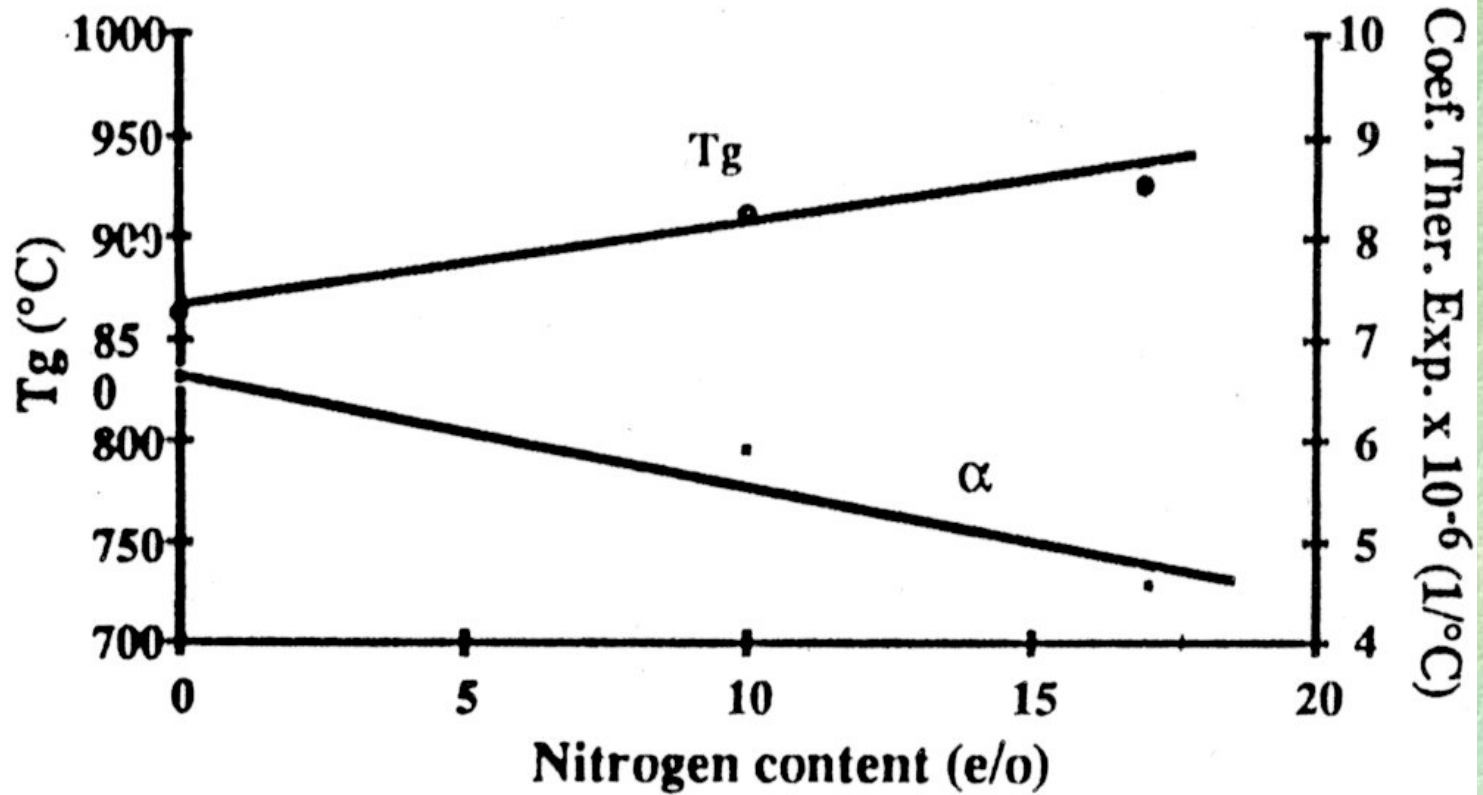
# Caractéristiques des verres d'oxynitrides



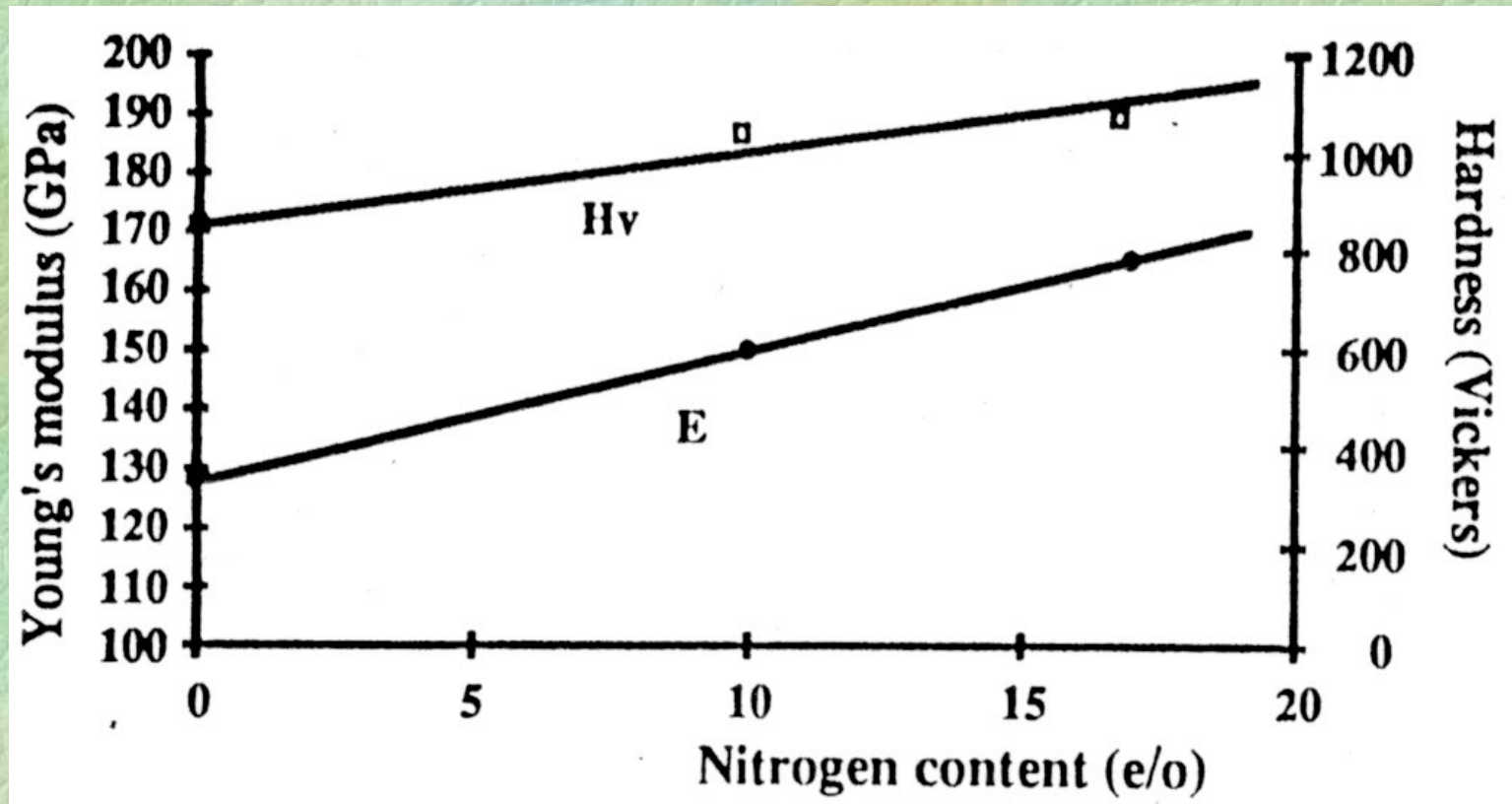
# Caractéristiques des verres d'oxynitrides



# Caractéristiques des verres d'oxynitrides



# Caractéristiques des verres d'oxynitrides





# Conclusion sur les propriétés des verres oxynitrides

Pour des taux d'azote croissants, on observe un renforcement du réseau vitreux qui implique:

**une augmentation de** la densité, des températures de  $T_g$  et de cristallisation, de la viscosité, de la microdureté, des modules élastiques et de la résistance à la fracture

**une diminution** du coefficient de dilatation thermique

**une amélioration** de la durabilité chimique (surtout pour les verres azotés de phosphates)

⇒ atouts pour verres de confinement de déchets nucléaires (en développement)

# Conclusion sur les verres de confinement des produits radioactifs

Actuellement, les verres d'oxydes (borosilicates) ont fait leurs preuves et sont en cours d'optimisation

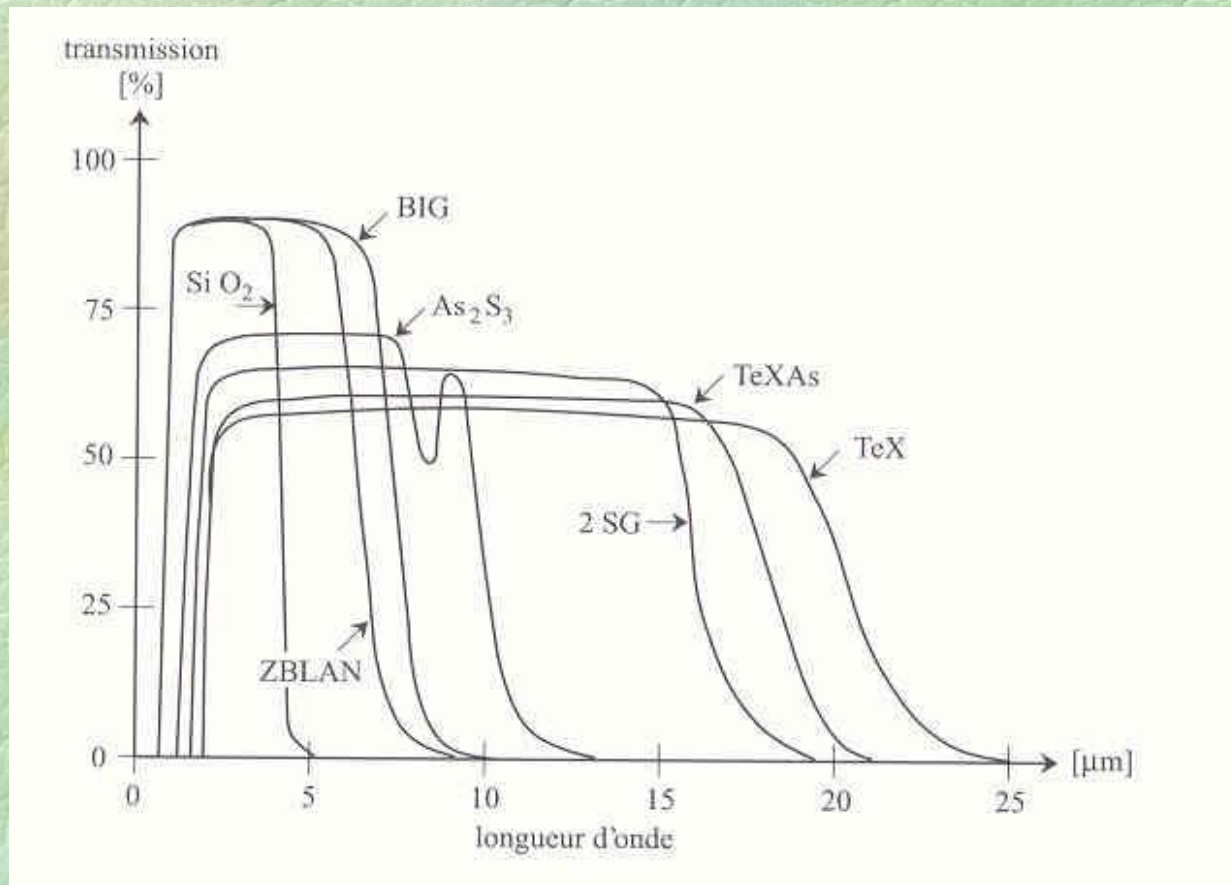
On étudie des nouvelles compositions à base de phosphates

Les verres oxynitrides ont montré leurs potentialités et sont en cours de développement

# Verres de fluorures

Se distinguent des oxydes par leur composition totalisant 100% de fluorures de métaux lourds. Les plus caractéristiques sont:

les fluorozirconates (ZBLAN), les fluoroindates (BIG) et les PZG.



**Tableau 10.3** Composition chimique des verres de fluorures, de sulfures et de chalcogénures.

Verre	Composition
ZBLAN	53 ZrF <sub>4</sub> – 20 BaF <sub>2</sub> – 4 LaF <sub>3</sub> – 3 AlF <sub>3</sub> – 20 NaF
BIG	30 BaF <sub>2</sub> – 18 InF <sub>3</sub> – 12 GaF <sub>3</sub> – 20 ZnF <sub>2</sub> – 10 YbF <sub>3</sub> – 6 ThF <sub>4</sub> – 4 ZrF <sub>4</sub>
PZG	35.3 PbF <sub>2</sub> – 23.5 ZnF <sub>2</sub> – 34.3 GaF <sub>3</sub> – 4.9 YF <sub>3</sub> – 2 AlF <sub>3</sub>
GLS	70 Ga <sub>2</sub> S <sub>3</sub> – 30 La <sub>2</sub> S <sub>3</sub>
GNS	66 Ga <sub>2</sub> S <sub>3</sub> – 34 Na <sub>2</sub> S
GGSSb	Ge <sub>20</sub> Ga <sub>5</sub> Sb <sub>10</sub> S <sub>65</sub>
2SG	Sb – Se – Ge – Ga
TeXAs	Te <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> IAs <sub>4</sub>

Proportion dominante de ZrF<sub>4</sub> dans ZBLAN

Faible teneur en tétravalents dans BIG

Concentration élevée de PbF<sub>2</sub> dans PZG

⇒ propriétés optiques différentes

Les liaisons métal-fluor sont moins fortes que les liaisons métal-oxygène  $\Rightarrow$  températures caractéristiques beaucoup plus basses

**Tableau 10.4** Propriétés physiques des verres de fluorures, de sulfures et de chalcogénures. Les indices de réfraction sont donnés à la raie D du sodium (a), à 500 nm (b), à 632,8 nm (c) et à 10 mm (d).

Verre	$T_g$ [°C]	$T_x$ [°C]	$T_f$ [°C]	$n$	$\alpha$ [ $10^{-7} \text{ K}^{-1}$ ]
ZBLAN	262	352	455	1,498 <sup>(a)</sup>	200
BIG	332	460	576	1,505 <sup>(a)</sup>	171
PZG	270	325	547	$\approx 1,59$ <sup>(a)</sup>	170
GLS	556	681	830	$\approx 2,6$ <sup>(b)</sup>	90
GNS	484	599	720	—	145
GGSSb	305	494	—	2,3657 <sup>(c)</sup>	162
2SG	280	—	—	2,63 <sup>(d)</sup>	150
TeXAs	118	—	—	2,8741 <sup>(d)</sup>	270

Fluorures

$T_g$  sont de l'ordre de 300°C ( $T_g$  de Silice 1000°C)

$T^\circ$  de cristallisation ( $T_x$ ) oscillent entre 450 et 580°C

# Méthodes d'élaboration des verres de fluorures

## Techniques verrières classiques

Mélange des produits de départ (fluorures de métaux)

Fusion du mélange – affinage

Coulée du bain fondu

Recuisson

Taille et polissage du verre

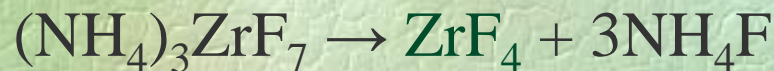
## Particularité des verres fluorures:

sensibilité à l'humidité ambiante  $\Rightarrow$  atmosphère contrôlée  
et sèche

aptitude à cristalliser  $\Rightarrow$  trempe jusqu'au  $T_g$

## Méthodes d'élaboration des verres de fluorures

En cas de non disponibilité ou du coût trop élevé des fluorures de métaux, on utilise des oxydes en présence d'un agent fluorant (comme le bifluorure acide d'ammonium)



Fusion du mélange de fluorures – affinage entre 800 et 950°C sous atmosphère contrôlée neutre (Ar ou N<sub>2</sub> sec) ou réactive (SF<sub>6</sub> ou NF<sub>3</sub>) pour une qualité optique maximale.

Coulage dans un creuset en laiton préchauffé à T ~ T<sub>g</sub> du verre

Recuisson.

## Méthodes d'élaboration des verres de fluorures

Pour verres de très haute qualité optique, on utilise la technique de lévitation:

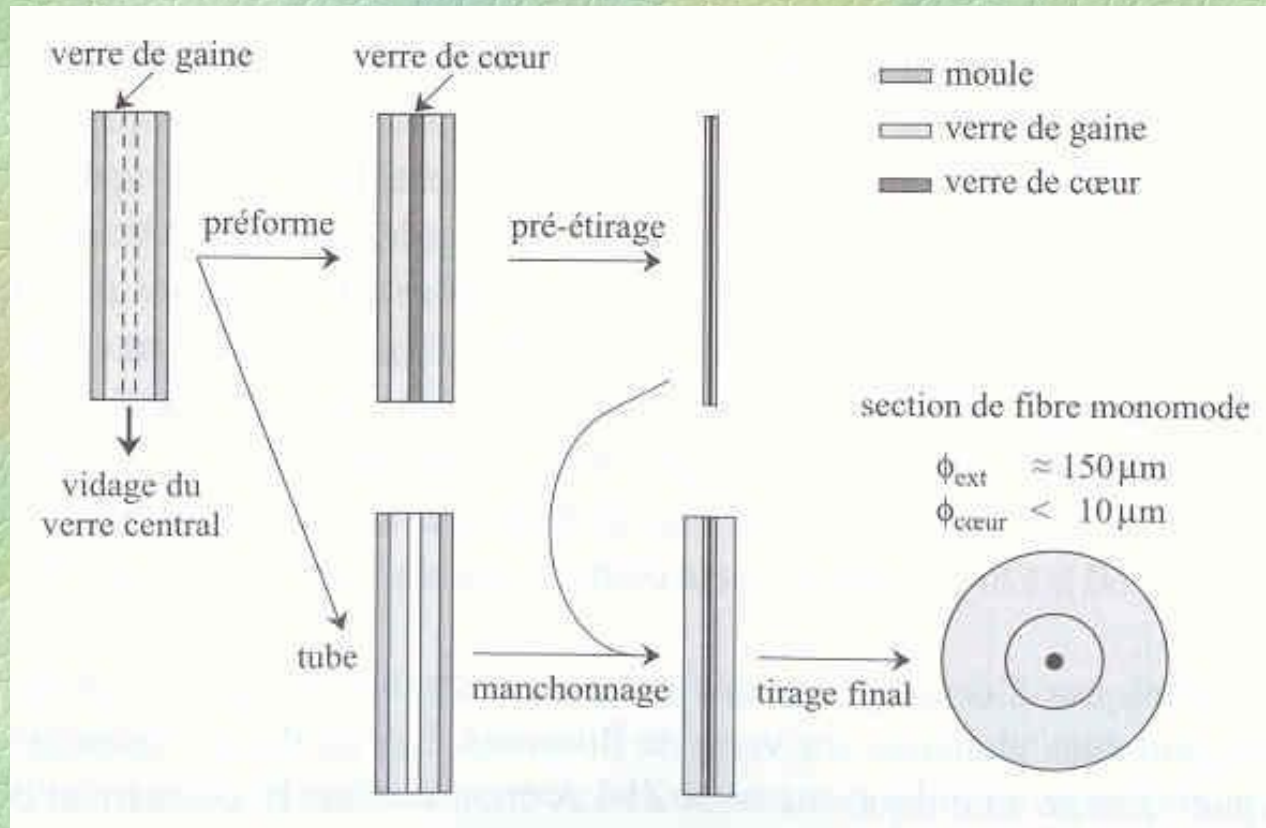
Fusion et refroidissements se font en suspension au-dessus d'un film de gaz (pas de risques de contamination par les creusets)



# Méthodes d'élaboration des verres de fluorures

## Fibres optiques

1°) Coulage d'un tube de verre 2°) Coulage du verre cœur ( $n >$ ) 3°) Etirage de la préforme mère

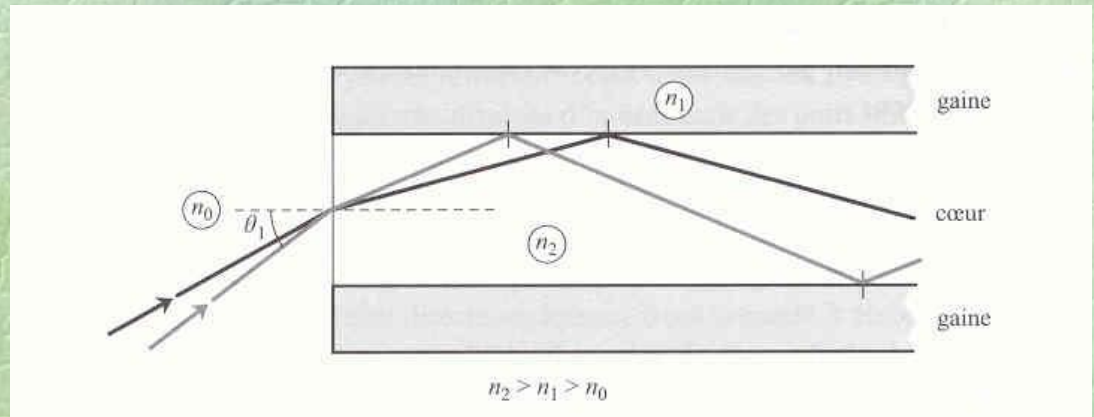


4°) la préforme étirée est manchonnée par un second tube et étirée de nouveau

## Stabilité thermique

Facteur de Hruby :  $(T_x - T_g) / (T_f - T_x)$

Le verre ZBLAN apparaît comme un verre très stable avec un pic de cristallisation très faible  $\Rightarrow$  convient idéalement pour la réalisation de fibres optiques



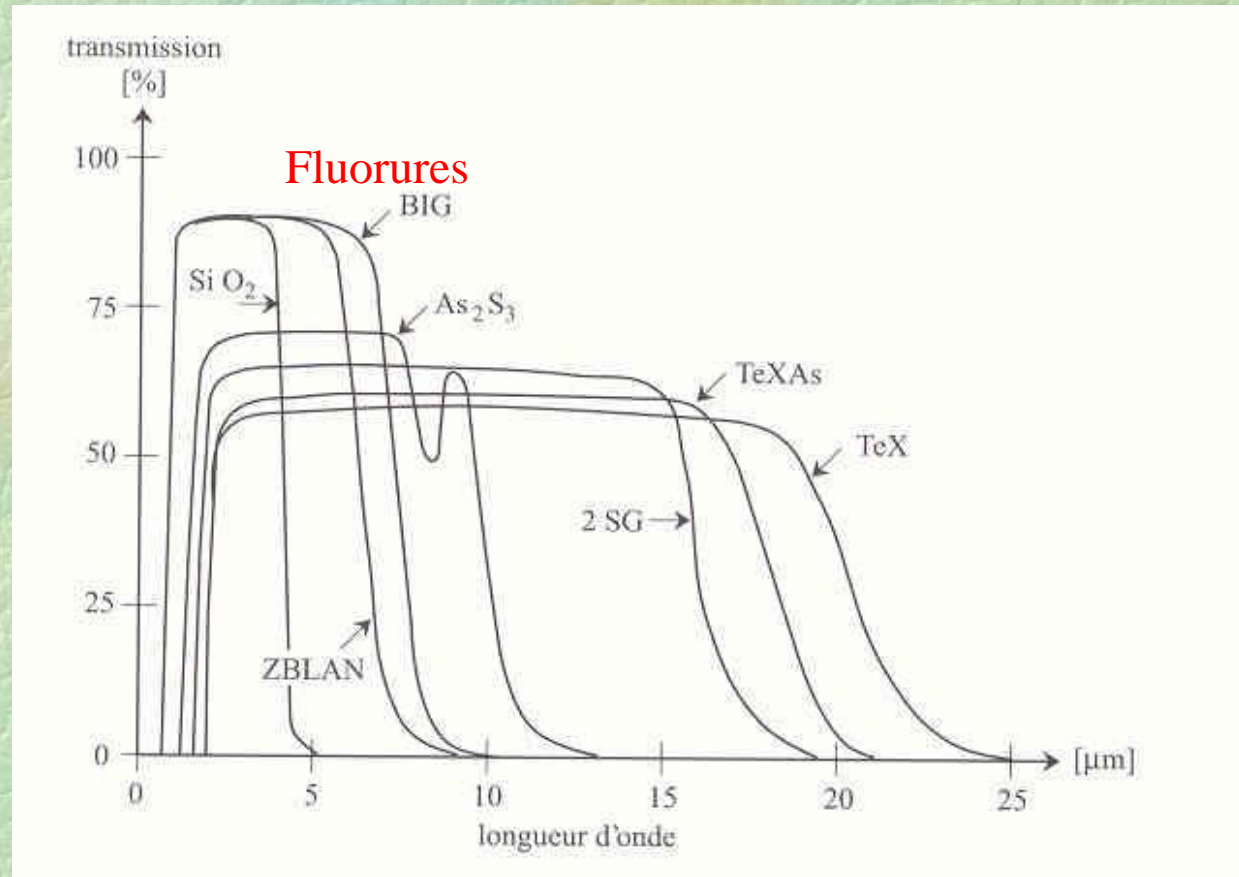
## Indice de réfraction

La plupart des verres de fluorures:  $n \sim 1.5$

Ajout d'éléments lourds et polarisables comme  $Pb^{2+}$  ou  $Cl^-$  pour augmenter l'indice) pour le verre cœur de la fibre.

# Domaines de transmission optique

Large fenêtre de transmission dans IR par rapport à la silice



# Verres de chalcogénures

## 2 familles distinctes:

- Verres acceptant d'être dopés par des ions de terres rares (sulfures ou séléniures de Ge ou de Ga): Applications en optique active
- Verres non dopables ( contenant beaucoup de tellure ou de sélénium): Applications en optique passive

**Tableau 10.3** Composition chimique des verres de fluorures, de sulfures et de chalcogénures.

Verre	Composition
ZBLAN	53 ZrF <sub>4</sub> – 20 BaF <sub>2</sub> – 4 LaF <sub>3</sub> – 3 AlF <sub>3</sub> – 20 NaF
BIG	30 BaF <sub>2</sub> – 18 InF <sub>3</sub> – 12 GaF <sub>3</sub> – 20 ZnF <sub>2</sub> – 10 YbF <sub>3</sub> – 6 ThF <sub>4</sub> – 4 ZrF <sub>4</sub>
PZG	35.3 PbF <sub>2</sub> – 23.5 ZnF <sub>2</sub> – 34.3 GaF <sub>3</sub> – 4.9 YF <sub>3</sub> – 2 AlF <sub>3</sub>
GLS	70 Ga <sub>2</sub> S <sub>3</sub> – 30 La <sub>2</sub> S <sub>3</sub>
GNS	66 Ga <sub>2</sub> S <sub>3</sub> – 34 Na <sub>2</sub> S
GGSSb	Ge <sub>20</sub> Ga <sub>5</sub> Sb <sub>10</sub> S <sub>65</sub>
2SG	Sb – Se – Ge – Ga
TeXAs	Te <sub>2</sub> Se <sub>3</sub> IAS <sub>4</sub>

## Verres de chalcogénures

**Tableau 10.4** Propriétés physiques des verres de fluorures, de sulfures et de chalcogénures. Les indices de réfraction sont donnés à la raie D du sodium (a), à 500 nm (b), à 632,8 nm (c) et à 10 mm (d).

Verre	$T_g$ [°C]	$T_x$ [°C]	$T_f$ [°C]	$n$	$\alpha$ [ $10^{-7} \text{ K}^{-1}$ ]
ZBLAN	262	352	455	1,498 <sup>(a)</sup>	200
BIG	332	460	576	1,505 <sup>(a)</sup>	171
PZG	270	325	547	$\approx 1,59$ <sup>(a)</sup>	170
GLS	556	681	830	$\approx 2,6$ <sup>(b)</sup>	90
GNS	484	599	720	–	145
GGSSb	305	494	–	2,3657 <sup>(c)</sup>	162
2SG	280	–	–	2,63 <sup>(d)</sup>	150
TeXAs	118	–	–	2,8741 <sup>(d)</sup>	270

Sulfures

Sulfure de gallium GLS et GNS:  $T$  assez élevées par rapport aux fluorures

Très grande stabilité du verre GGSSb ( $T_x - T_g = 190^\circ$ )

## Verres de chalcogénures

**Tableau 10.4** Propriétés physiques des verres de fluorures, de sulfures et de chalcogénures. Les indices de réfraction sont donnés à la raie D du sodium (a), à 500 nm (b), à 632,8 nm (c) et à 10 mm (d).

Verre	$T_g$ [°C]	$T_x$ [°C]	$T_f$ [°C]	$n$	$\alpha$ [ $10^{-7} \text{ K}^{-1}$ ]
ZBLAN	262	352	455	1,498 <sup>(a)</sup>	200
BIG	332	460	576	1,505 <sup>(a)</sup>	171
PZG	270	325	547	$\approx 1,59$ <sup>(a)</sup>	170
GLS	556	681	830	$\approx 2,6$ <sup>(b)</sup>	90
GNS	484	599	720	—	145
GGSSb	305	494	—	2,3657 <sup>(c)</sup>	162
2SG	280	—	—	2,63 <sup>(d)</sup>	150
TeXAs	118	—	—	2,8741 <sup>(d)</sup>	270

Les verres **2SG et TeXAs** (famille optique passive) ont un  $T_g$  très bas et absence de cristallisation

Indices de réfraction beaucoup plus élevés car polarisabilité plus marquée des ions  $S^{2-}$  et  $Se^{2-}$  par rapport aux halogènes

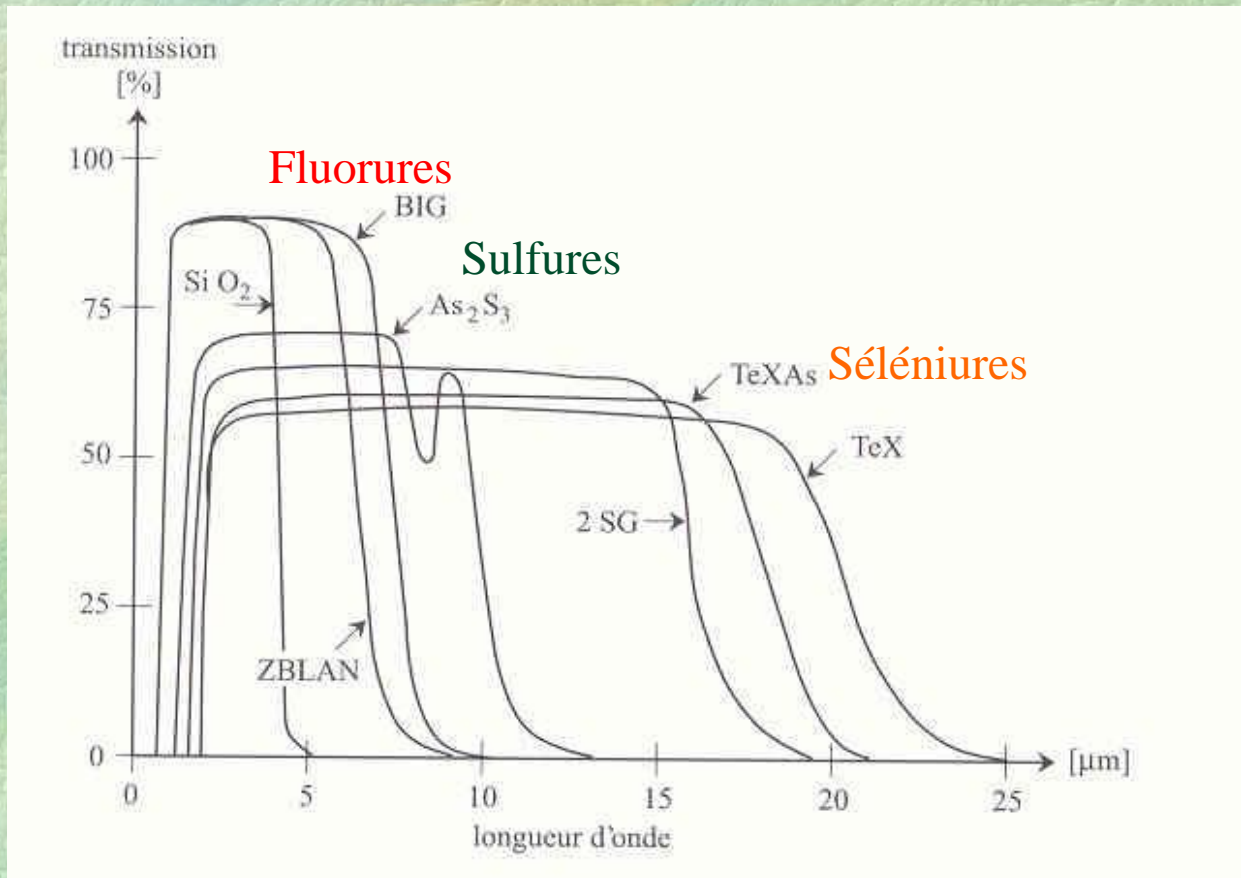
**Tableau 10.4** Propriétés physiques des verres de fluorures, de sulfures et de chalcogénures. Les indices de réfraction sont donnés à la raie D du sodium (a), à 500 nm (b), à 632,8 nm (c) et à 10 mm (d).

Verre	$T_g$ [°C]	$T_x$ [°C]	$T_f$ [°C]	$n$	$\alpha$ [ $10^{-7} K^{-1}$ ]
ZBLAN	262	352	455	1,498 <sup>(a)</sup>	200
BIG	332	460	576	1,505 <sup>(a)</sup>	171
PZG	270	325	547	$\approx 1,59$ <sup>(a)</sup>	170
GLS	556	681	830	$\approx 2,6$ <sup>(b)</sup>	90
GNS	484	599	720	—	145
GGSSb	305	494	—	2,3657 <sup>(c)</sup>	162
2SG	280	—	—	2,63 <sup>(d)</sup>	150
TeXAs	118	—	—	2,8741 <sup>(d)</sup>	270

## Domaines de transmission optique

Energie de phonons plus faible  $\Rightarrow$  les verres sulfures sont transparents jusqu'à  $\sim 10 \mu\text{m}$  dans l'IR:  $\text{As}_2\text{S}_3$

Verres à base de chalcogénures lourds (Se et Te) transmettent jusqu'à 15 ou 18  $\mu\text{m}$





# Méthodes d'élaboration des verres de chalcogénures

Matières premières: éléments ou leurs sulfures ou séléniures

Les propriétés optiques dépendent fortement de la pureté  $\Rightarrow$   
produits de très haute pureté (5N)

Pesée en boîte sèche sous atmosphère contrôlée

Introduction dans une ampoule de silice

Four basculant, lente montée en  $T^\circ$  jusque la  $T^\circ$  de synthèse

$\sim 800$  et  $1000^\circ\text{C}$

Homogénéisation par agitation par balancement du four pendant  
10 heures

Refroidissement, trempe et recuisson à  $T_g$

# Méthodes d'élaboration des verres de chalcogénures

## Fibres optiques

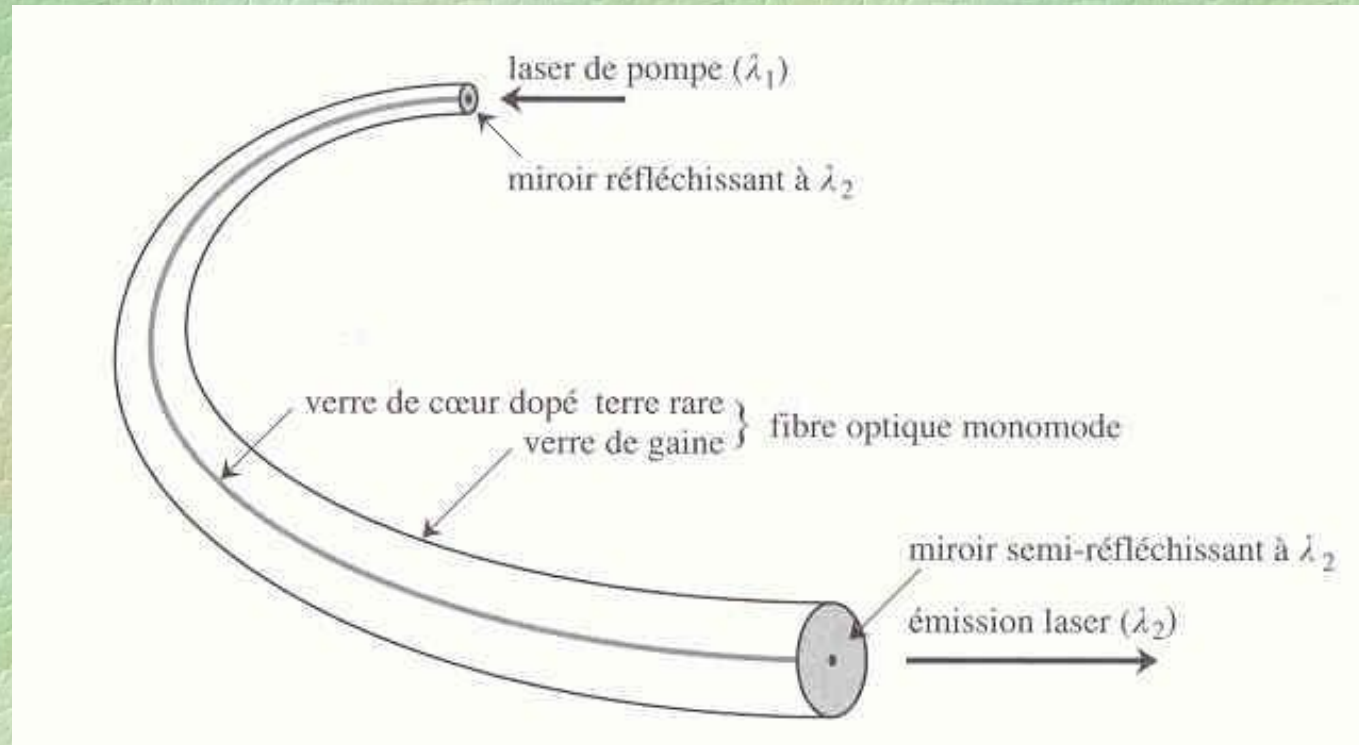
\* Synthèse des 2 types de verre « gaine et cœur » séparément dans des tubes de silice scellés, la gaine est obtenue par centrifugation pendant le refroidissement du verre;

Après recuit, le barreau est introduit dans le tube.

\* Méthode du double creuset peut être appliquée aux verres de chalcogénures, les bains étant maintenus sous Ar.

# Applications des verres optiques

## Optique active: fibres lasers



Verre de cœur actif dopé par un ion de terres rares

**Tableau 10.5** Fibres laser ZBLAN dopées terres rares. Puissance de pompe : incidente (ic), injectée (ij) ou absorbée (a). (ap): pompage par addition de photons.

403 $\lambda$ [ $\mu\text{m}$ ]	Terre rare	Puissance de sortie	Caractéristique de la pompe	Référence
0,381	Nd	74 $\mu\text{W}$	590 nm (ap); 275 mW (ic)	[10.63]
0,412	Nd	500 $\mu\text{W}$	590 nm (ap); 320 mW (ic)	[10.64]
0,481	Tm	230 mW	1123 nm (ap); 1,6 W (ic)	[10.65]
0,544	Er	3 mW	801 nm (ap); 40 mW (ij)	[10.66]
0,635	Yb/Pr	4,5 mW	860 nm; 170 mW (ic)	[10.67]
2,79	Er	1,04 W	970 nm; 4,42 W (ij)	[10.68]
2,9	Ho	12 mW	640 nm; 500 mW (a)	[10.69]
3,45	Er	2,5 mW	650 nm; 300 mW (a)	[10.70]
3,9	Ho	11 mW (77K)	885 nm; 900 mW (ij)	[10.71]

Les  $\lambda$  laser sur fibres ZBLAN s'étendent par valeurs discrètes de l'UV jusqu'à IR moyen

# Applications

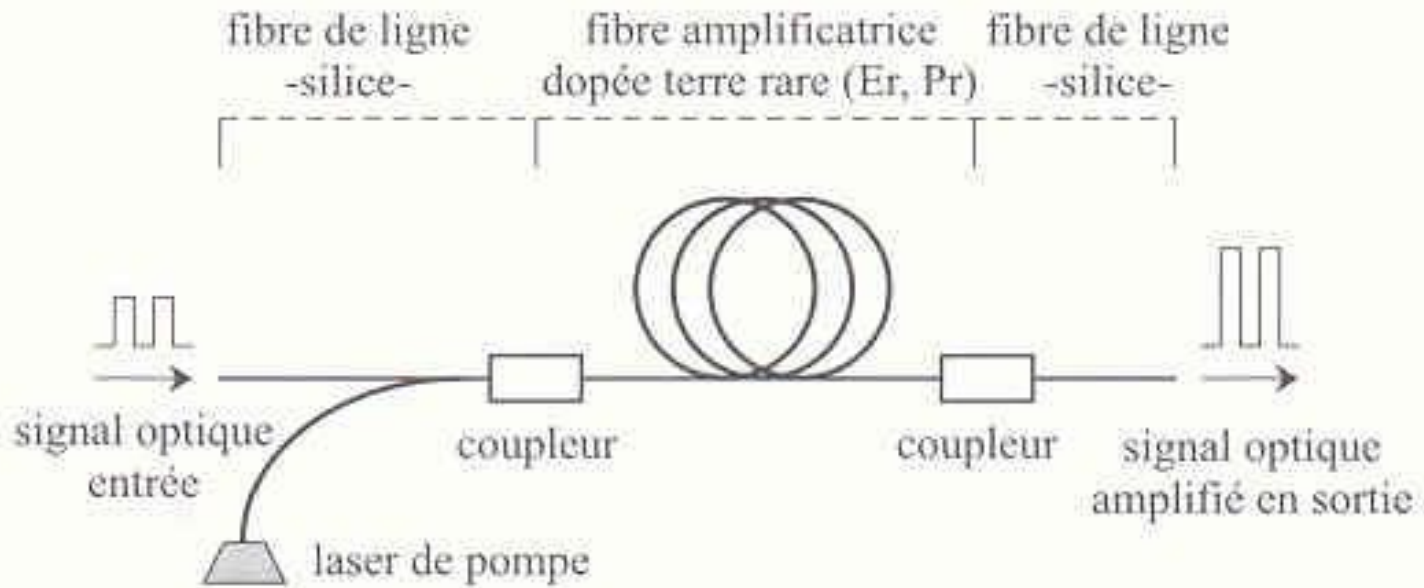
**Tableau 10.6** Caractéristiques des amplificateurs optiques à fibre de fluorures ou de sulfures. Sauf indication contraire, les fibres employées sont de type ZBLAN. (DL): diode laser.

$\lambda$ [ $\mu\text{m}$ ]	Terre rare	Gain max. [dB]	Caractéristiques de la pompe	Référence
1,3	Pr	30,5	1,017 $\mu\text{m}$ 500 mW (MOPA)	[10.77]
1,3	Pr (PbF <sub>2</sub> -InF <sub>3</sub> )	22	1,015 $\mu\text{m}$ 238 mW (MOPA)	[10.79]
1,34	Pr (GNS)	32	1,017 $\mu\text{m}$ 90 mW (Ti:saph.)	[10.81]
1,47	Tm	28	1,064 $\mu\text{m}$ 200 mW (Nd:YAG)	[10.86]
1,54	Er	33	1,48 $\mu\text{m}$ 50 mW (LD)	[10.82]
1,658	Tm	35	1,22 $\mu\text{m}$ 140 mW (LD)	[10.87]

# Applications

## Optique active: amplificateurs optiques

Amplification directe des signaux lumineux sans conversion en signal électrique



# Applications

## Optique Passive

*Domaine 8 – 12  $\mu\text{m}$*

Les verres de chalcogénures (TeX) sont transparents dans la bande 8 – 12  $\mu\text{m}$  et conviennent pour l'optique des caméras IR

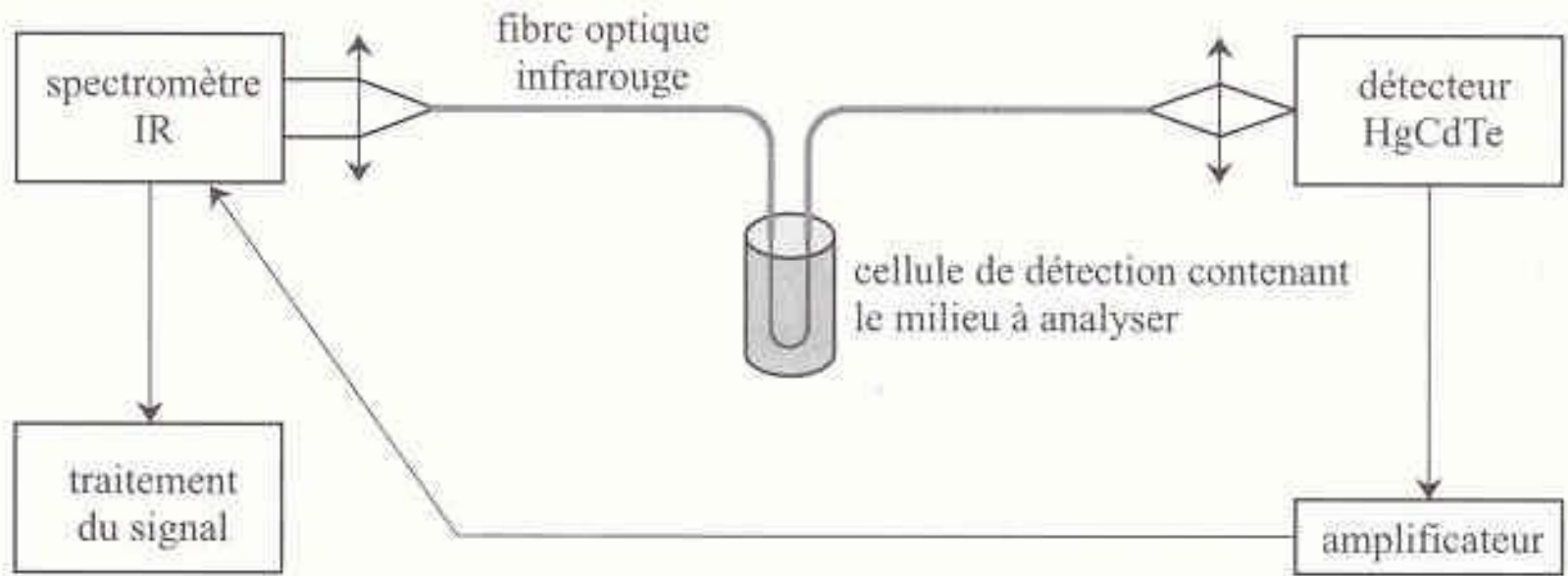
Fibres optiques : mesure de température sans contact ( -20°C et +200°C) à partir d'un flux lumineux IR

# Applications

Optique Passive:

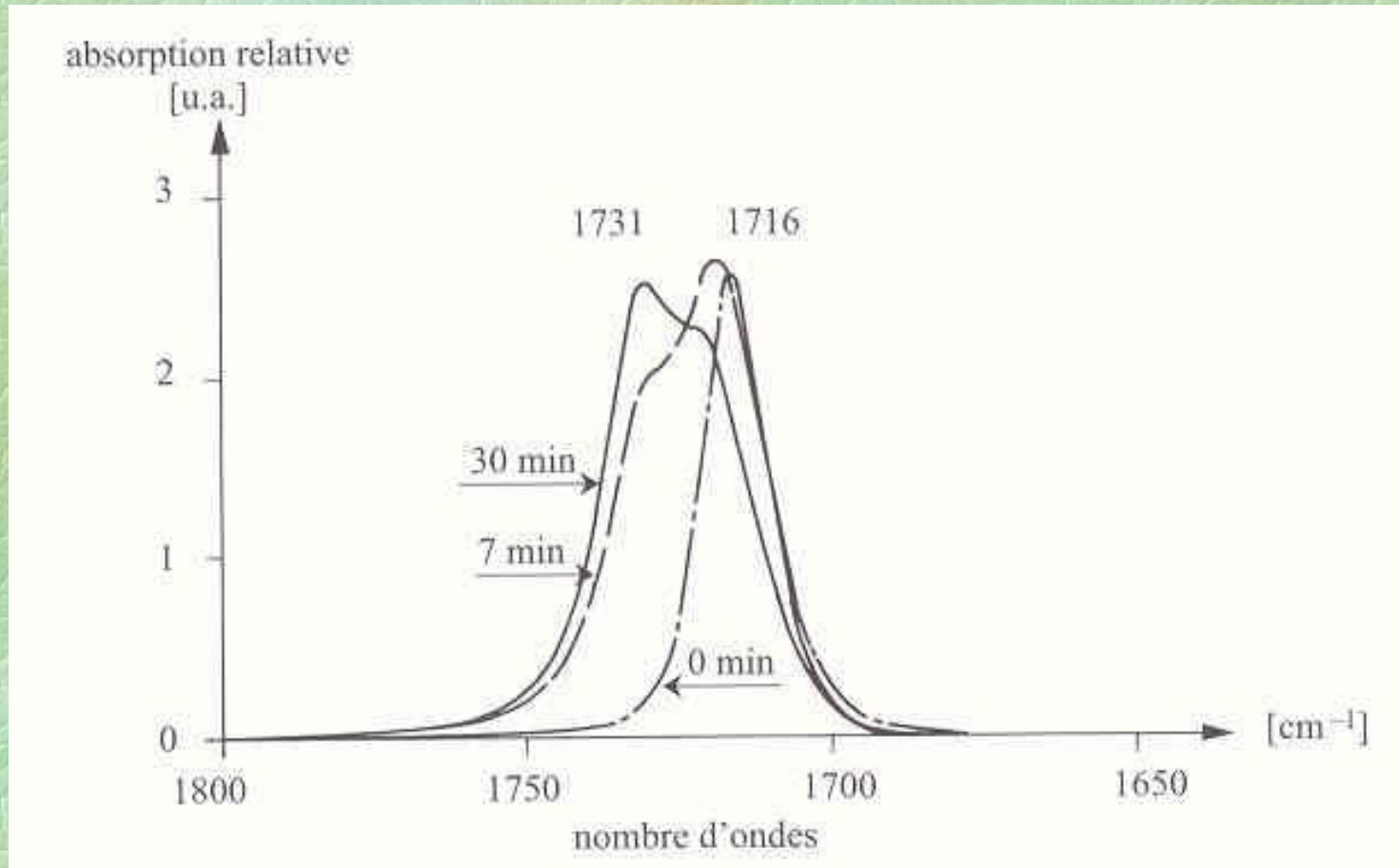
*Spectroscopie déportée par ondes évanescentes*

Fibres optiques IR pour détection de vibration de liaisons organiques. Elles permettent une analyse déportée (en des points peu accessibles) ou d'environnement hostile





⇒ Suivi de réactions chimiques : fermentation lactique, vinification ... en agroalimentaire, en chimie industrielle...



*Transformation de pentanone en éthylformate: décalage du pic d'absorption du groupement C=O*

# Conclusions

L'expérience acquise dans le domaine du confinement par vitrification des déchets radioactifs peut être mise à profit pour le traitement de tous les déchets toxiques, par exemple les « REFIOM » (résidus d'épuration des fumées industrielles des ordures ménagères) qui contiennent des métaux lourds.

Les verres spéciaux à fonctions optiques se positionnent comme des matériaux complémentaires des verres d'oxydes classiques. Certains sont déjà commercialisés comme les amplificateurs optiques à fibre ZBLAN pour les télécommunications ainsi que les verres TeX pour les optiques de caméras IR.