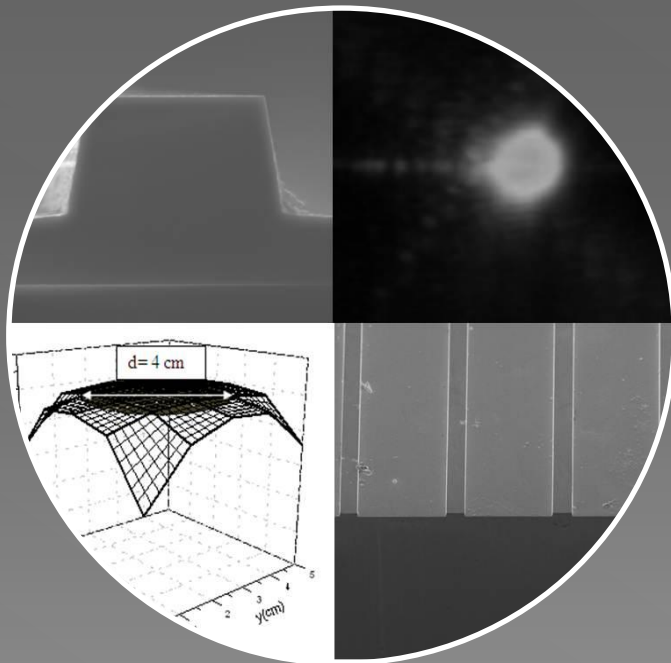


Guides d'onde à base de films chalcogénures pour l'optique intégrée infrarouge

C. Vigreux

M. Vu Thi, R. Escalier, A. Pradel

Institut Charles Gerhardt Montpellier,
Equipe « Chalcogénures et Verres »,
UM2-CNRS, Montpellier, France



Verres chalcogénures : une classe de semi-conducteurs amorphes

liés de façon covalente

Formateurs de réseau

Éléments chalcogènes

1																	18	
1	H																	He
2	Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
3	Na	Mg									Al	Si	P	S	Cl	Ar		
4	K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
5	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
6	Cs	Ba	La-Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
7	Fr	Ra	Ac-Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Cn						

S

Se

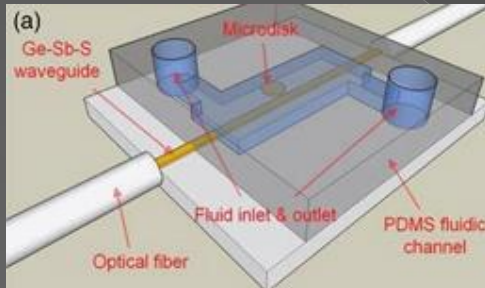
Te

des propriétés qui peuvent être ajustées pour des applications spécifiques

Large gamme de matériaux amorphes

Métrologie de l'environnement

Micro-capteurs pour la détection de gaz polluants
CO₂: 4,2 μm, SO₂: 8,7 μm,
CO : 2,3 et 4,6 μm, ...



Viens et al.
J. Lightwave Technol. 17(7), 1184 (1999)

Amplification optique

Guides d'onde IR actifs, lasers

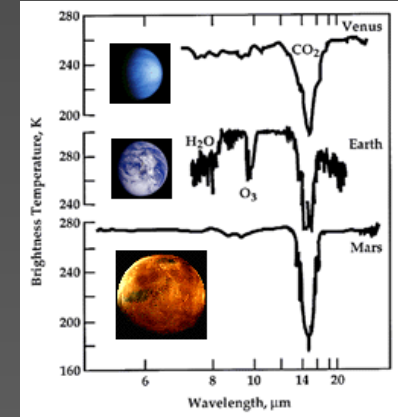
Micro-capteurs pour l'analyse des milieux biologiques

Wilkinson et al., SPIE - Advanced Materials and Optical Systems for Chemical and Biological Detection, Boston (2007)

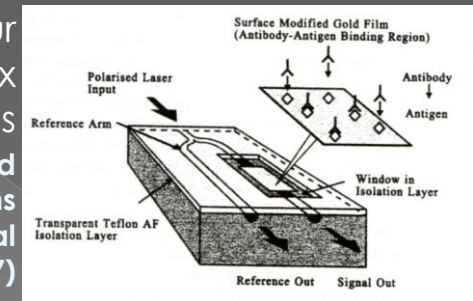
Interférométrie spatiale

Composants pour la détection et l'analyse des exo-planètes

H₂O
O₃
CO₂



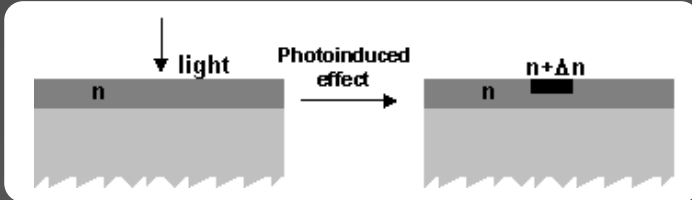
Biologie



Développement de guides d'onde canaux à base de films chalcogénures

Différentes technologies

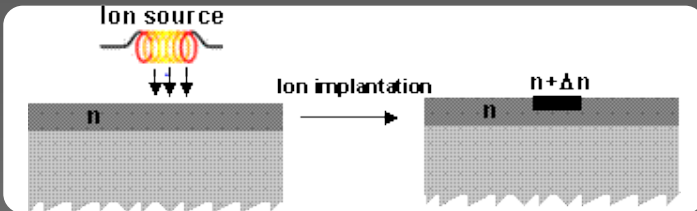
Ecriture laser



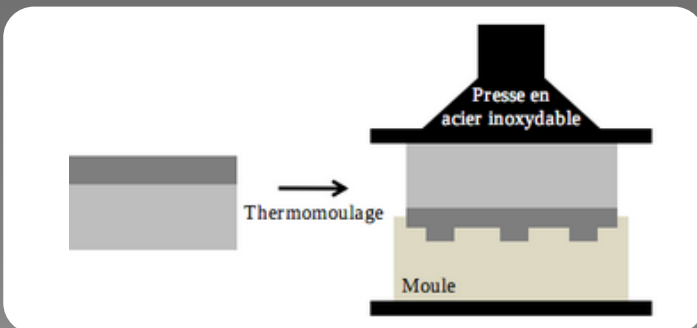
Photodiffusion d'argent



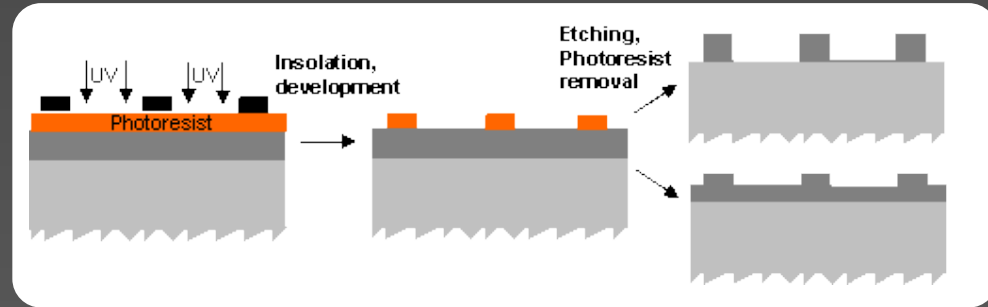
Implantation ionique



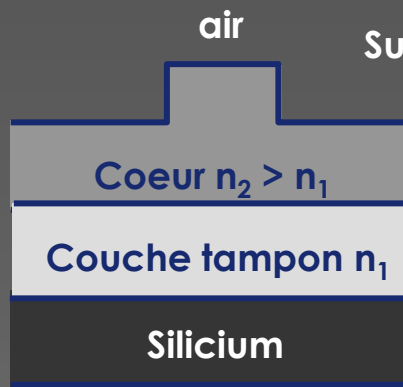
Pressage à chaud



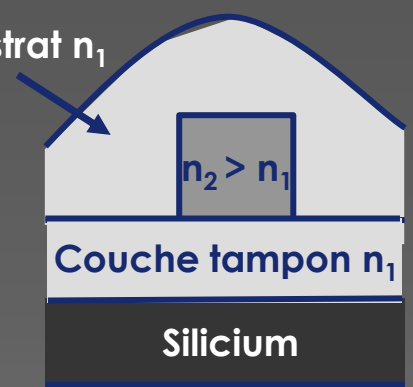
Photolithographie et gravure



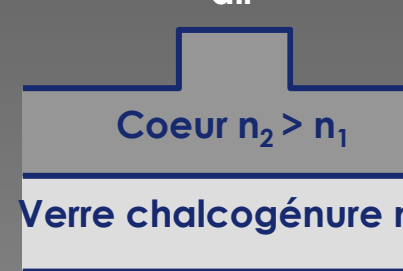
Guides RIB



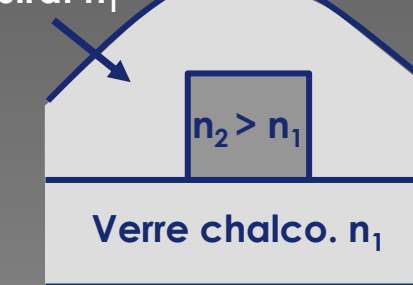
Guides enterrés



air



Superstrat n_1



IR → - films épais
- gravure profonde

Obtention de films tellurés épais aux propriétés ajustables

Différentes voies de dépôt

Co-évaporation thermique

La plus utilisée

Evaporation thermique

Facile à mettre en oeuvre et vitesse de dépôt élevée

Mais peu adaptée aux couches multi-éléments

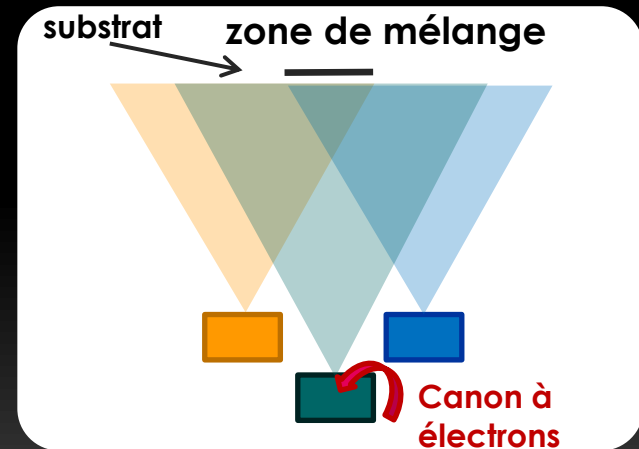
Pulvérisation cathodique RF

Ablation laser

Adaptées aux couches multi-éléments

Mais nécessité de fabriquer des cibles et peu adaptées aux dépôts sur des substrats larges

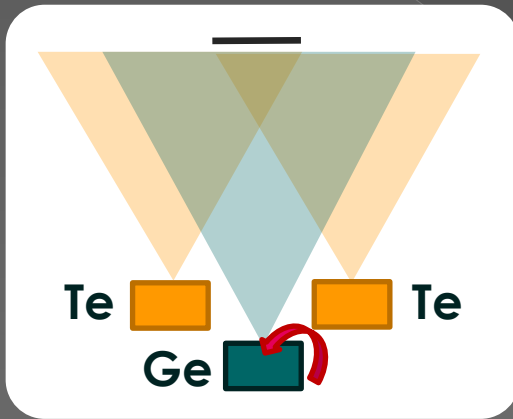
Mêmes avantages que l'évaporation thermique mais adaptée aux couches multi-éléments



Méthode qui permet de varier facilement la composition des couches

Trois systèmes étudiés

TeGe



TeGeGa



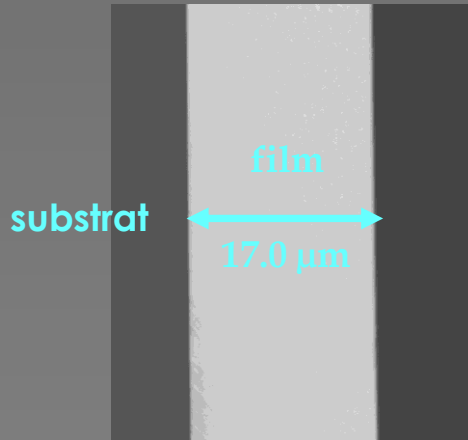
TeGeSe



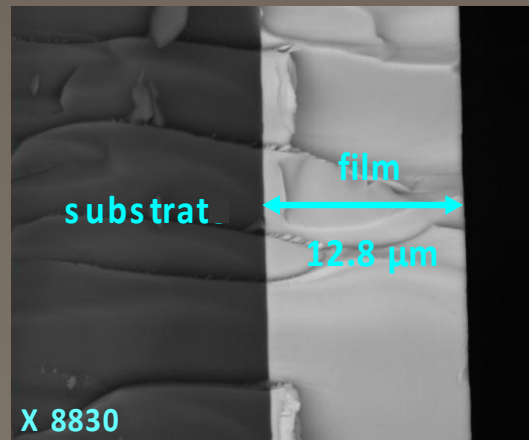
Principaux résultats

Obtention de films épais et homogènes

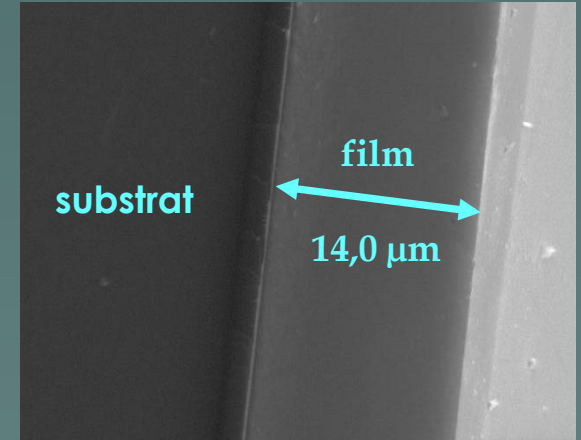
TeGe



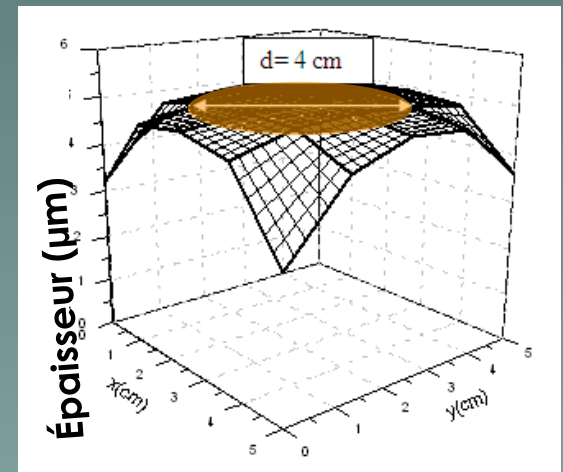
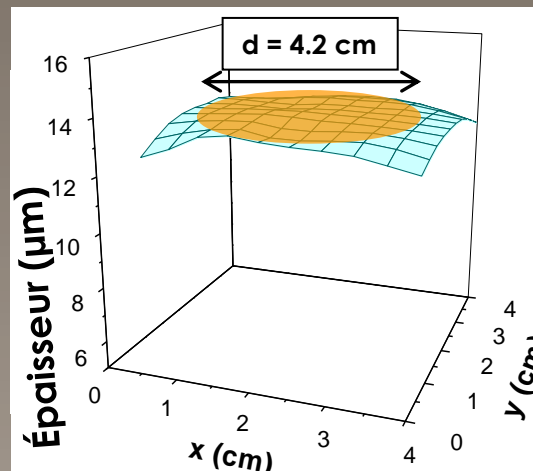
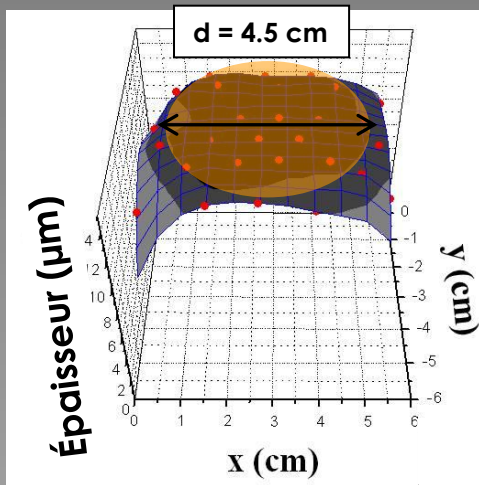
TeGeGa



TeGeSe

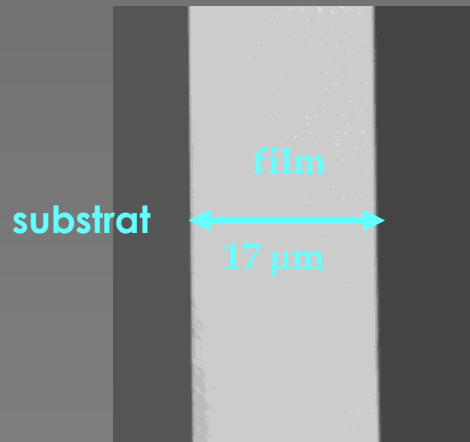


Homogénéité en épaisseur

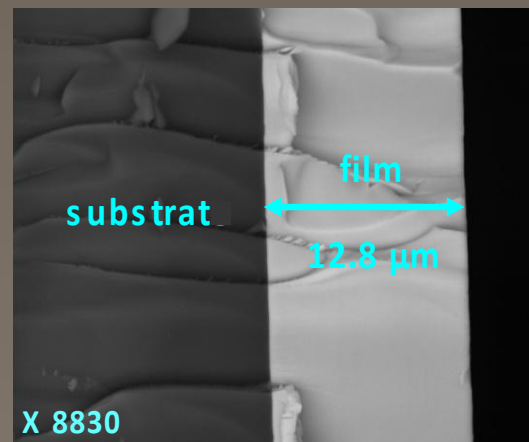


Obtention de films épais et homogènes

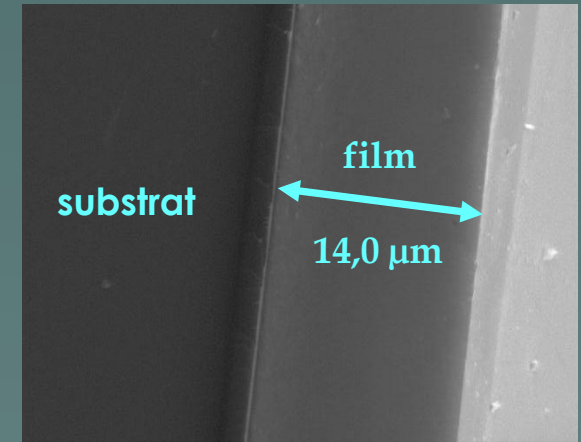
TeGe



TeGeGa

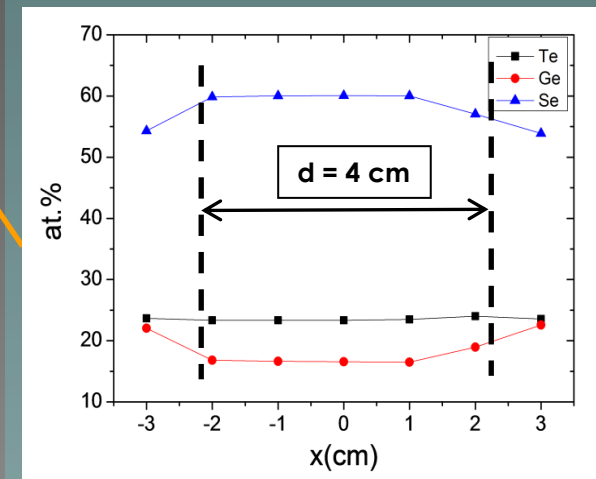
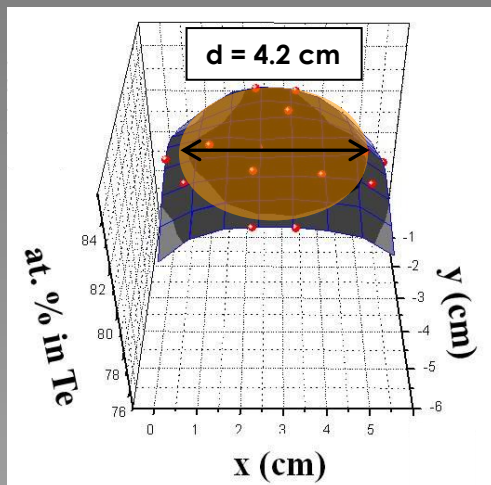


TeGeSe



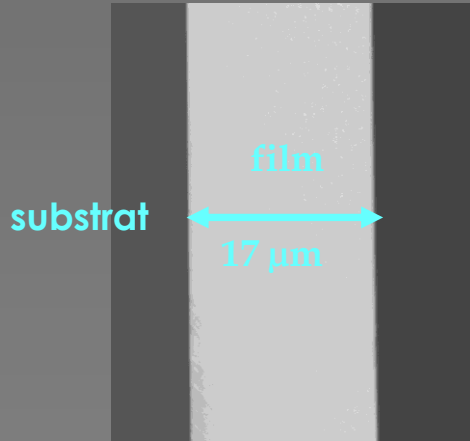
Homogénéité en composition

en surface (EPMA)

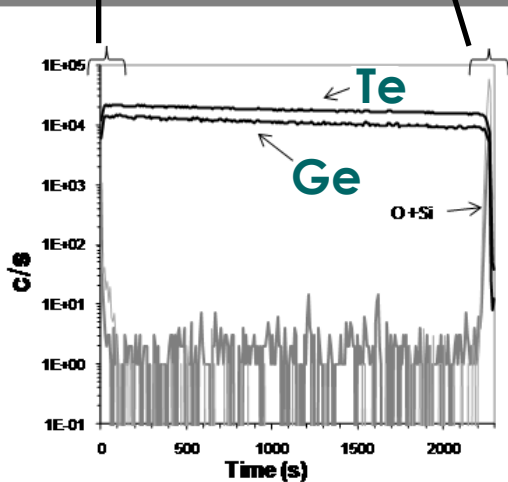


Obtaining of thick homogeneous films

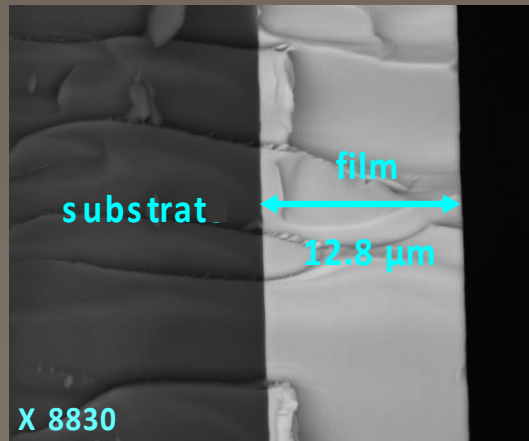
TeGe



Surface du film Interface avec le substrat

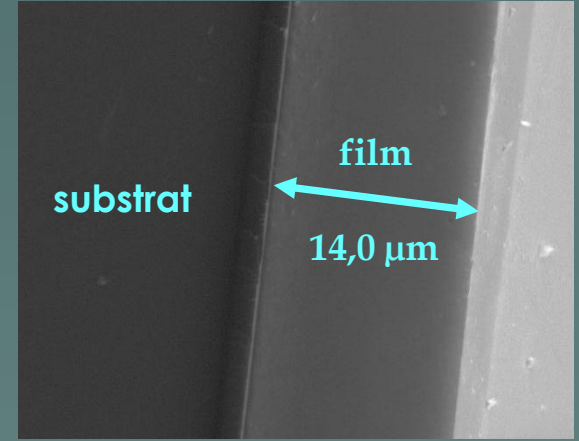


TeGeGa

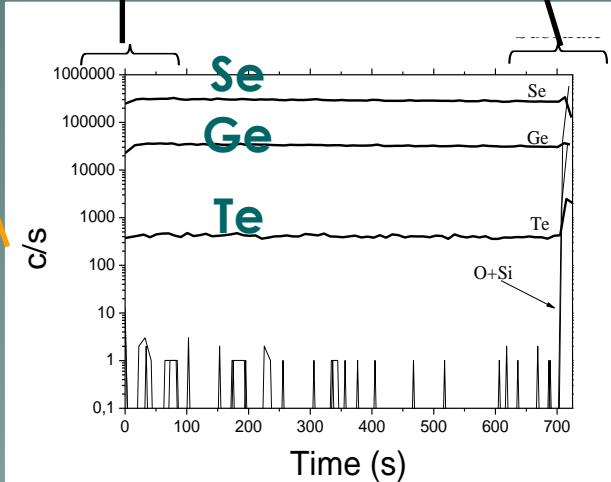


Homogénéité en composition
en profondeur (SIMS)

TeGeSe



Surface du film Interface avec le substrat

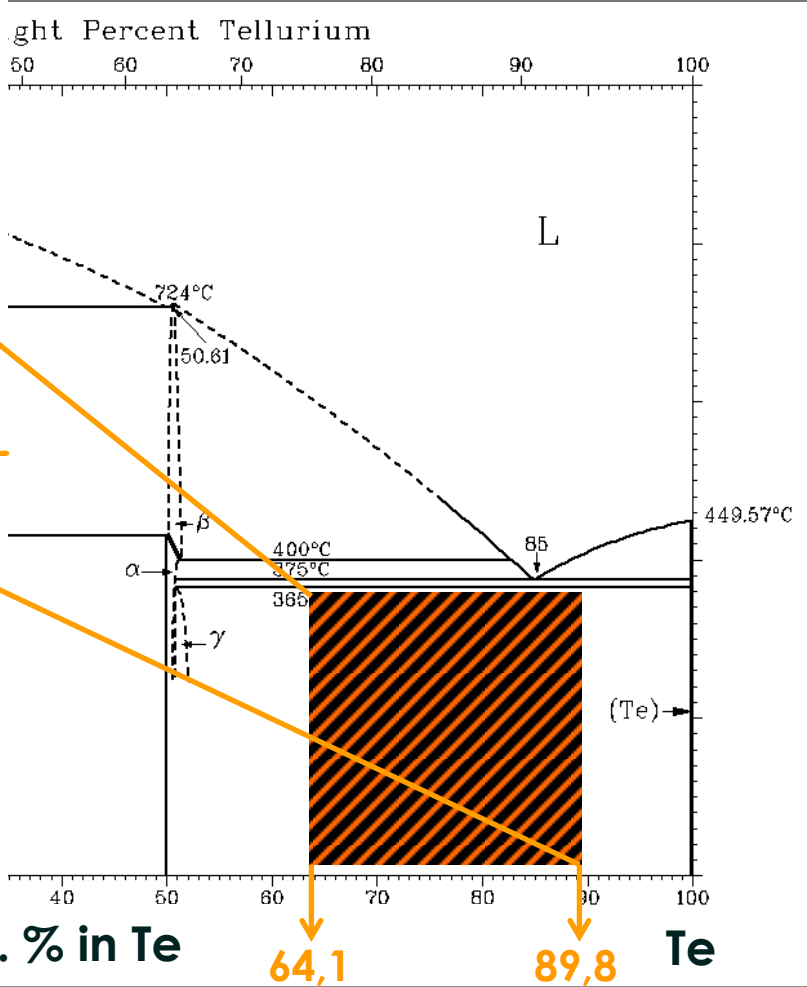
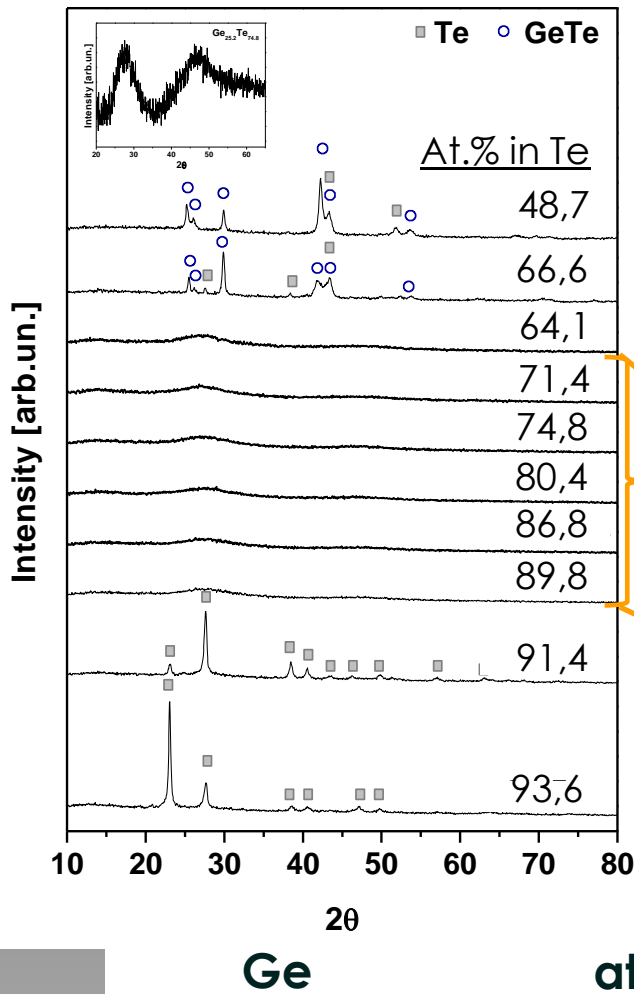


Obtention de films avec des compositions très variées

TeGe

TeGeGa

TeGeSe



Obtention de films amorphes dans une plus large gamme de compositions que pour les massifs

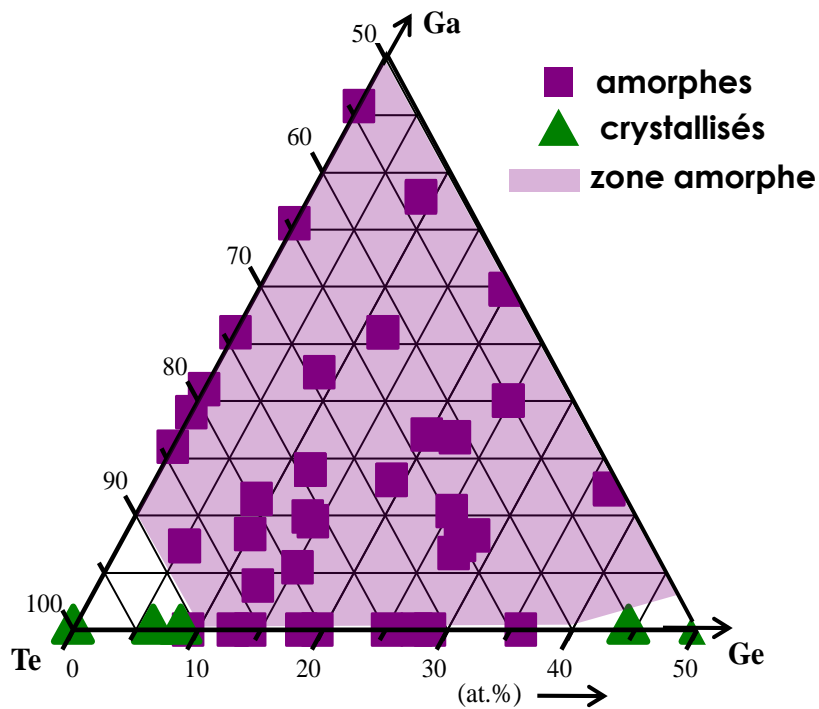
Obtention de films avec des compositions très variées

TeGe

TeGeGa

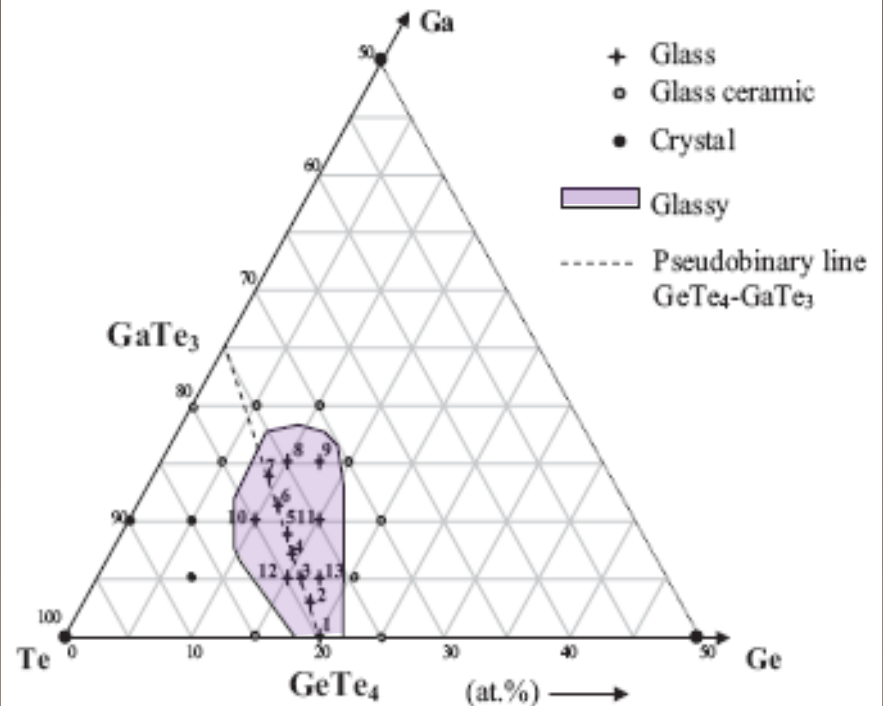
TeGeSe

Films obtenus par co-évaporation



Très large zone amorphe

Matériaux massifs



S. Danto et al, Adv. Funct. Mater., 16, 1846 (2006)

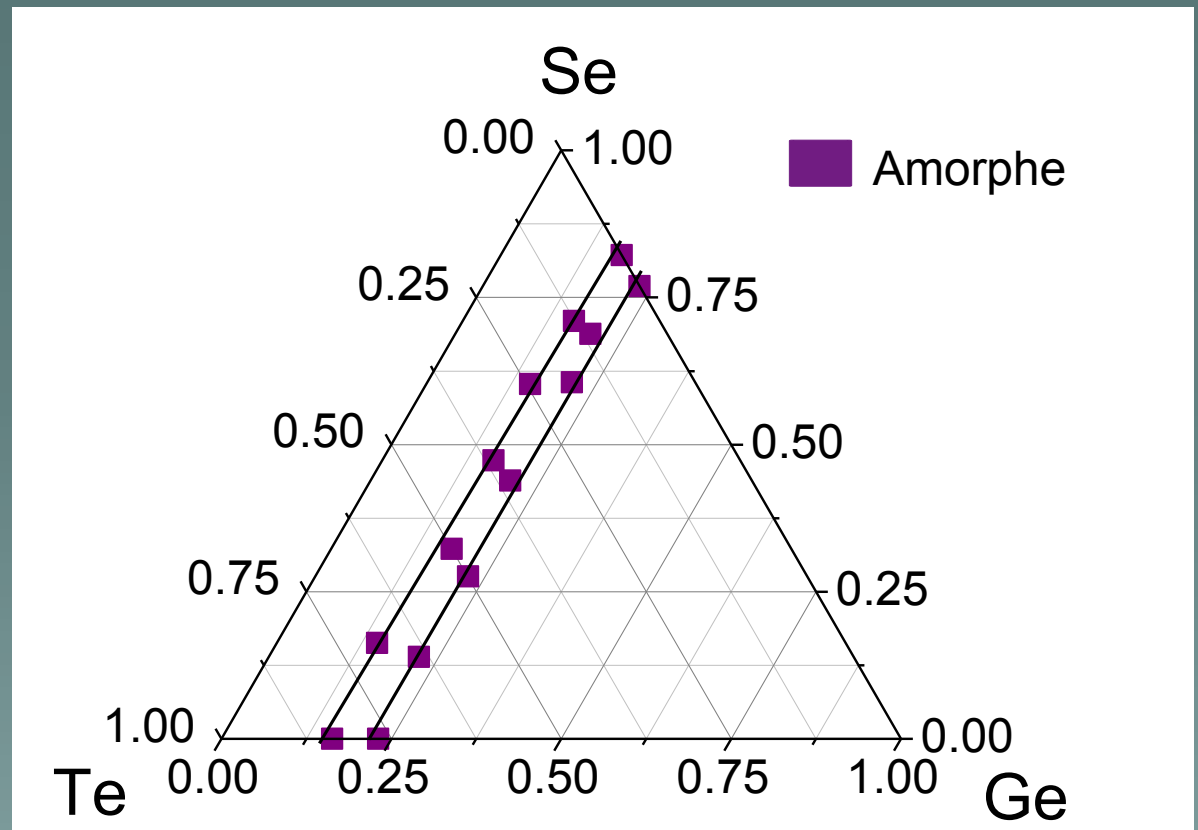
Obtention de films avec des compositions très variées

TeGe

TeGeGa

TeGeSe

2 lignes ont été étudiées

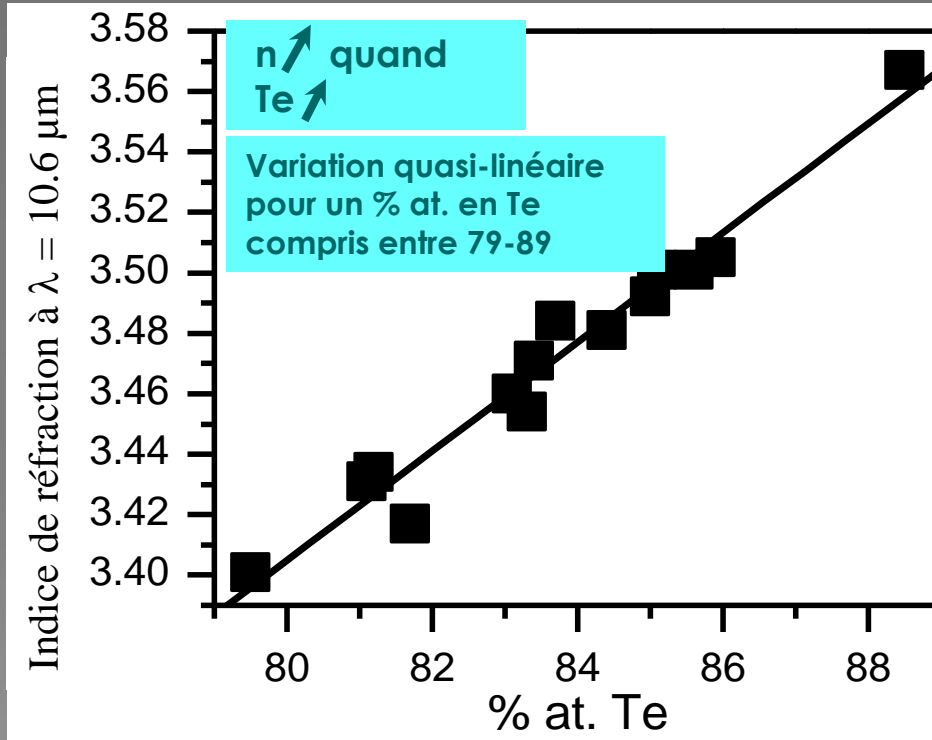


Obtention de films aux propriétés ajustables

TeGe

TeGeGa

TeGeSe



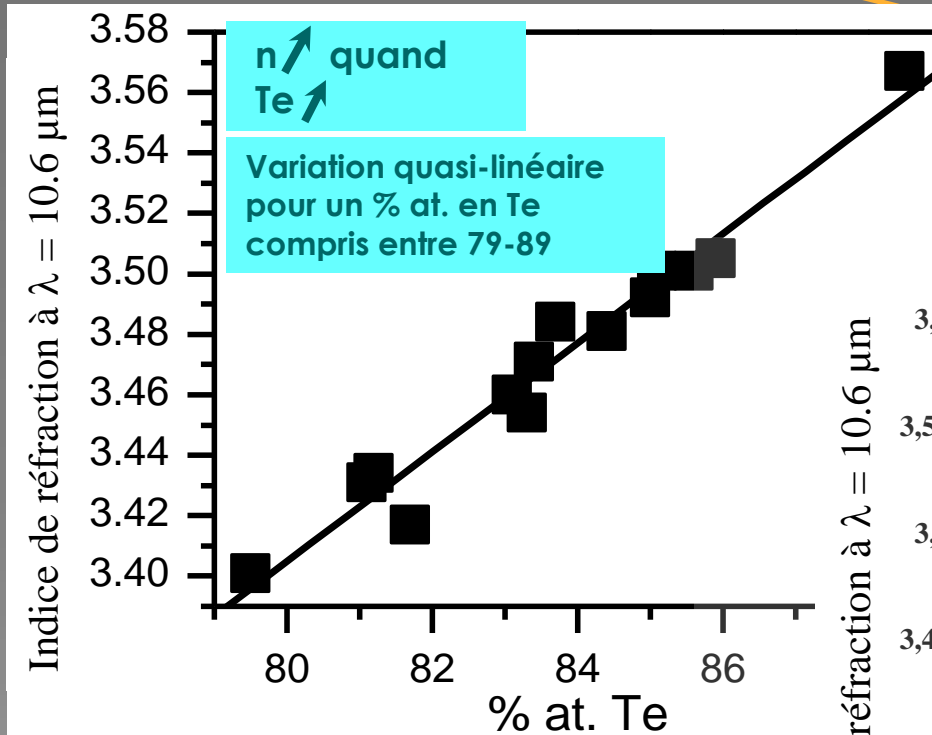
Indice de réfraction mesuré par m-lines
à $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$

Obtention de films aux propriétés ajustables

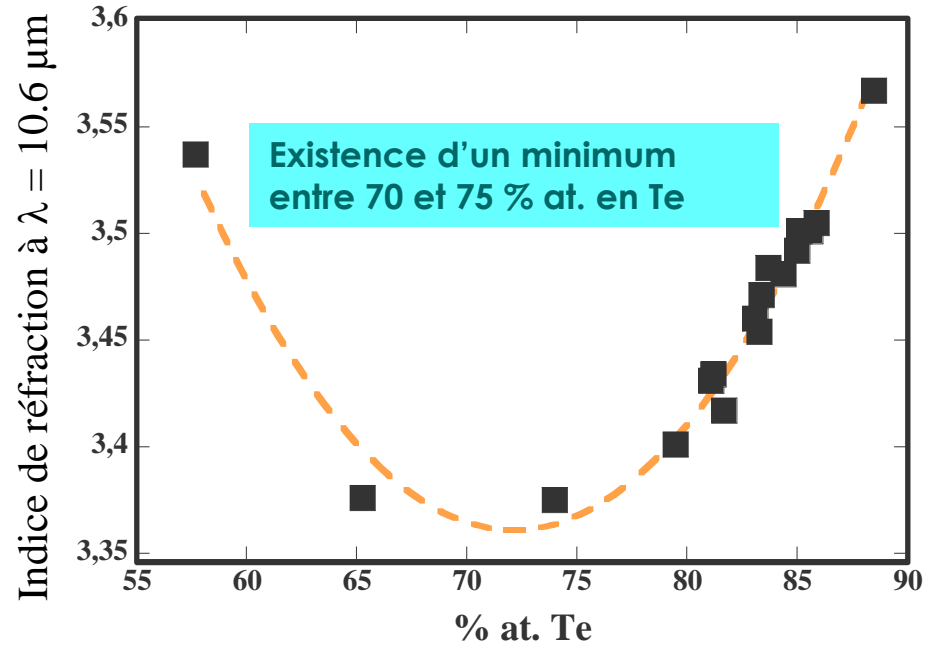
TeGe

TeGeGa

TeGeSe



Indice de réfraction mesuré par m-lignes à $\lambda = 10.6 \mu\text{m}$

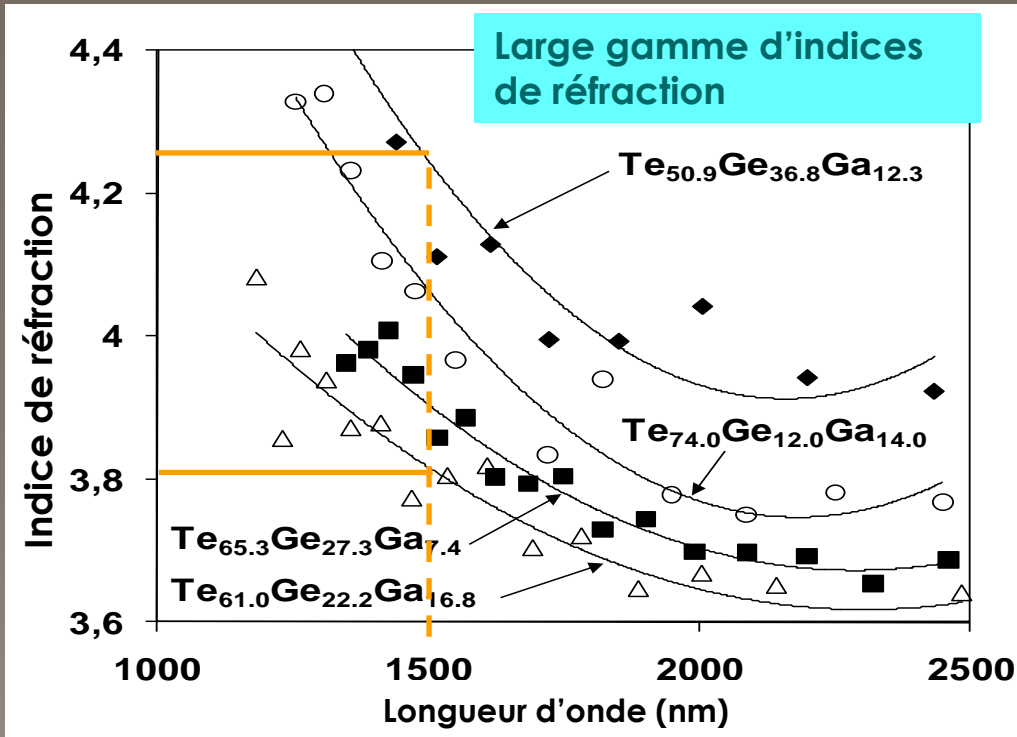


Obtention de films aux propriétés ajustables

TeGe

TeGeGa

TeGeSe



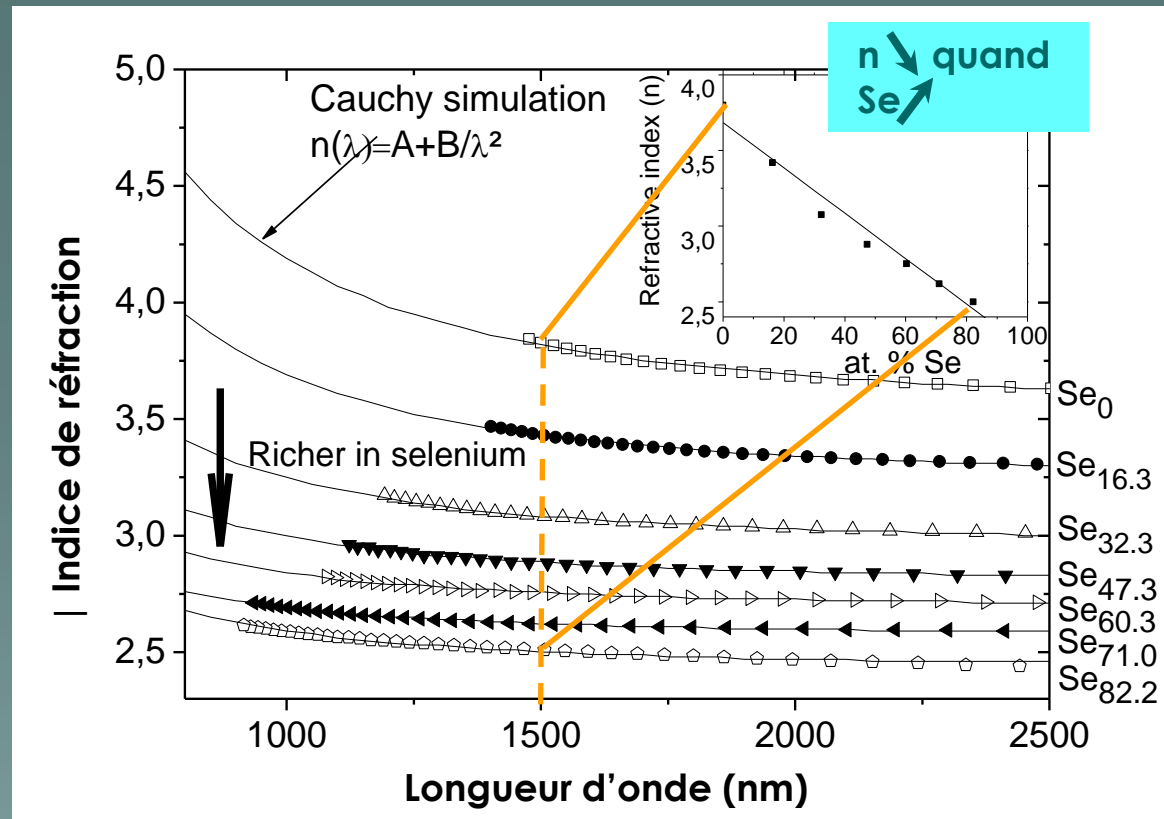
Indice de réfraction calculé par la méthode de Swanopel

Obtention de films aux propriétés ajustables

TeGe

TeGeGa

TeGeSe



Indice de réfraction calculé par la méthode de Swanoepe

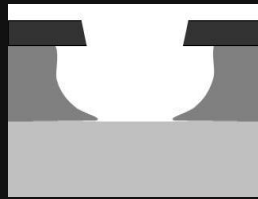
Gravure profonde des films tellurures

Différentes voies de gravure

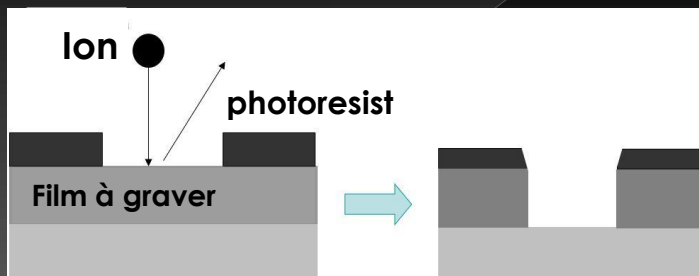
Gravure humide

Facile à mettre en oeuvre et très sélective

mais attaque isotrope



Gravure sèche

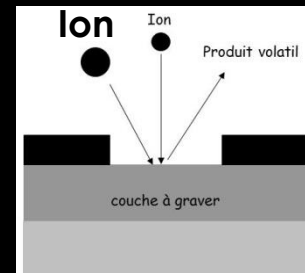


Anisotrope mais non sélective

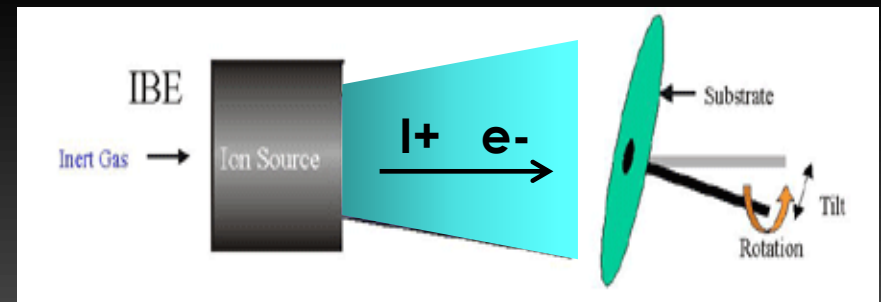
Gravure ionique réactive

Combine 2 effets complémentaires:

- Attaque chimique qui permet une bonne sélectivité
- Gravure physique qui augmente le caractère anisotrope



Usinage ionique

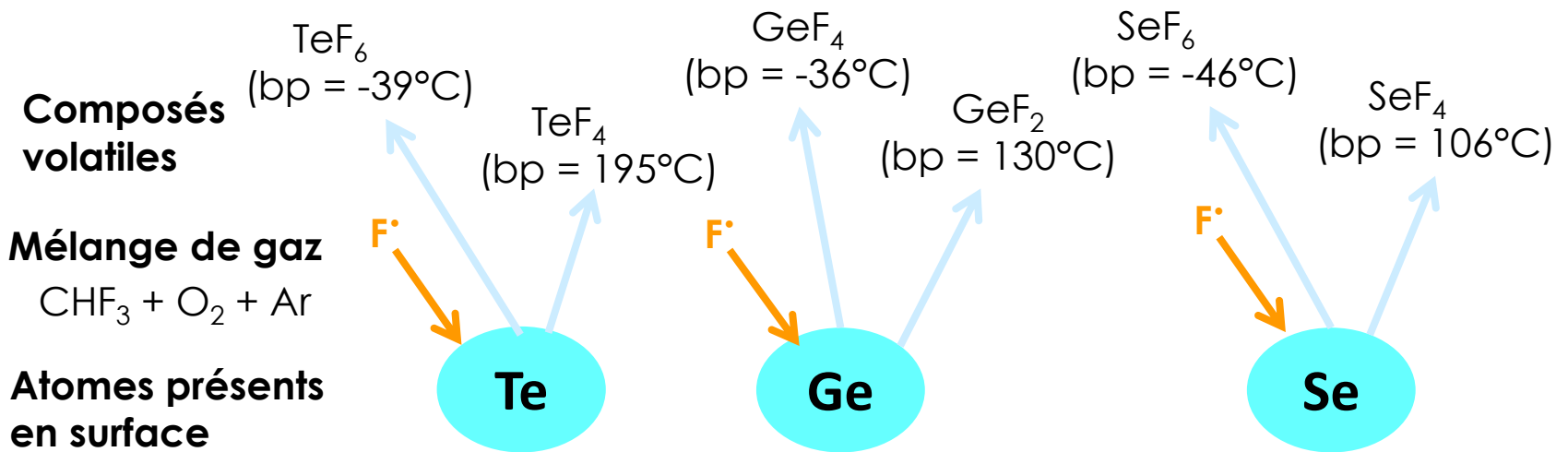


Equipement doté d'un porte-substrat tournant mais aussi pouvant être tilté, de sorte à obtenir des profils d'angle contrôlés

Gravure ionique réactive : 2 systèmes étudiés

TeGe

TeGeSe



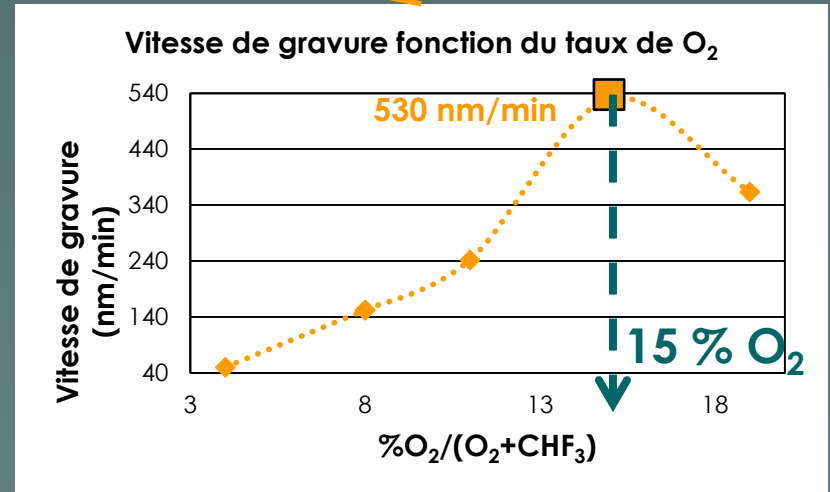
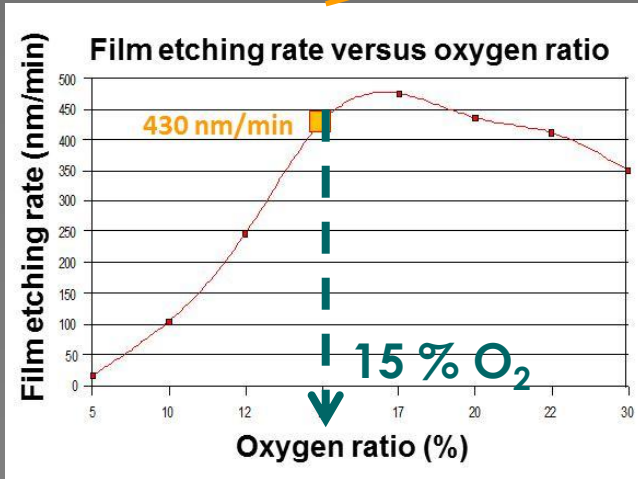
Principaux résultats

Obtention de profondeurs de gravure importantes

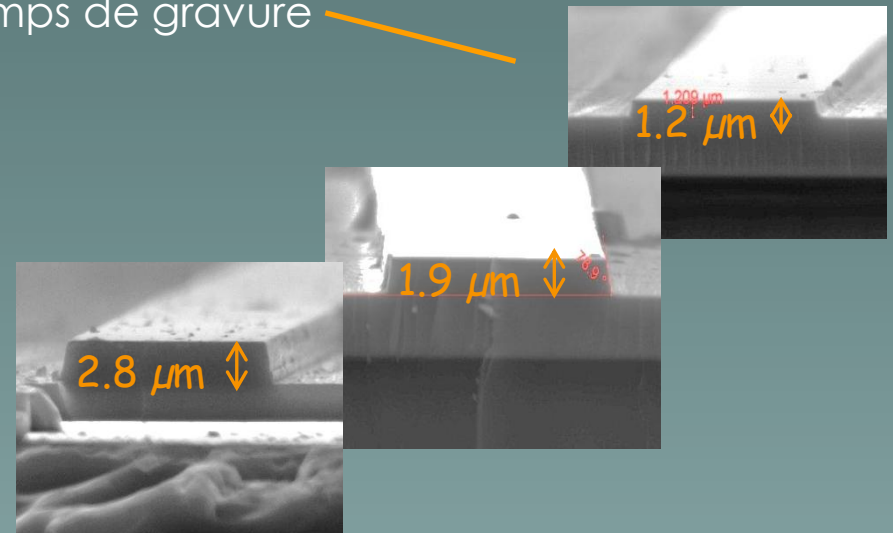
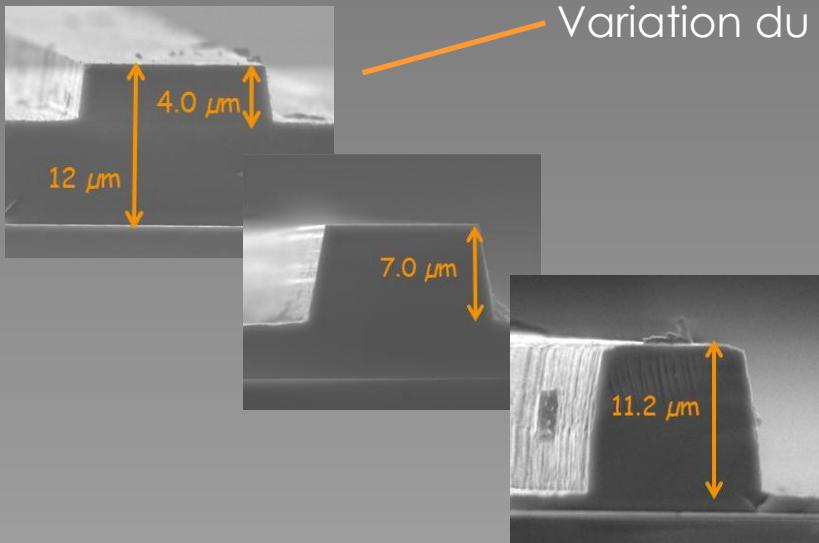
TeGe

Recherche des conditions optimales

TeGeSe

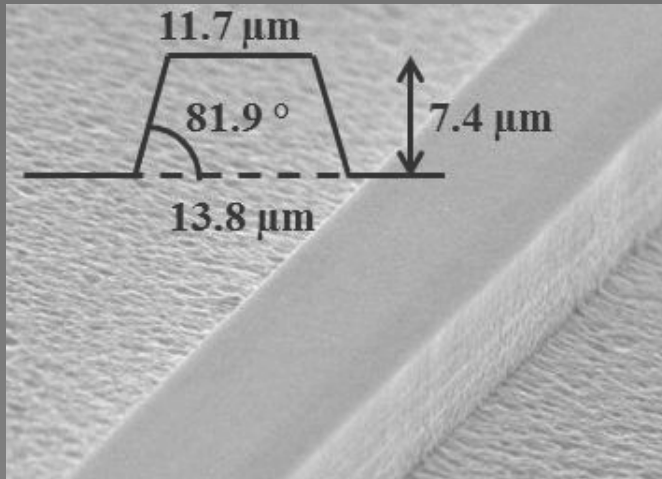


Variation du temps de gravure

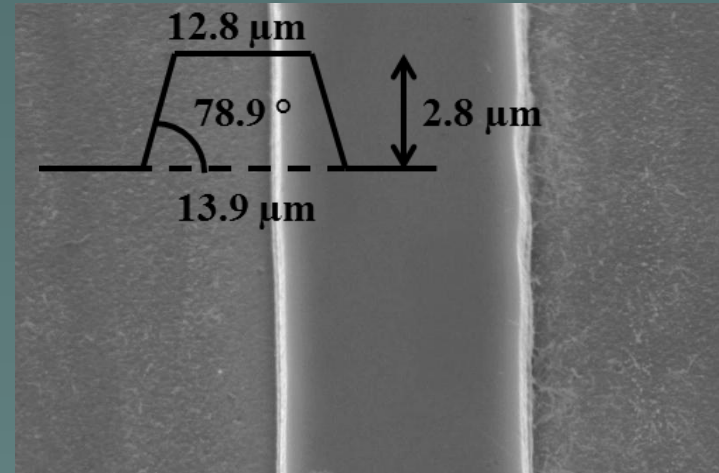


Obtention de marches quasi-verticales

TeGe

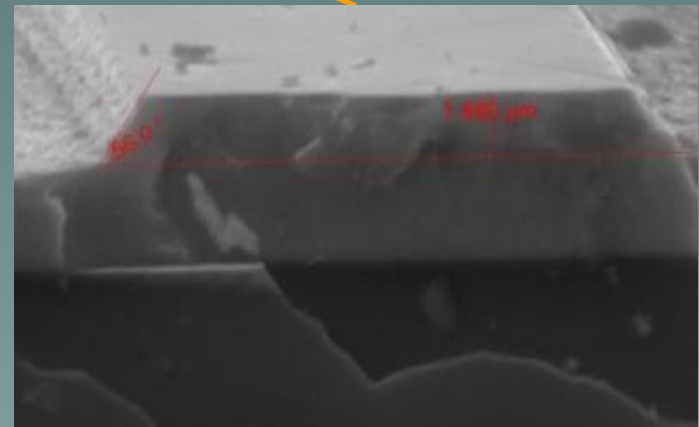
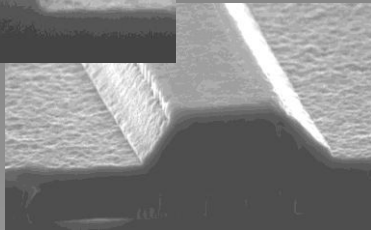
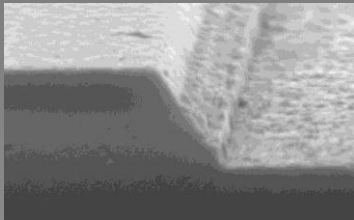


TeGeSe



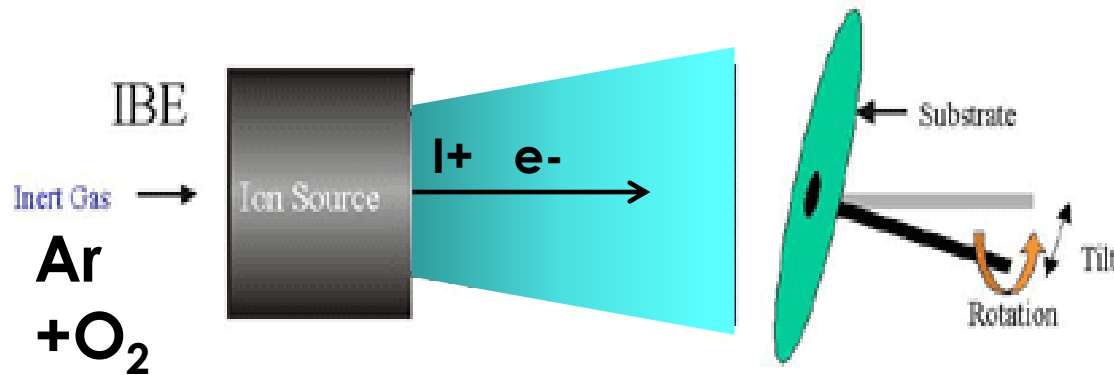
Possibilité limitée de varier l'angle des marches

Flancs en "escaliers"



Usinage ionique : 1 système étudié

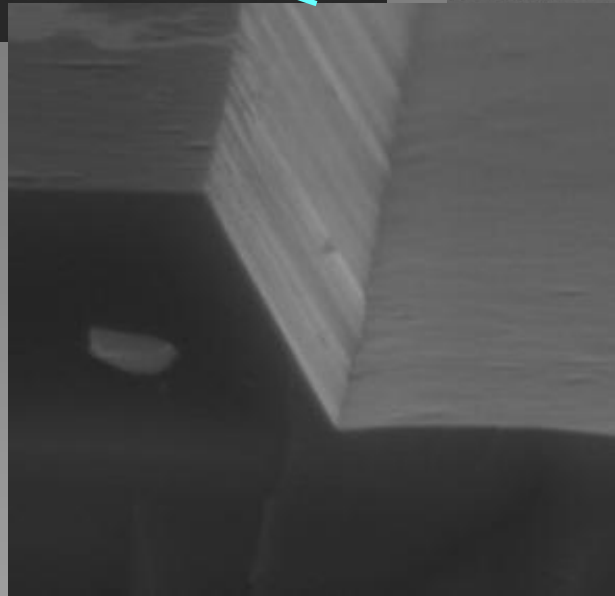
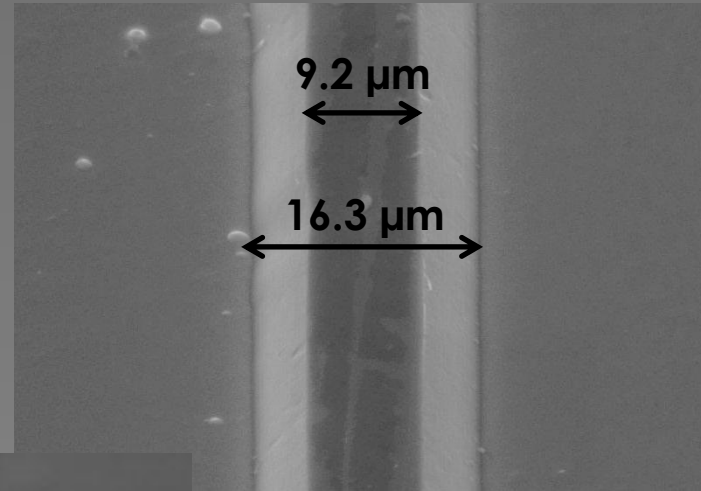
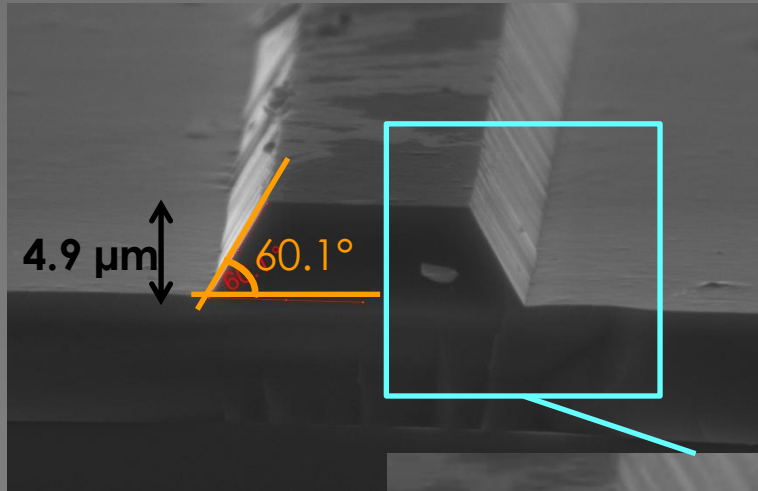
TeGe



Tout premiers résultats

Obtention de marches à angle contrôlé

TeGe



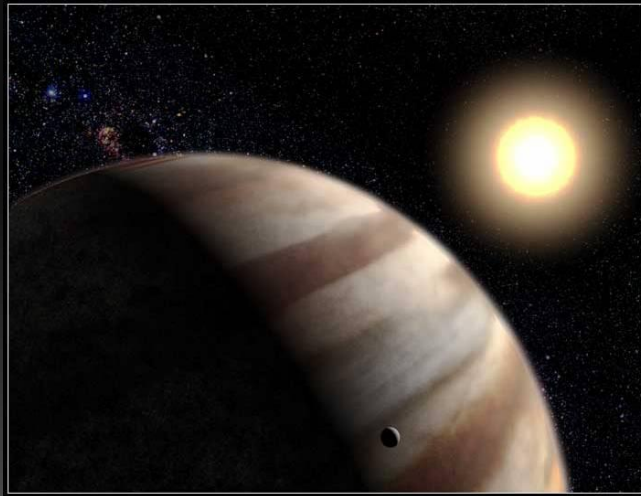
Ouvre des possibilités
complémentaires de la RIE

Fabrication et caractérisation de guides d'onde canaux

Application visée

Interférométrie spatiale

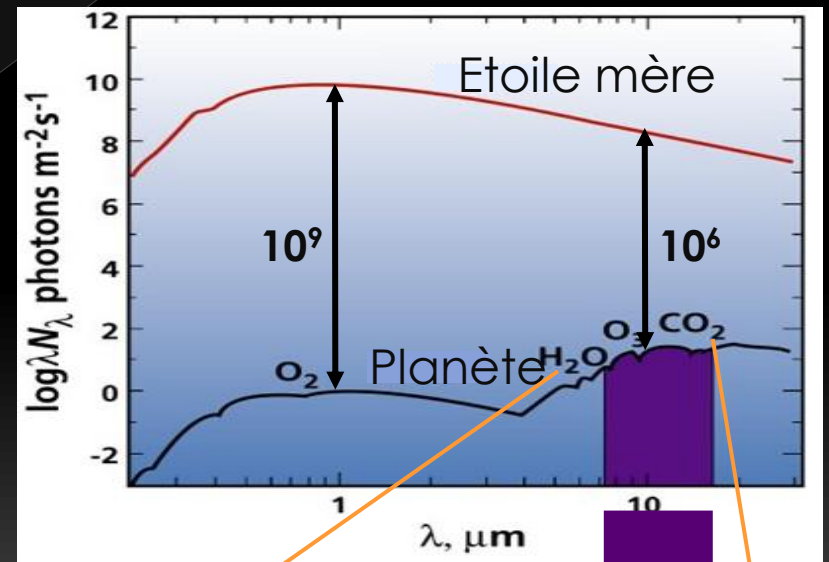
Objectif :
Recherche de planètes extra-solaires
isotypes de la Terre



→ Spectrométrie de l'atmosphère des exo-planètes pour détecter les signatures des molécules de H₂O, O₃ and CO₂

Problèmes :

- Fort contraste entre les planètes et leur étoile mère



H₂O : 6 - 8 μm
et 19,6 μm

CO₂ :
13-15 μm

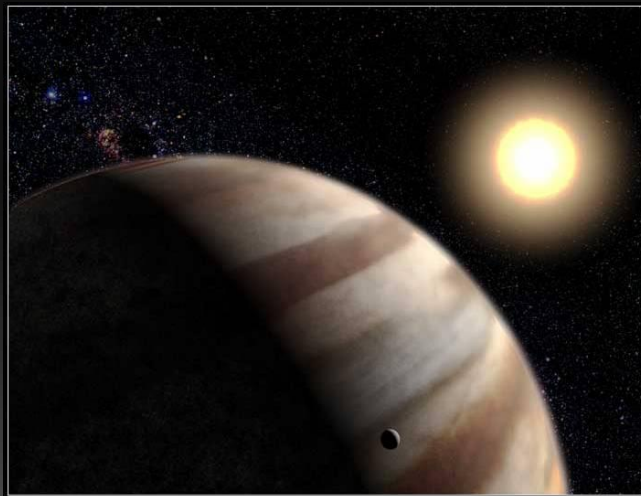
[6 - 20 μm]

Fabrication et caractérisation de guides d'onde canaux

Application visée

Interférométrie spatiale

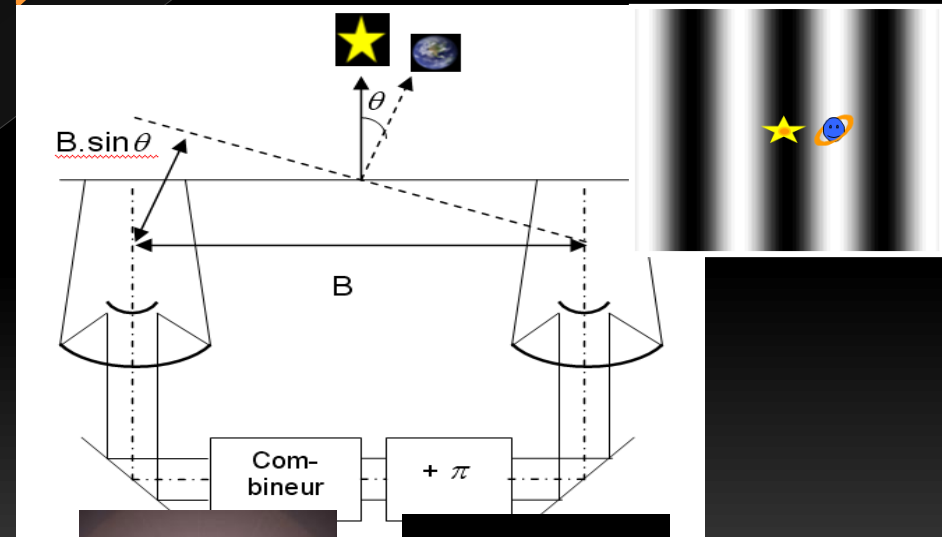
Objectif :
Recherche de planètes extra-solaires isotypes de la Terre



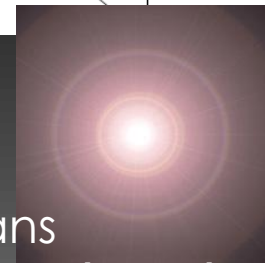
→ Spectrométrie de l'atmosphère des exo-planètes pour détecter les signatures des molécules de H_2O , O_3 and CO_2

Problèmes :

- Faible séparation angulaire entre la planète et son étoile mère



Sans
interférométrie



Avec
interférométrie



TNO TPD

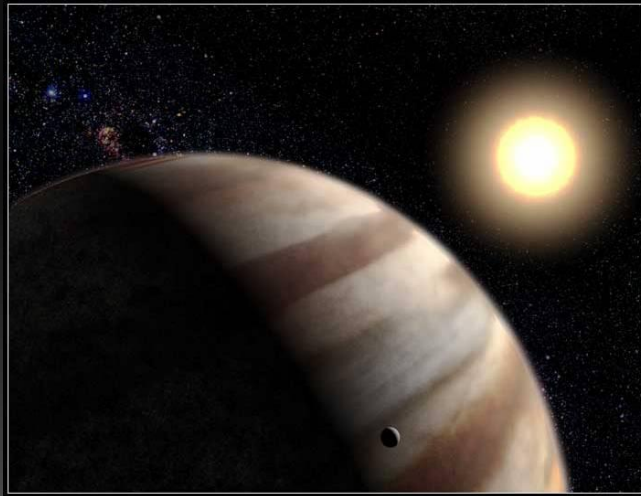
Fabrication et caractérisation de guides d'onde canaux

Application visée

Interférométrie spatiale

Objectif :

Recherche de planètes extra-solaires isotypes de la Terre

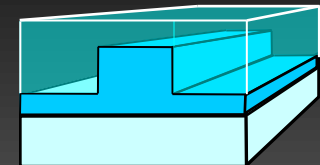
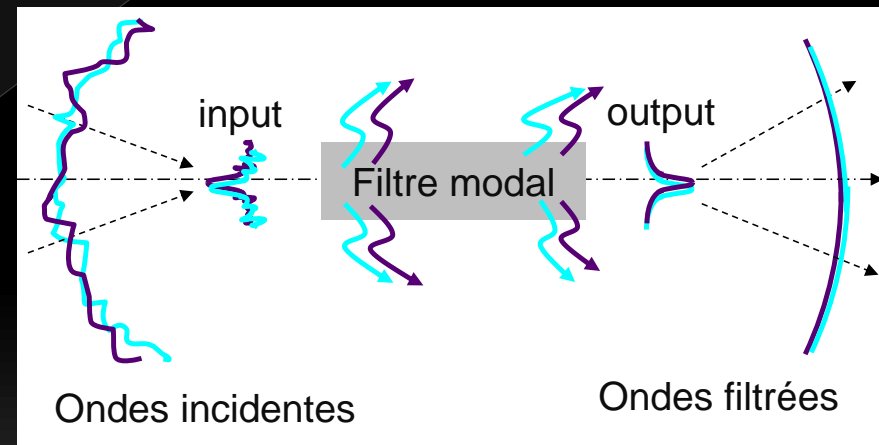


→ Spectrométrie de l'atmosphère des exo-planètes pour détecter les signatures des molécules de H_2O , O_3 and CO_2

Cahier des charges

Solution :

- Fabriquer un filtre modal infrarouge capable d'un taux de réjection de la lumière de 10^{-6}



Guides d'onde canaux monomodes [6 – 20 μm]

Design des guides d'onde

Cahier des charges :

- Guidage monomode entre 6 et 20 μm
- Rendement de couplage élevé

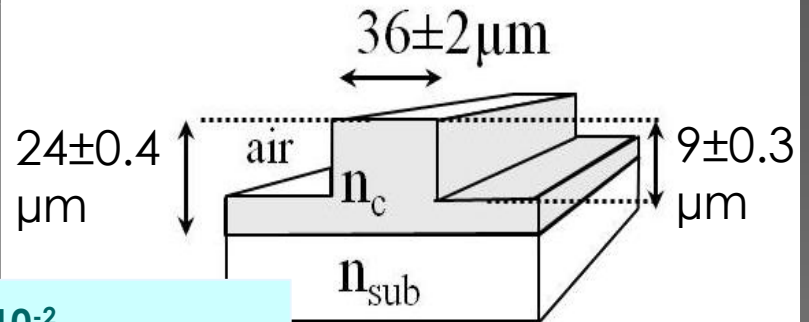
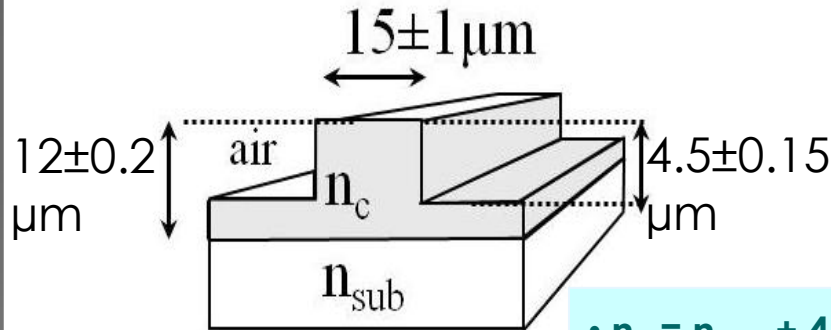
Division en deux sous-bandes : [6 – 11 μm] & [10 – 20 μm]

Design le plus simple :

Guide chargé (rib)

[6 – 11 μm]

[10 – 20 μm]



- $n_c = n_{\text{subs}} + 4 \cdot 10^{-2}$
- flancs des guides [80 ; 90 °]

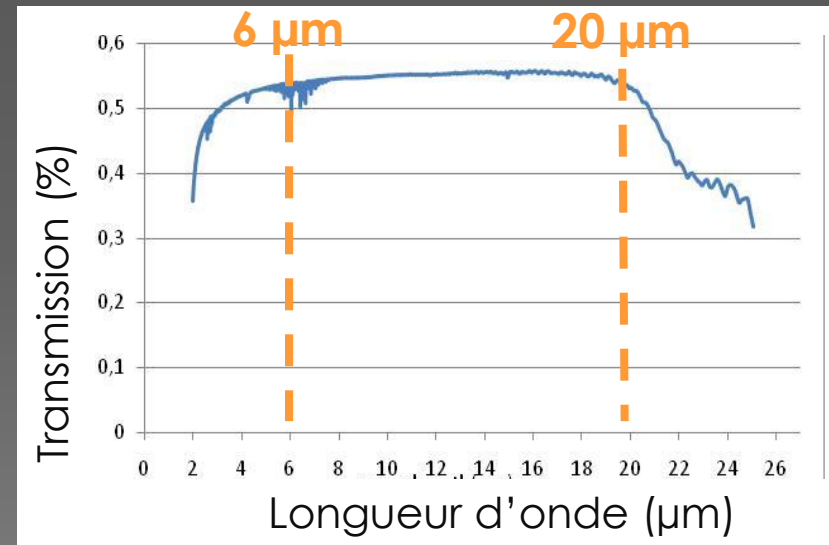
Principaux résultats

Fabrication

?

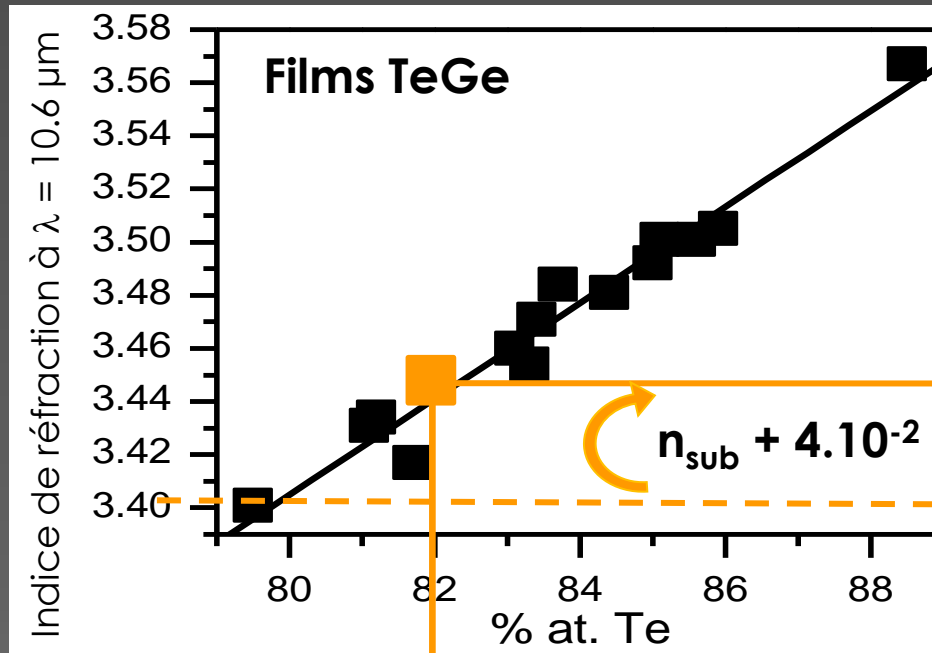
substrat

$\text{Te}_{75}\text{Ge}_{15}\text{Ga}_{10}$



- Stable thermiquement : $\Delta T = 113 \text{ }^\circ\text{C}$
- Indice de réfraction contrôlé:
 $3,3990 \pm 0,0015 @ 10,6 \text{ } \mu\text{m}$
- Pertes de propagation : $\approx 0,6 \text{ dB/cm}$

Fabrication



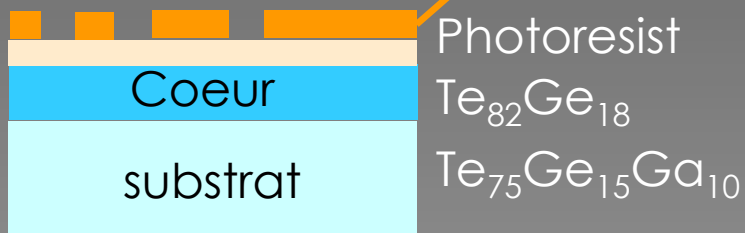
?

Coeur

substrat

$\text{Te}_{75}\text{Ge}_{15}\text{Ga}_{10}$

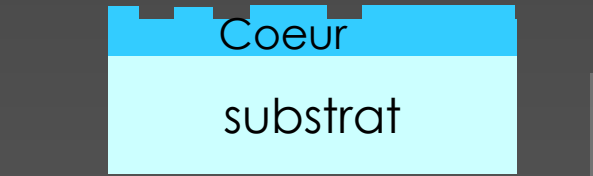
Fabrication



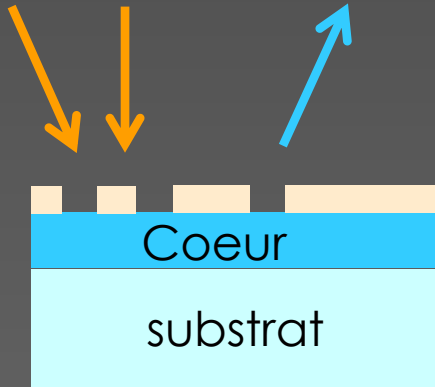
Masque avec des bandes de différentes largeurs pour tenir compte de la dispersion de l'indice de la couche guidante

$$n_c = 3,44 \pm 2 \cdot 10^{-2}$$

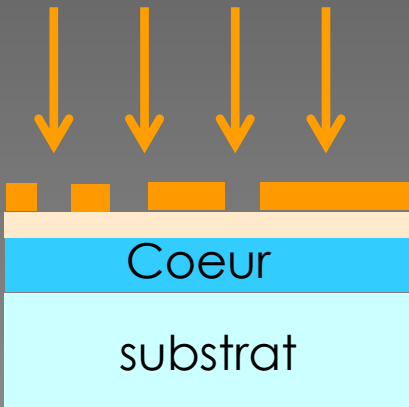
Fabrication



Gravure ionique réactive



UV insolation



Photoresist

$\text{Te}_{82}\text{Ge}_{18}$

$\text{Te}_{75}\text{Ge}_{15}\text{Ga}_{10}$

Préparation des faces d'entrée et sortie

Réalisation de "sandwich" constitués d'une dizaine d'échantillons

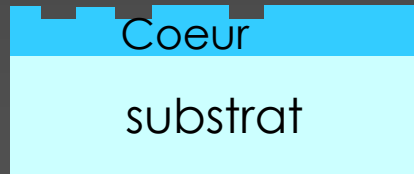


Polissage fin des faces

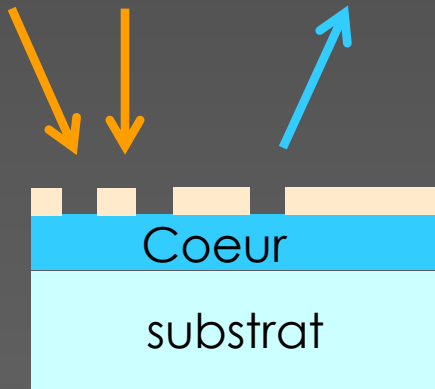


Cire Arcanson

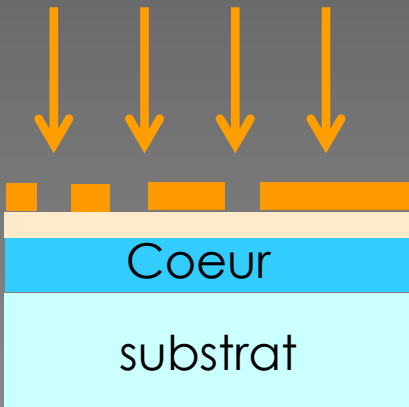
Fabrication



Gravure ionique réactive



UV insolation



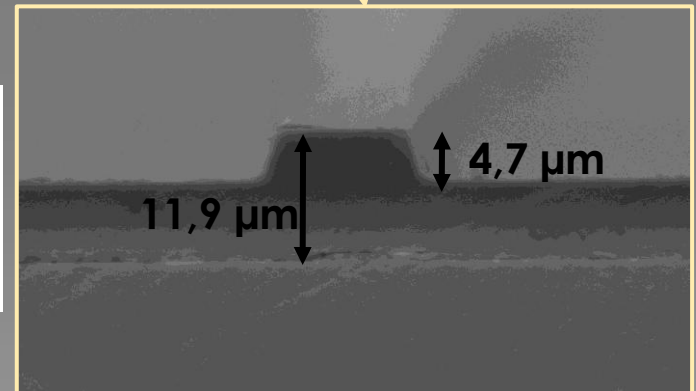
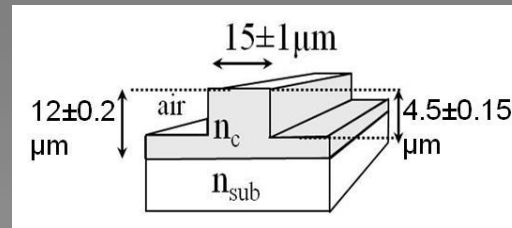
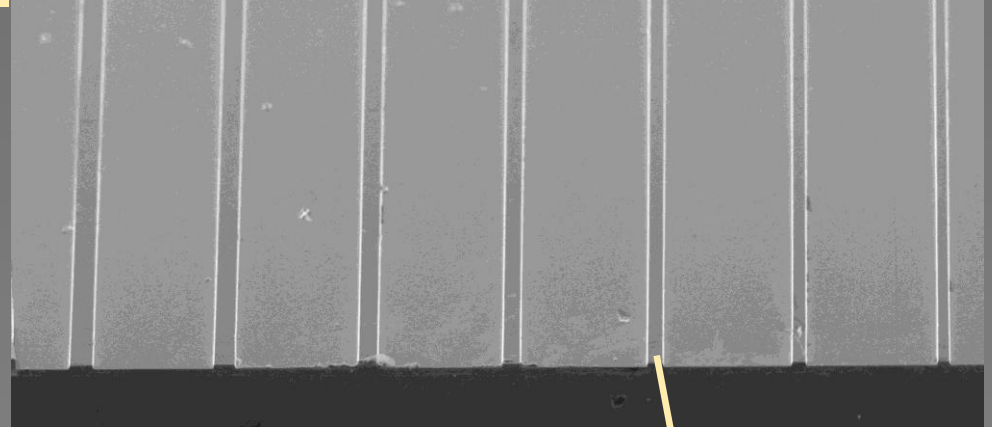
Photoresist

$\text{Te}_{82}\text{Ge}_{18}$

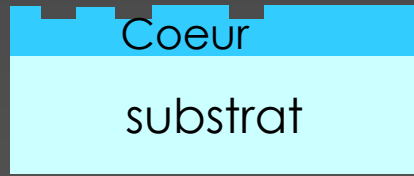
$\text{Te}_{75}\text{Ge}_{15}\text{Ga}_{10}$

[6 – 11 μm]

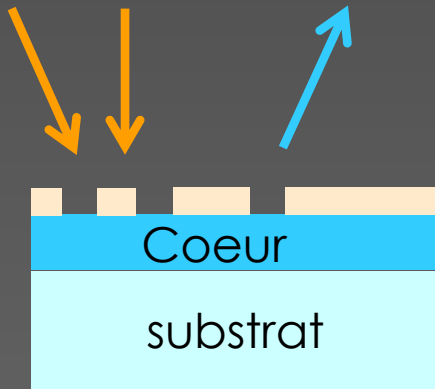
24 μm 22 μm 20 μm 18 μm 16 μm 14 μm 12 μm



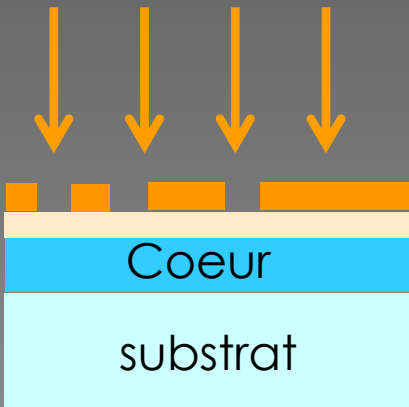
Fabrication



Gravure ionique réactive



UV insolation



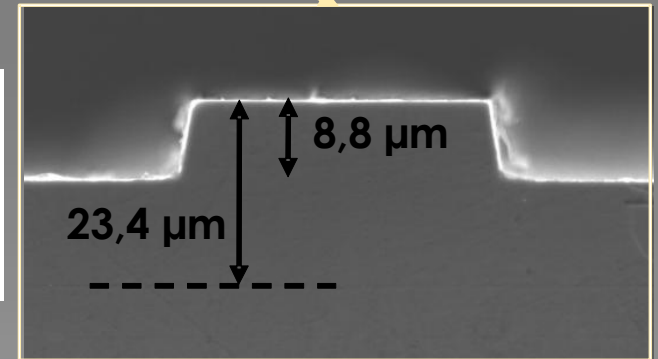
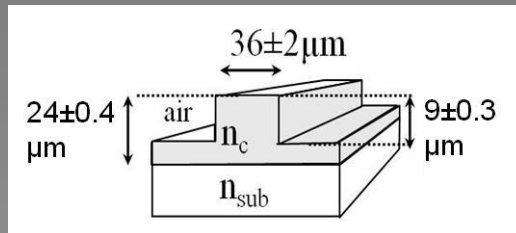
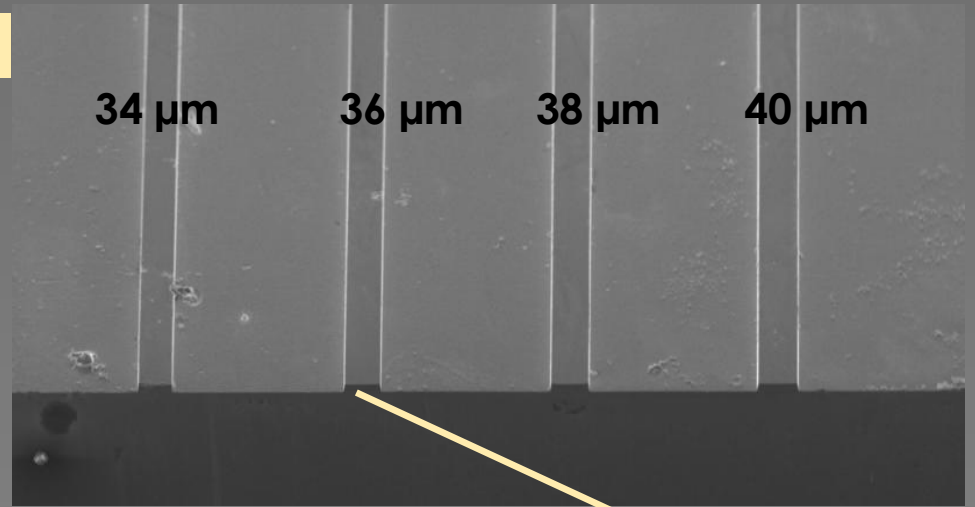
[10 – 20 μm]

34 μm

36 μm

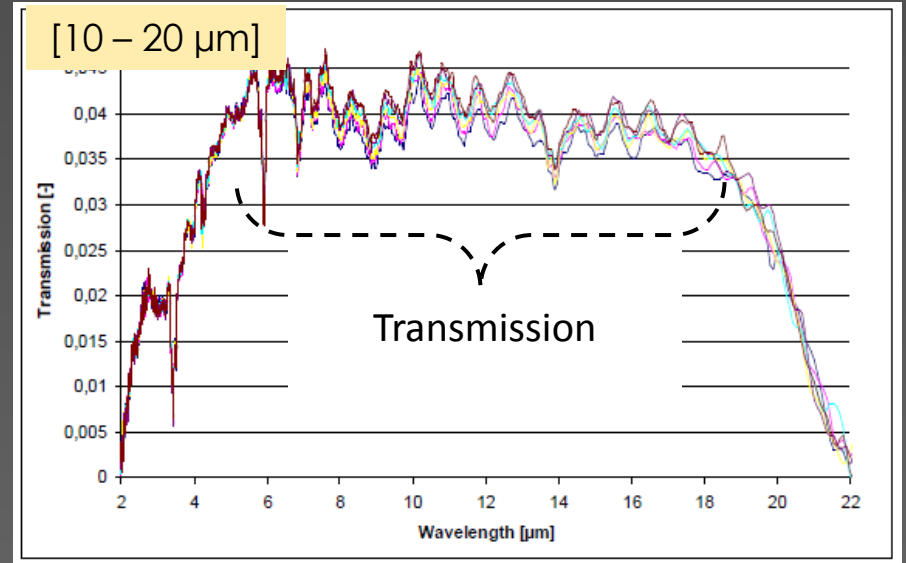
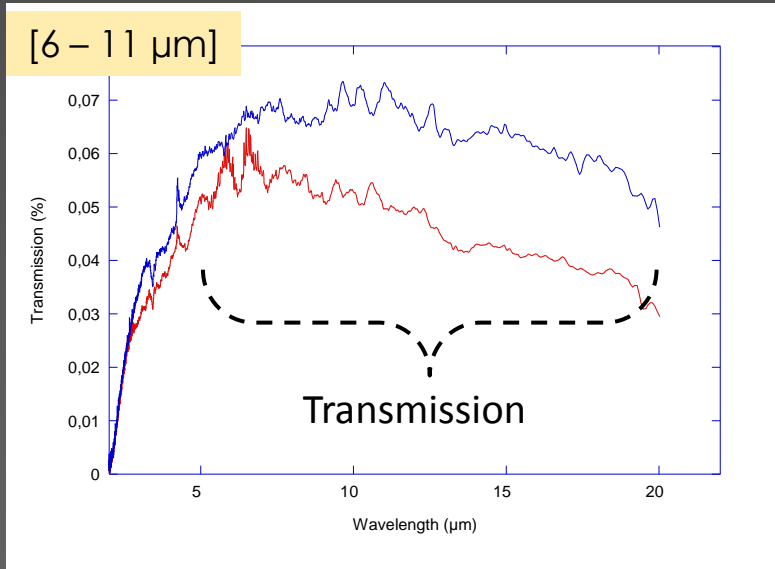
38 μm

40 μm

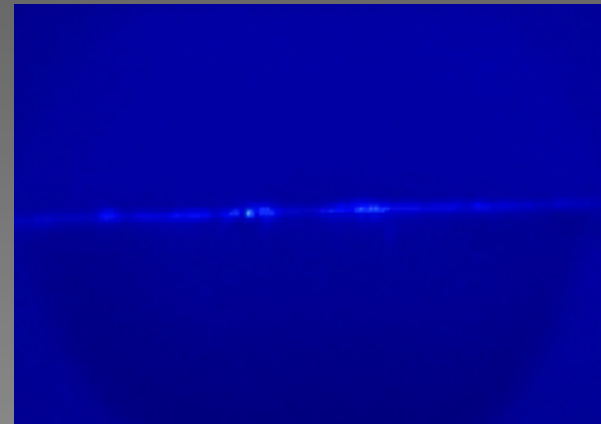
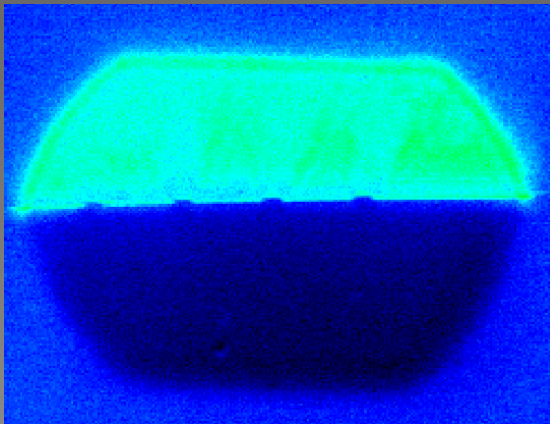


Caractérisation

Bon confinement de la lumière dans toute la gamme spectrale



Démonstration du guidage à 10,6 μm



Caractérisation

Mise en évidence de la capacité de filtrage modal à $10,6 \mu\text{m}$

Système
d'injection



Caméra IR

Interféromètre
de Mach-
Zehnder

Système de
détection

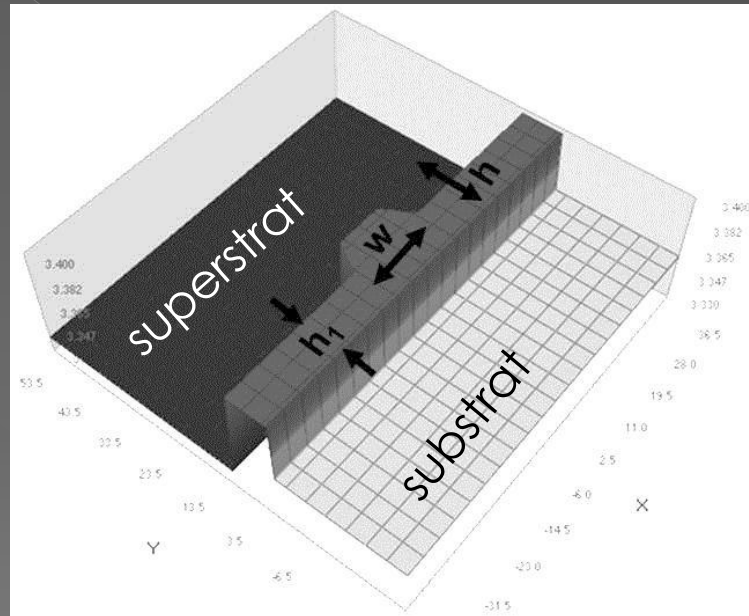
Réjection $< 6 \cdot 10^{-5}$

Design alternatif

Avantages :

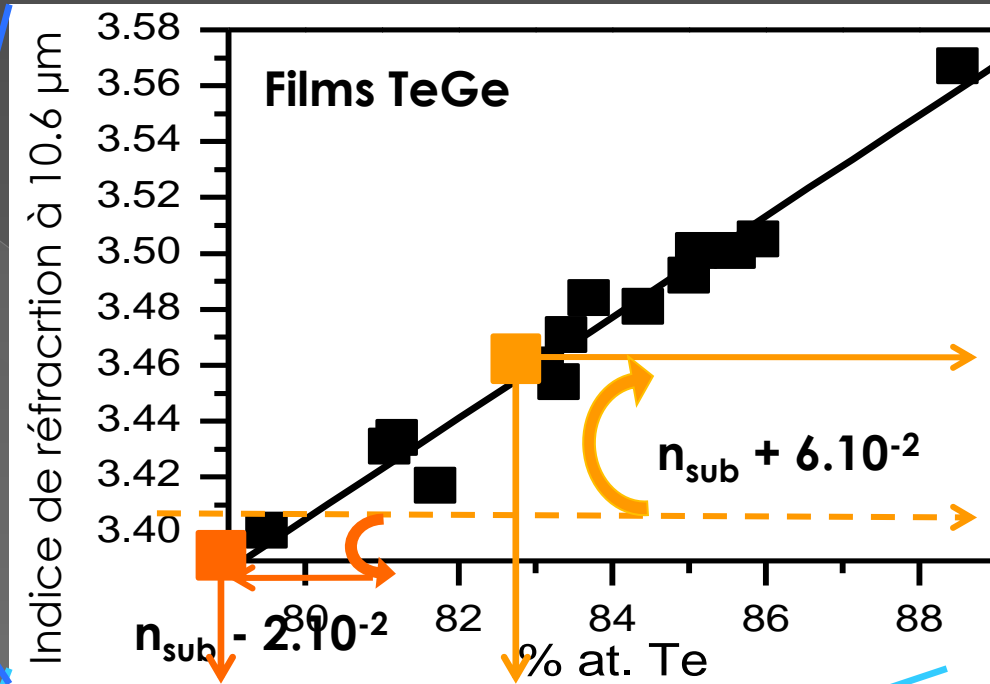
- Comportement monomode dans toute la gamme spectrale de 6 à 20 μm
- Très bon rendement de couplage

- $n_c = n_{\text{subs}} + 6 \cdot 10^{-2}$
- $n_{\text{super}} = n_{\text{subs}} - 2 \cdot 10^{-2}$
- $h = 15 \mu\text{m}$
- $h_1 = 9 \mu\text{m}$
- $W = 18 \mu\text{m}$



Challenge : être capable de recouvrir par un superstrat

Fabrication



Superstrat

coeur

substrat

coeur

substrat

Superstrat :
 $\text{Te}_{79}\text{Ge}_{21}$

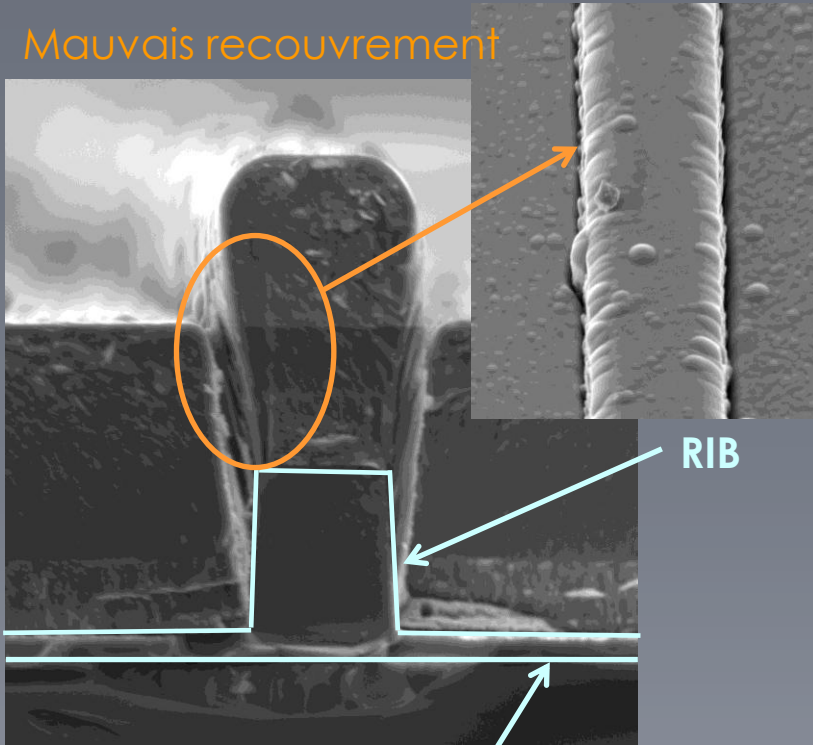
Couche de coeur :
 $\text{Te}_{83}\text{Ge}_{17}$

$\text{Te}_{75}\text{Ge}_{15}\text{Ga}_{10}$

Premiers tests de recouvrement

Gravure ionique réactive

Mauvais recouvrement

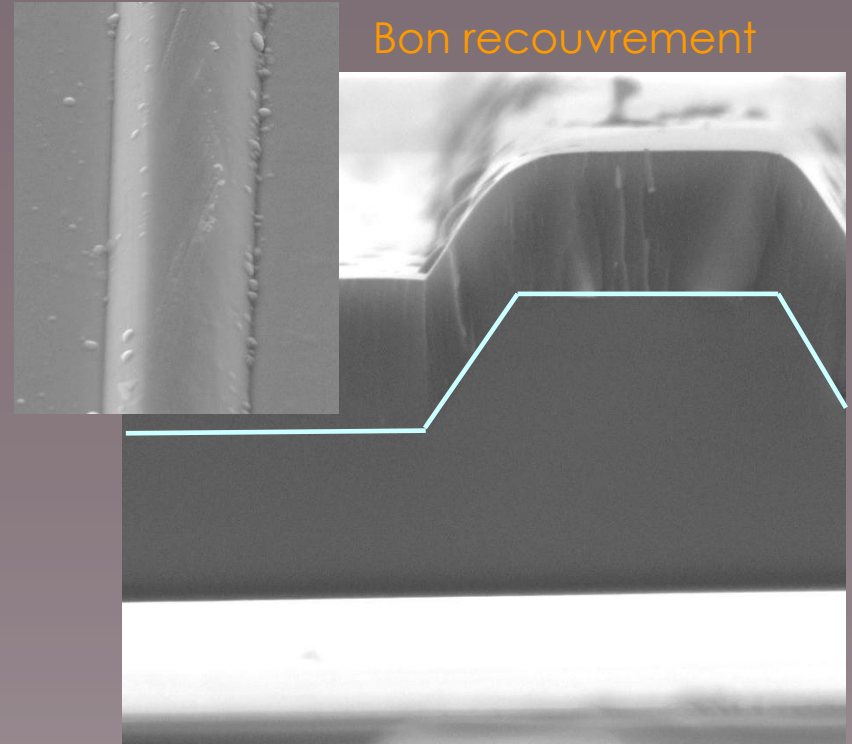


RIB

Interface substrat / couche de coeur

Usinage ionique

Bon recouvrement



RIB

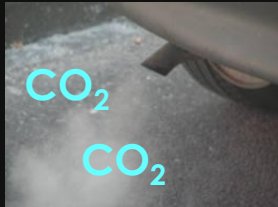
Fabrication et caractérisation de guides d'onde canaux

Application visée

Métrologie de l'environnement

Challenge :

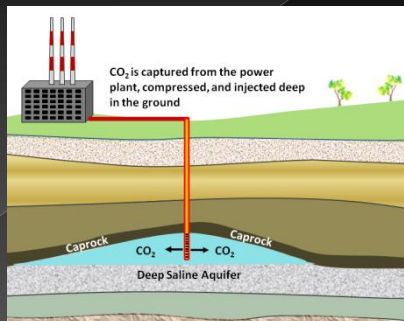
- Fabriquer un micro-capteur de CO_2



Contrôle des rejets des véhicules



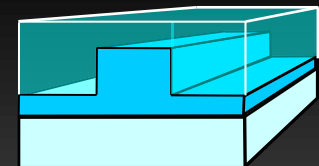
Contrôle de la qualité de l'air dans l'habitacle



Contrôle des fuites de CO_2 dans les sites de stockage géologique

Cahier des charges

- Guides canaux devant fonctionner à $4,2 \mu\text{m}$ et au moins jusque $16 \mu\text{m}$
- Guides canaux fonctionnant aussi à $1,3$ et $1,55 \mu\text{m}$ pour des tests préliminaires sur les bancs classiques



Guides canaux [1 - 16 μm]

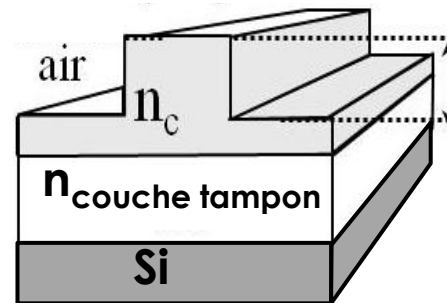
Channel waveguides to be designed

Cahier des charges :

- Premier objectif : réaliser des guides monomodes à $1,55 \mu\text{m}$
- Substrat : silicium

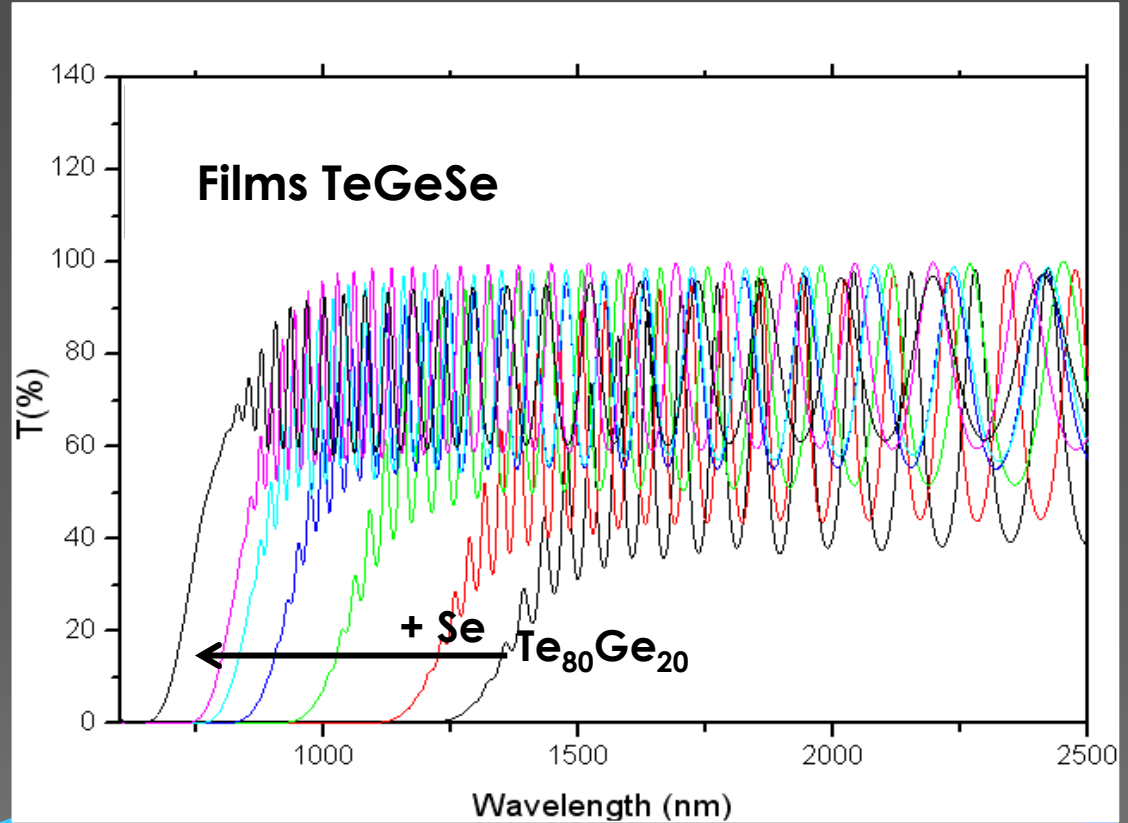
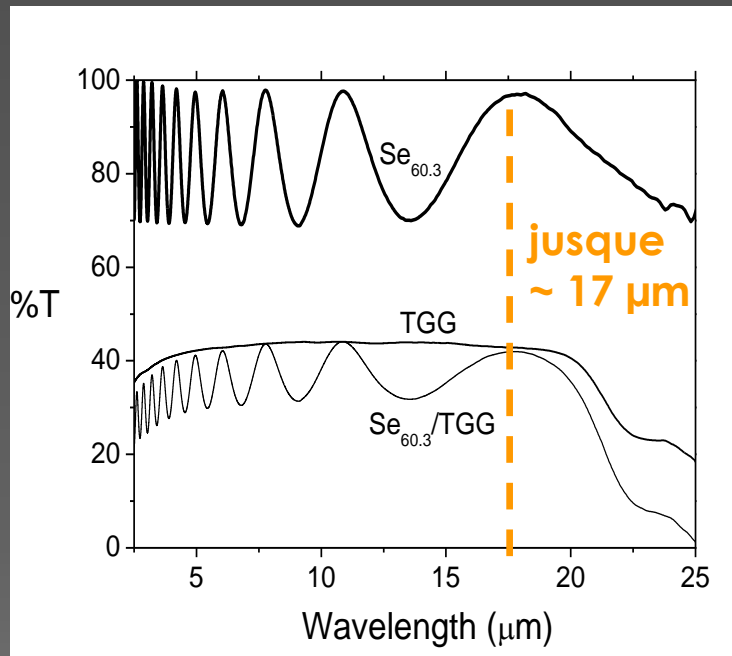
Design le plus simple :

Guide rib



Principaux résultats

Fabrication



?

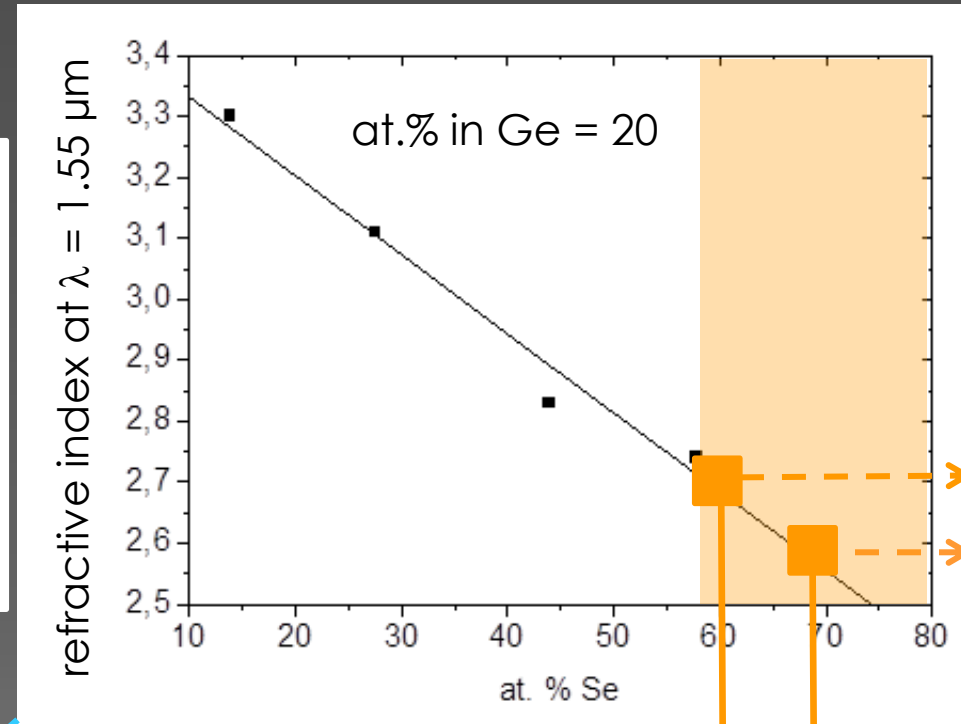
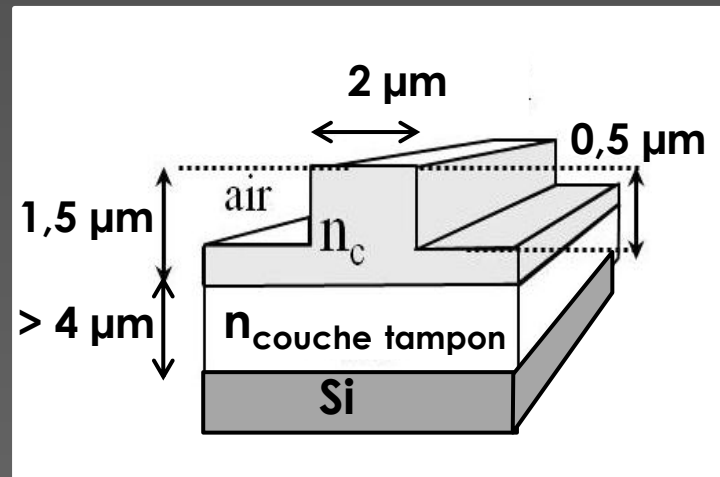
coeur

couche tampon

silicium

Fabrication

Compositions très stables thermiquement



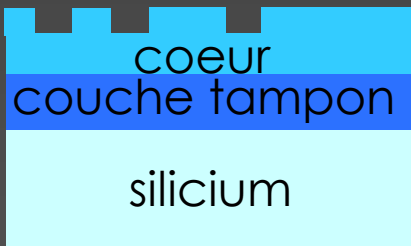
$n_c = 2,7$
 $n_{\text{tamp}} = 2,6$

Cœur :
 $\text{Te}_{20}\text{Ge}_{20}\text{Se}_{60}$

Couche tampon :
 $\text{Te}_{12}\text{Ge}_{20}\text{Se}_{68}$

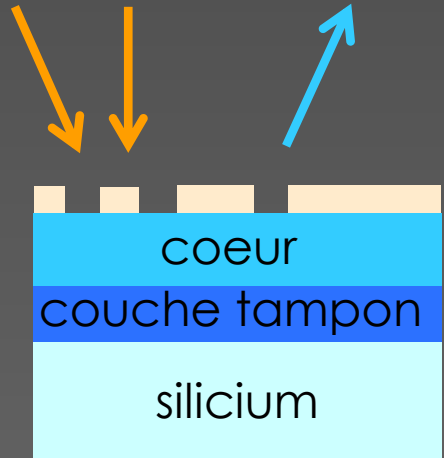
?

coeur
couche tampon
silicium

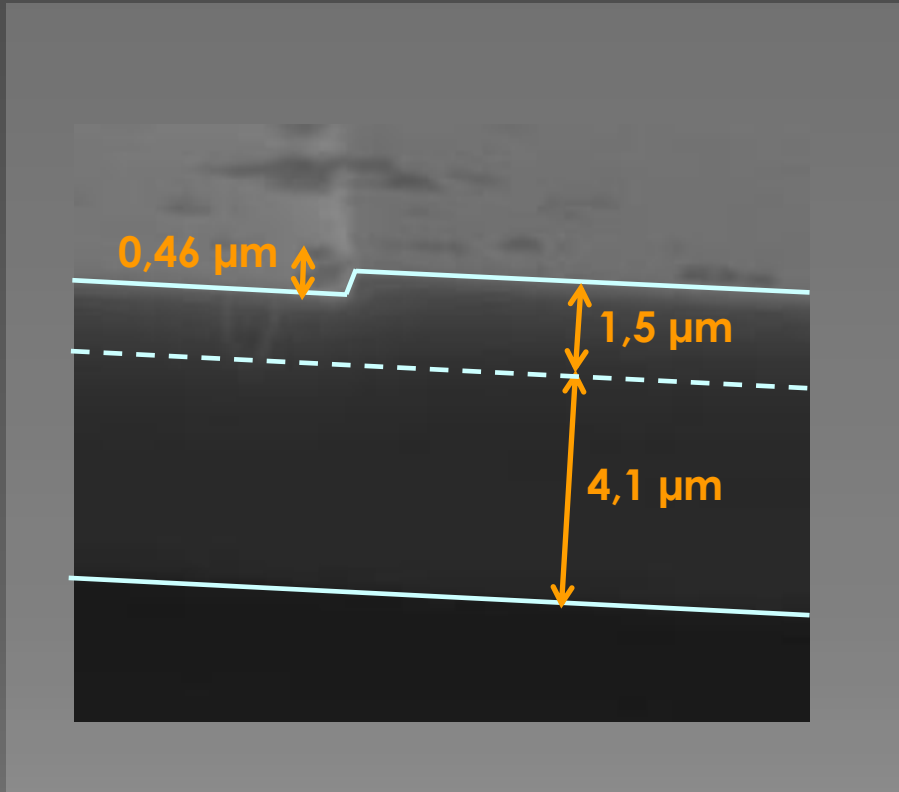
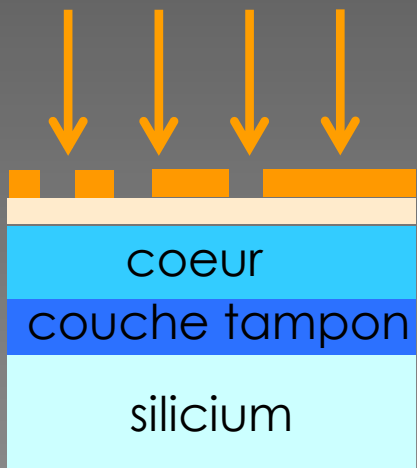


Fabrication

Gravure ionique réactive

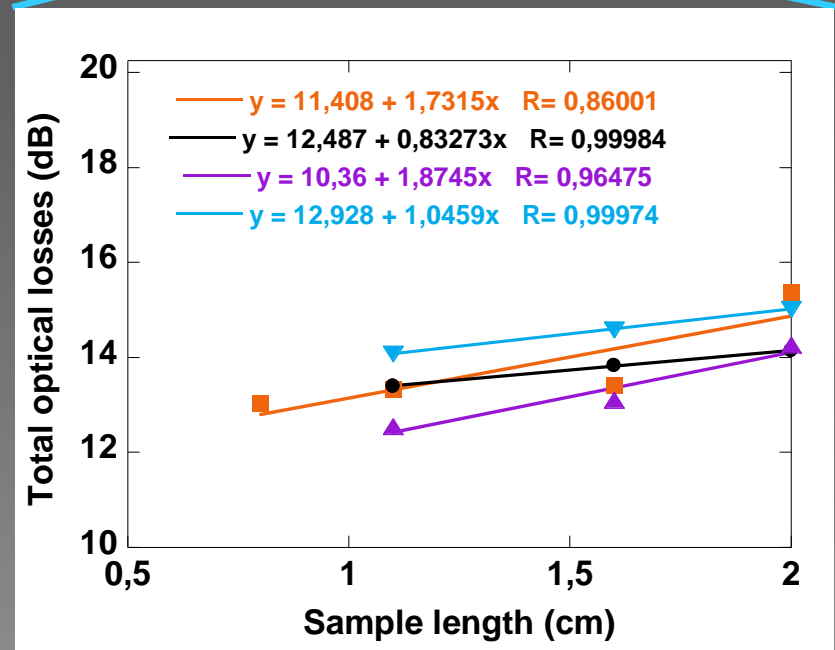
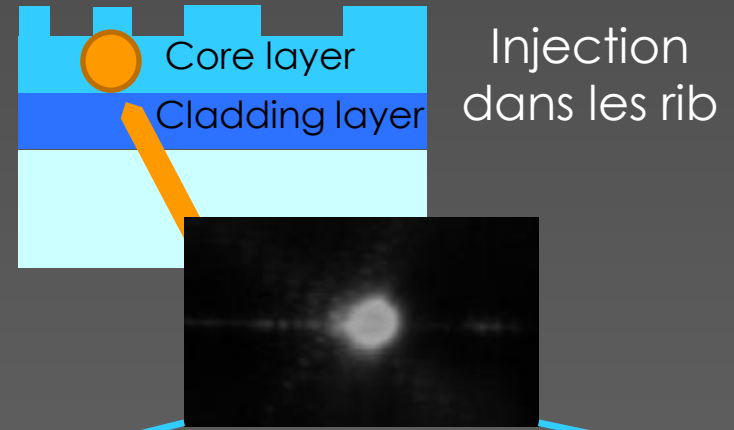
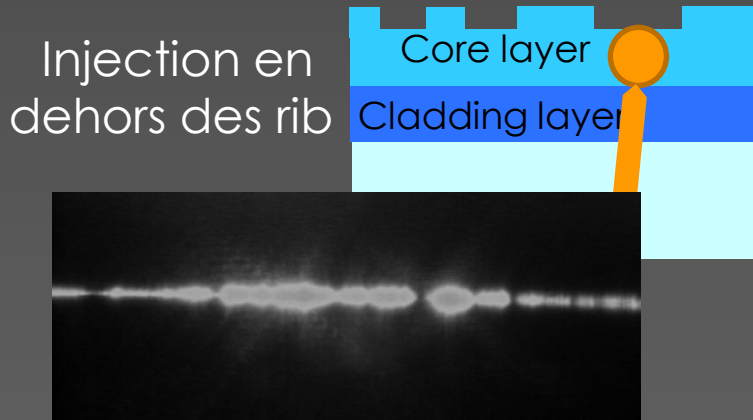


Illumination UV



Test

Bon confinement de la lumière : démonstration à 1,55 μm



- Pertes de couplage $\sim 10 - 15$ dB
- Pertes de propagation $\sim 0,5 - 1,8$ dB.cm $^{-1}$

Conclusions

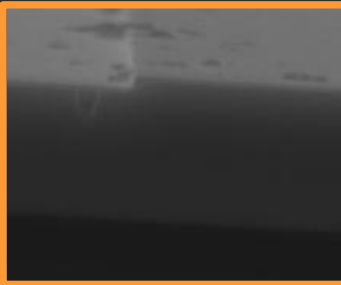
Interférométrie spatiale



- fabrication de guides canaux pour les bandes spectrales [6 – 11 μm] and [10 – 20 μm] :
 - qui transmettent la lumière de 6 à 20 μm
 - qui sont monomodes (démonstration à 10,6 μm)
 - qui peuvent servir de filtre modal à 10,6 μm
- conception de guides enterrés pour la bande spectrale entière [6 – 20 μm]
 - design très prometteur -> objectif de la phase 3 du projet
 - démonstration de la possibilité de recouvrement par un superstrat



Métrologie de l'environnement



- fabrication de guides rib pour la bande spectrale [1 – 16 μm]:
 - qui présentent un comportement monomode à 1,55 μm
 - avec des pertes de propagation de 0,5 – 1,8 dB.cm^{-1}



Annie Pradel
Raphaël Escalier
Eléonore Barthélémy
Mai Vu Thi



Frédéric Pichot
Jean Lyonnais
Jean-Marie Peiris
Claude Merlet
Joël Couve



Volker Krischner



Marc Barillot
Stéphane Ménard



Paul Coudray



Raphaël Kribich



Xianghua Zhang



Gilles Parent



Jean-Emmanuel Broquin
Lionel Bastard



Thierry Billeton

Merci pour
votre attention

Remerciements