

A vibrant graphic featuring a central globe with a white '360' overlaid. The globe is surrounded by a sunburst of colorful rays in shades of blue, orange, red, and purple. To the right of the '360' is the text 'YEARS YOUNG' in a stylized font, with 'YEARS' in blue and 'YOUNG' in orange. Below this is the tagline 'MAKING THE WORLD A BETTER HOME' in blue and red.

360 YEARS YOUNG  
MAKING THE WORLD  
A BETTER HOME



# VERRE INDUSTRIEL POUR LE BÂTIMENT

Octobre 2025



**Barbara Bouteille, PhD**

SGR Paris, Département Couches Minces



# FONCTIONNALISATION DU VITRAGE

## PAR DES EMPILEMENTS DE COUCHES MINCES

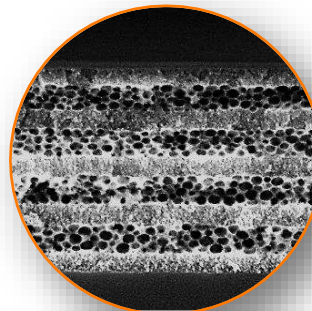
Saint-Gobain  
SGR Paris

Pourquoi  
fonctionnaliser  
un vitrage ?

Couches minces  
déposées par  
PVD

Dépôts  
Voie Liquide

Vitrages actifs



01

# SAINT-GOBAIN & SGR PARIS



## Saint-Gobain en deux photos iconiques



# Aujourd'hui, leader mondial de la construction durable



Changement climatique



Raréfaction des ressources naturelles



Urbanisation et croissance démographique

les grandes  
tendances  
mondiales



Rénovation énergétique



Construction légère



Décarbonation de l'industrie

nos  
réponses

# Nos marques, business partenaires

## Vitrage bâtiment



## Plaques de plâtre et gypse



## Isolation



## Plafonds acoustiques



## Abrasifs



## Enduits et mortiers



## Aménagement intérieur et extérieur



## Vitrage électrochrome



## Films pour vitrages



## Textiles techniques



## Verres anti-feu



## Verre automobile



## Chimie de la construction



## Systèmes canalisation



## ENSEIGNES DE DISTRIBUTION ET SERVICES



## En quelques chiffres



**80**

une **présence industrielle** active  
dans **80** pays



**360**

ans d'**histoire**



**8**

centres de **R&D** transversaux  
dans le monde



**1 100**

près de **1 100** sites de **production**  
dans le monde



**2 600**

près de **2 600** points de **vente** dans  
le monde



**2050**

nous nous engageons à **atteindre**  
« **zéro émission nette** » à horizon **2050**

## PERFORMANCE



## DURABILITÉ



## Nous mettons nos clients au cœur de notre culture d'innovation

- 8** centres de R&D transversaux dans le monde
- 100** centres de recherche et de **développement**
- 3 800** chercheurs
- 3 700** collaborateurs dans la filière **marketing**, en contact avec les clients
- 450** brevets déposés en 2024
- 35** accords signés avec des **start-ups** en 2024



# NOS CHIFFRES CLÉS

500

salariés

38

l'âge moyen

34

nationalités  
représentées

85

brevets déposés avec un  
inventeur de SGR Paris

40,4 %

de femmes

90 %

des ingénieurs ont une thèse



CERTIFIED



HappyIndex\*Trainees  
FRANCE 2025

# DES COMPÉTENCES TRANSVERSALES POUR INNOVER



## SCIENCE DES MATÉRIAUX

Science des matériaux inorganiques et polymères  
Chimie bio-sourcée, *wasterials* et solutions circulaires



## PROCÉDÉS INDUSTRIELS

Procédés industriels  
Capteurs, modélisation, science des données  
Verre à couches à l'échelle pilote  
Conception, caractérisation et propriétés des vitrages à couches



## SOLUTIONS POUR LA CONSTRUCTION LÉGÈRE

Résistance au feu, transfert thermique, qualité de l'air intérieur, acoustique, optique  
Solutions de façade, nouveaux modes de construction  
Impression 3D  
Design et sociologie, expérience utilisateur, facilité d'installation



## OUTILS NUMÉRIQUES

Outils numériques, réalité virtuelle et imagerie numérique  
Analyse du cycle de vie  
Machine learning  
Intelligence artificielle, intelligence artificielle générative

# DÉPARTEMENT COUCHES MINCES

## 4 grandes thématiques



### Empilements Bas-émissifs

- Empilements mono-Ag
- Techno-briques fondamentales



### Systèmes avancés

- Empilements multi-Ag
- Vitrages actifs



### Couches extérieures

- Couches pour applications extérieures
- Couches transparentes conductrices



### Revêtements par voie liquide

- Procédés dépôts
- Formulation
- Chimie de surface

→ Sujets courts termes : développements de produits, transferts industriels, ...

→ Sujets longs termes : compréhension, thèses, collaborations académiques, ...

# POSTE D'INGÉNIEURE DE RECHERCHE

- **2013 – 2016 : ESPCI, diplôme d'ingénieur**  
Master SMNO, science des matériaux et nano-objets (Sorbonne)
- **2017 – 2020 : Thèse de doctorat – (SVI/PMMH)**  
*Séparation de phase dans les couches minces de verre pour la nanostructuration de surface*
- **Depuis 2020 : Cheffe de projet – Revêtements Fonctionnel par voie Liquide**  
Recherche échelle laboratoire & industrialisation de produits  
Applications bâtiments, façade & intérieur  
Encadrement de thèses, stages  
Thématiques : polymérisation UV, distorsion optique, topographie



# 02

## POURQUOI FONCTIONNALISER UN VITRAGE ?



# FABRICATION DU VERRE PLAT

## VERRE SODOCALCIQUE PROCÉDÉ FLOAT



GLASS BÂTIMENT FRANCE SAINT-GOBAIN



- Qualité du verre
  - homogénéité de la densité
  - limite d'inclusions
  - limite de bulles
- Grands verres = 3,20 x 6 m<sup>2</sup> !
- Epaisseur
  - 2-3 mm automobile 4-12 mm bâtiment

# 1) RENFORCEMENT MÉCANIQUE ?

## PAR TRAITEMENT THERMIQUE

- Propriétés de sécurité
  - Améliorer la résistance aux chocs
  - Éviter les coupures et les chutes



Verre non-trempe

Verre trempé

Verre feuilleté

Traitement thermique  
650 - 700°C qq min  
refroidissement rapide à l'air

2 verres laminés  
séparés par un intercalaire PVB

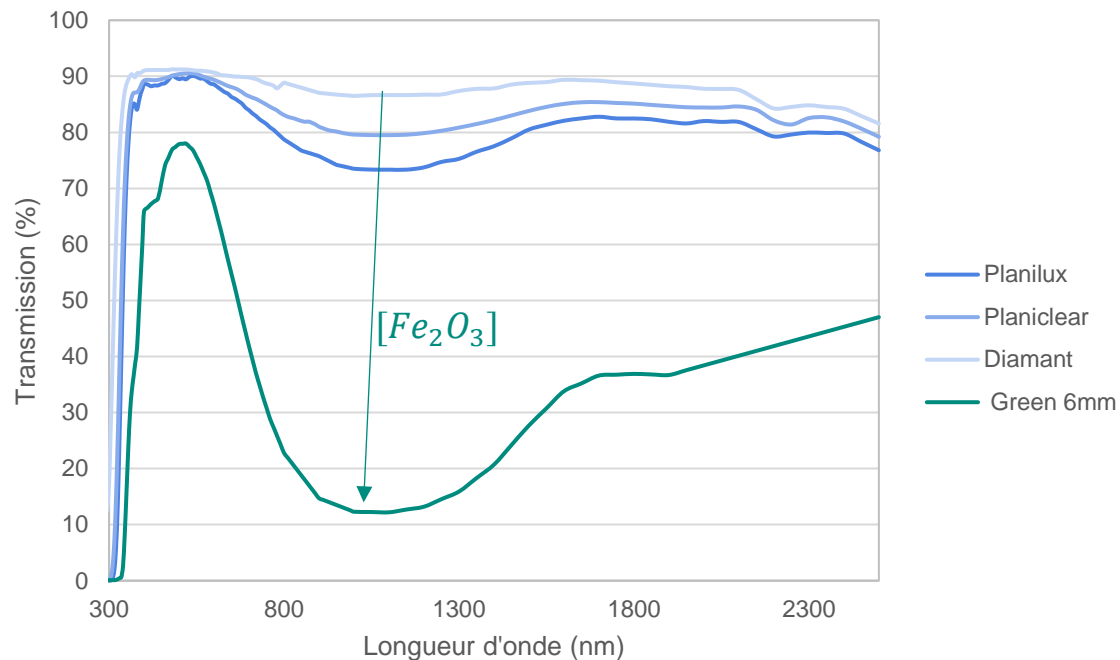
NB: alternative par trempe chimique (= par échange d'ion), utilisée pour des petites tailles, faibles épaisseurs ou géométries complexes mais pas de fragmentation



## 2) MODULER L'ESTHÉTIQUE ?

### VERRE TINTÉ DANS LA MASSE

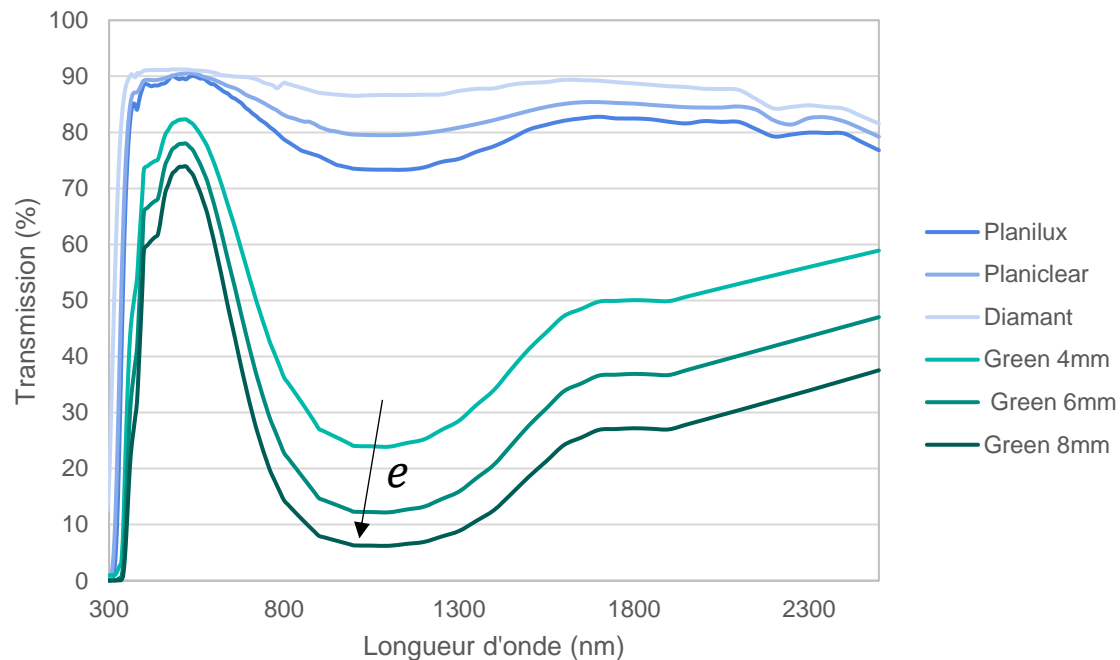
- Augmenter la transparence  
Contrôle des impuretés ( $Fe_2O_3$  !)



## 2) MODULER L'ESTHÉTIQUE ?

### VERRE TINTÉ DANS LA MASSE

- Augmenter la transparence  
Contrôle des impuretés ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  !)
- Ajuster la couleur  
Concentration en Fe

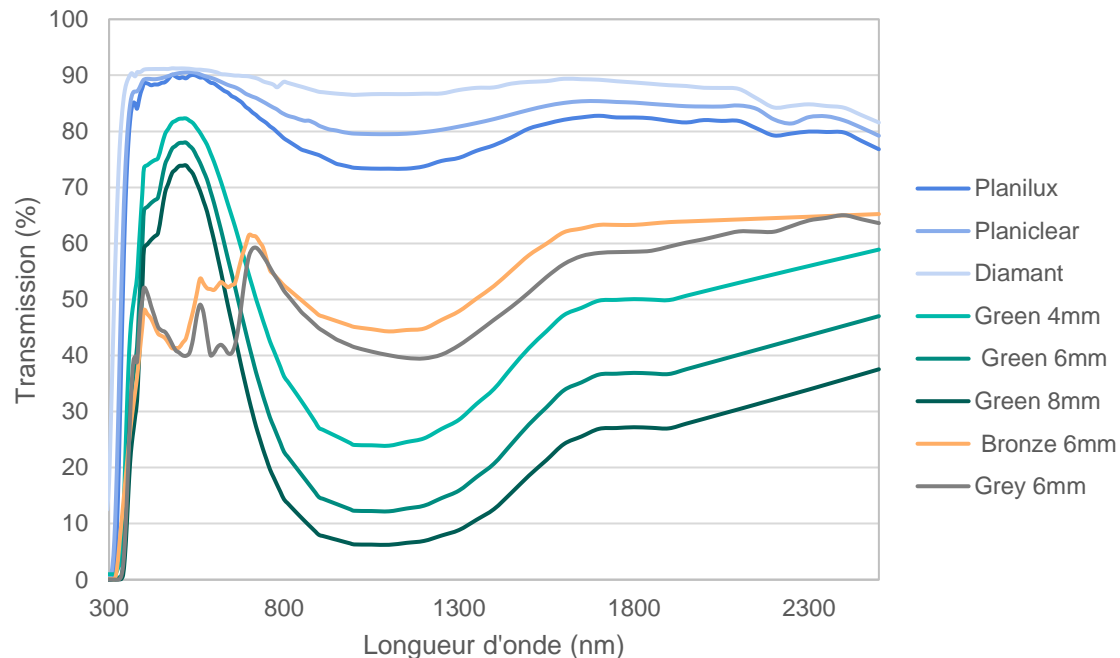


→ Limite: contrôle par absorption seulement, **dépendance de l'épaisseur**

## 2) MODULER L'ESTHÉTIQUE ?

### VERRE TINTÉ DANS LA MASSE

- Augmenter la transparence  
Contrôle des impuretés ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$  !)
- Ajuster la couleur  
Concentration en Fe, Co, Se



→ Limite: contrôle par absorption seulement, dépendance de l'épaisseur

→ **Coût élevé**: changement de batch, transitions

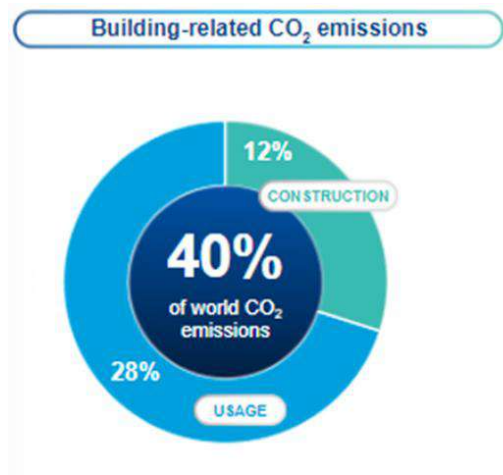
# 3) PERFORMANCES THERMIQUES ?

## LES ENJEUX

- Impact sur l'environnement des bâtiments (en France)
  - 43 % de la consommation d'énergie globale\*
  - 33% des gaz à effet de serre\*\*
  - 40% des matières premières extraites\*\*\*



Visualisation des déperditions de chaleur



- **Performance** énergétique d'un vitrage :  
levier de la décarbonisation des émissions d'un bâtiment
- **Confort** des usagers :  
Selon l'OMS nous passons 80-90% du temps en intérieur

\* : <https://www.ademe.fr/expertises>

\*\* 2019/07/Publication-neutralité-et-batiment-Carbone-4-ADEME.pdf

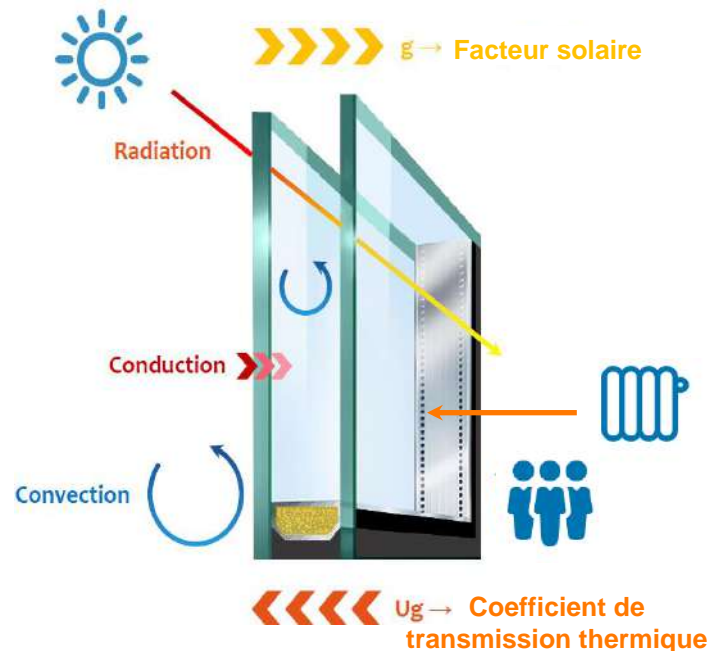
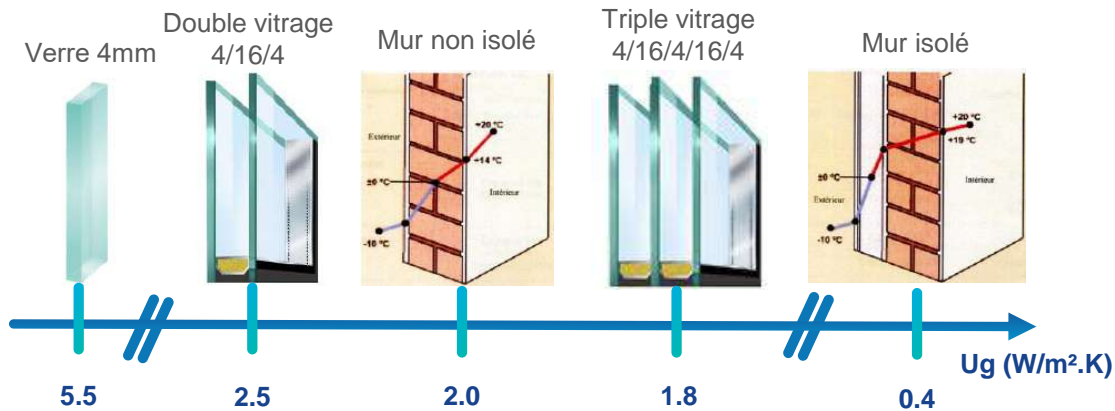
\*\*\* <http://www.hqegbc.org/>  
(rapport : L'économie circulaire tremplin du bâtiment durable pour tous)

# 3) PERFORMANCES THERMIQUES ?

## VERRE ISOLANT ?

Transmission de chaleur à travers un vitrage, par :

- **CONDUCTION** dans un solide, limitée grâce aux cavités
- **CONVECTION** dans un fluide, limitée par l'épaisseur de la cavité, et la nature du gaz  $Kr < Ar < Air$
- **RADIATION** par ondes électromagnétiques si le milieu est transparent



# 3) PERFORMANCES THERMIQUES ?

## PROPRIÉTÉ DU VERRE DANS L'IR

Les radiations solaires reçues sur terre

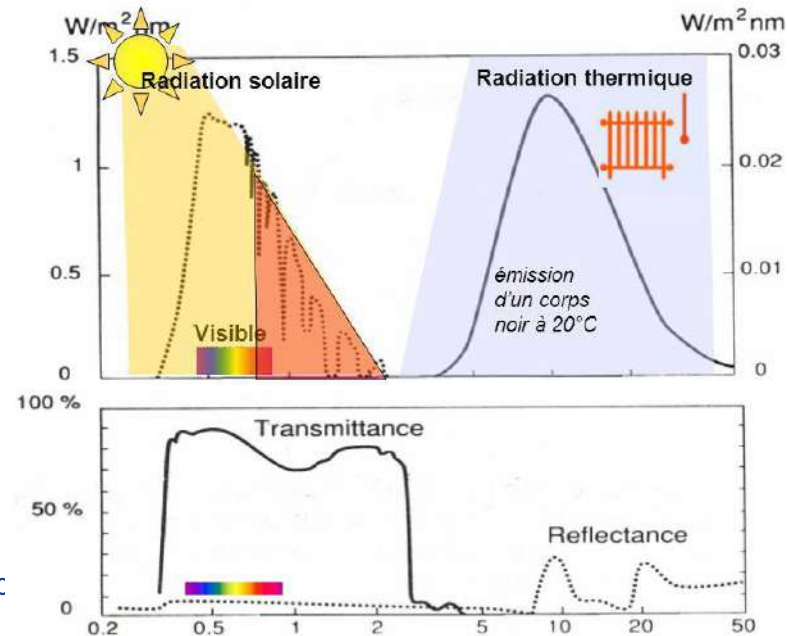
- Visible ~50% = lumière
- Proche IR ~50% = chaleur

Les radiations thermiques intérieurs

- Émission d'un corps noir ~20°C = chauffage

Le verre sodo-calcique dans l'IR

- Transparent dans le visible et le proche IR (300 nm – 3 µm)
- Absorbant dans les IR lointains → Réémet à ~10µm comme un corp



→ LES REVÊTEMENTS DOIVENT AMÉLIORER L'ISOLATION EN RÉGULANT LES ÉCHANGES RADIATIFS  
= MAXIMISER LA LUMIÈRE, RÉFLÉCHIR LA CHALEUR

# DEUX STRATÉGIES

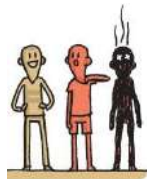
## ET DES HYBRIDATIONS



**Vitrage bas-émissif, Low-E**

**ECLAZ®**

*Garder la chaleur en hiver*



**Vitrage à contrôle solaire**

**COOL-LITE®**

*Eviter les surchauffes en été*

# DEUX STRATÉGIES

ET DES HYBRIDATIONS...



**Vitrage bas-émissif, Low-E**  
ECLAZ®

*Garder la chaleur en hiver*  
→ réflexion IR  $10\mu\text{m}$  vers l'intérieur



**Vitrage à contrôle solaire**  
COOL-LITE®

*Eviter les surchauffes en été*  
→ réflexion IR  $1-2\mu\text{m}$  vers l'extérieur



03

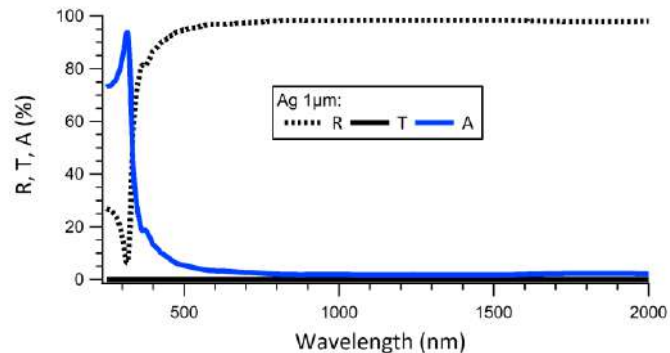
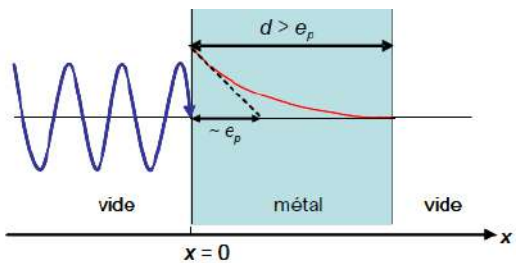
# COUCHES MINCES DÉSPOSÉES PAR PVD



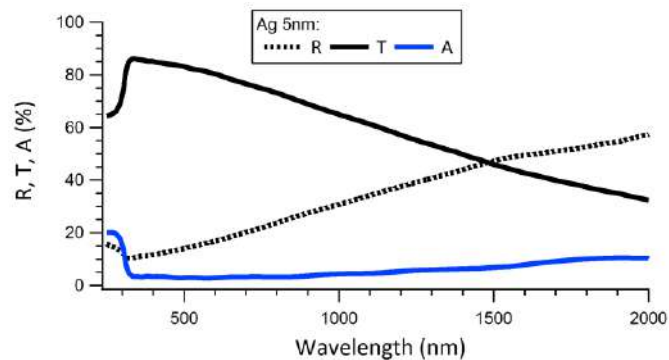
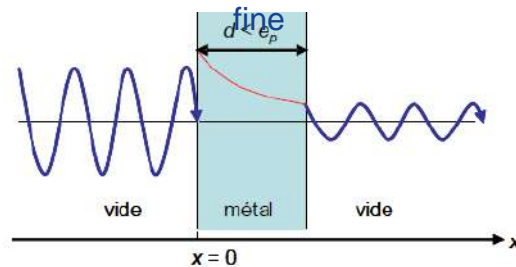
# COUCHES MINCES MÉTALLIQUES

« DIS JAMY, ÇA VEUT DIRE QUOI MINCE ? »

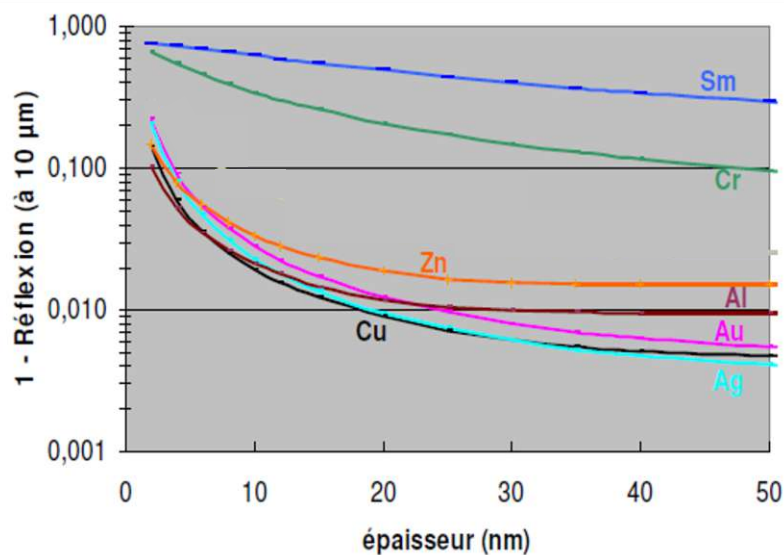
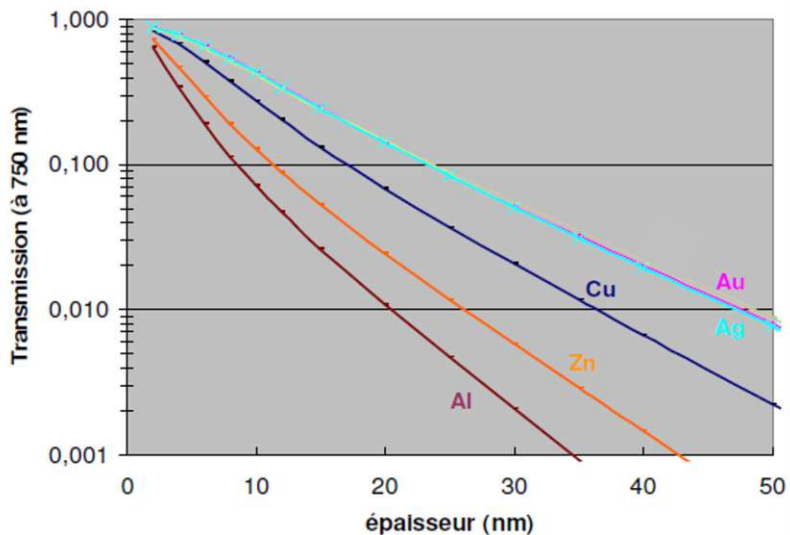
- **RÉFLÉCHISSANT** dans l'IR thermique ( $10\mu\text{m}$ )
- **OPAQUE** dans le visible



- **RÉFLÉCHISSANT** dans l'IR thermique ( $10\mu\text{m}$ )
- **TRANSPARENT** dans le visible si épaisseur suffisamment



# QUEL MÉTAL CHOISIR ?



	Au	Ag	Cu	Zn	Al
<b>TRANSMISSION</b> (visible) :					
<b>RÉFLEXION</b> (IR thermique - 10µm) :					

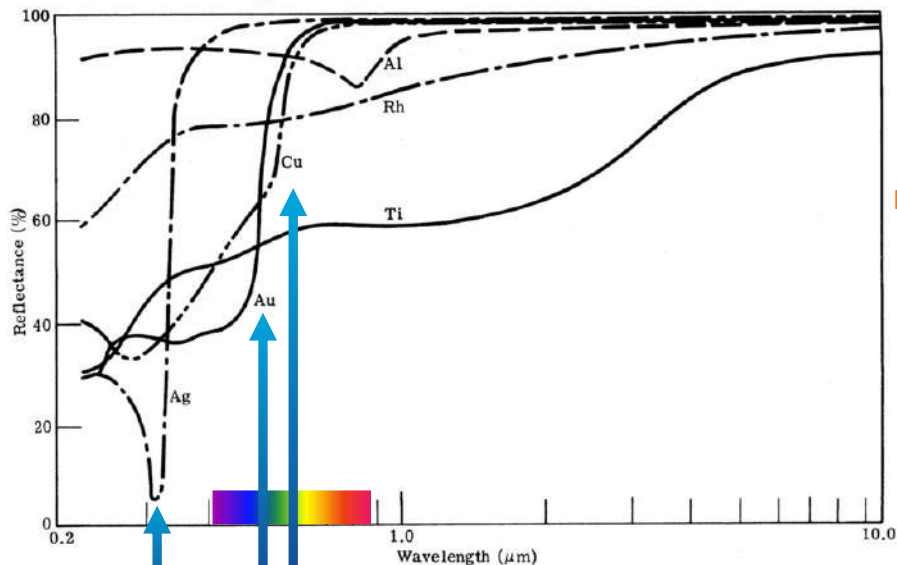
**TRANSMISSION** (visible) :

**RÉFLEXION** (IR thermique - 10µm) :

# AND THE WINNER IS....?

## L'ARGENT !

Impact de la transition interbande des métaux sur la couleur



Ag  
uv

Au et Cu  
visible

**TRANSMISSION** (visible) :

**RÉFLEXION** (IR thermique - 10μm) :

**COÛT** :

**NEUTRALITÉ EN COULEUR** :

Au	Ag	Cu
+++	++	+

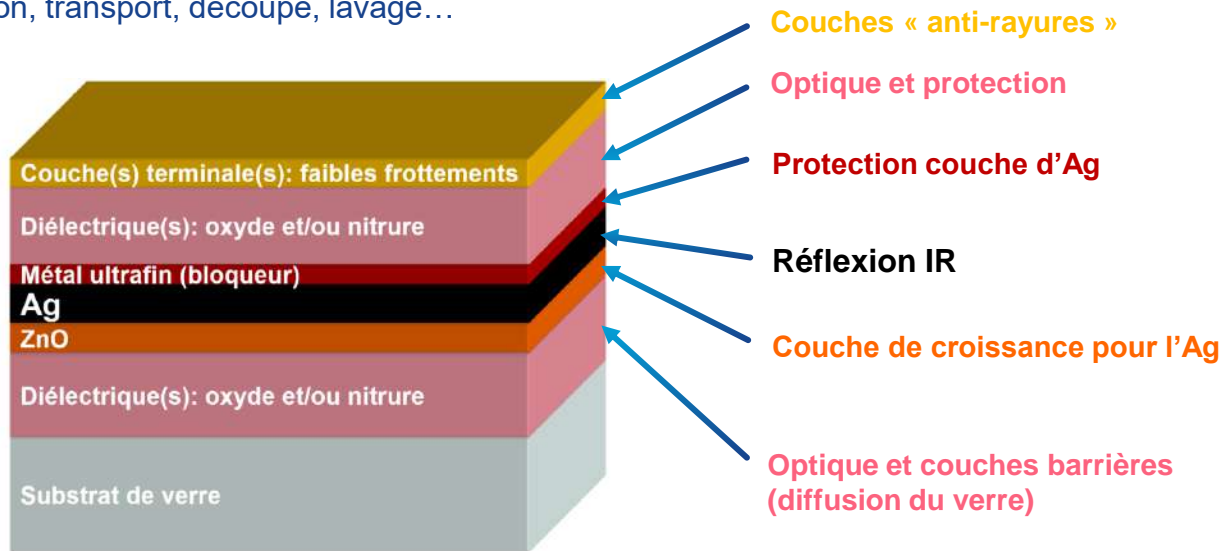
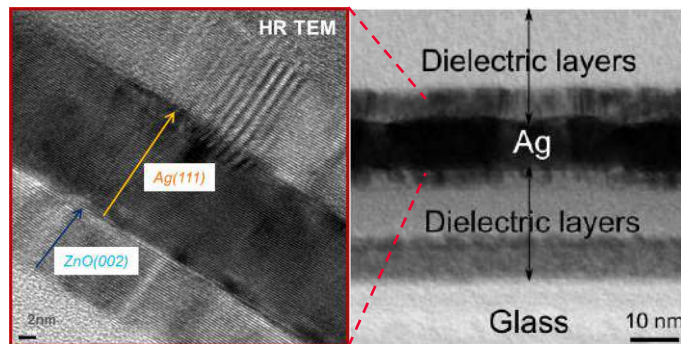


# STABILISATION PAR EMPILEMENT

## 5-50 COUCHES MINCES

Encapsulation dans un millefeuille pour atteindre

- la qualité de l'Ag, cristallinité, taille de grains...
- la trempe, diffusion à chaud, démouillage, corrosion...
- la transformation, étapes de manutention, transport, découpe, lavage...



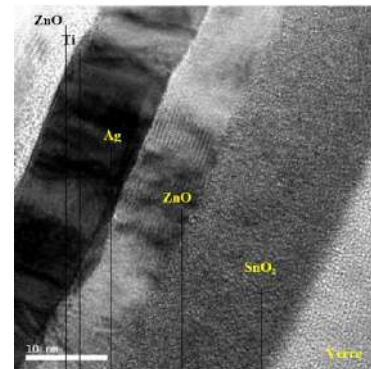
# OPTIMISATION DE LA COUCHE D'ARGENT

## QU'EST-CE QUI LIMITE LA CONDUCTIVITÉ ?

Amélioration de la réflexion des IR = Amélioration de la conductivité de la couche d'Ag

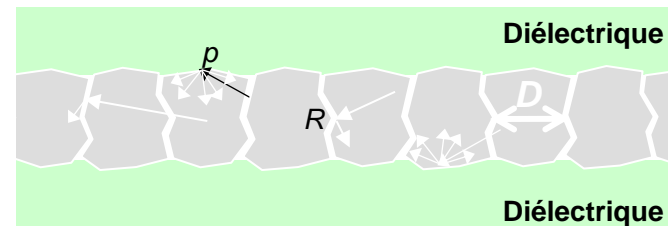
### LIMITER LE SCATTERING AUX INTERFACES

Diminuer la rugosité de la sous-couche  
Interface la plus lisse possible



### LIMITER LE SCATTERING PAR LES JOINTS DE GRAINS

Améliorer la cristallisation de l'Ag  
Augmenter la taille des grains d'Ag



# OPTIMISATION DE LA COUCHE D'ARGENT

## CHOIX D'UNE SOUS-COUCHE

Propriétés de la sous de croissance idéale :

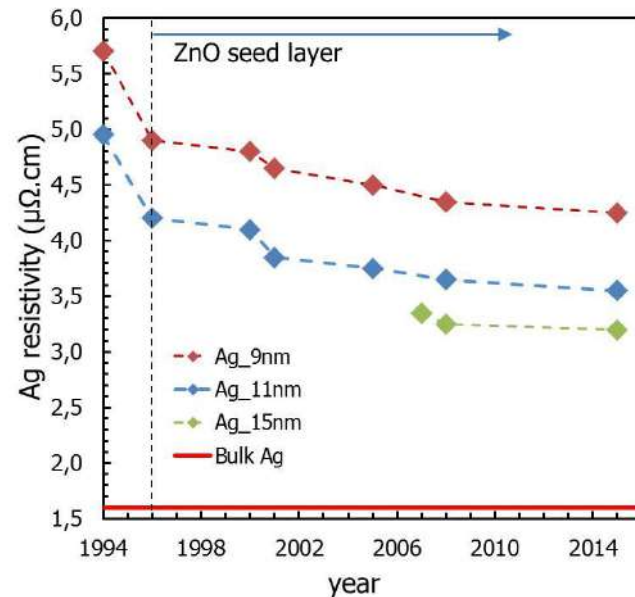
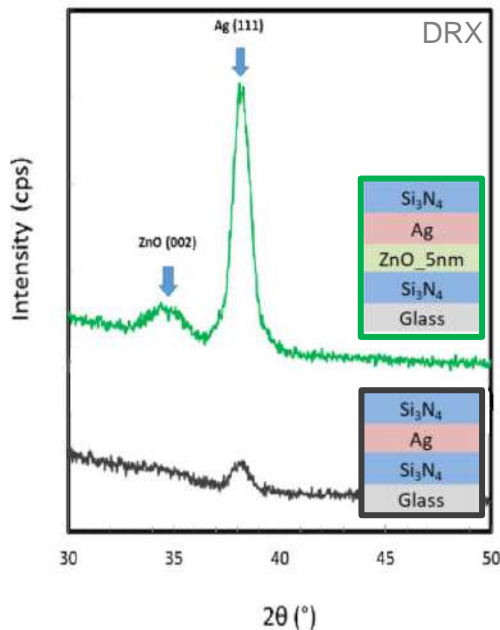
- Oxyde transparent ;
- Bon mouillage de l'Ag ;
- Cristallisé à température ambiante ;
- Structure cubique ;
- Faible *lattice mismatch* avec Ag ;

# OPTIMISATION DE LA COUCHE D'ARGENT

## CHOIX D'UNE SOUS-COUCHE

Propriétés de la sous de croissance idéale :

- Oxyde transparent ;
- Bon mouillage de l'Ag ;
- Cristallisé à température ambiante ;
- ZnO structure hexagonale vs Ag structure cubique mais croissance par épitaxie permise
- Lattice mismatch important entre ZnO et Ag



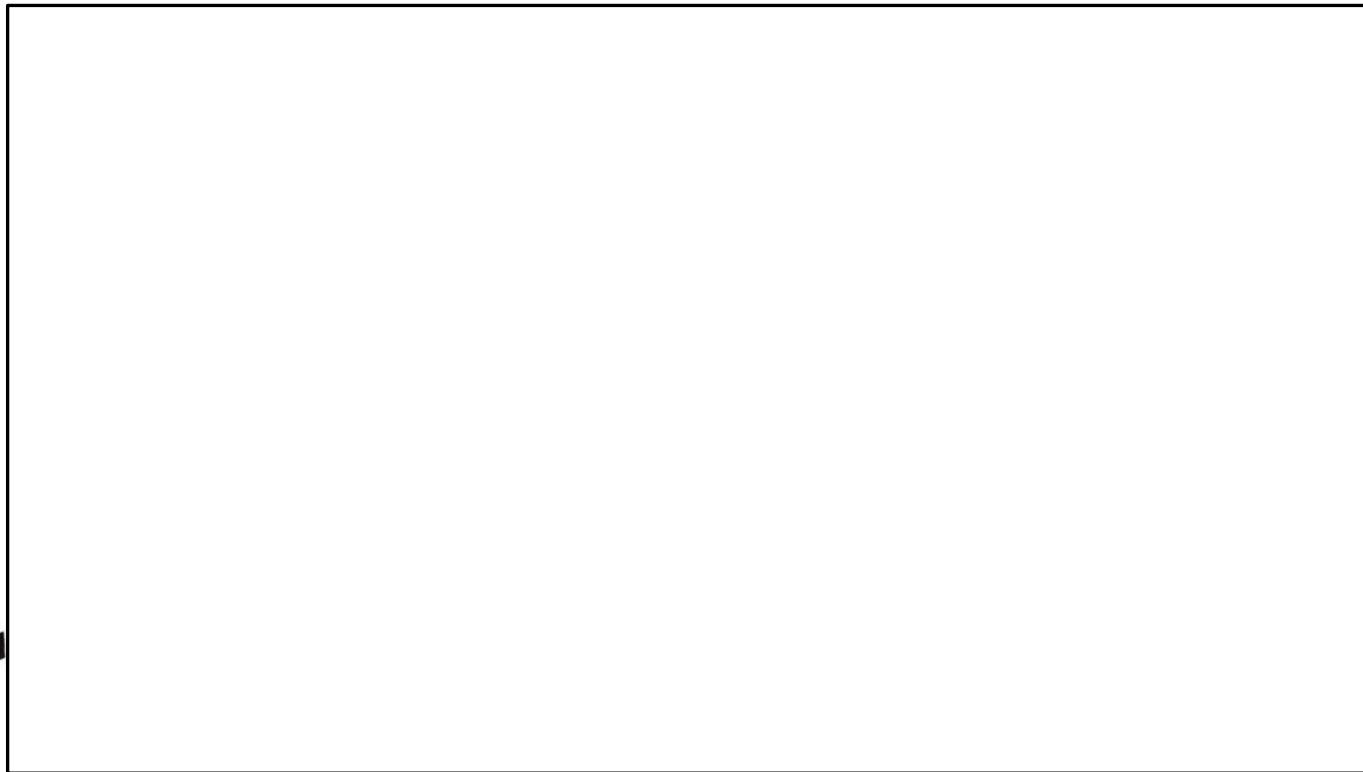


# DÉPÔT PAR PULVÉRISATION CATHODIQUE MAGNÉTRON

## PRINCIPE PVD

On contrôle :

- La vitesse
- Les voltages
- La nature des cathodes
- Les gaz
- Les pressions



[https://www.youtube.com/watch?v=sCc7\\_7hkexA](https://www.youtube.com/watch?v=sCc7_7hkexA)

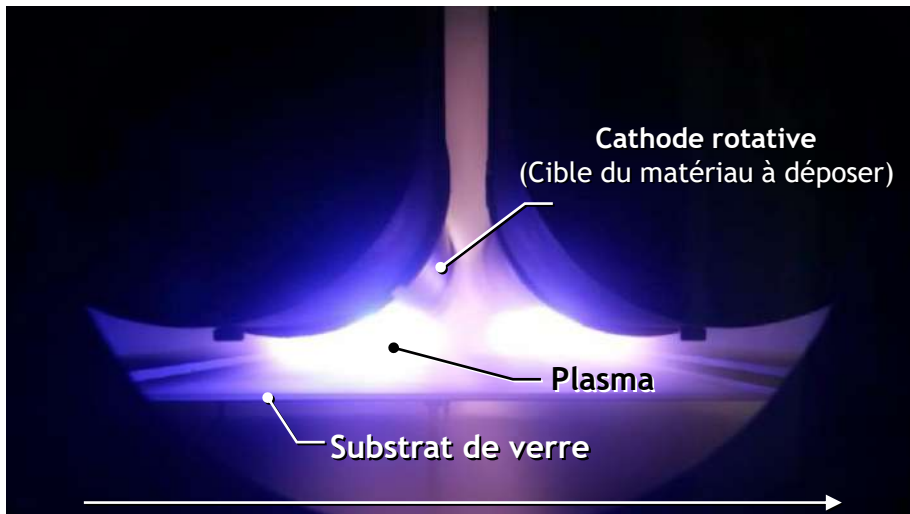
# DÉPÔT PAR PULVÉRISATION CATHODIQUE MAGNÉTRON

## ÉCHELLE INDUSTRIELLE

Challenges d'un dépôts sur verres de 3,2m x 6m (voir 18 m !)

- Vitesse de défilement : plusieurs m/min
- **Homogénéité**, latérale et temporelle

*ODG : Tondre une pelouse à 5 cm +/- 1 mm  
... sur toute la surface de l'Europe!*



Direction de déplacement



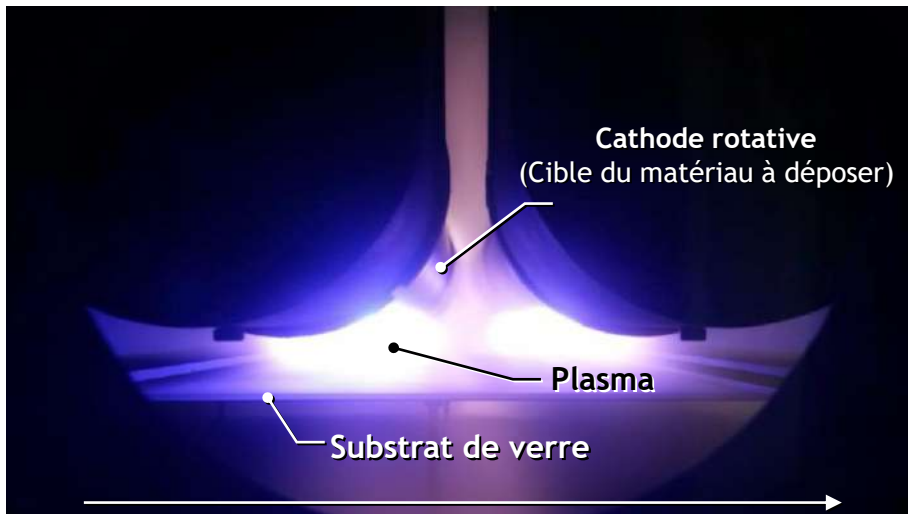
# DÉPÔT PAR PULVÉRISATION CATHODIQUE MAGNÉTRON

## ÉCHELLE INDUSTRIELLE

Challenges d'un dépôts sur verres de 3,2m x 6m (voir 18 m !)

- Vitesse de défilement : plusieurs m/min
- Homogénéité, latérale et temporelle
- Certains empilements avec plus de **50 couches successives**

1 couche = 1 cathode

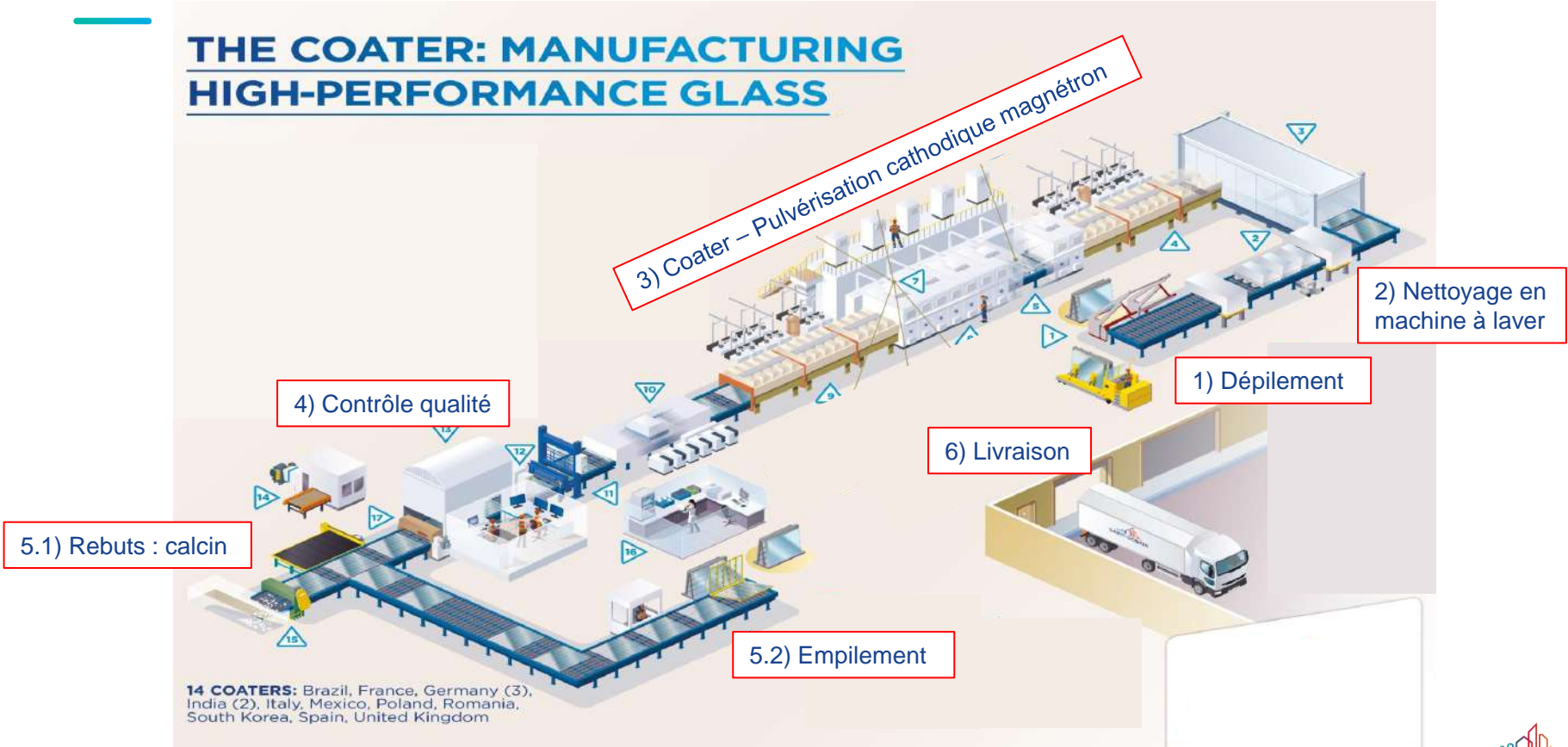


Direction de déplacement



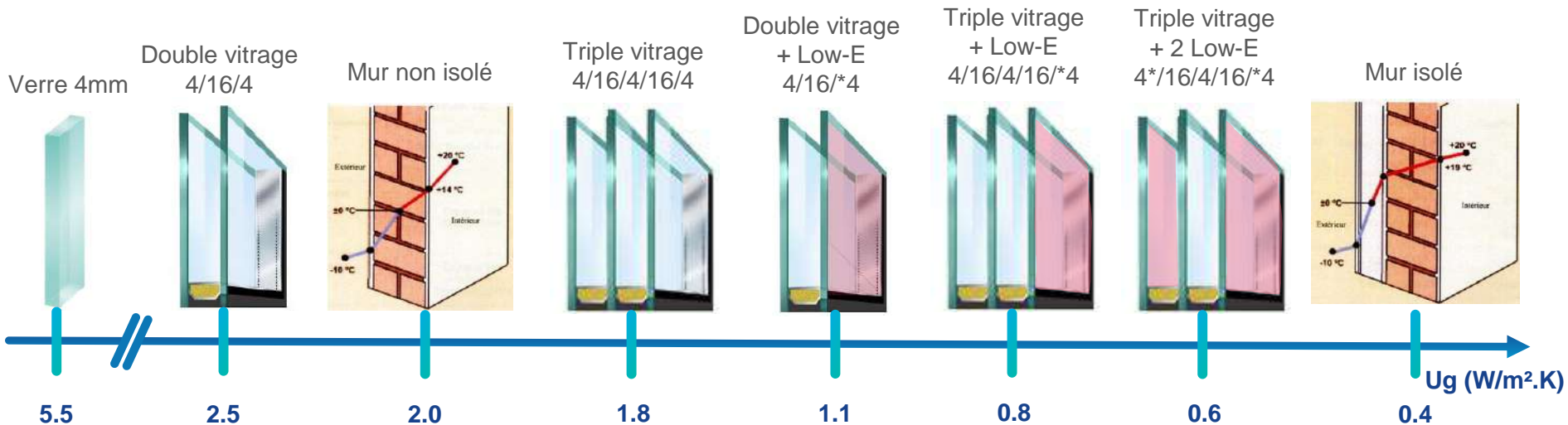
# UNE LIGNE INDUSTRIELLE

## THE COATER: MANUFACTURING HIGH-PERFORMANCE GLASS



# PERFORMANCES THERMIQUES ACCRUES

## & LUMIÈRE NATURELLE CONSERVÉE



# AJUSTEMENTS OPTIQUES

## MESURES ET SIMULATIONS

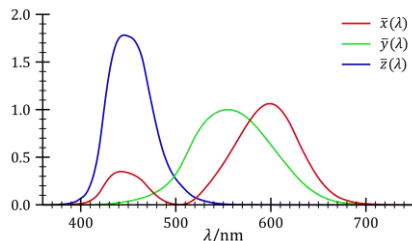
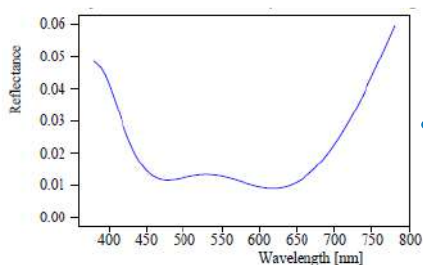
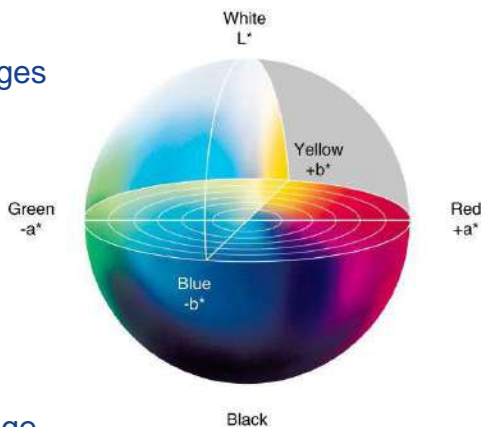
Comparaison des couleurs entre différents vitrages

→ Projection des courbes spectrales de l'observateur standard

→ Simulation dans un environnement ciel bleu ou ciel gris, avec ou sans stores

Les paramètres du système  $L^*a^*b^*$  [CIE 1976] :

- la clarté  $L^*$  entre 0 (noir) à 100 (blanc ref.)
- le paramètre  $a^*$  valeur sur un axe vert → rouge
- le paramètre  $b^*$  valeur sur un axe bleu → jaune



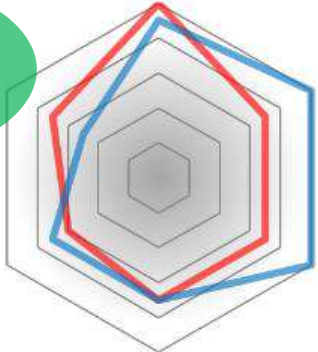
# STACK DESIGN OU TROUVER LA BONNE ARCHITECTURE



Performances

Réflexion externe

Production et transformation facilitées



Réflexion interne

Couleurs en angle

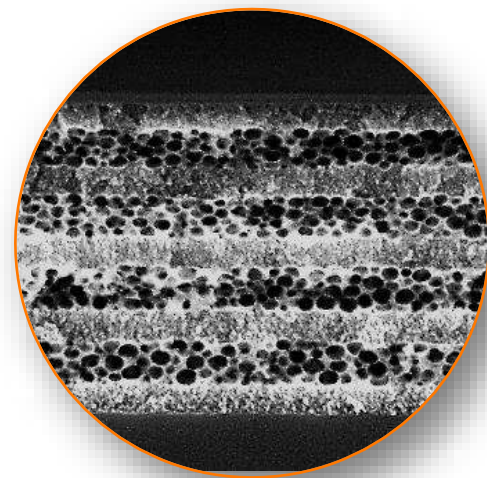
Couleurs en transmission



X 2	Overcoat
X 2	Si3N4
X 2	ZnO
X 2	NiCr
X 2	Ag
X 2	NiCr
X 2	ZnO
X 2	SnZnO
X 2	Si3N4
X 2	ZnO
X 2	NiCr
X 2	Ag
X 2	NiCr
X 2	ZnO
X 2	SnZnO
X 2	Si3N4
X 2	ZnO
X 2	NiCr
X 2	Ag
X 2	NiCr
X 2	ZnO
X 2	SnZnO
X 2	Si3N4

04

# COUCHES MINCES PAR VOIES LIQUIDES





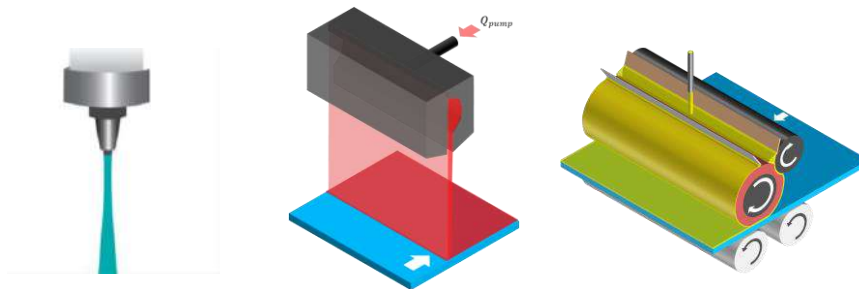
# LES PROCÉDÉS

## COMPATIBLES GRANDES TAILLES

Les procédés doivent être applicables sur 3.20 x 6 m

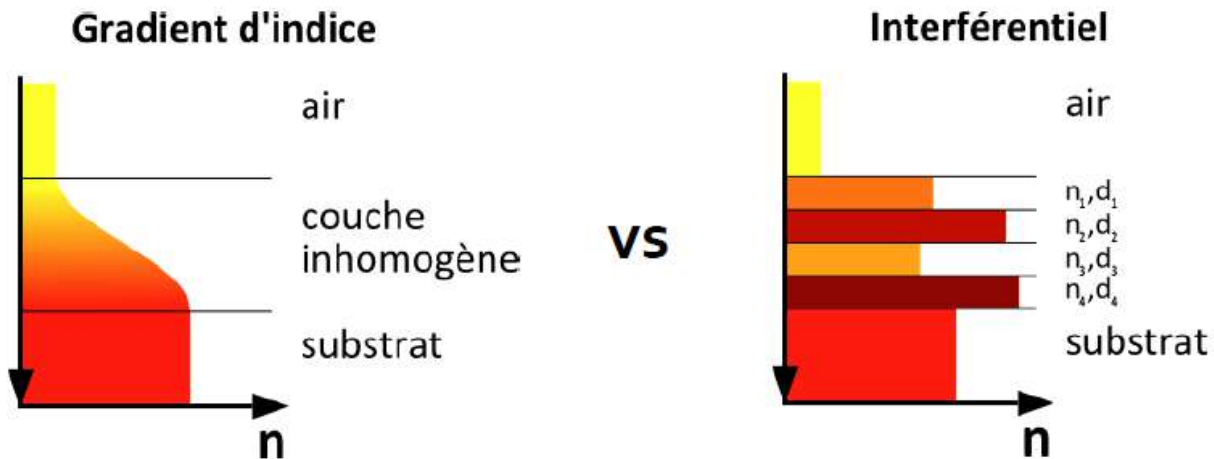
- Le spray
- Le rideau
- Le rouleau
- Spin coating (microélectronique)
- Dip coating (lunetterie)

Et pour certaines applications (ex : cas d'opacité)  
on peut relaxer les contraintes d'esthétiques



# REVÊTEMENT ANTIREFLET

2 stratégies possibles



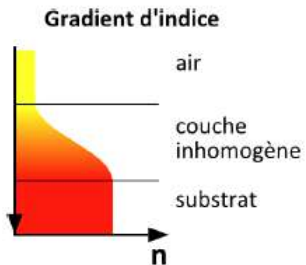
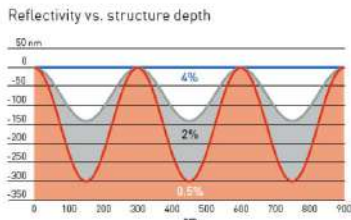
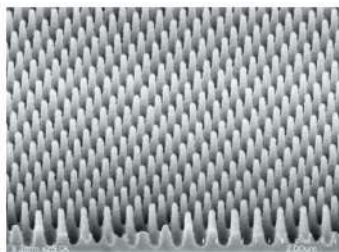
H.A. Macleod, *Thin-Film Optical Filters, Third Edition*, Institute of Physics Publishing, London, 2001

Quel matériau pour obtenir un indice de réfraction entre 1 et 1,52 ?

# GRADIENT PAR TEXTURATION OU POROSITÉ

## TEXTURATION

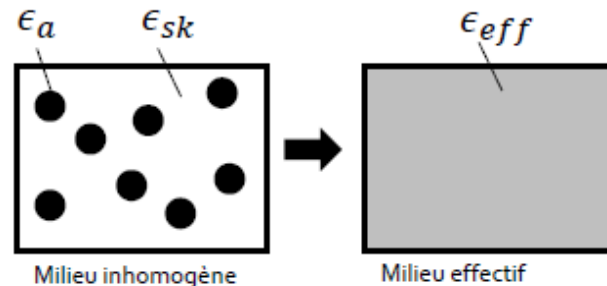
- La quantité de matériau dense augmente progressivement et crée le gradient du point de vue optique
- Nano-impresion
- Bioinspiration : oeil de mouche



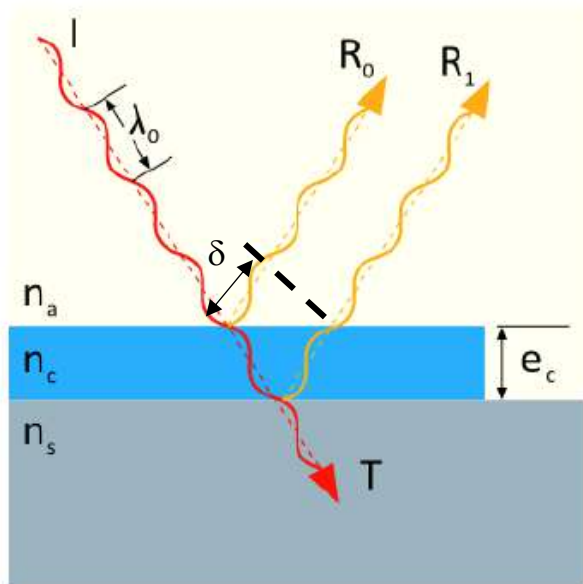
## POROSITE

- Mélange de matériaux à une échelle petite devant la longueur d'onde
- Si les indices ne sont pas trop différents :

$$n_{eff} \approx \phi_1 n_1 + (1 - \phi_1) n_2$$



# ANTIREFLET GRADIENT MONOCOUCHE



$$\frac{\delta}{2} = e_c n_c = \left(p + \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda_0}{2}, \text{ avec } p \in \mathbb{N}$$

$$r_{cs} = r_{ac} = \frac{n_c - n_s}{n_c + n_s} = \frac{n_a - n_c}{n_a + n_c}$$

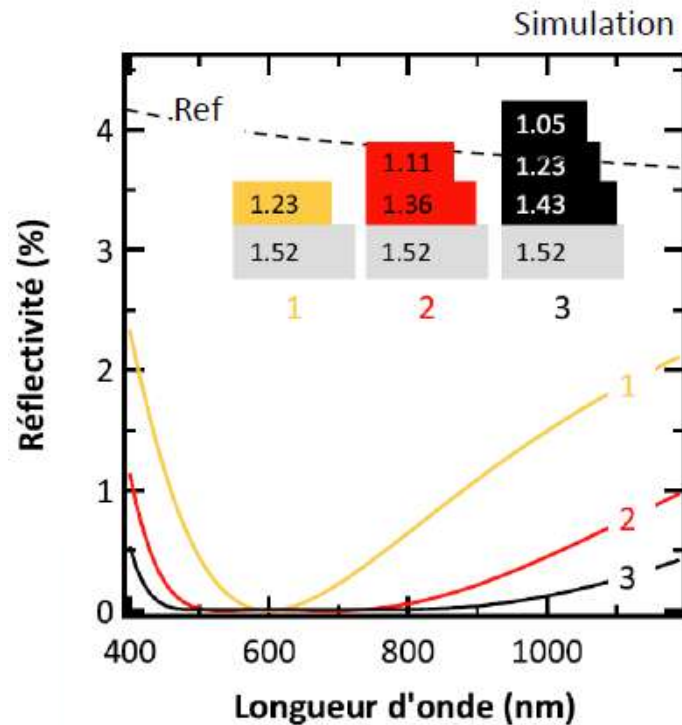
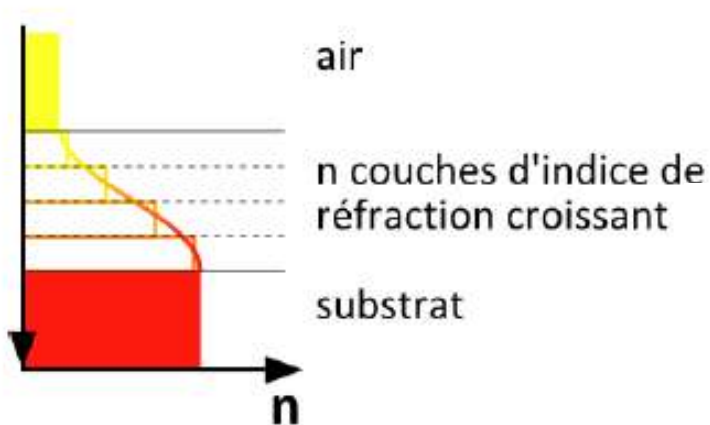
$$n_c = \sqrt{n_a n_s}$$

- Pour une interface entre du verre (d'indice  $n_s = 1.52$ ) et de l'air (d'indice  $n_a = 1$ ),  $n_c$  vaut **1,23**

# ANTIREFLET GRADIENT MULTICOUCHE

## CAS D'UN EMPILEMENT ?

- Large bande
- Besoin d'indice de réfraction très bas ( $\sim 1,1$ )



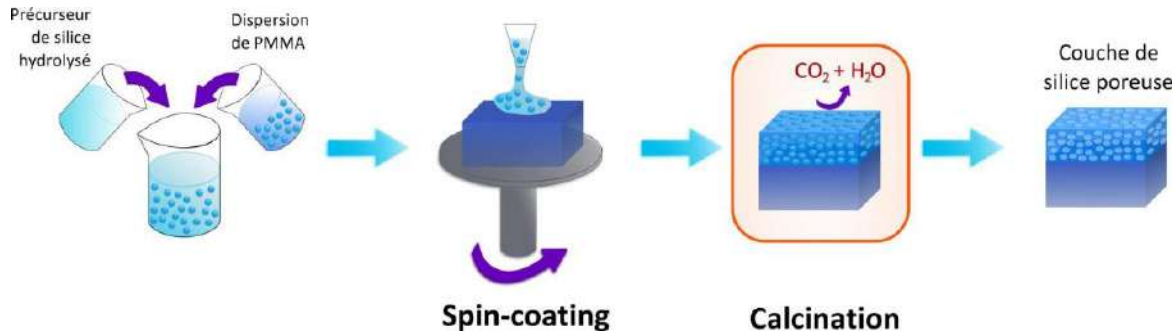
Krepelka, A. *Jemná Mechanika A Optika*, 1992, **3–5**, 53



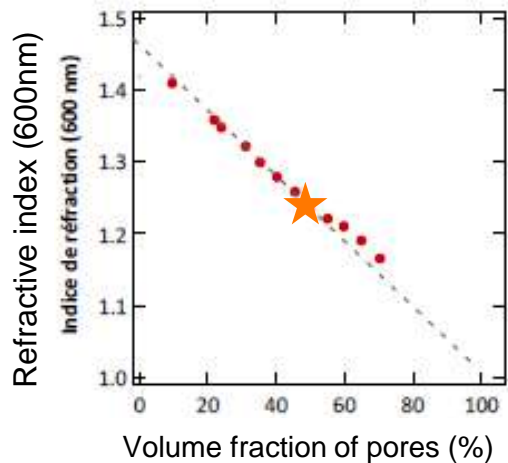
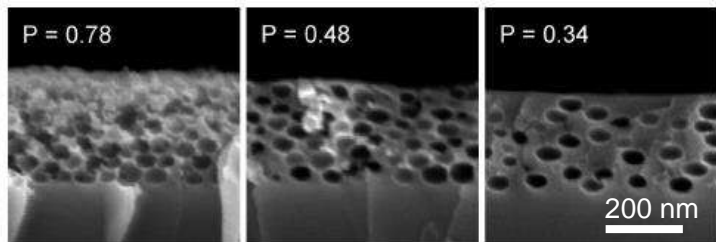
# DÉPÔT POREUX BAS INDICE

## PROTOCOL

- Porogène = Latex  
Particule PMMA ~30-80 nm
- Sol-gel de silice



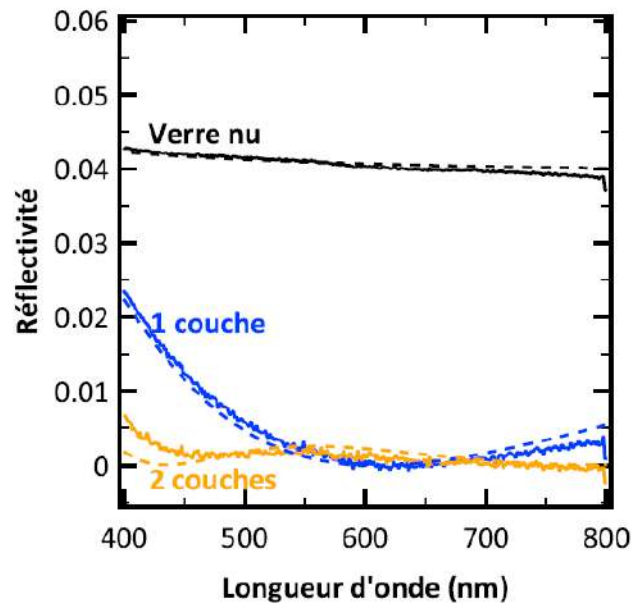
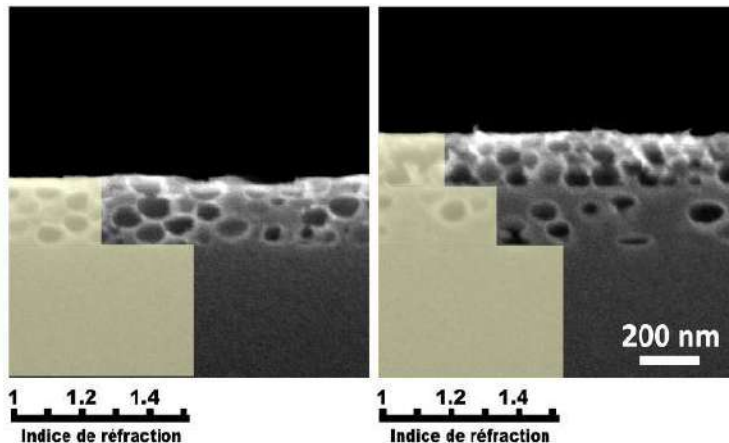
## CONTROLE DE L'INDICE



# ANTIREFLET POREUX

## PERFORMANCE

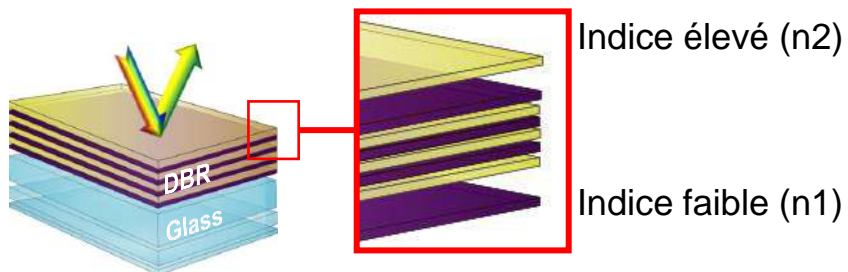
- Stabilité mécanique & humidité
- Stable avec l'angle d'incidence (VS stratégie interférentielle)
- Grandes surfaces / bas coût



# MIROIR DE BRAGG

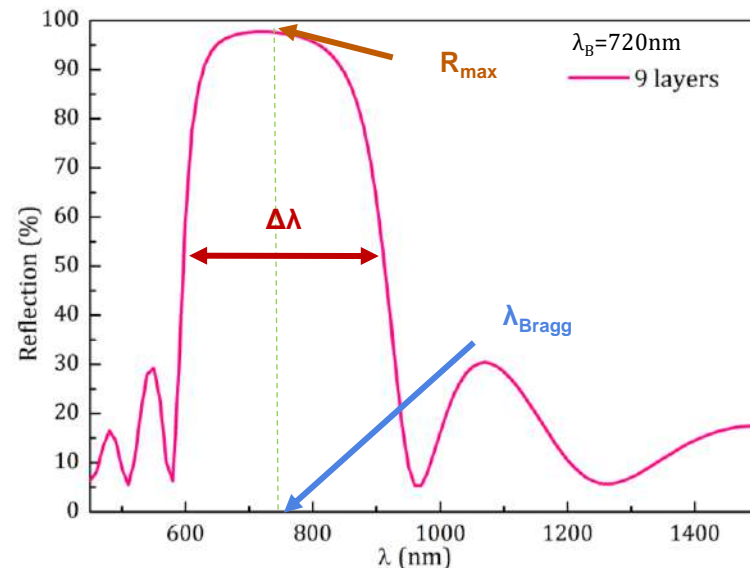
## PRINCIPE

- Miroir composé de diélectrique : très faible absorption
- Empilement de couches minces composées de matériaux ayant un fort contraste d'indice  $n_1 < n_2$



$$\delta = n_i e_i = \frac{\lambda_{Bragg}}{4}$$

- $\lambda_{bragg}$  → épaisseur des couches
- $\Delta\lambda$  → contraste d'indice et  $\lambda_{bragg}$
- $R_{max}$  → nombre de couches



Simulation pour un empilement de 9 couches à incidence normale



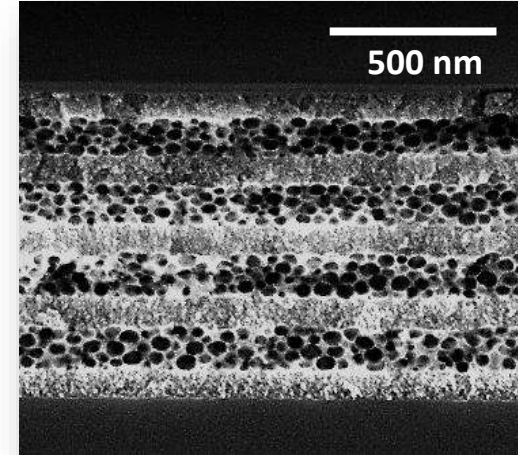
# MIROIR DE BRAGG

## PROTOCOLE

- Empilement à 9 couches:

$\text{TiO}_2$  :  $n = 2,08$  à 600nm

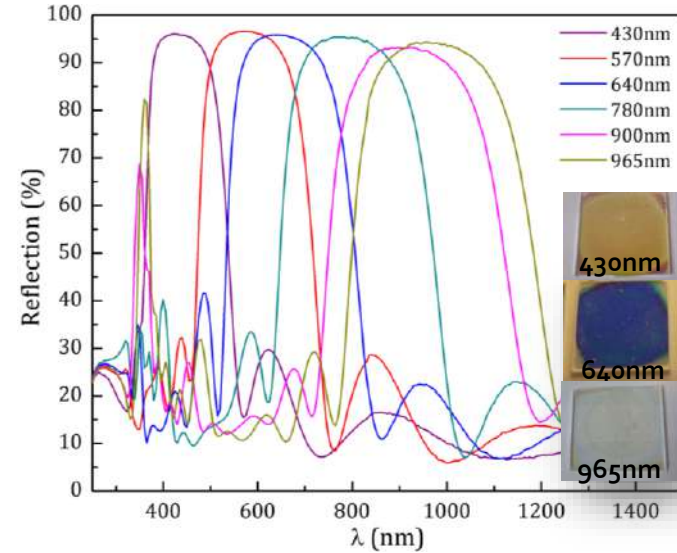
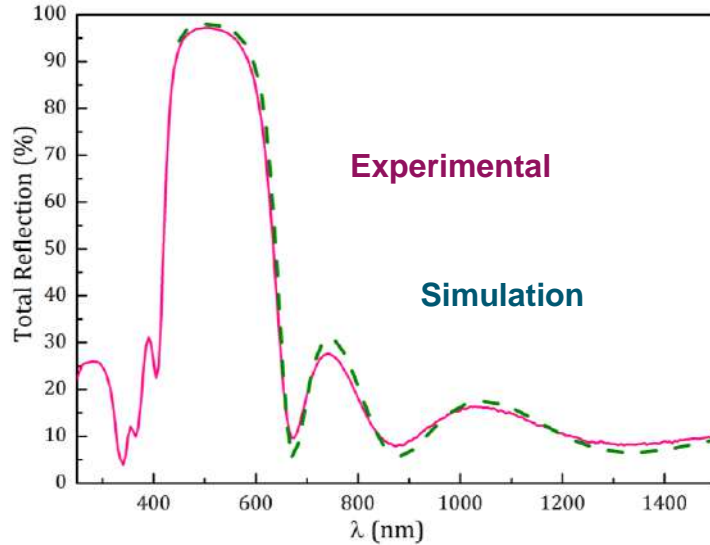
$\text{SiO}_2$  poreux même couche sol-gel/latex :  $n = 1,24$  à 600nm



# MIROIR DE BRAGG

## PERFORMANCES

En modifiant les épaisseurs on choisit  $\lambda_{\text{bragg}}$



Mais effet interférentiel en angle

05

# VITRAGES ACTIFS



# QU'EST-CE QUE LE VITRAGE ACTIF ?

## DEFINITION

Un vitrage qui à la demande de l'utilisateur utilise de l'énergie pour:

- Changer les propriétés du vitrage : transparence, opacité, couleur...
- Ajouter des fonctions additionnelles : chauffage, éclairage, information...

## APPLICATION MARKETS

### BATIMENT

- Neuf ou rénovation (film par exemple)
- Commercial & résidentiel

### TRANSPORT

- New and Retrofit
- Voiture, train, maritime, aeronautics



# POUR QUELLES FONCTIONALITÉS ?

ECRANTAGE



PRIVACITE



ECLAIRAGE



CHAUFFAGE



AFFICHAGE

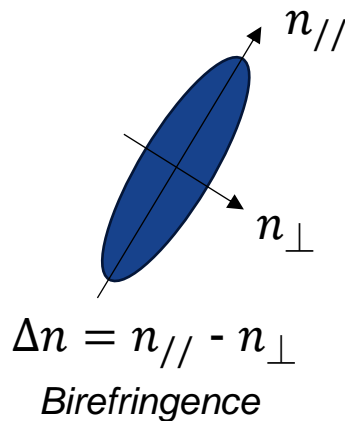


# UTILISATION DE CRISTAUX LIQUIDES (LC)

## PRINCIPE

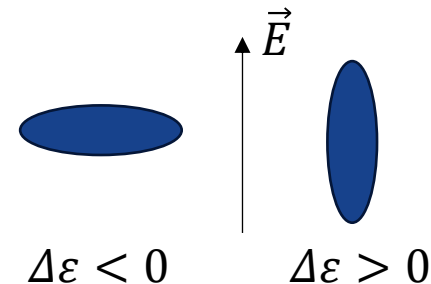


- Pour obtenir de la diffusion « scattering » à la demande, on génère un contraste d'indice de réfraction à la demande
- Les cristaux liquides sont de bons candidats par leur biréfringence : indice  $n_{//} \neq n_{\perp}$
- Le contraste d'indice vient de l'orientation des LC, par application d'un champ électrique



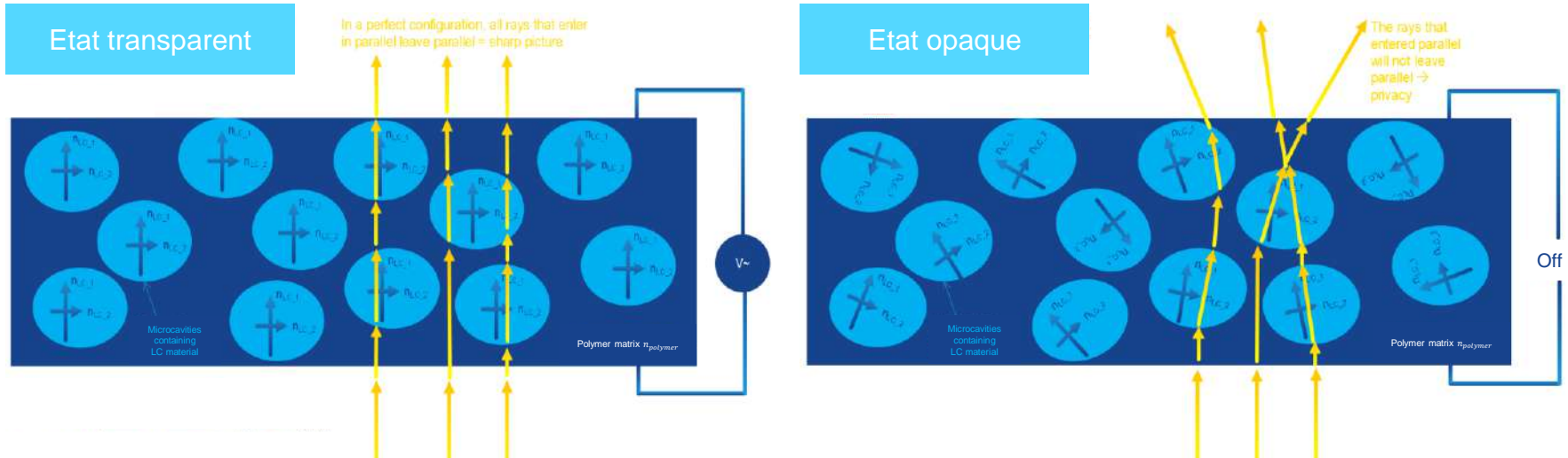
$$\Delta \varepsilon = \varepsilon_{//} - \varepsilon_{\perp}$$

Anisotropie diélectrique



# CRISTAUX LIQUID POUR L'OPACITÉ

## POLYMER DISPERSED LIQUID CRYSTAL (PDLC)



- Les indices du grand axe et du polymère doivent être proches  $n_{LC_1} \approx n_{polymer}$  et  $\Delta\varepsilon > 0$  force l'état transparent.
- $n_{LC_2} \neq n_{polymer}$  créer de la diffusion pour l'état opaque.
- Composition 70% polymère / 30% LC, plage de température -20 - 60°C

# APPLICATIONS

## POLYMER DISPERSED LIQUID CRYSTAL (PDLC)

- PRIVA-LITE®



Challenge

→ Diminuer le flou en angle  
à cause de l'épaisseur optique



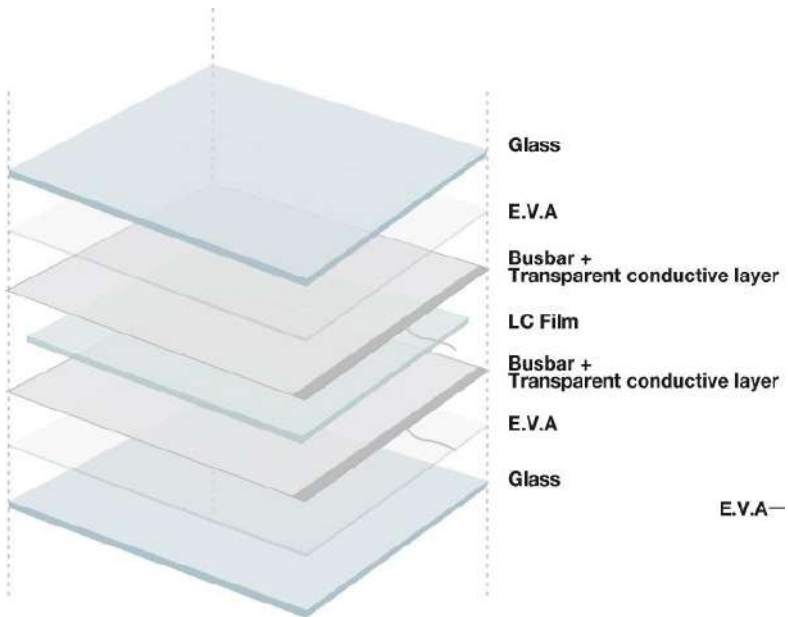


# APPLICATIONS

## POLYMER DISPERSED LIQUID CRYSTAL (PDLC)

Configuration laminée

→ Permet l'utilisation en toit automobile



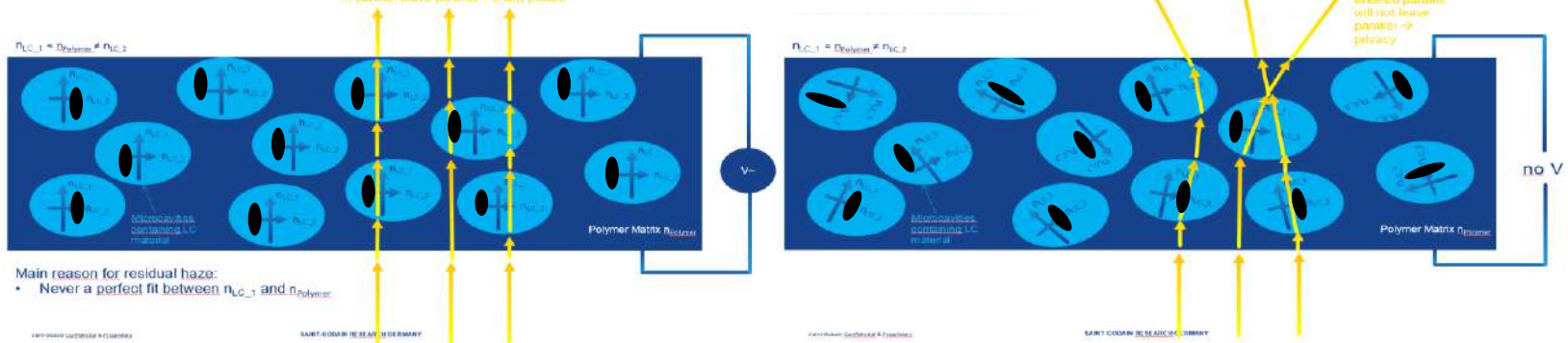
- Amplisky® et Solarbay®



# ET SI ON AJOUTAIT DES COLORANTS

## DYE-DOPED POLYMER DISPERSED LIQUID CRYSTAL (DD-PDLC)

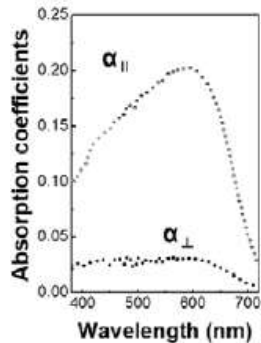
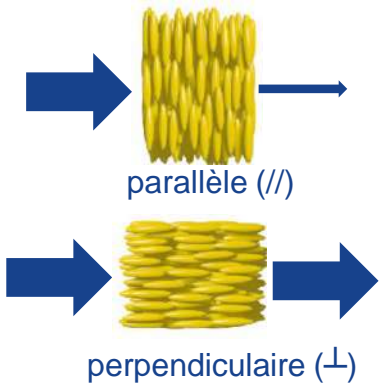
- Amplisky Ombra® : privacité + écrantage



# ET SI ON AJOUTAIT DES COLORANTS ?

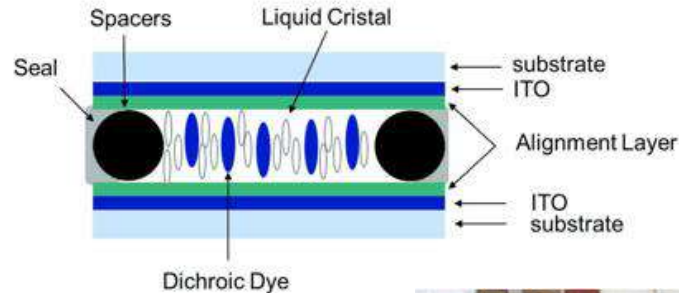
## GUEST-HOST LIQUID CRYSTAL (GHLIC)

- Colorants dichroïques



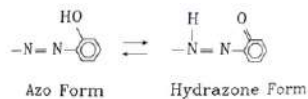
Ji et al. Crystals 2021, 11, 131

- Dispersion de colorants (*guests*) dans une matrice de LC (*host*) qui vont suivre l'orientation des LC

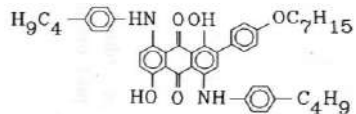


### Exemple de molécules

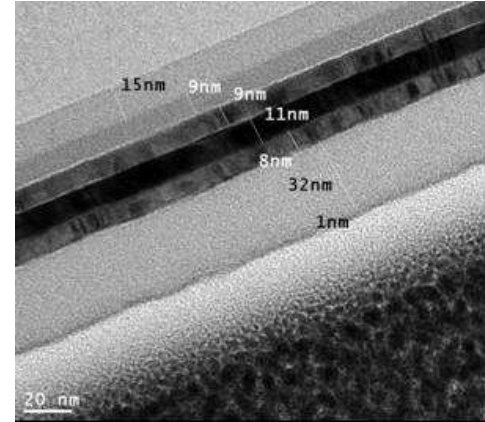
#### Azo



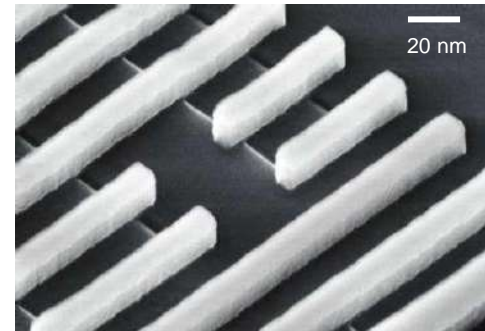
#### Anthraquinone



# CONCLUSION



Vitrage isolant Saint-Gobain



Processeur Intel



MERCI

