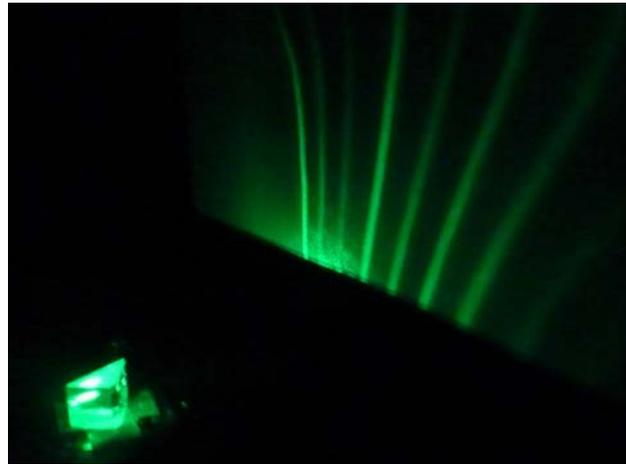


Optimisation analytique de filtres interférentiels pour une exaltation géante du champ optique



C. Ndiaye, M. Zerrad, F. Lemarchand, C. Amra

Institut Fresnel, UMR CNRS 7249

Universités d'Aix Marseille, Ecole Centrale Marseille

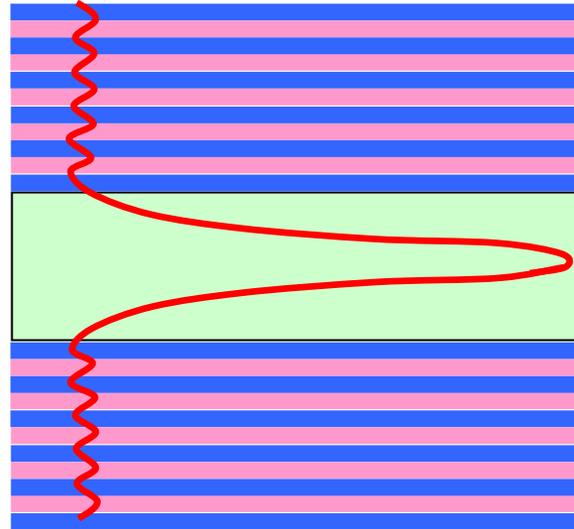
... dévolu à la conception de systèmes interférentiels
délivrant une exaltation optimale de champ optique

Applications en espace libre et en optique guidée

- capteurs (environnement, vivant)
- contrôle de l'émission spontanée (μ -cavités, seuil laser)
- microscopies nouvelles...

L'exaltation n'est pas un nouveau challenge...

Cas des
filtres bande-étroite
(Fabry-Perot)



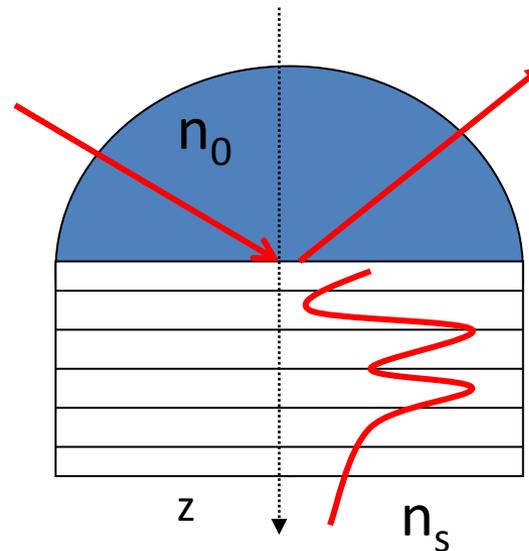
$$SI = \left| \frac{E_{\max}}{E_0^+} \right|^2 = \frac{n_0}{n_S} T_0 \left(\frac{n_H}{n_L} \right)^{2*(p-2)}$$

nombre de couches

choc d'indice

En espace libre, « quasi-insensibilité »
à l'environnement ambiant

=> Utiliser la réflexion totale



- sensibilité au substrat (air)
 - champ évanescent*
- nombre de couches modéré

QUESTIONS

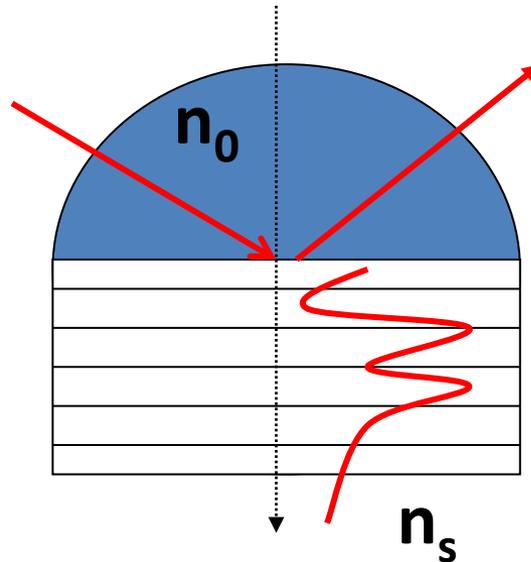
- conception analytique du meilleur multicouche?
- exaltation maximale?
- lien avec l'absorption totale?
- robustesse des composants?
- mesure de l'exaltation?
- lien plasmonique?

1- Multicouche en réflexion totale

Pas de flux de Poynting dans le substrat ($T = 0$)

$$\Rightarrow v^* = n_0 \sin i_0 > n_s$$

le superstrat est un milieu haut indice ($n_0 > n_s$)



Condition uniquement liée à l'indice du substrat*

- *Champ trigonométrique dans les couches telles que : $v^* < n_i$*
- *Champ hyperbolique dans les couches telles que : $v^* > n_i$*

2- Absorption totale versus Exaltation de champ

$$\Phi_0^+ A = \frac{\omega}{2} \sum_i \varepsilon_i'' e_i \bar{E}_i^2$$

absorption \nearrow $\Phi_0^+ A$ \nwarrow **thickness**
 ε_i'' \uparrow **permittivity**

2- Absorption totale versus Exaltation de champ

$$\Phi_0^+ A = \frac{\omega}{2} \sum_i \varepsilon_i'' e_i \bar{E}_i^2$$

On considère une classe C d'empilements avec A = 100%

$$\sum_i \varepsilon_i'' e_i \bar{E}_i^2 = \text{constant} = 2 \Phi_0^+ / \omega$$

... on réduit progressivement l'indice imaginaire

$$\Rightarrow \exists i / \lim_{\varepsilon_i'' \rightarrow 0} (\bar{E}_i^2) = \infty$$

Exaltation non majorée (1/n'')
Absorption Totale \Leftrightarrow Exaltation Géante

3- Synthèse d'empilements avec absorption totale

$$R = \left| \frac{\check{n}_0 - Y_0}{\check{n}_0 + Y_0} \right|^2 \implies R = 0 \iff Y_0 = \check{n}_0$$

Relation de récurrence

$$Y_{i-1} = (-j \check{n}_i \sin \delta_i + Y_i \cos \delta_i) / (\cos \delta_i - j Y_i \sin \delta_i / \check{n}_i)$$

valeur initiale: $Y_p = \check{n}_s$

Equation à résoudre

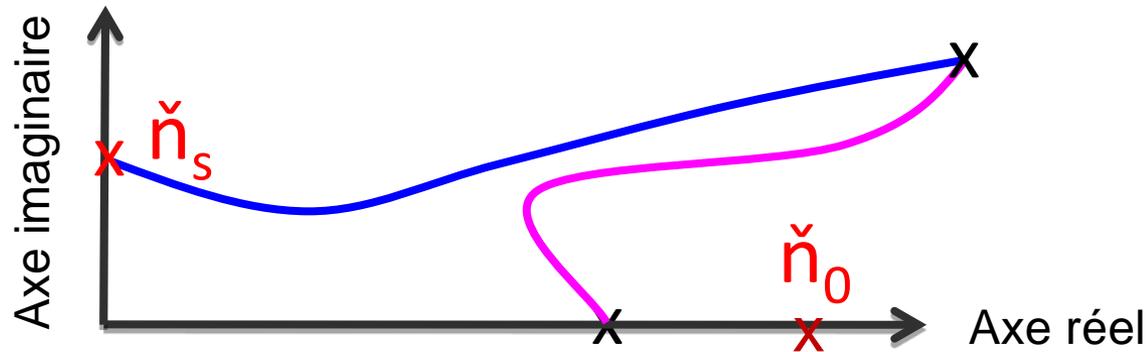
$$Y_0(\check{n}_s) = \check{n}_0$$

← réel
← imaginaire pur

But transparent layers do not offer solutions!

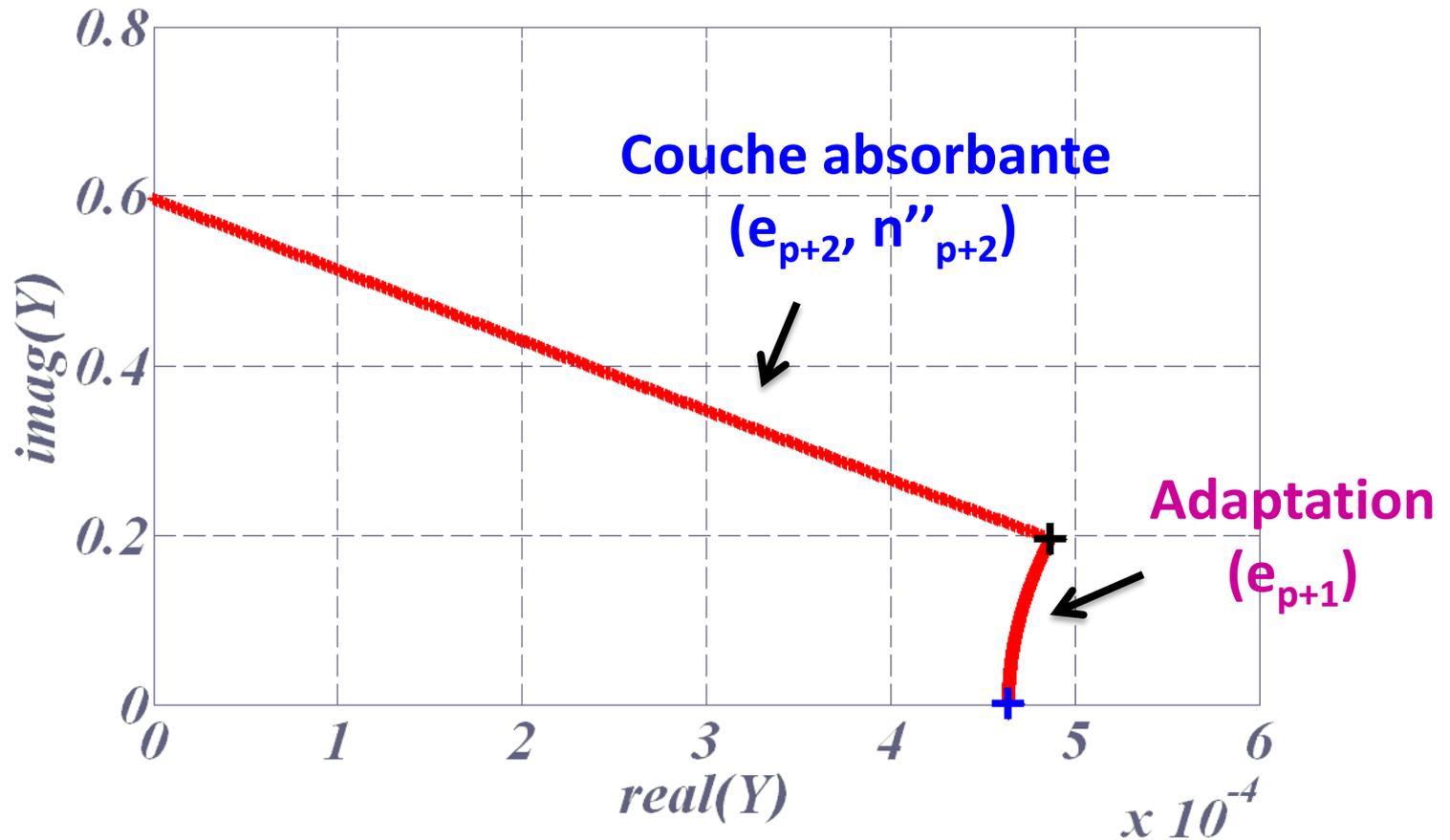
\check{n}_s imaginaire (réflexion totale)

=> $Y(z)$ imaginaire dans tout l'empilement



- Quitter l'axe imaginaire avec une **couche mince légèrement absorbante** (e_{p+2}, n_{p+2}'')
- Rejoindre l'axe réel via une **couche d'adaptation** (e_{p+1})

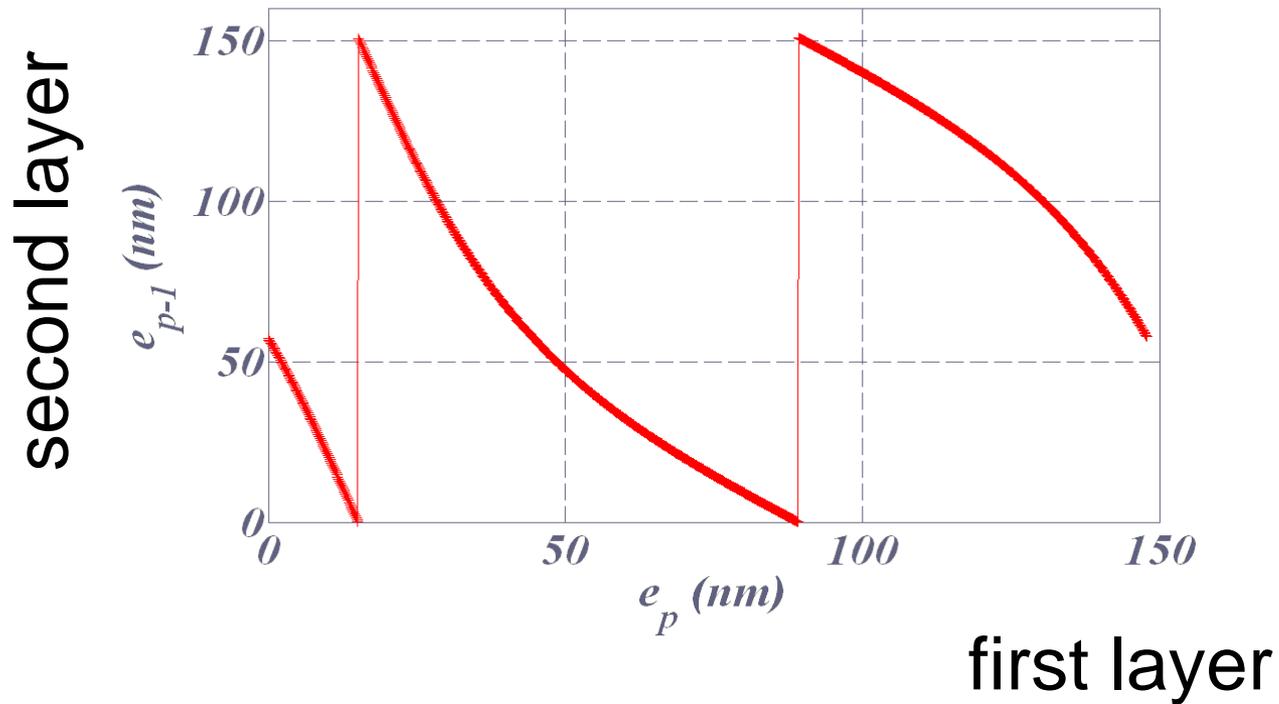
Le rôle du premier bi-couche



Il existe une infinité de bicouches qui remplissent cette fonction...

« Courbe d'épaisseurs » pour le bicouche

$$\tan(2\alpha_{p-1}e_{p-1}) = \frac{2\tilde{n}_{p-1}Y''_{p-1}(e_p)}{\tilde{n}_{p-1}^2 - |Y_{p-1}(e_p)|^2}$$



****Limiter l'épaisseur pour préserver l'exaltation***

A ce stade l'admittance est réelle mais très éloignée de \check{n}_0

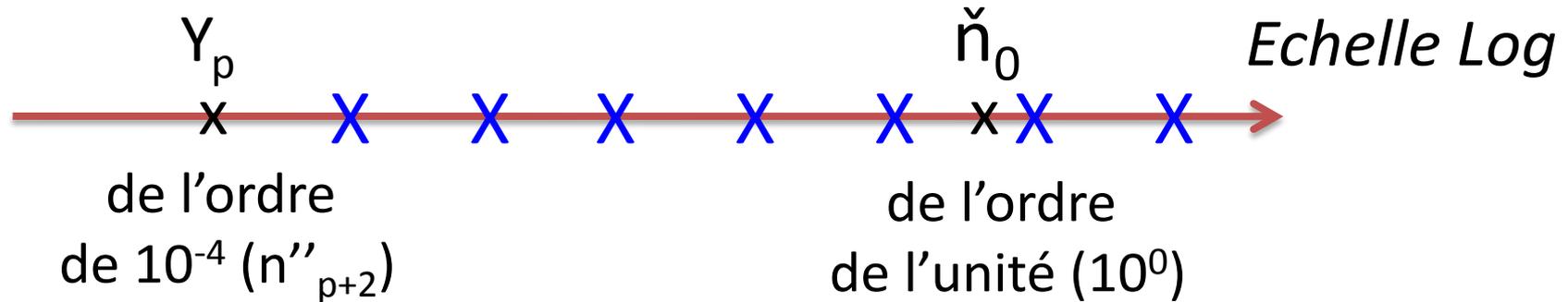


Exemple: miroirs quart d'onde matchés
avec $p=2q$ couches minces: $(LH)^q$

$$Y_0 = Y_p \left(\check{n}_H / \check{n}_L \right)^{p/2}$$

← nombre
de couches

← choc d'indices
effectifs



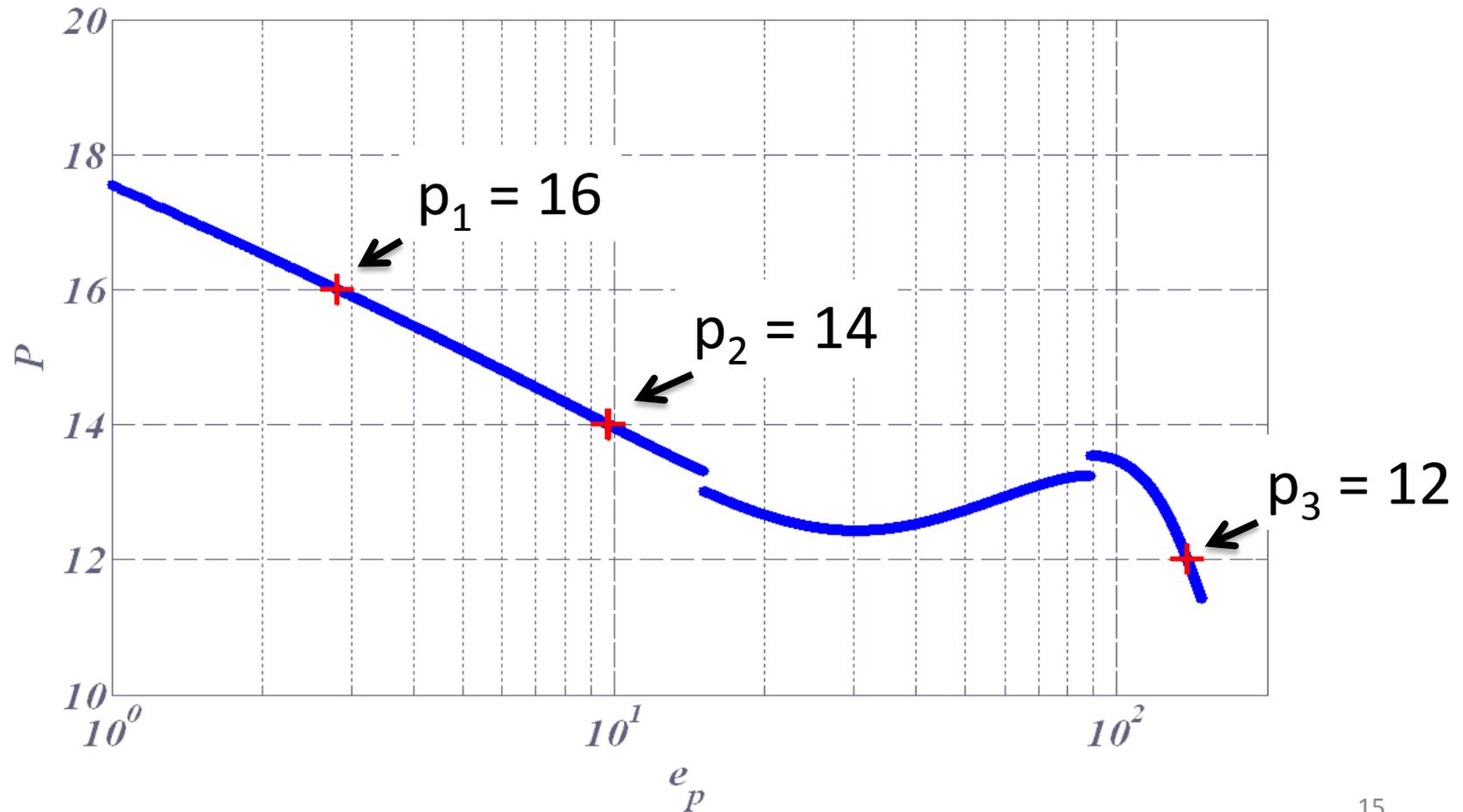
**... il faut positionner correctement
l'admittance réelle du bi-couche initial**

A chaque entier correspond un bicouche

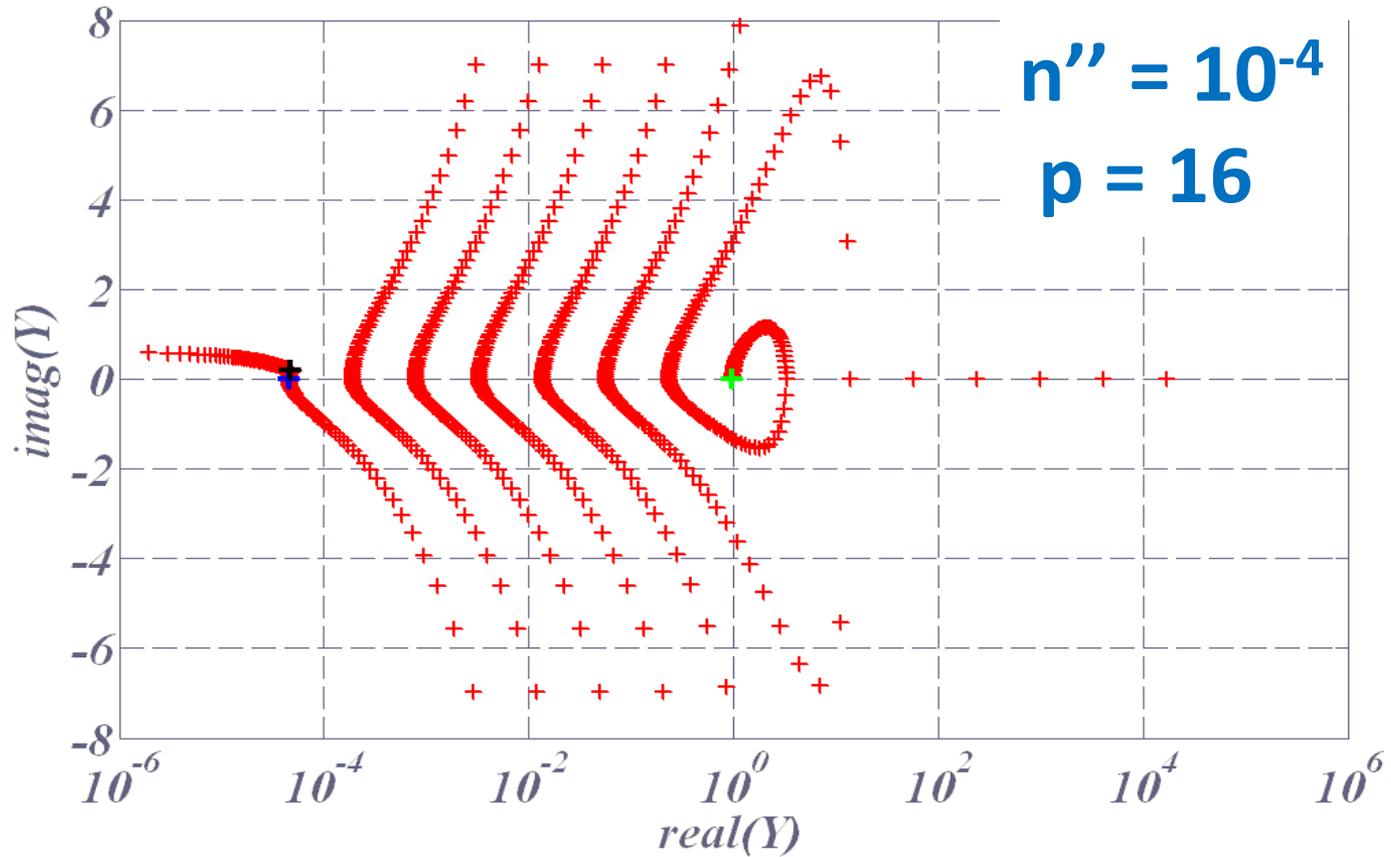
Suite discrète d'épaisseurs e_{p+2}

Nombre de couches versus épaisseur initiale e_{p+2}

cas $n'' = 10^{-4}$

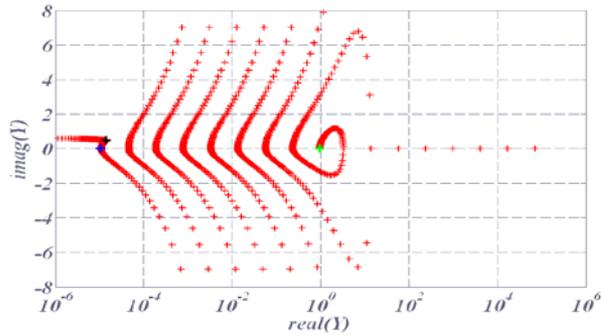


Résumé (plan complexe)

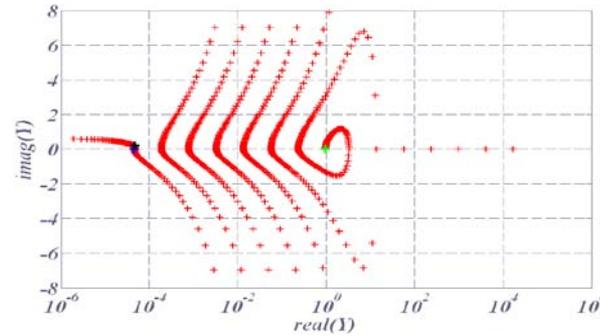


Synthèse pour chaque entier p_m

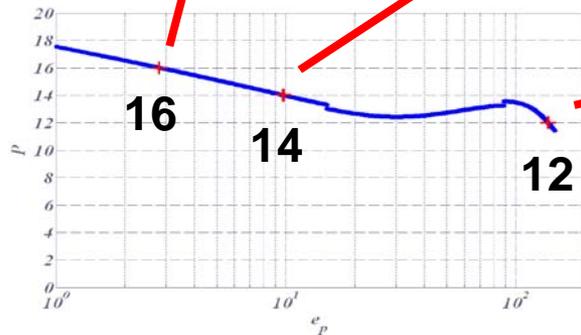
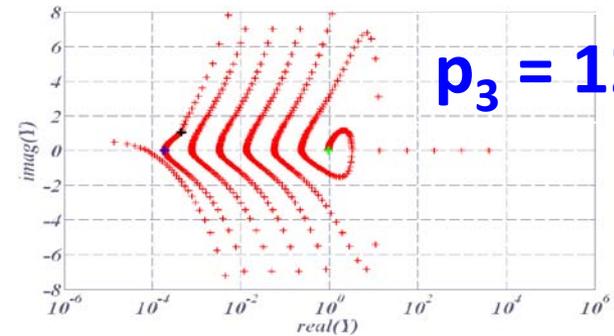
$p_1 = 16$



$p_2 = 14$



$p_3 = 12$



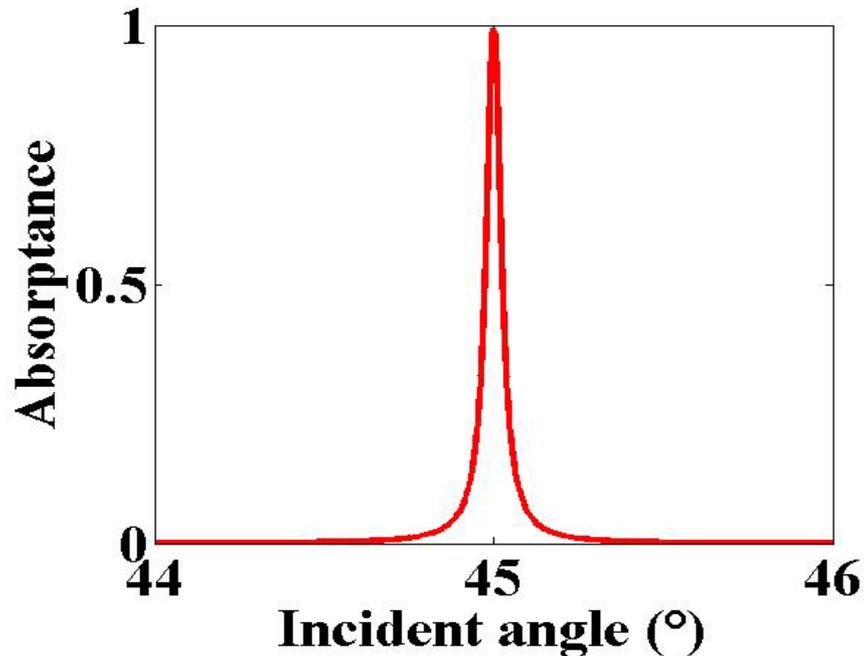
4- RESULTATS NUMERIQUES

- Valider la procédure
- Analyser la fonction optique obtenue

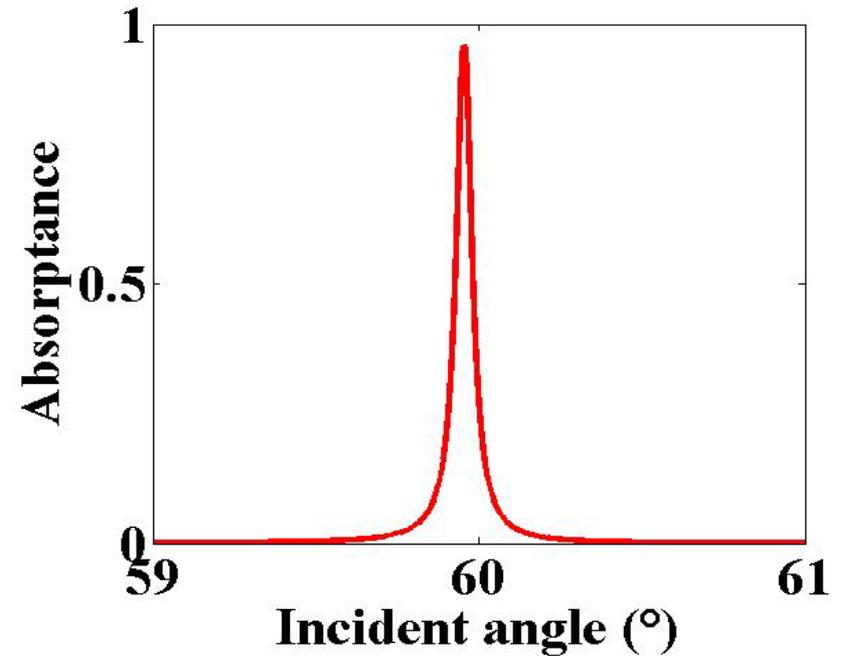
Empilement diélectrique avec absorption totale

Polarisation TE - $n'' = 5 \cdot 10^{-4}$

TE 45° - 42 couches



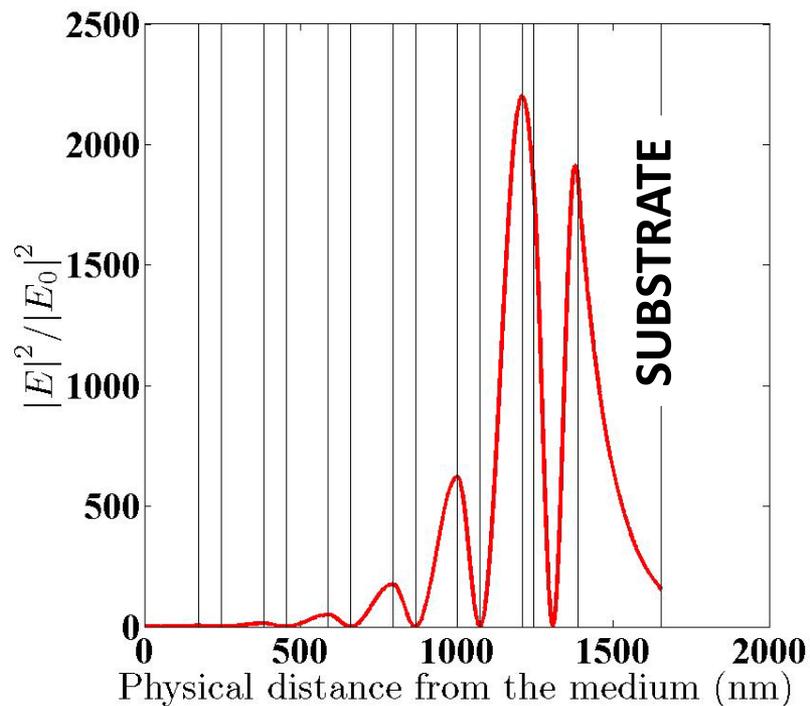
TE 60° - 8 couches



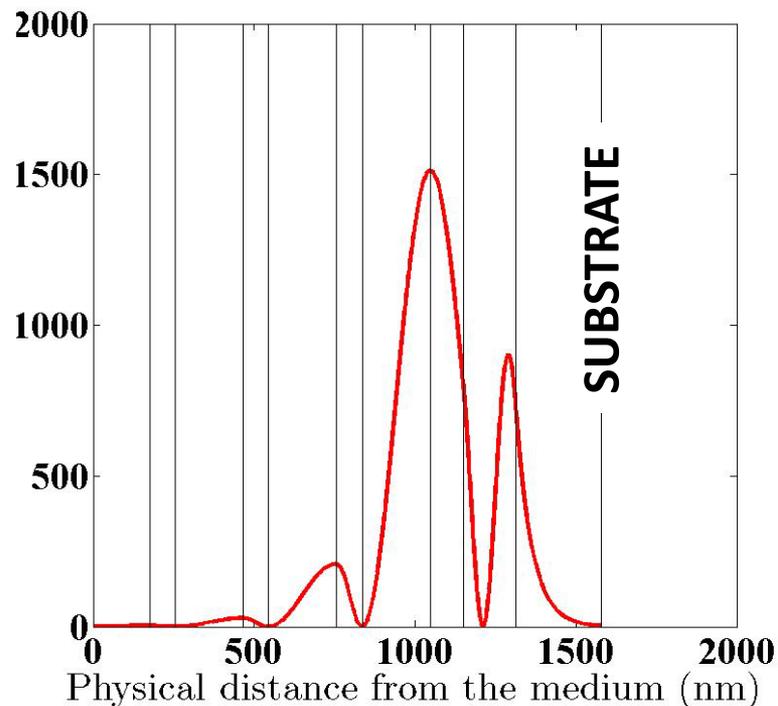
Exaltation du champ

$$n'' = 5 \cdot 10^{-4}$$

45° - SI = 2200



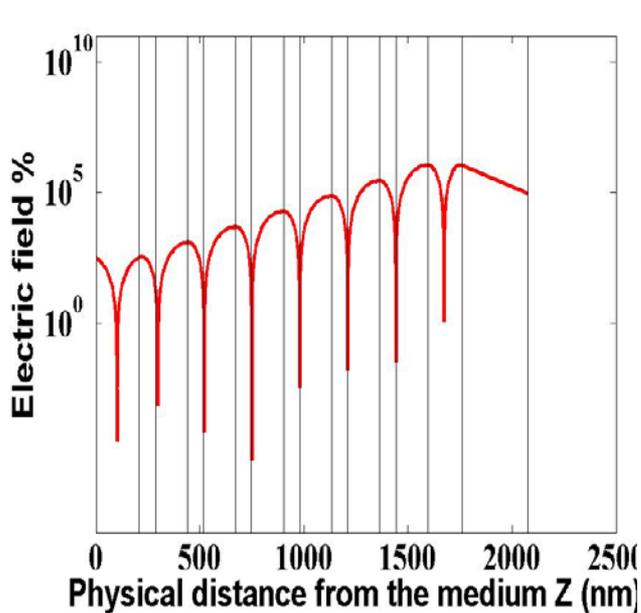
60° - SI = 1500



Exaltation versus indice imaginaire*

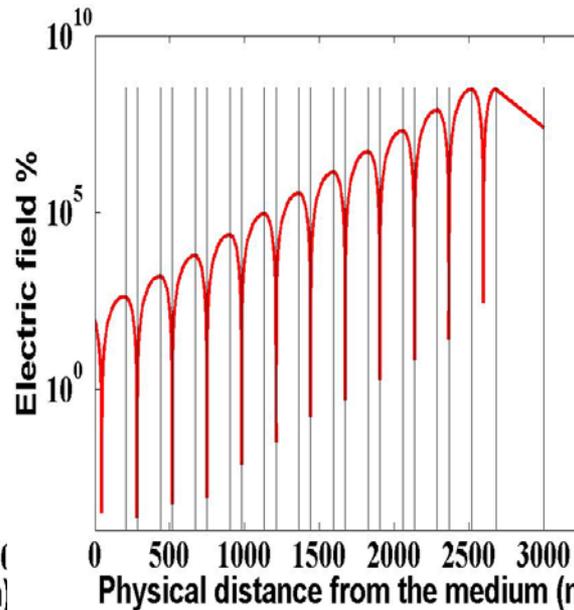
$$n'' = 7 \cdot 10^{-5}$$

$$SI > 10^5$$



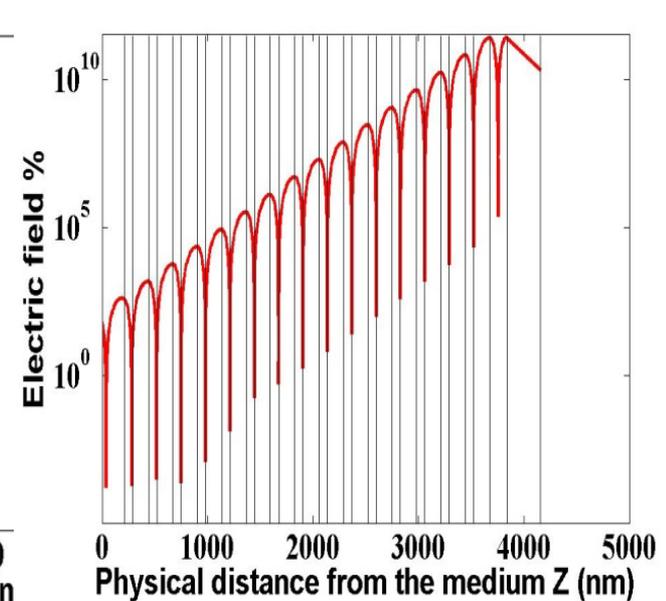
$$n'' = 3 \cdot 10^{-7}$$

$$SI > 10^7$$



$$n'' = 3 \cdot 10^{-10}$$

$$SI > 10^{10}$$



(... ignore les phénomènes NL et d'endommagement)

SENSIBILITE ET ROBUSTESSE

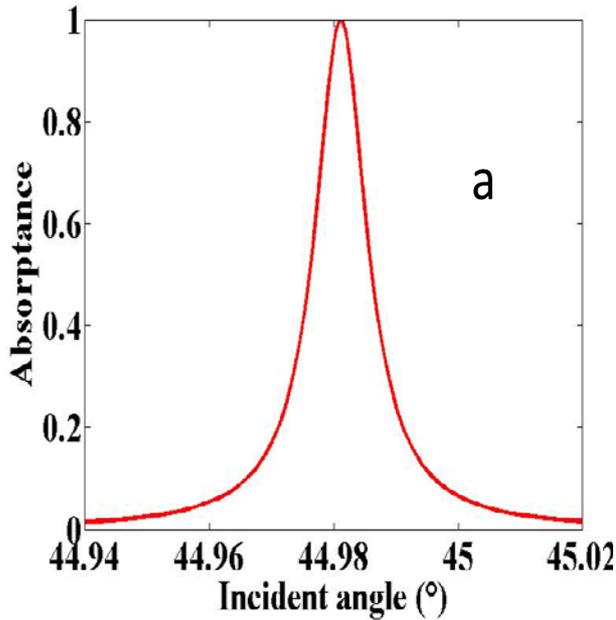
Une fabrication accessible?

- **Contrôle des épaisseurs**
- **Impact des conditions expérimentales**

*divergence, bande passante,
précision sur les épaisseurs et indices*

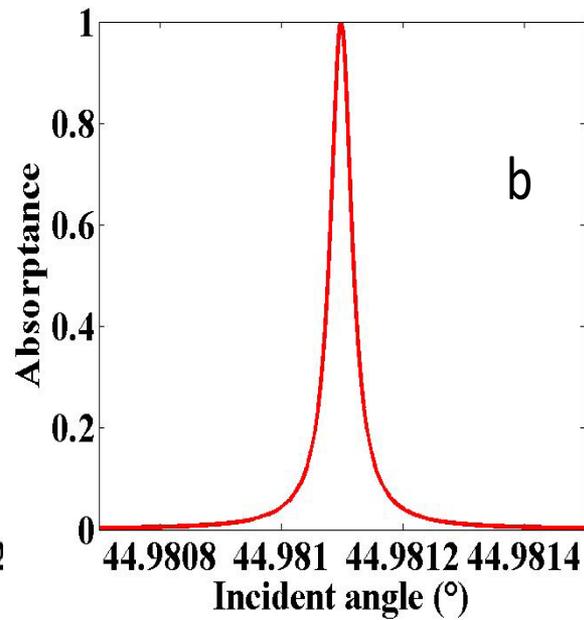
Bande passante versus exaltation cas de l'incidence

$$n'' = 7 \cdot 10^{-5}$$



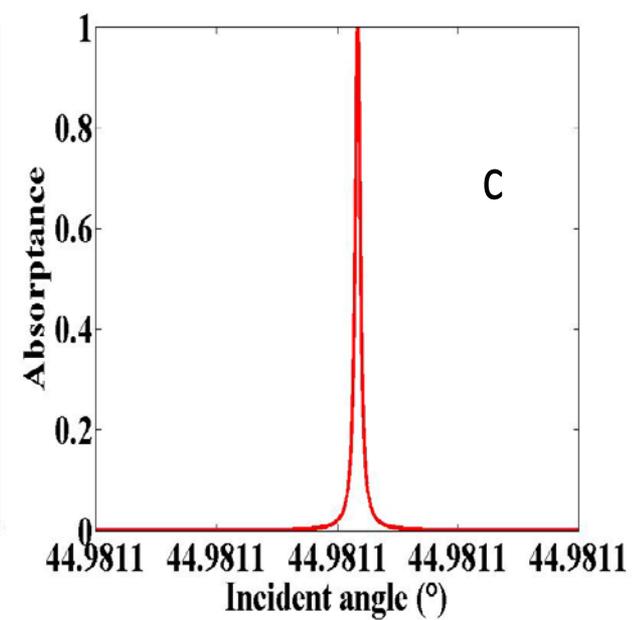
$$\longleftrightarrow 0.08^\circ$$

$$n'' = 3 \cdot 10^{-7}$$



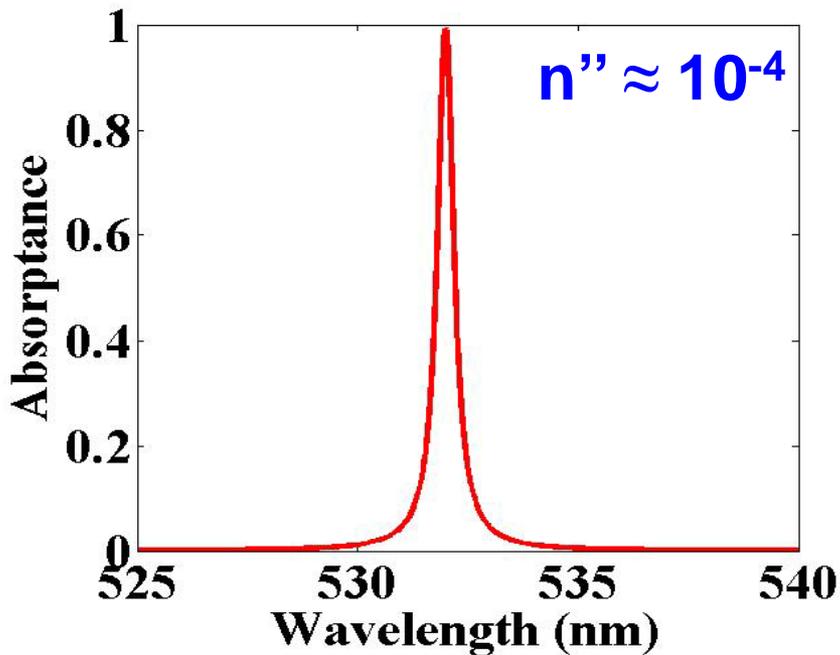
$$\longleftrightarrow 6 \cdot 10^{-4}^\circ$$

$$n'' = 3 \cdot 10^{-10}$$

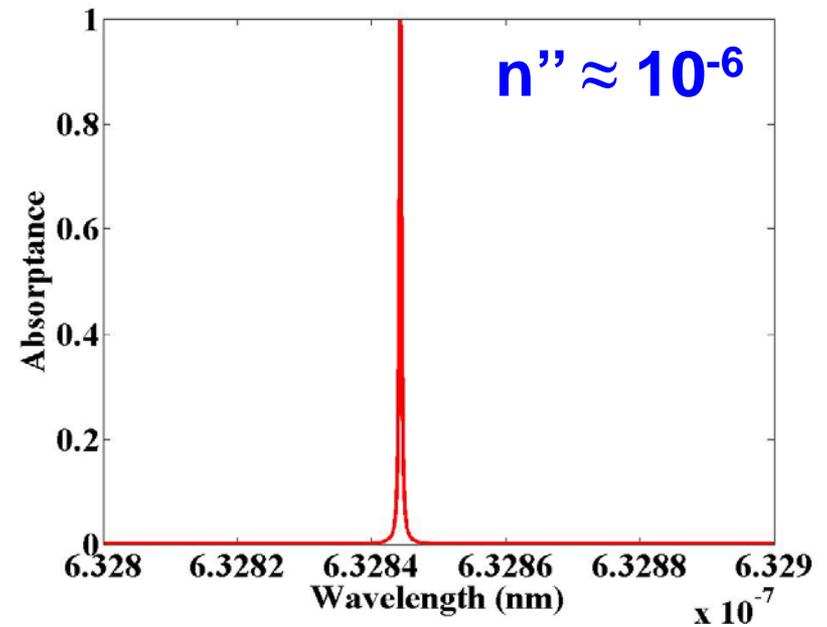


$$\longleftrightarrow 3 \cdot 10^{-6}^\circ$$

Bande passante versus exaltation cas de la longueur d'onde



←—————→
15nm



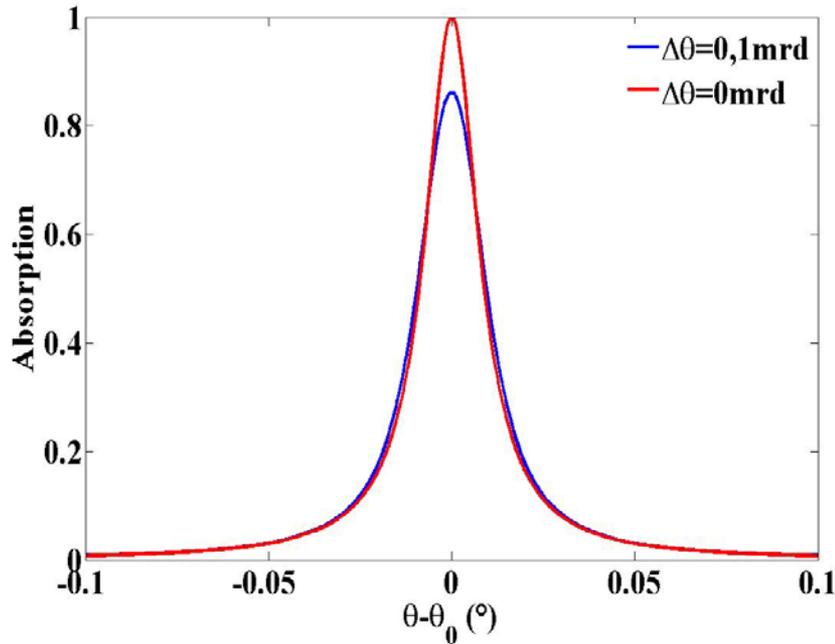
←—————→
0.1nm

Le rôle de la divergence

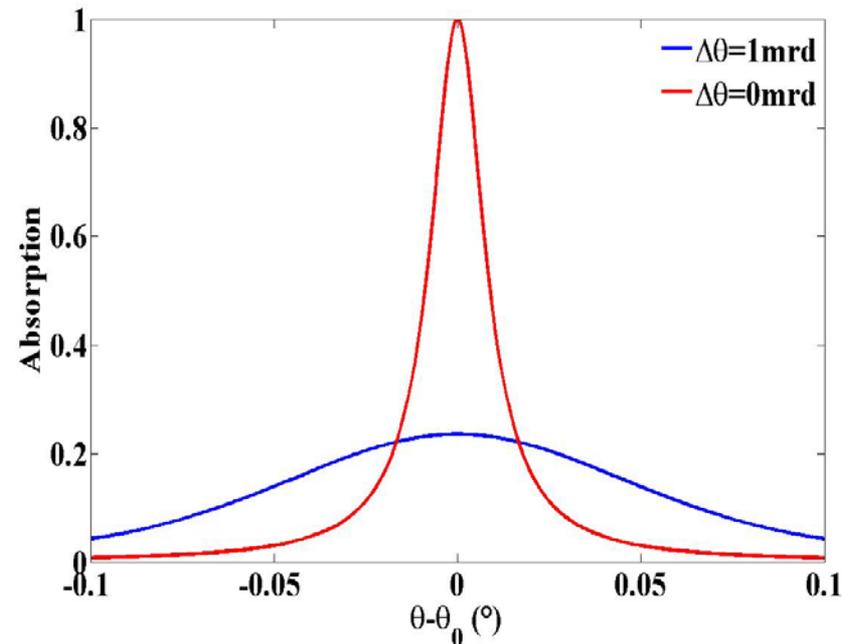
$$n''_{\text{design}} = 5.3 \cdot 10^{-4}$$

← wave packet

$$A(\Delta i) = (1/\Phi_0^+) \int_{\sigma} \alpha_0(\sigma) [1 - R(\sigma)] |A_0^+(\sigma - \sigma_0)|^2 d\sigma$$



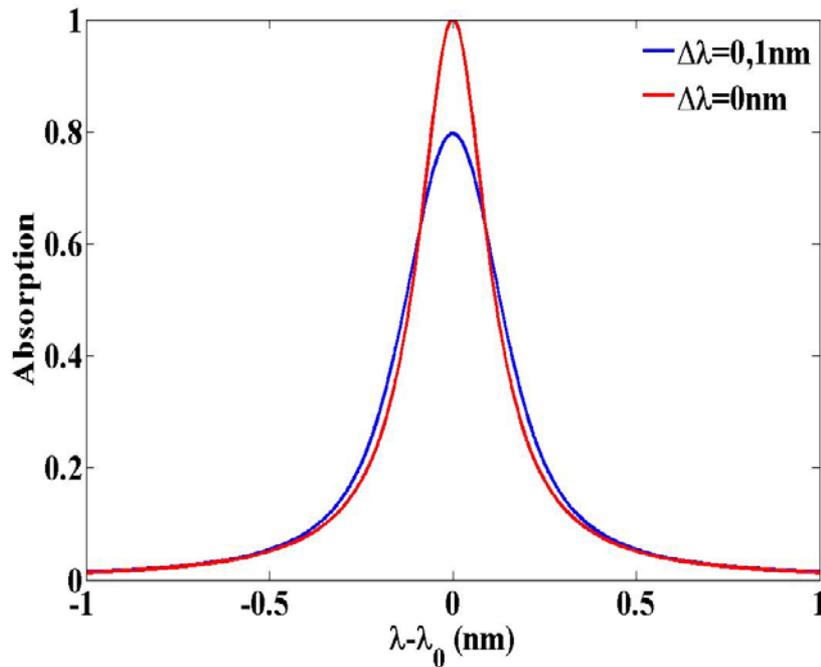
$\Delta i = 0.1 \text{ mrd}$



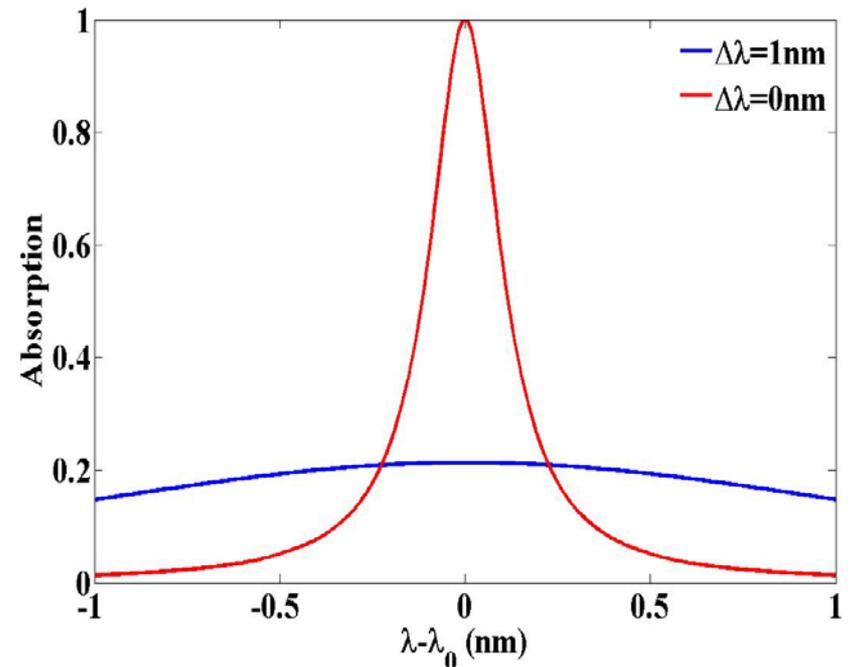
$\Delta i = 1 \text{ mrd}$

Le rôle de la fenêtre spectrale

$$A(\Delta\omega) = (1/\Phi_0^+) \int_w \alpha_0(\omega) [1 - R(\omega)] |A_0^+(\omega - \omega_0)|^2 d\omega$$



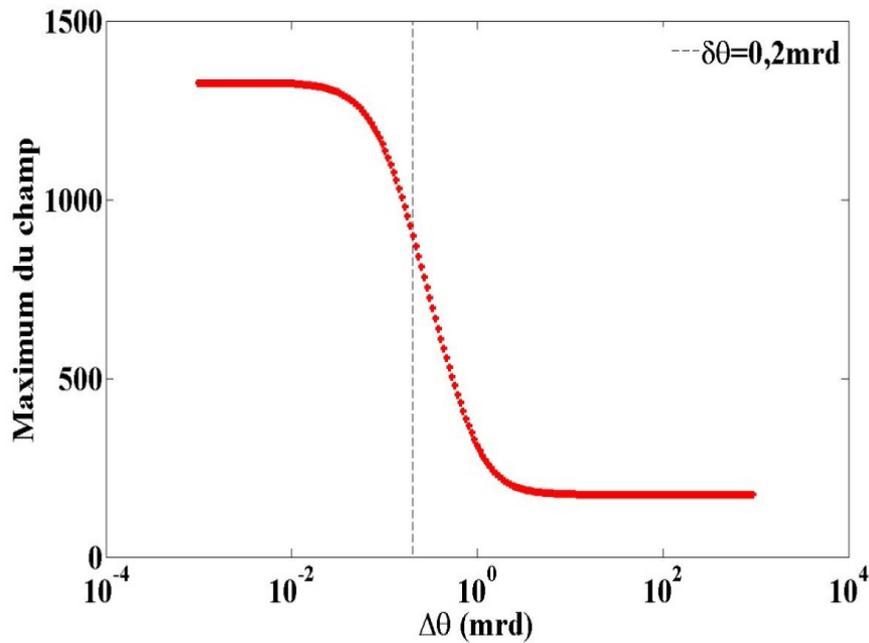
$\Delta\lambda = 0.1 \text{ nm}$



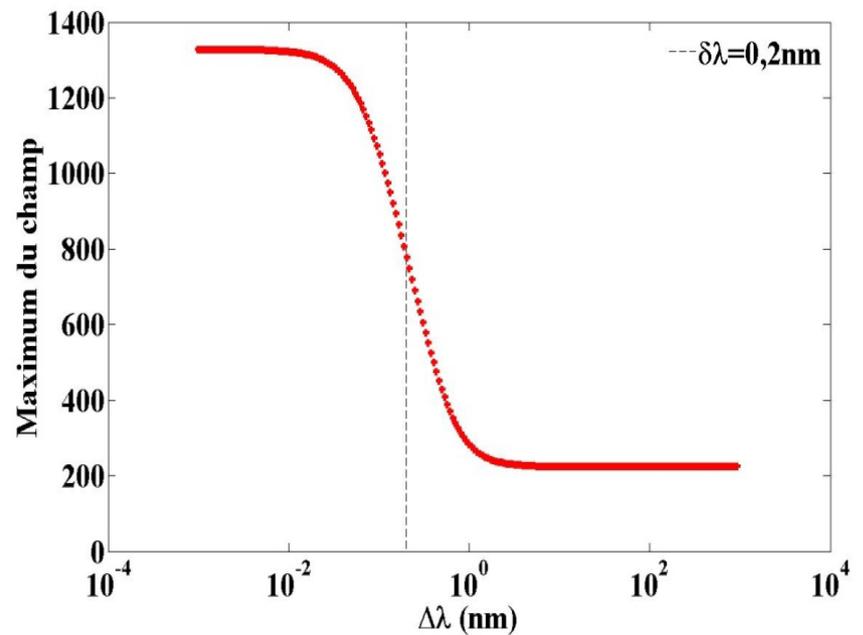
$\Delta\lambda = 1 \text{ nm}$

Conséquence sur l'exaltation

Divergence →

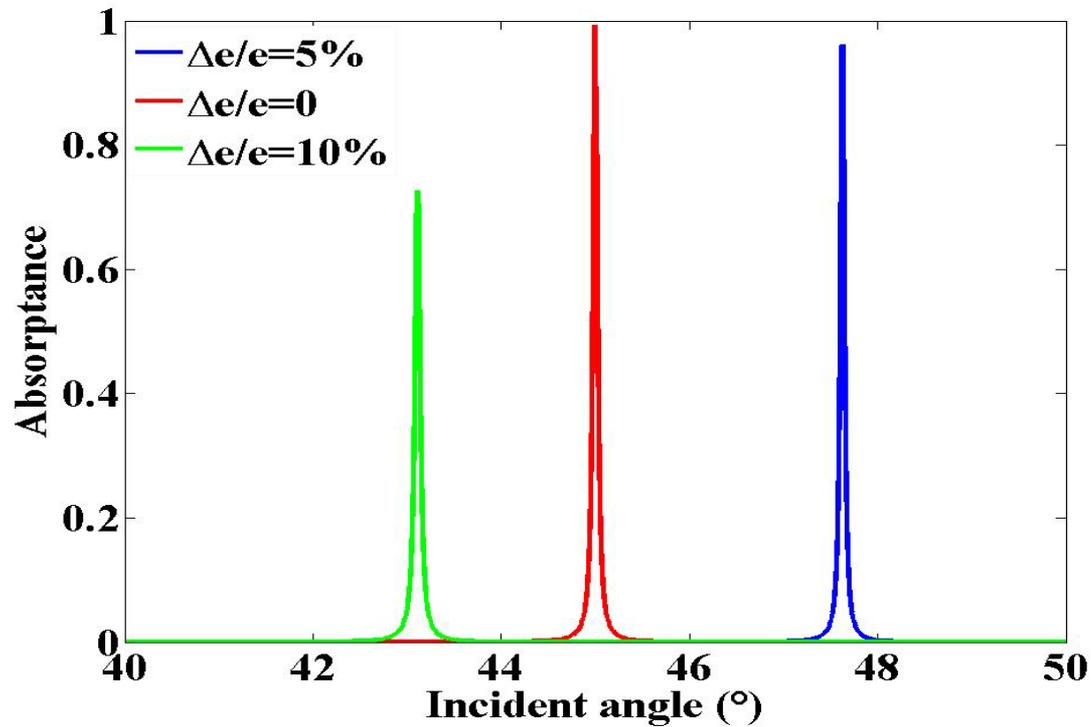


Largeur de raie →



Sensibilité aux épaisseurs

(Erreurs aléatoires)



Résumé partiel

La sensibilité croît avec les performances

La robustesse décroît avec les performances

« Compromis »

Exaltation de 10^4 avec 0.1mrd de divergence

Ajuster l'ensemble des paramètres selon l'application

Comparaison aux plasmons

En raison de l'indice imaginaire, l'exaltation est plus modeste dans les structures métalliques

$$\left| \bar{E}_i^2 / E_0^+ \right|^2 \approx (1/\pi) (\epsilon_r / \mu_r)^{0.5} (\lambda / e_i) (1/n'_i n''_i)$$

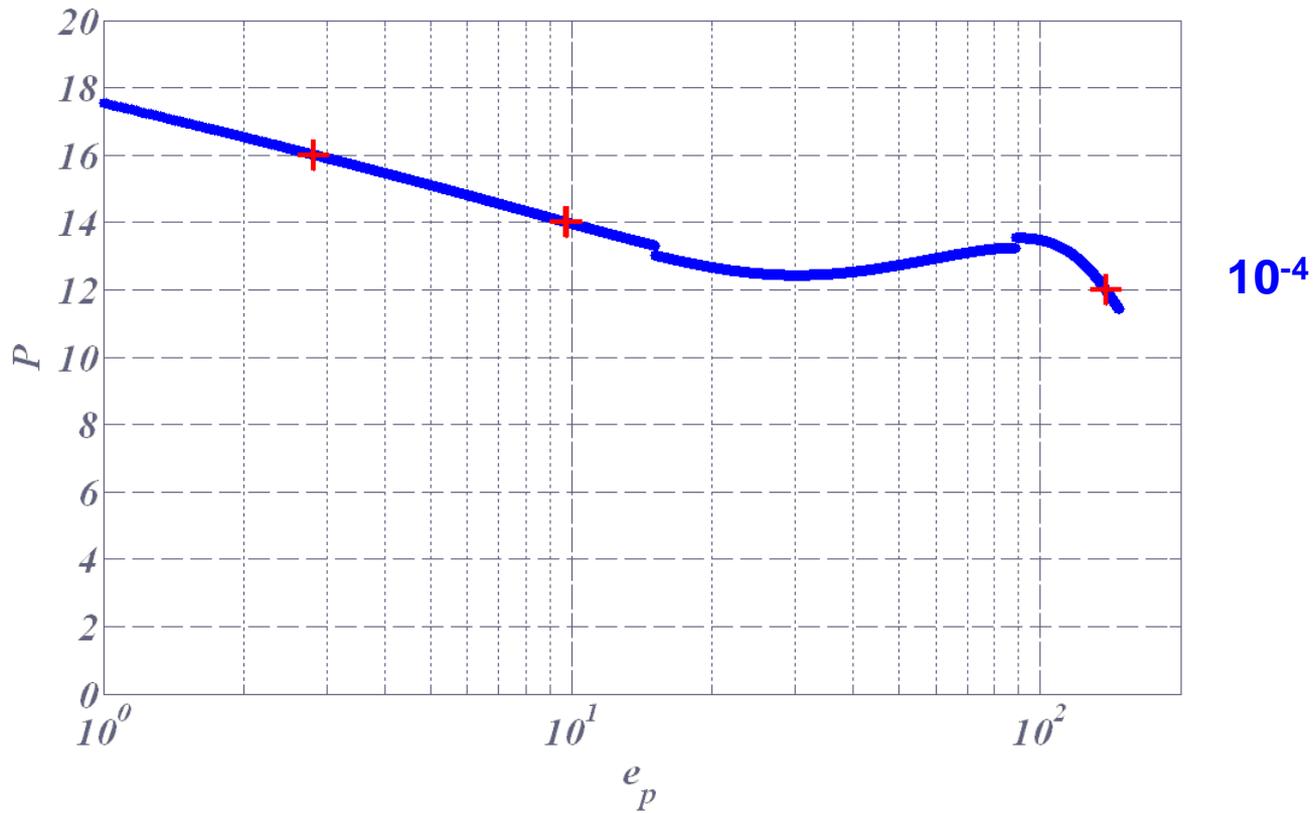
⇒ $\bar{E}_d^2 / \bar{E}_m^2 = n_m'' / n_d''$

Indice métallique

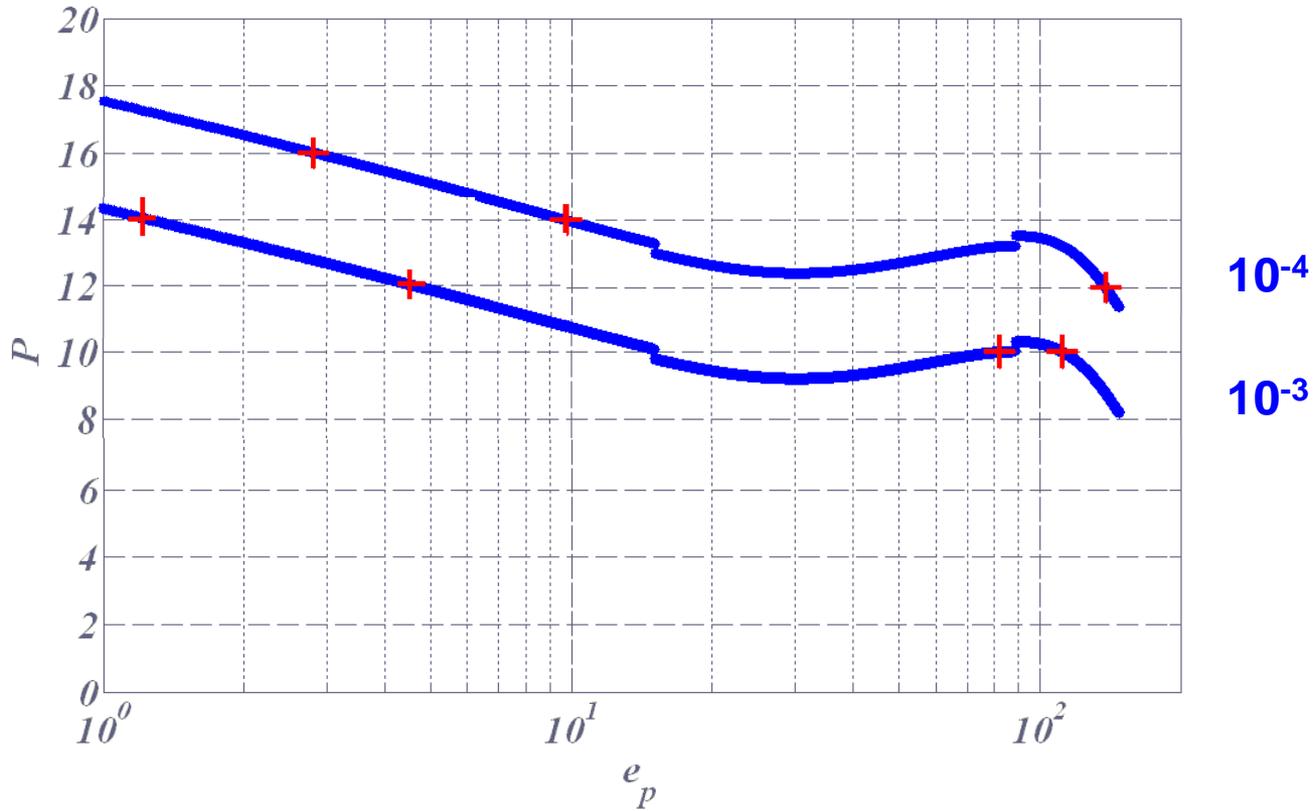
Indice diélectrique

mais une meilleure robustesse

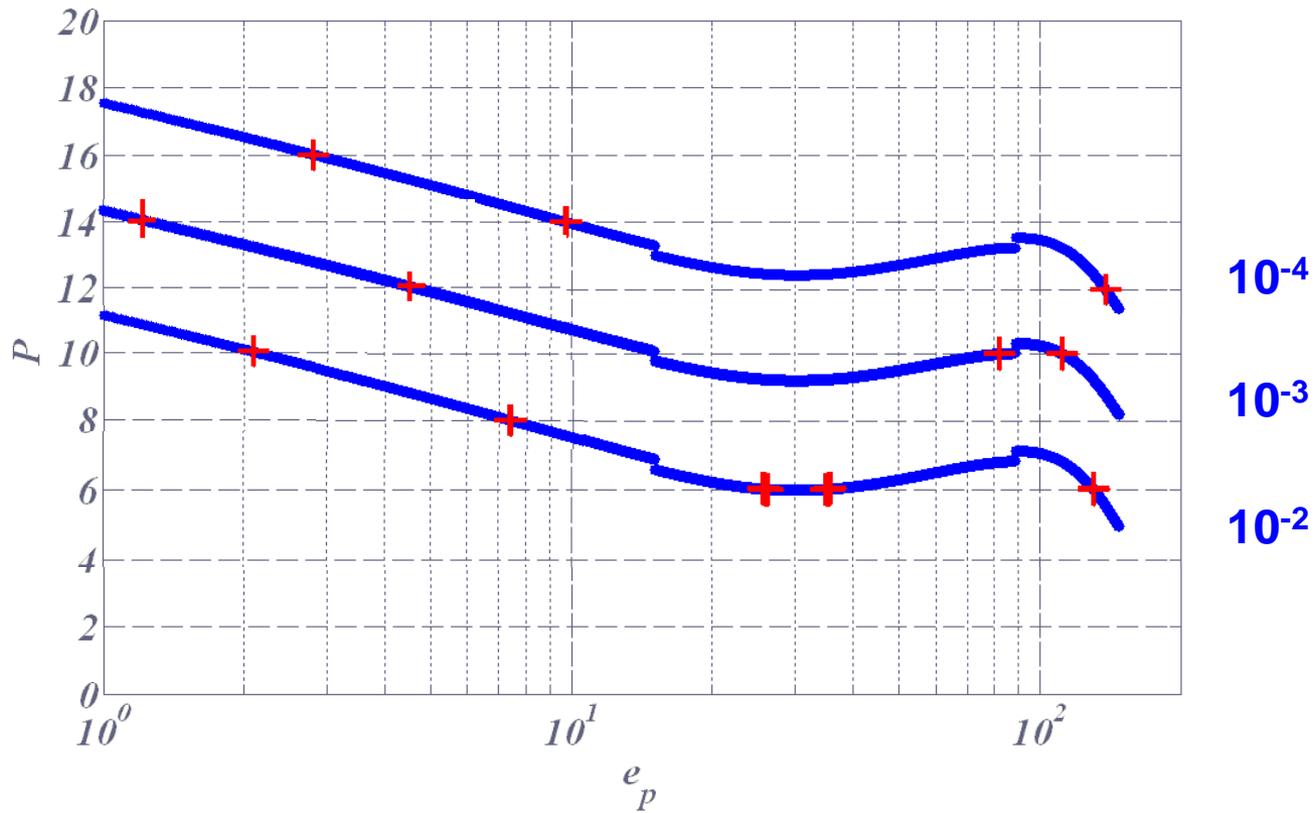
$$n''_p = 10^{-4} \quad \rightleftarrows \quad p_m = 16, 14, 12$$



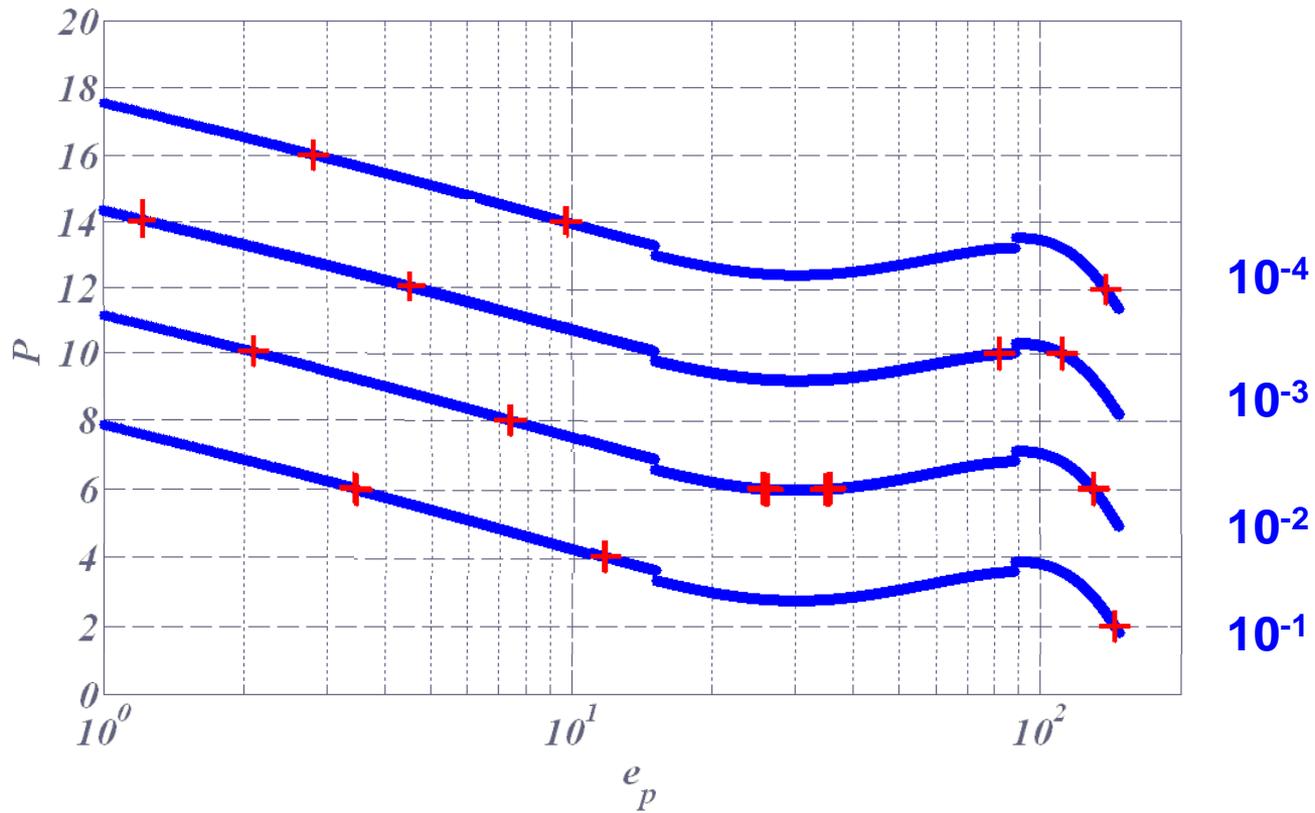
$$n''_p = 10^{-3} \Rightarrow p_m = 14, 12, 10, 10$$



$$n''_p = 10^{-2} \Rightarrow p_m = 10, 8, 6, 6, 6$$



$$n''_p = 10^{-1} \Rightarrow p_m = 6, 4, 2$$

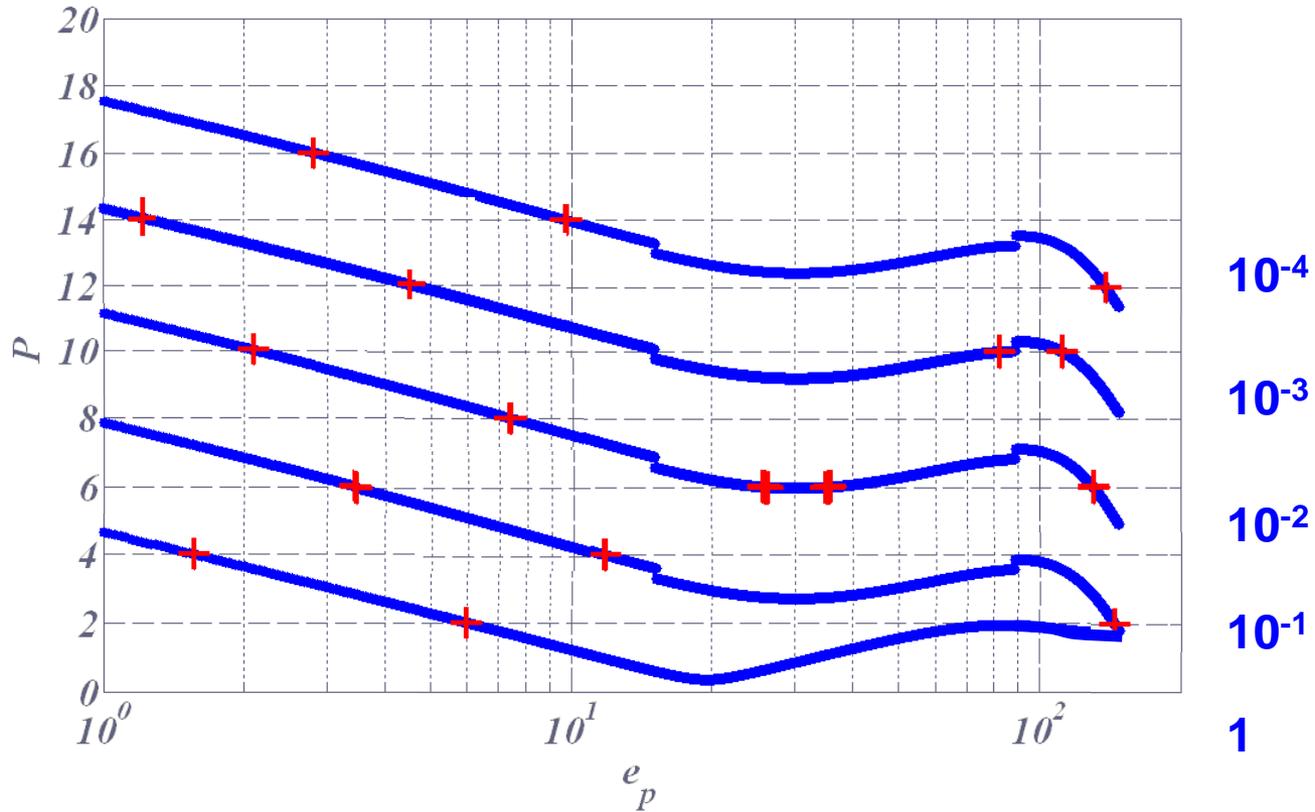


$$n''_p = 1.$$

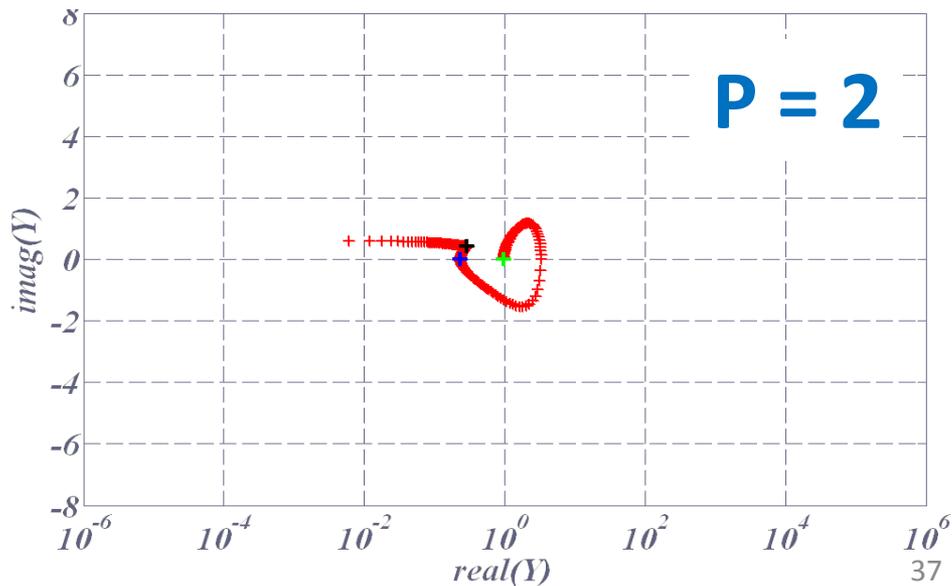
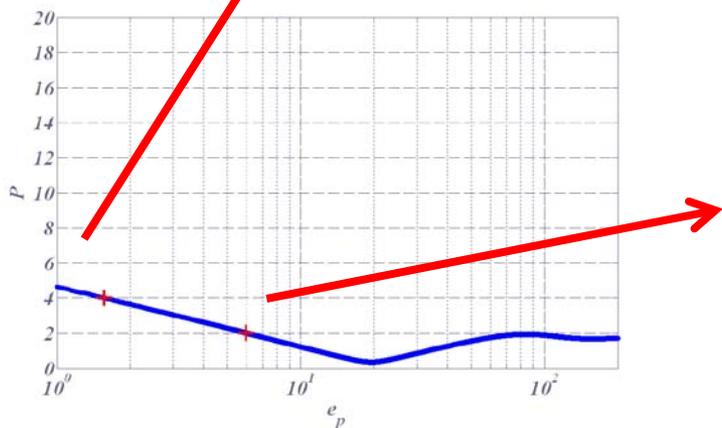
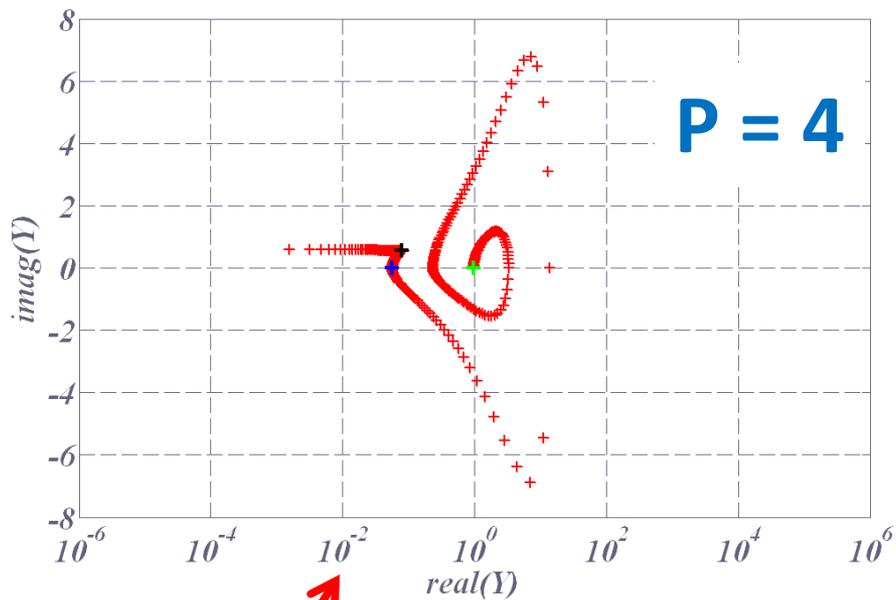


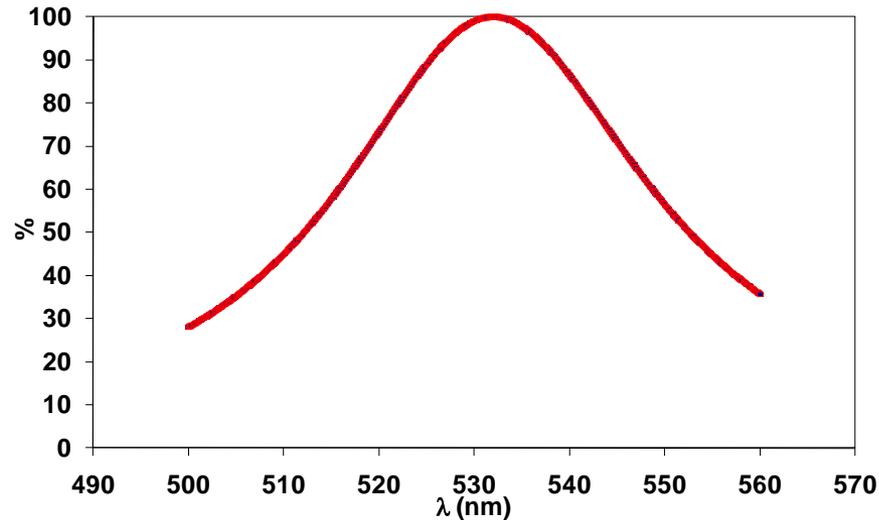
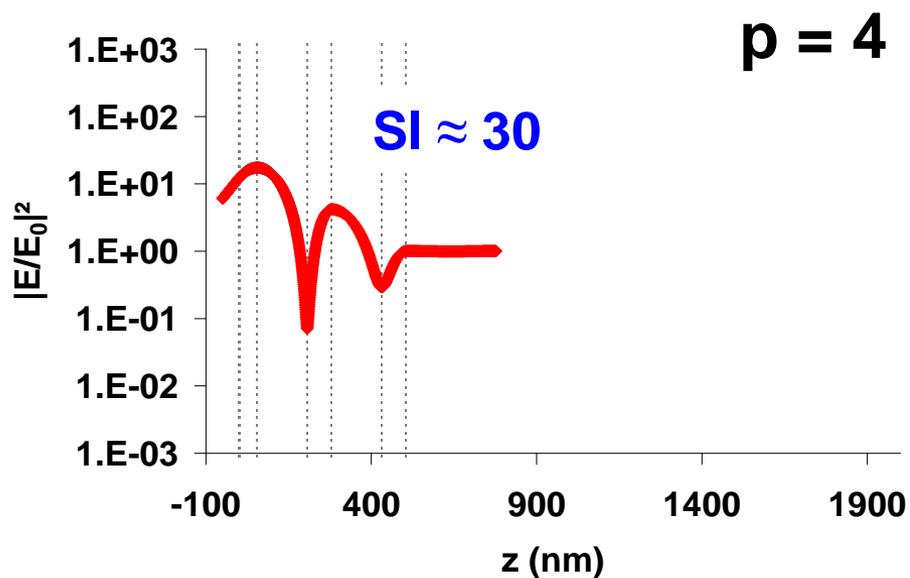
$$p_m = 4, 2$$

Plasmonic Device



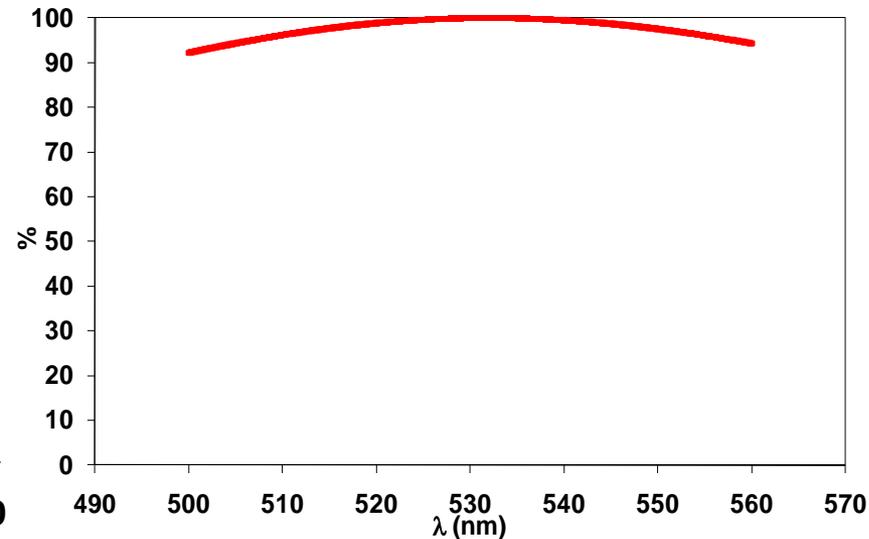
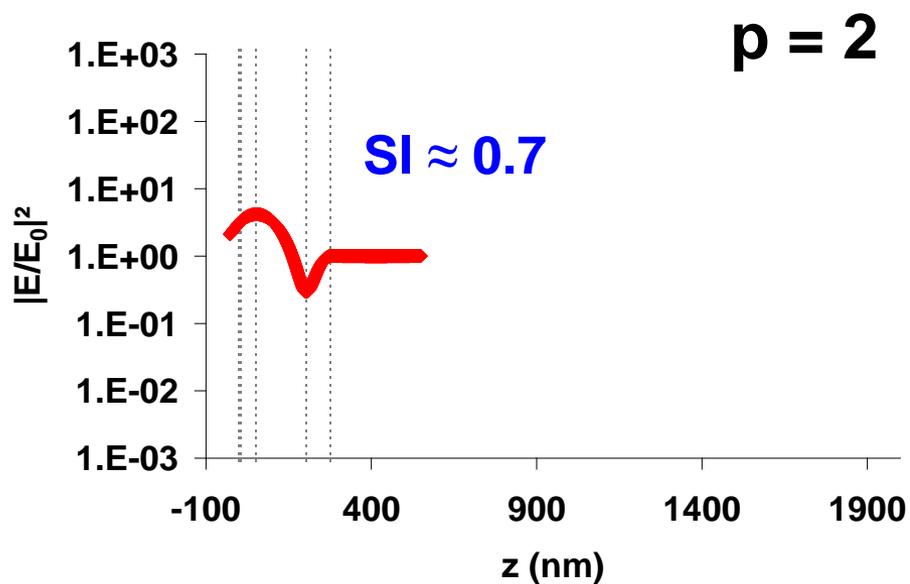
Synthèse de composants plasmoniques





Faible exaltation

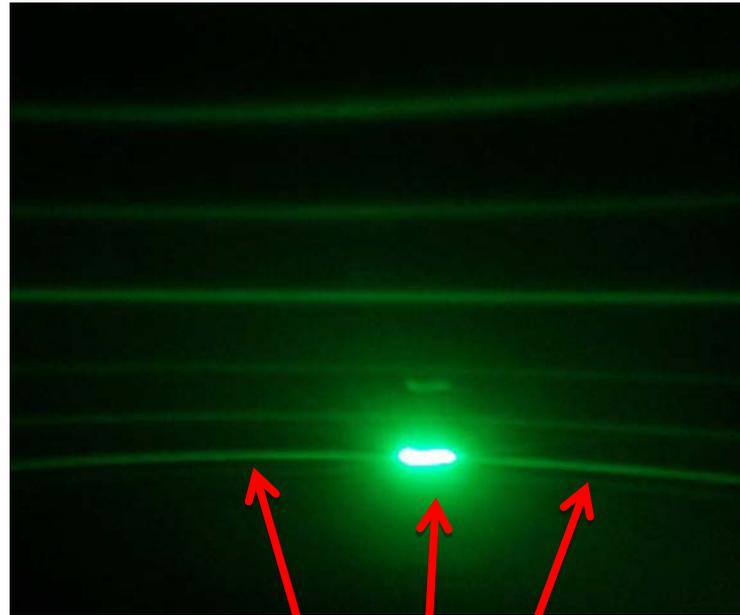
Bonne stabilité



Mesurer l'exaltation?

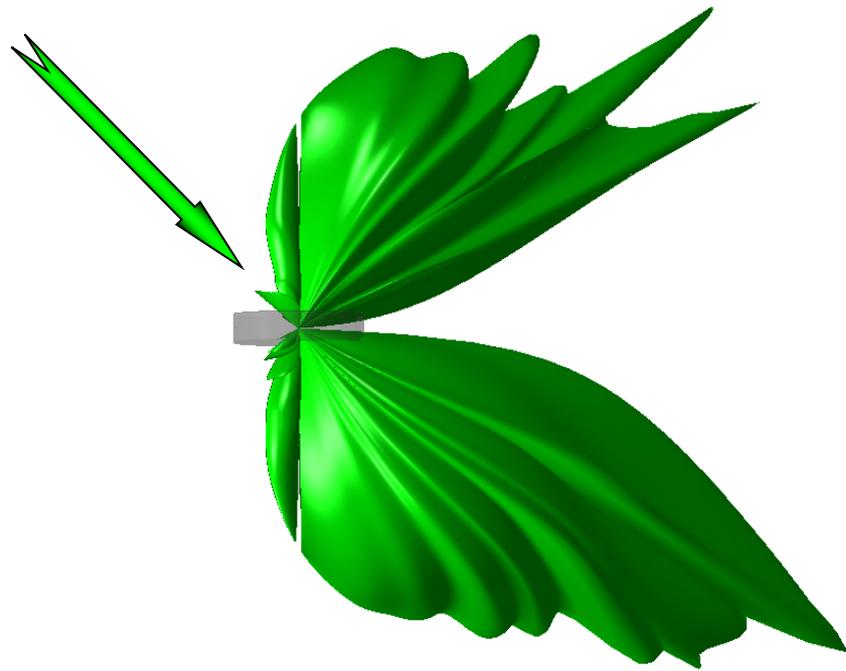
Via la spectrophotométrie?

mais faisceau réfléchi élargi suivant des cônes brillants

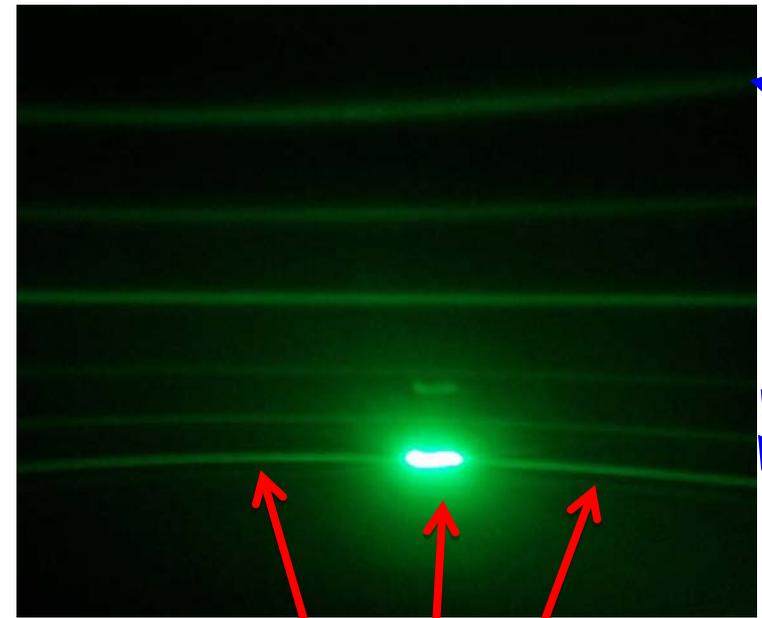


Reflection

*En raison de l'exaltation,
la diffusion ne peut pas
être négligée: $1 = A + S$*

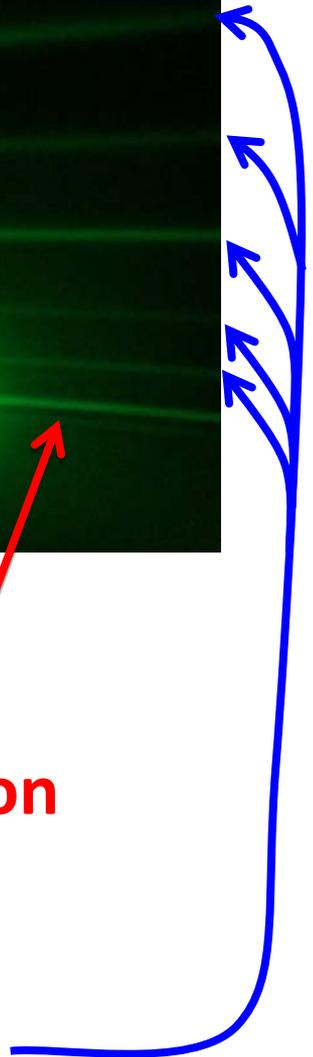


1st-order theory



Reflection

**Scattering
cones**



Utiliser les techniques photothermiques?

CONCLUSION

- D'un point de vue théorique, on sait obtenir des exaltations arbitraires
 - Le composant devient instable à mesure que la performance croît (sensibilité versus fabrication)
 - Compromis acceptable: exaltation de 10^4
 - Mesure de l'exaltation (en cours)...

La conception est liée à l'indice imaginaire