

Chapitre VI

OPTIQUE NON LINEAIRE

VI-1- Introduction

Les sources lasers ont bouleversé les méthodes et les possibilités de la spectroscopie: leurs très grande monochromaticité a permis de résoudre des structures très fines, leur densité spectrale de puissance a permis d'imaginer de nouvelles méthodes de spectroscopie beaucoup plus performantes que les techniques classiques. Ces méthodes sont basées sur la réponse non linéaire d'un atome à une source lumineuse intense ce qui a conduit au développement de l'optoélectronique.

La pénétration de l'optoélectronique dans de nombreux secteurs d'activité touchant aussi bien le grand public que des secteurs plus spécialisés est considérable:

*** Grand public**

- caméscopes
- lecteurs de compacts disques et de vidéo
- écrans plats à cristaux liquides
- télévision haute définition

*** Professionnel**

- imprimantes lasers
- lecteurs de code barres
- mémoire d'ordinateurs CD-ROM
- équipement laser pour la médecine
- réseaux de télécommunications par fibres optiques
- Capteurs à fibres optiques

*** Défense et spatial**

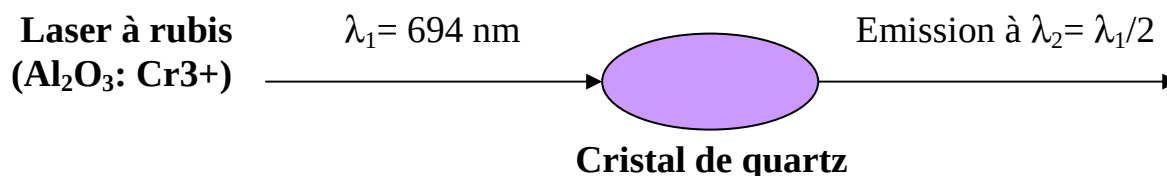
- télémètre à laser
- liaisons inter satellites

Beaucoup de ces réalisations ont été rendues possibles grâce à plusieurs facteurs:

- La maîtrise et l'élaboration des matériaux semi-conducteurs et la mise au point de diodes laser: réalisation de sources compactes adaptées au pompage des ions terres rares.
- Le développement de la fabrication de fibres optiques de haute pureté capable de transmettre des signaux optiques sur plusieurs centaines de kilomètres.
- La découverte de lasers femtoseconde ($1\text{fs}=10^{-15}\text{s}$) sources brèves et très intenses, permettant d'atteindre les limites de l'optique en durée d'impulsion et de créer des champs électromagnétiques super intenses.

VI-2- Non linéarité optique

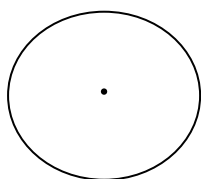
L'optique non linéaire étudie la réponse non linéaire de certains milieux à des champs électriques ou magnétiques dont l'un au moins est situé dans le domaine des fréquences optiques. Ce phénomène découvert par Franken et coll en 1961 après la découverte du laser à rubis:



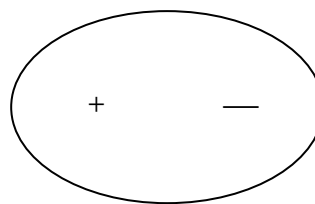
Le champ magnétique lumineux est très faible sa contribution est généralement négligeable. Par contre le champ électrique peut être très important avec les sources lasers actuelles. Par exemple une impulsion laser d'une durée de 100fs (10^{-15} s) d'énergie très faible (1 μ J) focalisée sur une surface de 100 μm^2 . génère une intensité lumineuse de $10^{13}\text{W}/\text{cm}^2$, ce qui correspond à un champ électrique associé de 100 $10^6\text{V}/\text{cm}$, supérieur au champ coulombien qui lie les électrons périphériques d'un atome au noyau. (A titre de comparaison un champ électrique produit par l'arc électrique ne dépasse pas 10^3 à $10^4\text{V}/\text{cm}$ et le champ associé à la lumière solaire est d'environ $10\text{V}/\text{cm}$). Sous l'effet de tel champ, les électrons d'un atome effectuent un mouvement de vibration non plus sinusoïdal, mais distordu. Les distorsions engendrent des harmoniques et des battements. Ainsi une onde intense peut augmenter l'indice du milieu qu'elle traverse et par conséquent modifier sa fréquence.

VI-2-1- Réponse non linéaire de matériaux soumis à une onde plane

a) Susceptibilité non linéaire



**Atome en l'absence
de champ électrique**



**Atome en présence
de champ électrique**

Sous l'effet d'un champ électrique il y a création de moments dipolaires électriques.

* Si le champ incident est faible et le milieu isotrope, les dipôles induits sont proportionnels au champ électrique et alignés le long de ce champ. Le matériau se comporte en diélectrique linéaire. Le moment dipolaire moyen par unité de volume ou polarisation du milieu P est alors:

$$P = P_0 + \chi_1 E$$

E = Champ électrique appliqué

P_0 = polarisation statique éventuelle en l'absence de champ électrique incident.

χ_1 = Susceptibilité linéaire.

* Si le champ incident est fort, les dipôles ne croissent plus linéairement avec le champ appliqué. La polarisation P du milieu est alors:

$$P = P_0 + \chi_1 E + \chi_2 E^2 + \chi_3 E^3 + \dots$$

$$E = E_m \cos \omega t$$

χ_n = susceptibilité d'ordre n

E_m = champ électrique incident à son amplitude maximale.

ω = pulsation du champ.

$$P = P_0 + \chi_1 E_m \cos \omega t + \chi_2 E_m^2 \cos^2 \omega t + \chi_3 E_m^3 \cos^3 \omega t + \dots$$

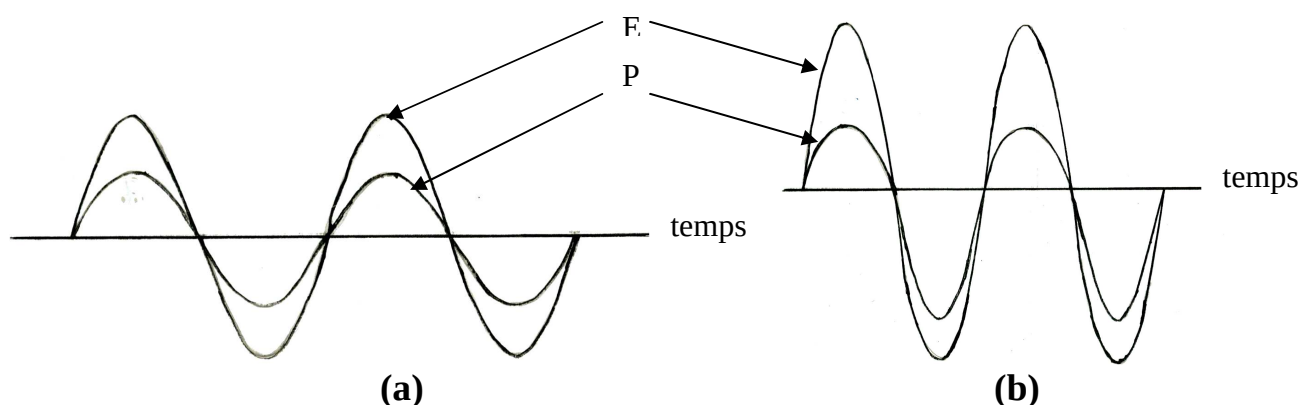
$$P = P_0 + \chi_1 E_m \cos \omega t + \frac{1}{2} \chi_2 (1 + \cos 2\omega t) E_m^2 + \frac{1}{4} \chi_3 (3 \sin \omega t - \sin 3\omega t) E_m^3 \dots$$

$(1 + \cos 2\omega t)$ contribue à la susceptibilité d'ordre 2.

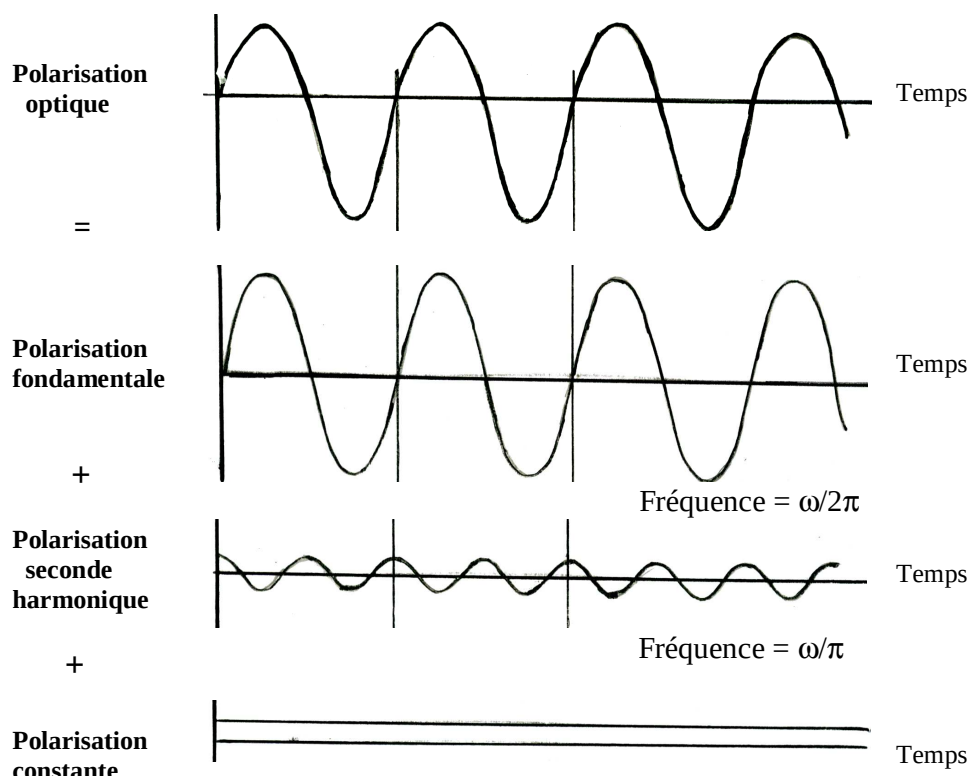
$\frac{1}{2} \chi_2 E_m^2$ = polarisation continue (rectification optique).

$\frac{1}{2} \chi_2 E_m^2 \cos 2\omega t$ = polarisation oscillante qui varie avec la pulsation 2ω .

Ainsi la lumière réémise par le matériau aura une fréquence 2ω , c'est la génération de seconde harmonique. De la même façon le terme χ_3 donnera naissance à une génération de 3^{ème} harmonique (3ω).



**Champ électrique (E) et polarisation optique (P)
dans un milieu linéaire (a) et dans un milieu non linéaire (b)**



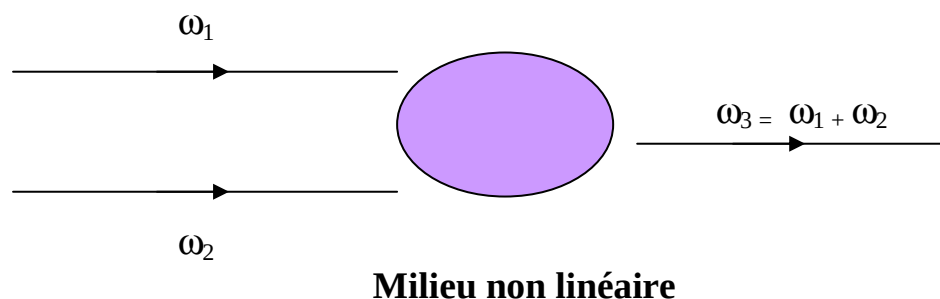
Décomposition d'une polarisation non linéaire (de forme anharmonique) en ses composantes harmoniques

La polarisation totale a une forme anharmonique somme de divers composantes:

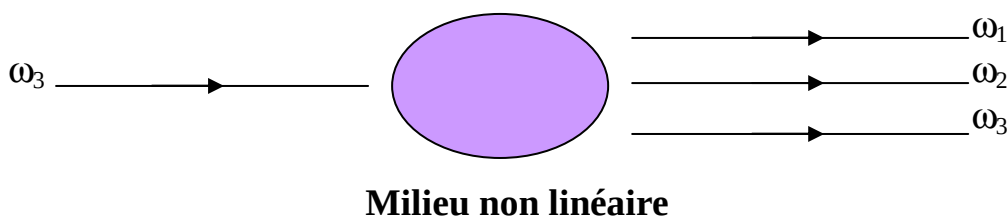
- la composante fondamentale qui est la plus importante.
- des composantes de fréquences multiples moins intenses.
- une polarisation constante due au champ statique induit par le milieu non linéaire.

* Amplification paramétrique

Les champs sinusoïdaux appliqués peuvent avoir des fréquences différentes: par exemple deux ondes de pulsation ω_1 et ω_2 envoyées dans un milieu non linéaire donnent naissance à une onde de pulsation $\omega_3 = \omega_1 + \omega_2$.



Cette opération peut être inversée: une onde de pulsation ω_3 intense envoyée dans un milieu non linéaire est susceptible d'engendrer voire d'amplifier deux ondes ω_1 et ω_2 telles que $\omega_1 + \omega_2 = \omega_3$: c'est l'amplification paramétrique. ω_3 est dite onde de pompe. ω_1 et ω_2 jouent un rôle symétrique comme onde signal et onde oisive.



De la même façon la polarisation de 3^{ème} ordre $\chi_3 E(\omega_1)$, $\chi_3 E(\omega_2)$, $\chi_3 E(\omega_3)$ fera apparaître un faisceau d'onde de pulsation $\omega_4 = \omega_1 + \omega_2 + \omega_3$. Si $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3$ on a un mélange à 4 ondes dégénérés (**DFWM**).

b) Indice non linéaire

L'indice de réfraction du milieu est donné par la relation :

$$n = n_0 + n_2 I + \dots$$

n_0 : indice de réfraction habituel de l'optique

$n_2 I$: correction de l'indice de réfraction

I : intensité lumineuse

$$I = \frac{E_m^2}{2}$$

$$n_0 = (1 + \chi_1)^{1/2}$$

$$n_2 = \frac{\chi_2}{2n_0}$$

La variation de l'intensité du champ électrique peut s'accompagner d'une modification de l'indice du milieu c'est **l'effet Kerr optique**.

L'ordre de grandeur relatif du terme $n_2 I$ et du terme n_0 dépend beaucoup du matériau considéré et de l'intensité lumineuse. Il est en général très faible. Il peut atteindre 10^{-2} pour un milieu gazeux au voisinage immédiat de la résonance et pour un laser continu de puissance modérée.

Les différentes contributions au coefficient d'indice non linéaire n_2 peuvent être d'origine électroniques, nucléaire ou thermique, chacune de ces contributions ayant une constante de temps τ caractéristique:

* **Les phénomènes électroniques** sont dus à la déformation des orbitales électroniques autour du noyau considéré comme fixe (approximation de Born-Oppenheimer). Pour les phénomènes non résonnant (fréquences optiques loin de celles correspondant à un seuil d'absorption) le temps de réponse est de l'ordre de 10^{-14} - 10^{-16} s. Pour l'excitation résonnante le temps de relaxation est de l'ordre de 10^{-7} s pour une transition dans le domaine visible.

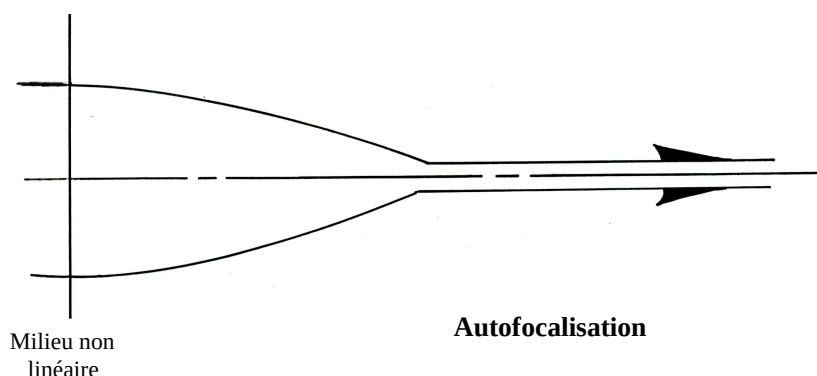
* **Les phénomènes non résonnants de type nucléaire** proviennent d'une modification du mouvement des noyaux induite par le champ exciteur. Les temps de réponse mis en jeu sont de l'ordre de 10^{-12} s. Ces effets sont principalement observables dans les liquides composés de molécules anisotropes.

* **L'effet thermique** dépend des propriétés thermiques du milieu. L'absorption par le milieu de l'onde électromagnétique provoque un échauffement local qui induit une variation de l'indice. L'effet thermique s'apprécie sur une échelle de temps plus grande ($\tau=10^{-1}$ s).

VI-2-2- Applications de l'équation $n = n_0 + n_2 I + \dots$

i) L'autofocalisation

Lorsque le faisceau lumineux traverse le milieu non linéaire, il se contracte et donne naissance à un filament fin c'est **l'autofocalisation**. Ce phénomène s'accompagne de densités d'énergie très élevées pouvant provoquer la destruction du matériau par échauffement. Ce phénomène est important dans le choix des compositions vitreuses, matière actives dans les expériences de fusion.

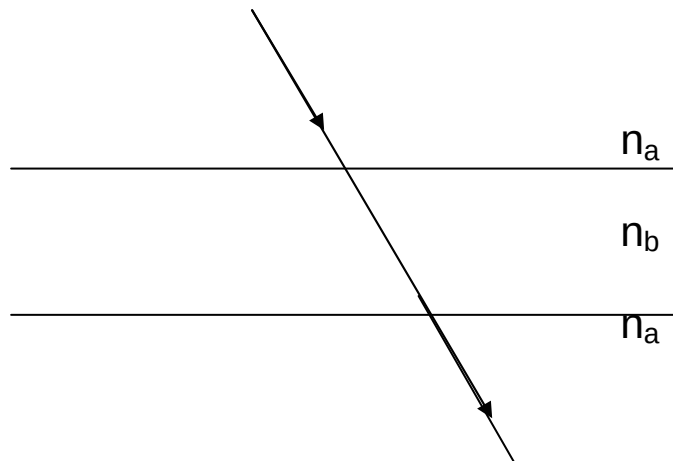


ii) La commutation optique et la création d'un langage binaire

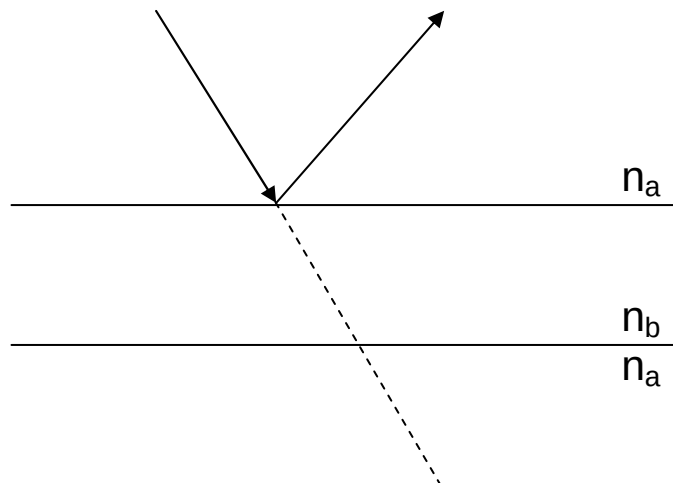
Soient 2 milieux d'indices n_a et n_b : deux cas peuvent se présenter:

*** $n_a = n_b$**

Si ($n_a = n_b$) un faisceau lumineux faible traverse sans modification.



*** $n_b \gg n_a$**



Si ($n_b \gg n_a$) une partie du faisceau lumineux est réfléchi. Lorsque l'intensité du faisceau incident augmente une partie de plus en plus importante est réfléchi. Cette évolution correspond à l'acte élémentaire d'une commutation optique et même de la création d'un langage binaire.

Les performances de cet acte sont liées à 3 facteurs: la variation de l'indice du milieu, son temps de réponse et son coefficient d'absorption.

En pratique le choix du matériau se fait en cherchant un compromis entre la nécessité d'un changement rapide de n_2 et d'une faible variation thermique de

l'indice linéaire ($d\eta/dT$) due à l'échauffement du matériau sous l'effet de l'intensité du faisceau lumineux. Ce compromis s'exprime par figure de mérite F:

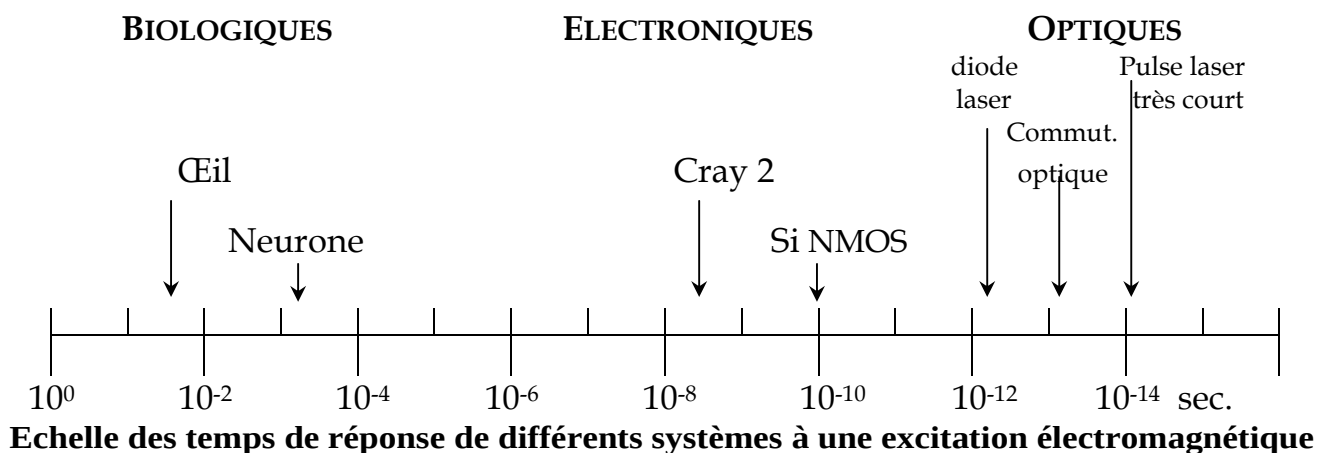
$$F = \frac{n_2 \rho C_p}{\alpha \tau dn/dT}$$

C_p : chaleur spécifique

ρ : densité du matériau

α : coefficient d'absorption à la longueur d'onde de travail

τ : temps de réponse du milieu.



iii) Possibilité de construire un ordinateur optique

Les ondes lumineuses se propageant dans des structures guidées comme les fibres optiques remplaceraient les courants électriques, ce qui permettrait la réalisation de systèmes très rapides grâce à la facilité d'obtenir des impulsions lumineuses de durées très courtes (< la pico seconde) et la mise au point de commutateurs optiques dont le temps de réponse est du même ordre de grandeur.

Il y a cependant des obstacles à surmonter: il s'agit de trouver des matériaux ayant :

- un temps de réponse très court.
- une grande non linéarité Kerr
- pouvant être miniaturisés facilement
- nécessitant de faibles énergies de commutation.

A moyen terme avant l'ordinateur tout optique les contributions optiques à l'ordinateur se développent essentiellement sur quelques créneaux tels que:

- le transport de l'information au sein de l'ordinateur
- le traitement de l'image
- les connexions.

Les développements liés à l'optique non linéaire ont permis de réaliser plusieurs dispositifs. En particulier des miroirs pour lesquels les lois de la réflexion diffèrent des lois de Descartes. Le plus connu est le miroir à conjugaison de phase réalisé sur la base du mélange à 4 ondes dégénéré. Il renvoie un rayon lumineux exactement dans la direction opposée à la direction incidente.