

IV.1-Introduction :

Dans ce chapitre nous allons faire le design du capteur de pression à cristaux photoniques proprement dit. En premier lieu nous allons proposer une structure de base constituée d'une matrice de 20x19 trous d'air dans un substrat en silicium. Pour cette structure nous allons déterminer la bande interdite photonique et le mode de propagation dans lequel elle est existante. Puis nous allons proposer un design du capteur qu'en utilisera à la suite pour les simulations et les études à venir.

IV.2-Structure élémentaire du capteur :

La structure élémentaire du capteur est représentée en figure IV.1. Cette structure est dite connectée du fait qu'elle est formée de trous creusés dans un substrat continu en silicium d'indice de réfraction 3.5 et ces trous sont remplis d'air d'indice de réfraction 1.

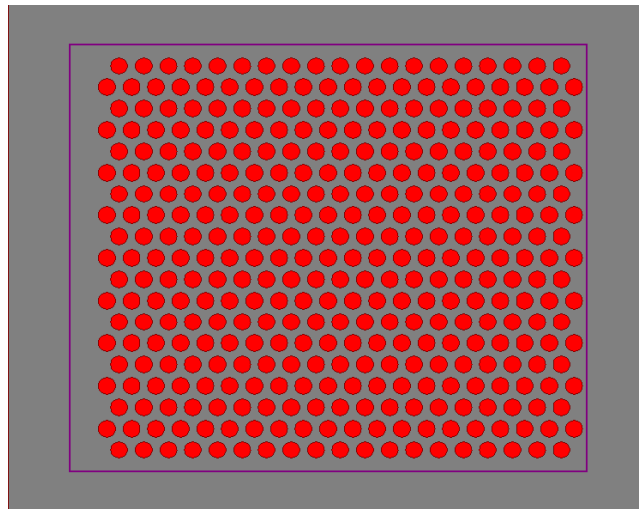


Figure IV.1 : Structure élémentaire du capteur de pression.

La figure IV.2 représente la cartographie des indices de réfraction de la structure. Cette cartographie est fournie directement par le logiciel de simulation RSoft.

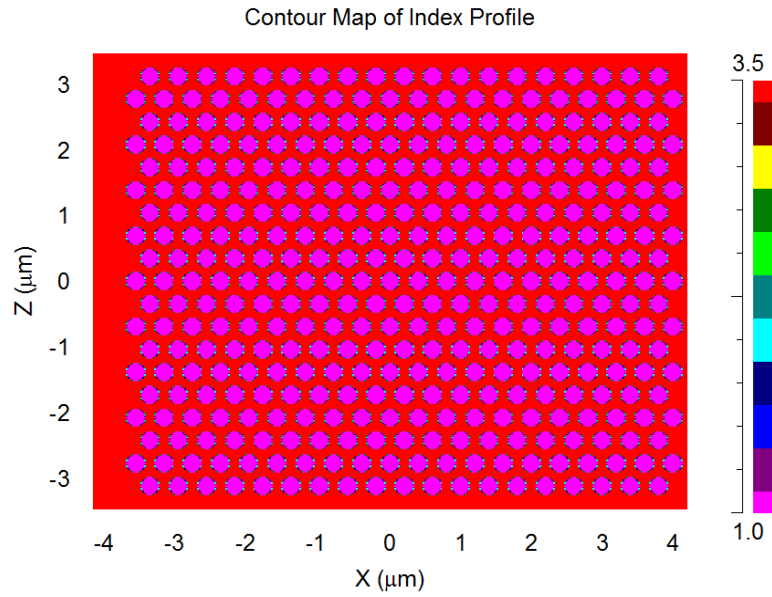


Figure IV.2 : Cartographie des indices de réfractifs

IV.3-Détermination de la bande interdite photonique :

La bande interdite obtenue est donnée en figure IV.3.a. Cette figure représente la distribution de la bande interdite photonique par rapport à l'orientation cristallographique du cristal (représenté sur l'axe des X de la figure) et sur l'axe des Y on trouve les valeurs de $\omega a / 2\pi c = a/\lambda$. Une bande interdite photonique ou gap photonique (BIPh) est disponible seulement pour le mode TM.

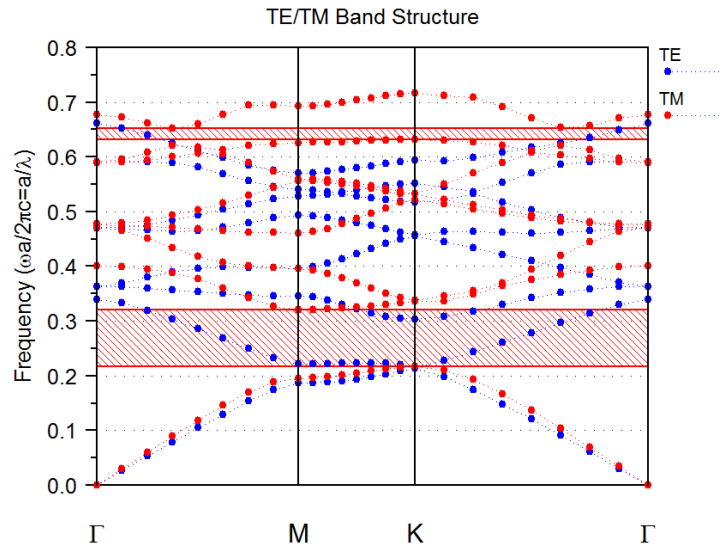


Figure IV.3.a.diagramme de bande d'un réseau hexagonal

la figure IV.3.b est un zoom de la figure précédente, cette figure va nous permettre le calcul direct des limites par relevé simple des coordonnées suivant l'axe OY.

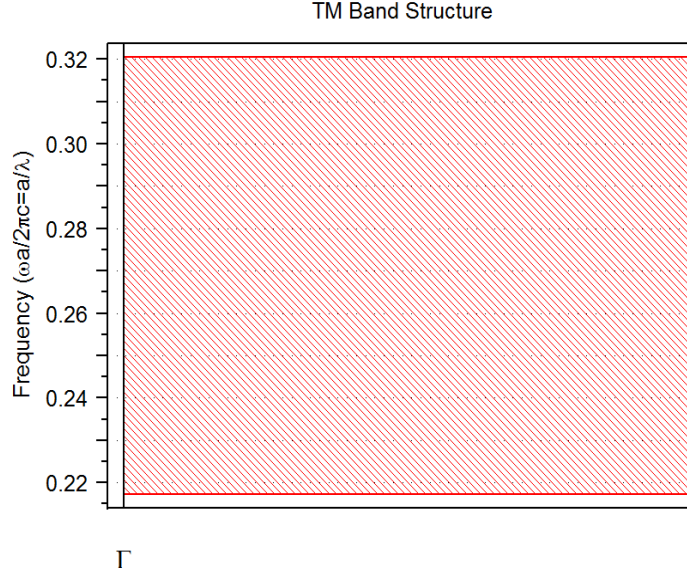


Figure IV.3.b. Diagramme de bande pour le mode TM

De cette figure on trouve :

$$\begin{cases} \text{LH (limite haute)} = 0.32055 = a/\lambda_H \\ \text{LB (limite basse)} = 0.2171 = a/\lambda_L \end{cases}, a \text{ est la période du réseau.}$$

Ce qui correspond à une bande interdite de dimensions :

$$\begin{cases} \text{BI}_H \text{ (limite haute)} = \lambda_H = 1.8425\mu\text{m} \\ \text{BI}_L \text{ (limite basse)} = \lambda_L = 1.2479\mu\text{m} \end{cases}$$

Et la longueur d'onde centrale de la bande interdite est de $\lambda_c = 1.5452 \mu\text{m}$

IV.4-La structure du capteur adoptée :

Pour l'étude prochaine du capteur nous allons adopter la structure représentée sur la figure IV.4 [49]. Cette structure est constituée de deux guides d'onde constituant deux défauts linéique L_1 et L_2 , de deux trous centrales de rayon identiques $R_1 = 0.5xa$, et d'une série d'autre trous de rayons $R_2 = 0.06 \mu\text{m}$, $R_3 = 0.05 \mu\text{m}$, $R_4 = 0.04 \mu\text{m}$ situés symétriquement des deux côtés des trous centrales. Durant ce travail nous allons calculer la sensibilité du capteur de pression représenté par cette structure puis nous allons calculer le

facteur de qualité des impulsions qu'il délivre en sortie suite à son excitation par une source lumineuse de longueur d'onde $\lambda = 0.55 \mu\text{m}$. la sensibilité définit le caractère du capteur à répondre à la variation de pression très faible et elle est d'autant meilleure que sa valeur est importante, tandis que le coefficient de qualité caractérise la forme des impulsions de sortie. Ce dernier est d'autant plus grand que les peaks de sortie sont aigus et de forme s'approchant du cas idéal.

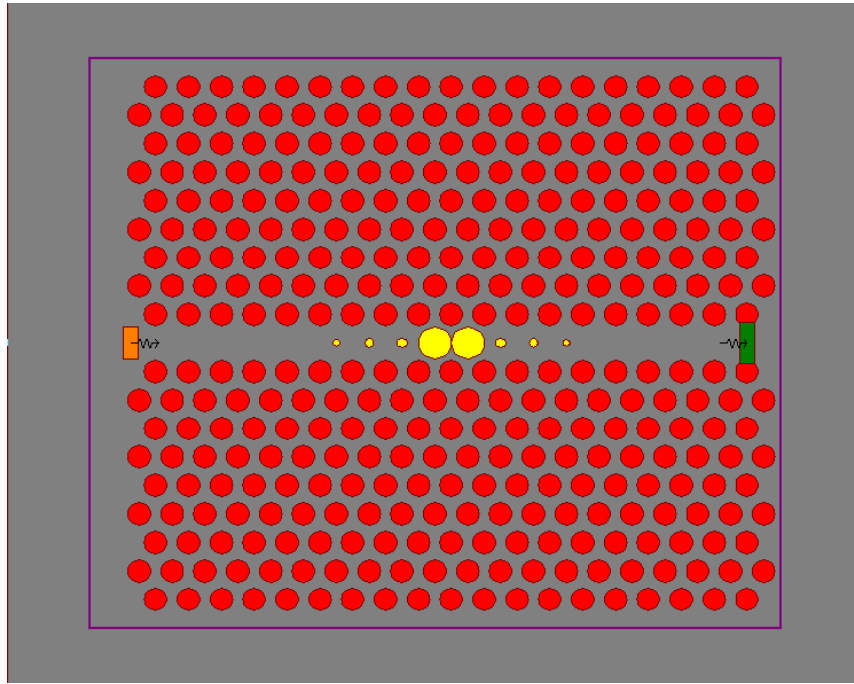


Figure IV.4 : Structure du capteur utilisé.

IV.4-1-Evolution de l'indice de réfraction du silicium en fonction de la pression :

La pression quand elle est appliquée à ce type de structure agit directement sur la forme et les dimensions géométriques des trous d'air. En conséquence le substrat en silicium voit son indice de réfraction changer de valeurs. En littérature du domaine [49], l'indice de réfraction suit une variation linéaire et croissante avec l'augmentation de la pression cela est bien montré en figure IV.5. Le pas de croissance de l'indice de réfraction n est $\Delta n = 0.03985$, ce qui fait que pour une variation de pression de 0 à 10 GPa les valeurs de n_{Si} (l'indice de réfraction du silicium) sont prénent les valeurs montrée en tableau IV.1 :

Pression (GPa)	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n_{Si} (URI)	3.5	3.53985	3.5797	3.61955	3.6594	3.69925	3.7391	3.77895	3.8188	3.85865	3.8985

Tableau IV.1. Les valeurs de n_{Si} dans l'intervalle de pression choisi

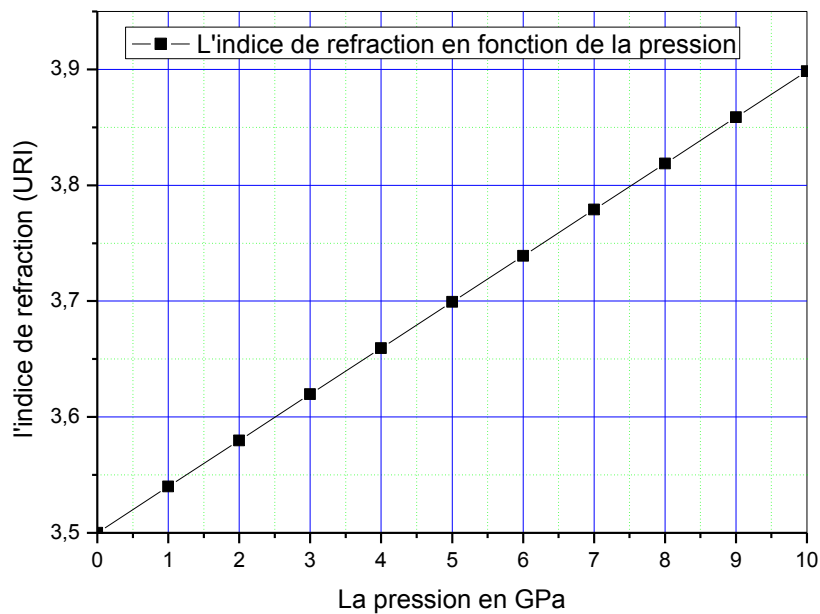


Figure IV.5 : Variation de l'indice de réfraction en fonction de la pression

IV.4-2-Etude de la réponse du capteur sous différente pression :

Dans cette partie nous allons simulés la réponse du capteur de pression quand il est soumis à une variation de pression allons de 0GPa à 10Gpa par pas de 1GPa. Les résultats sont présentés en figure IV.6.

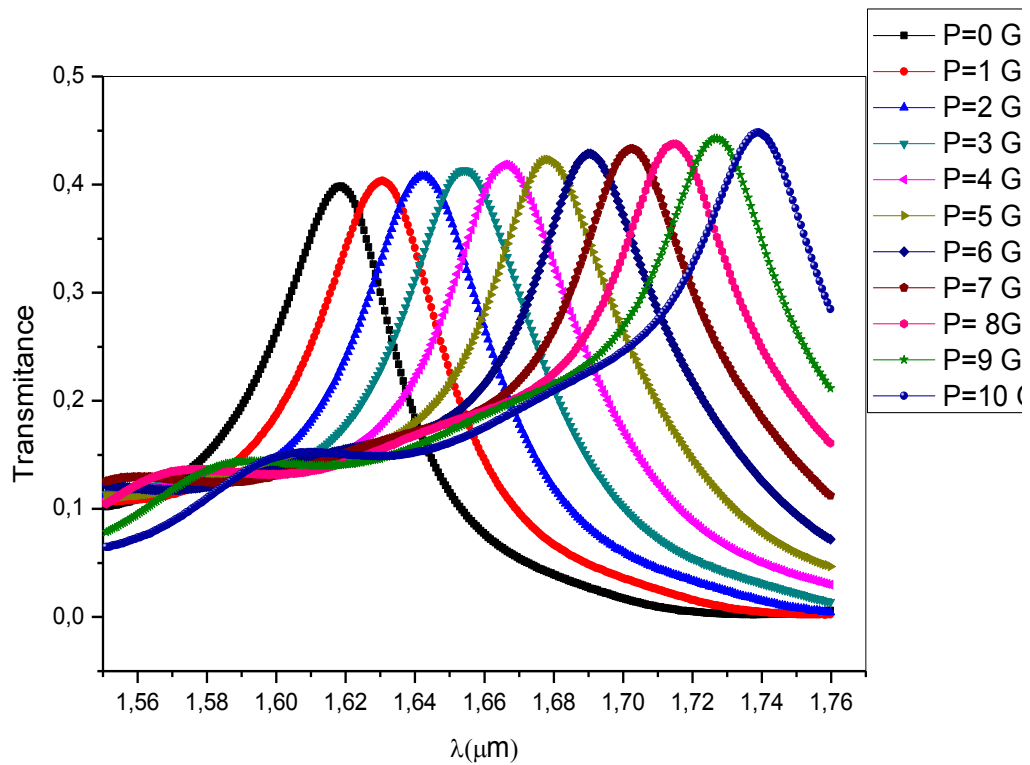


Figure IV.6 : Réponse du capteur pour sous différentes pressions

Cette figure montre une série d'impulsions ou chacune d'elle est située à une position λ_x sur l'axe des longueurs d'ondes. De cette figure on remarque qu'à chaque valeur de la pression correspond une longueur d'onde de résonance. Aussi on peut constater que l'emplacement des longueurs d'ondes de résonances est croissant avec la pression, le tableau IV.2 résume c'est résultats.

Pression (CPa)	indice de réfraction	transmittance	λ (μm)	Facteur de Qualité Q
0,000000	3,500000	0,397130	1,618300	20,452000
1,000000	3,539850	0,403540	1,631100	21,578000
2,000000	3,579700	0,407130	1,642600	21,612000
3,000000	3,619550	0,412820	1,654300	21,084000
4,000000	3,659400	0,418420	1,666500	49,478000
5,000000	3,699250	0,423820	1,678800	51,393000
6,000000	3,739100	0,429030	1,690600	52,793000
7,000000	3,778950	0,432630	1,702700	53,614000
8,000000	3,818800	0,438070	1,715500	53,876000
9,000000	3,858650	0,443470	1,727300	53,591000
10,000000	3,898500	0,447580	1,739500	52,769000

Tableau IV.2 : Caractéristiques du capteur en fonction de la pression.

IV.4-3-Variation de la longueur d'onde de résonance en fonction de la pression

Le tracé de la variation de la longueur d'onde en fonction de la pression est représenté en sur la figure IV.7.

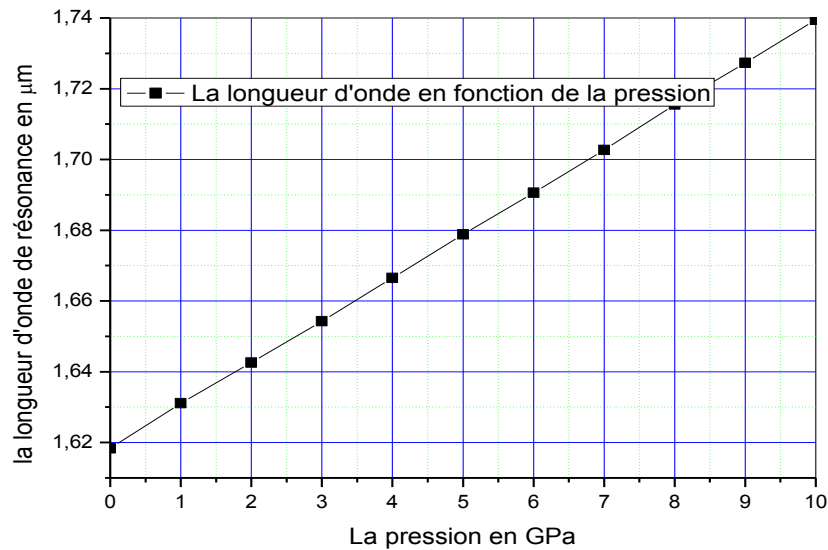


Figure IV.7 : Variation de la longueur
en fonction la pression

De cette figure on voit bien que la longueur d'onde de résonance suit une variation linéaire en fonction de la pression. Cette figure reflète en grande partie le comportement linéaire du capteur que nous avons adopté dans cette étude en fonction de la mesure de P . En effet la linéarité de la réponse d'un capteur est une caractéristique qu'on désire toujours avoir lors de sa conception, cette importance se traduit par la possibilité de prévoir immédiatement et d'une façon intuitive sa réponse pour n'importe quelle valeur de l'excitation d'entrée P .

IV.4-4-Variation de la longueur d'onde de résonance en fonction de la pression

La transmittance du signal est définie comme étant le pourcentage du signal transmis par la structure du capteur vers le moniteur de sortie (le récepteur optique). Ce paramètre est très important car il représente le caractère du capteur à transmettre fidèlement ou pas le signal d'entrée. Si l'intensité du signal au niveau du moniteur est importante cela veut dire que ce signal est exploité directement, mais dans le cas contraire il lui faut un procédé d'amplification avant son exploitation. Dans notre cas on a une transmission de 40% à 45%, ces valeurs sont relativement acceptables et dans les meilleures conditions cela ne nécessite pas une importante amplification. La figure IV.8, présente les résultats obtenus.

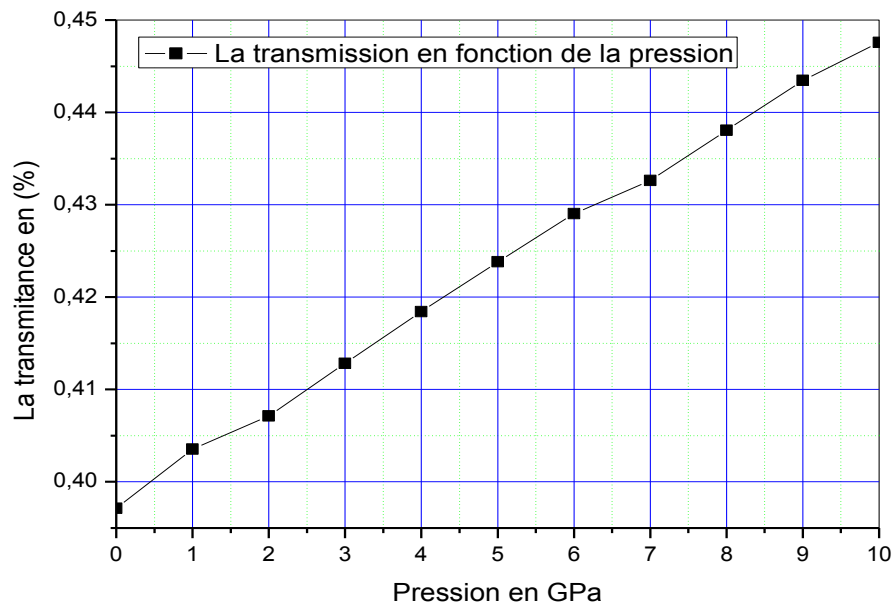


Figure IV.8 : Variation de la transmittance du signal en fonction la pression

IV.4-5-Variation du facteur de qualité Q en fonction de la pression :

Le facteur de qualité comme on a dit plus haut est un paramètre très important car il décrit la forme des impulsions de sortie. Pour le cas de notre structure, la figure IV.9 donne l'évolution de Q en fonction de la pression P du capteur.

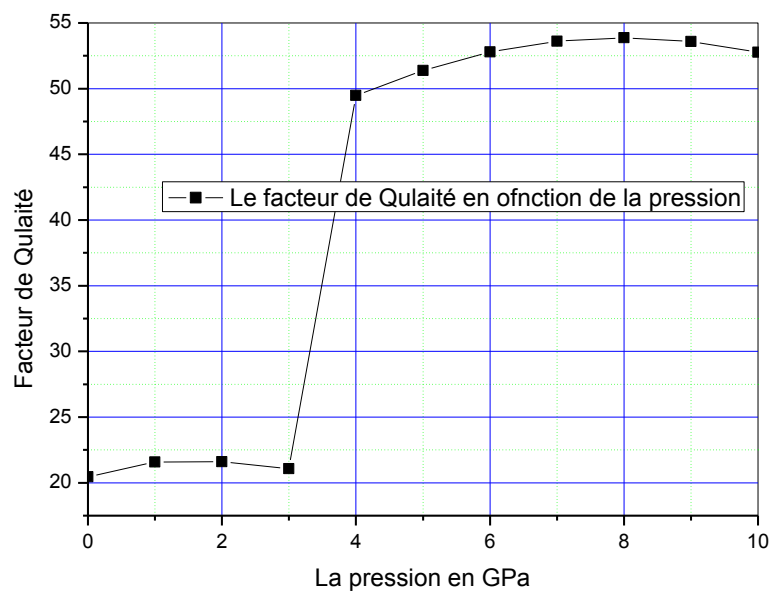


Figure IV.9 : Variation du facteur de qualité Q en fonction de la pression P

de cette figure on peut dire que le facteur de qualité est stable et plus important pour les pressions supérieures à 3GPa. Les valeurs que nous avons obtenus ici sont relativement acceptable et cela peut être constaté à partir des courbes de réponse du capteur présentées en figure IV.6. Il est à noter ici que pour avoir un facteur de qualité plus important, un processus de modification de la structure en vue de son optimisation est nécessaire.

IV.4-6-Sensibilité du capteur au changement de l'indice de réfraction:

La sensibilité du capteur représente sa capacité à détecter et à séparer les faibles changements d'indice de réfraction et les convertir en des décalages de longueur d'onde de résonance au niveau du récepteur. Autrement dit elle représente le minimum de pression que le capteur peut détecter et traduire en réponse claire et utile.

Dans notre cas, la sensibilité est définie par le rapport :

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} \dots\dots\dots (IV.1)$$

En utilisant cette formule on obtient les valeurs de la sensibilité représenté dans le tableau IV.3.

Pression (GPa)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S (nm/URI)	321,20	288,58	293,60	306,14	308,65	296,11	303,63	321,20	296,11	306,14

Tableau IV.3. Sensibilité du capteur

Les résultats sont aussi représentés en figure IV.10.

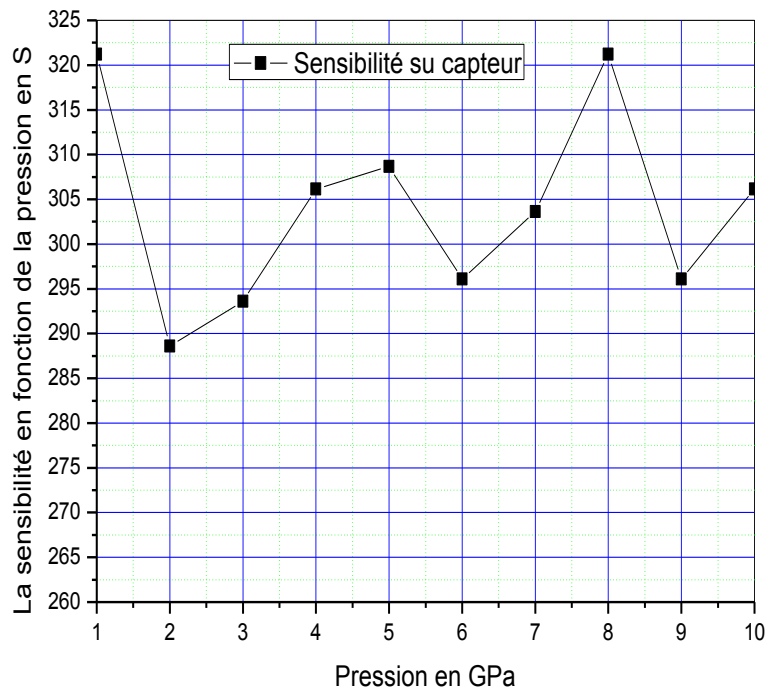


Figure IV.10 : Sensibilité du capteur

Les courbes que nous avons obtenues montrent une bonne sensibilité du capteur aux variations de l'indice de réfraction du silicium et par conséquent à la pression qui lui ait appliquée, la valeur maximale de la sensibilité obtenue est de 321,2045 nm/UIR.

En théorie cette sensibilité doit être constante, mais en pratique cela est irréalisable ou presque vous les erreurs de la simulation et aux erreurs systématiques. Mais pour nous il suffit d'avoir un étroit intervalle de variation de la sensibilité pour valider nos résultats, ce qui le cas de notre simulation. En effet nos calculs montrent qu'elle varie dans l'intervalle [288,5822, 321,2045] c'est-à-dire un pourcentage maximale de 11.3% $(288,5822 - 321,2045) / 288,5822 = 0.113$, ce qui représente une légère variation.

Pour améliorer cette sensibilité il existe plusieurs moyens en littérature du domaine entre autre : la modification de la structure du capteur. C'est d'ailleurs ce que nous allons faire dans ce qui suit.

IV.5-Nouvelle structure du capteur :

La modification que nous avons faite sur notre structure initiale est de faire le décalage des deux trous du centre (figure IV.11). Le trou de gauche sera décaler chaque fois de Δx vers la gauche et celui de droite sera décalé par la même valeur de Δx et de la même façon mais cette fois vers la droite.

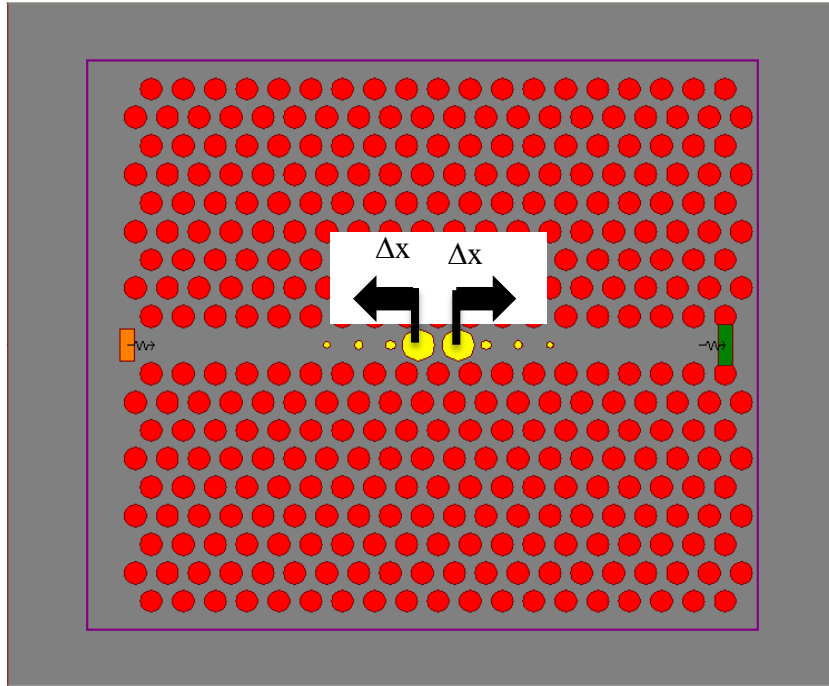


Figure IV.11 : Principe de l'amélioration de la structure

Quant aux valeurs de Δx , on a pris une valeur arbitraire de 0.01 comme pas de décalage et le décalage maximal significatif est de 0.06. Les figures IV.12.a,f, illustrent les résultats que nous avons obtenus. Il est important de signaler que chaque courbe est obtenues pour des pressions allons de 0GPa à 10GPa.

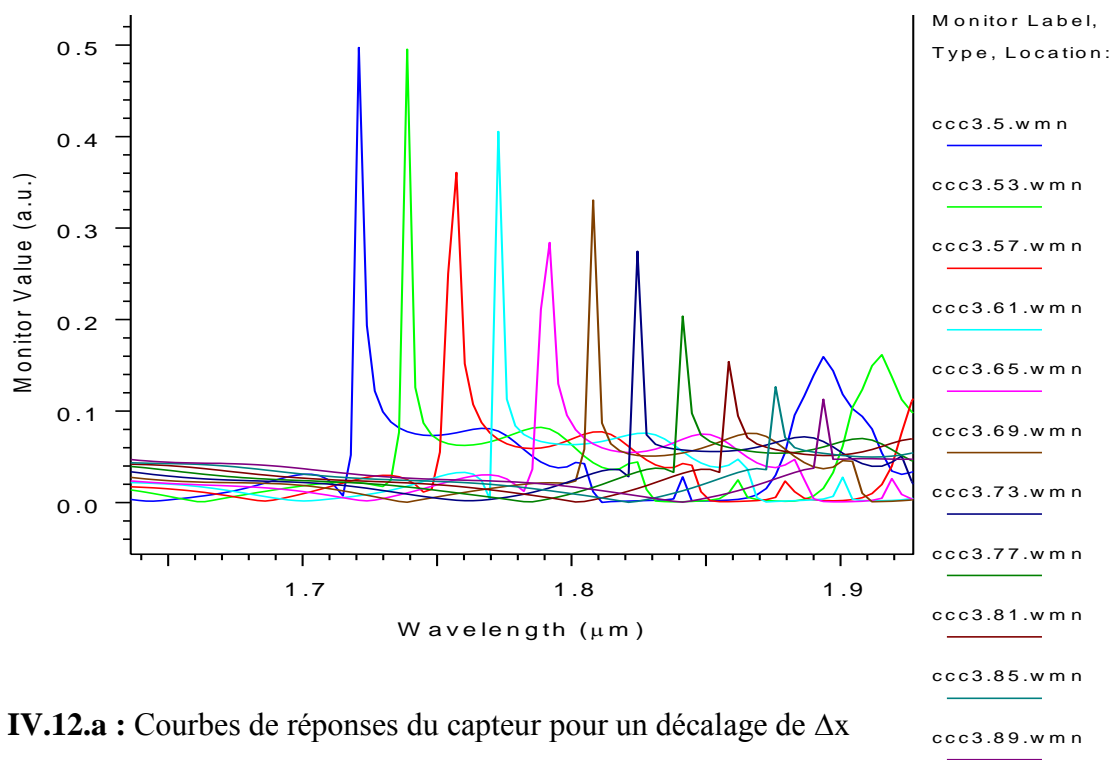


Figure IV.12.a : Courbes de réponses du capteur pour un décalage de Δx

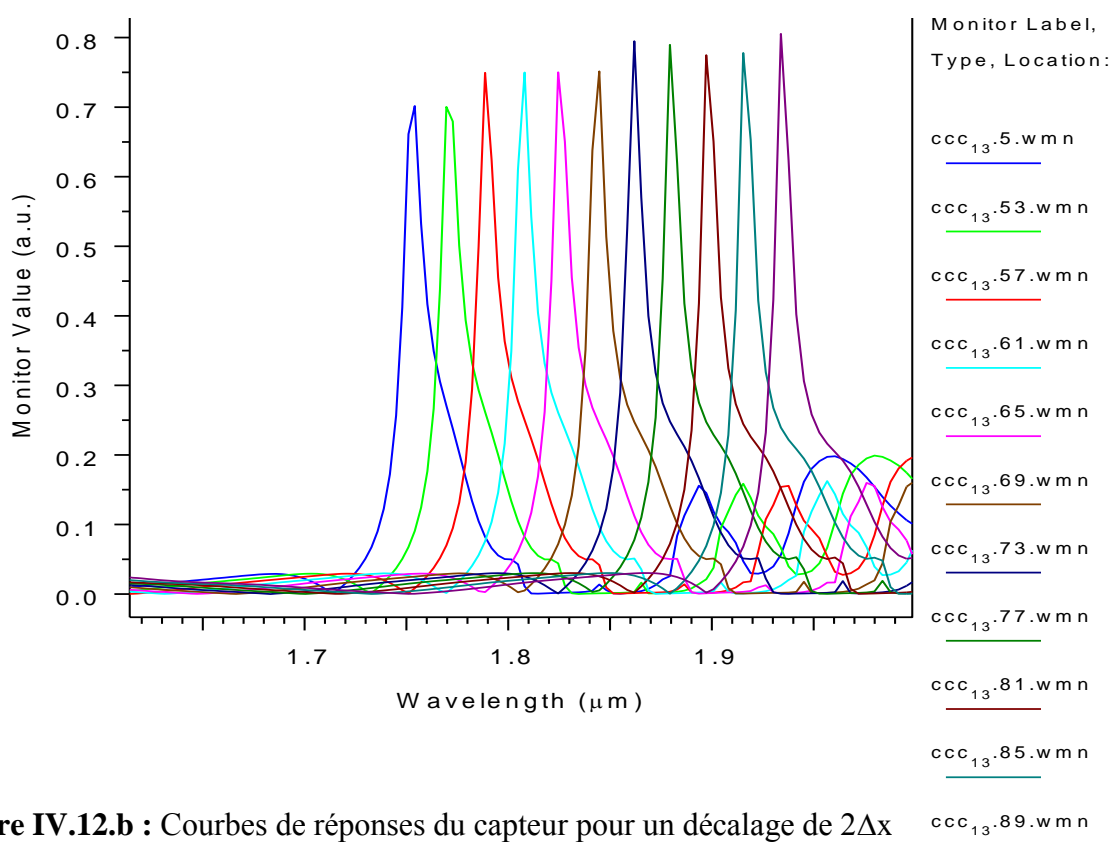


Figure IV.12.b : Courbes de réponses du capteur pour un décalage de $2\Delta x$

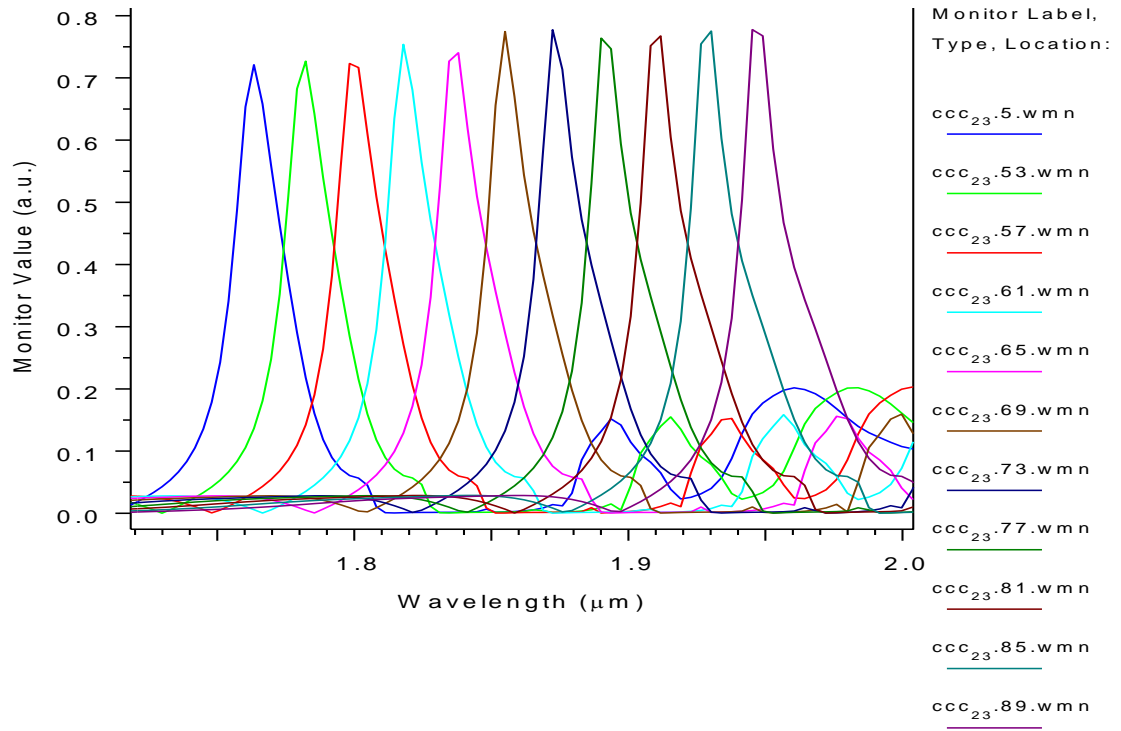


Figure IV.12.c : Courbes de réponses du capteur pour un décalage de $3\Delta x$

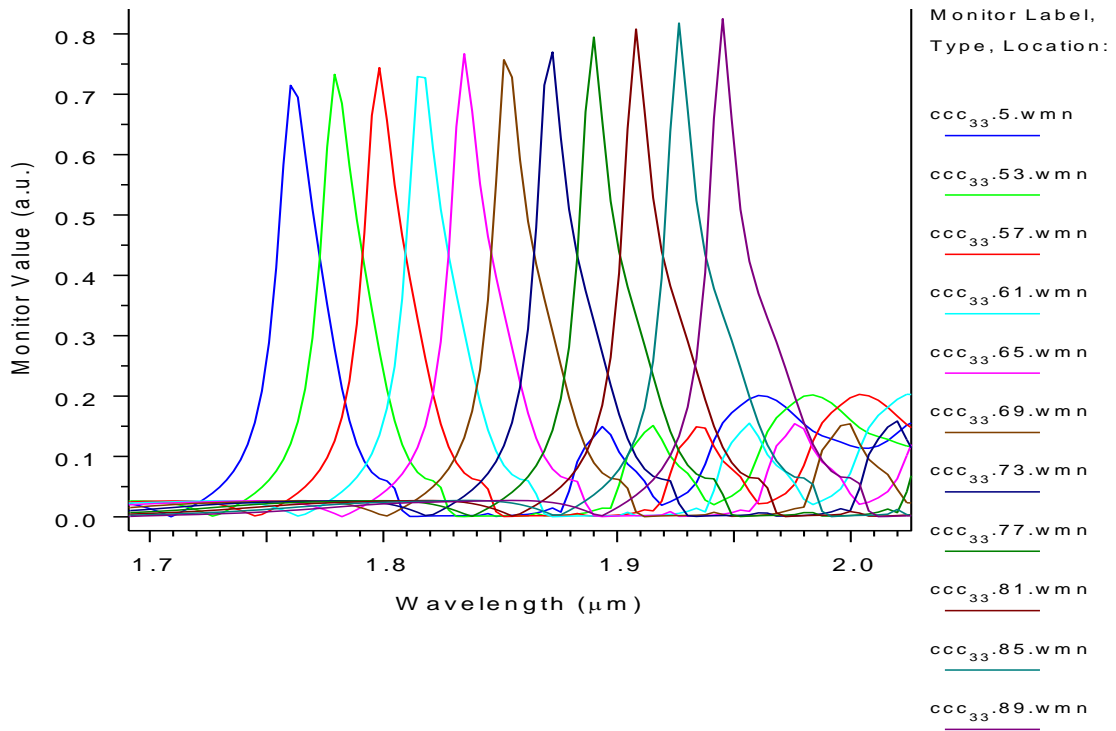


Figure IV.12.d : Courbes de réponses du capteur pour un décalage de $4\Delta x$

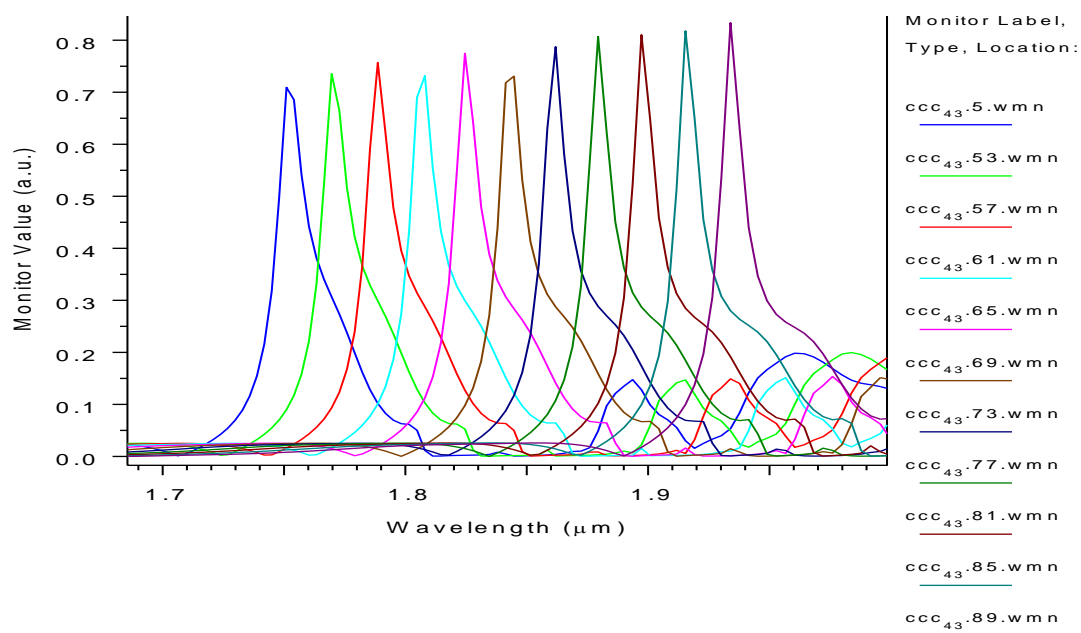


Figure IV.12.e : Courbes de réponses du capteur pour un décalage de $5\Delta x$

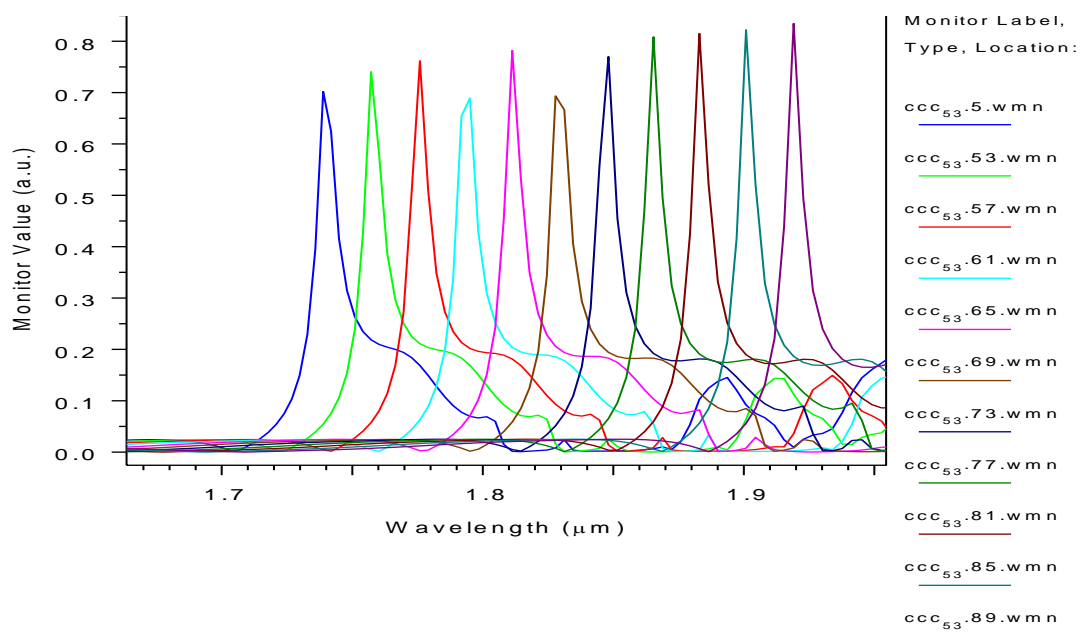


Figure IV.12.f : Courbes de réponses du capteur pour un décalage de $6\Delta x$

D'après les courbes que nous avons obtenues on peut aisément remarquer une grande amélioration des formes des impulsions reçues au niveau du moniteur. Cela se traduit absolument par l'amélioration des facteurs de qualités Q de la structure. Nous nous allons nous limité à observer le comportement de sensibilité après ce processus d'amélioration, le tableau suivant résume nos résultats.

Décalage Dx (μm)	Sensibilité (nm/UIR)
0,01	469
0,02	504
0,03	521
0,04	514
0,05	501
0,06	487

Tableau IV.4 : Sensibilité obtenue

Ce tableau est obtenu en prenant les meilleures sensibilités pour chaque cas de décalage. Il est très important à de souligner ici que les autres valeurs de la sensibilité pour chaque cas de décalage sont proche des valeurs choisies (voir annexe). La figure IV.13, donne l'évolution de la nouvelle sensibilité en fonction du déplacement des deux trous du centre.

De cette figure, on constate que l'amélioration que nous avons faite a abouti et la sensibilité s'est considérablement améliorée et la nouvelle sensibilité obtenue est de 521.

Ce résultats est très satisfaisant car et on peut dire que le capteur de pression que nous avons fait le design est très acceptable.

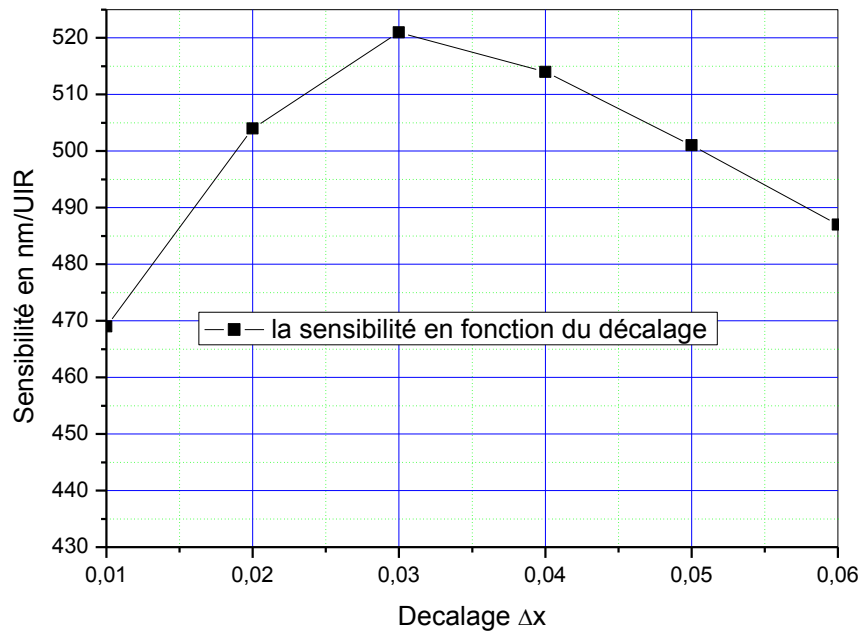


Figure IV.13 : Allure de la nouvelle sensibilité

IV.6-Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons adopté une structure pour le capteur pression que nous avons trouvé en littérature. L'étude de cette structure nous a fourni un facteur de qualité de 53.87, une transmission de 44.758 % et une sensibilité de 321. Ces valeurs sont assez satisfaisantes mais on procède à une amélioration de la forme du capteur à CPh dans le but d'améliorer ces caractéristiques. L'amélioration que nous avons proposée consiste en le décalage dans des sens opposés des deux grands trous du centre d'un pas de 0.01 jusqu'à avoir un déplacement total de 0.06 des deux côtés. Ce procédé a abouti et nous avons constaté de grandes améliorations que ce soit sur les formes des pics de réponses et donc en conséquence une amélioration des facteurs de qualité, aussi la sensibilité s'est améliorée considérablement et nous avons obtenu une valeur de **521** par rapport à **321** pour la structure originale.