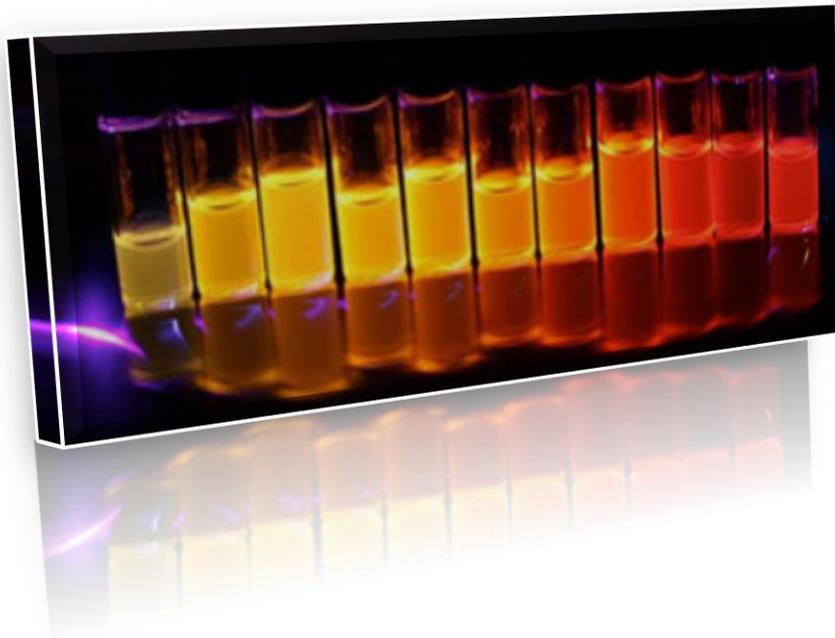


## **Etude et modélisation de la luminescence des nanocristaux de silicium**



**Etudiants :**

**Justine BARBARA**

**Auriane GILLES**

**Clara BROSOLO**

**Nathan FLAMBARD**

**Enseignant-responsable du projet :**

**Rémi DEMOULIN**

*Cette page est laissée intentionnellement vierge.*

Date de remise du rapport : **18/06/2018**

Référence du projet : **STPI/P6/2018 – 42**

Intitulé du projet : ***Etude et modélisation de la luminescence des nanocristaux de silicium***

Type de projet : ***Bibliographique et modélisation/simulation***

Objectifs du projet (10 lignes maxi) :

- ***Etudier le principe de la photoluminescence***
- ***Connaitre l'intérêt des nanocristaux dans le silicium***
- ***Etudier la formation des nanocristaux de silicium***
- ***Découvrir les applications possibles à partir des nanocristaux de silicium***
- ***Observer l'influence de la taille des nanocristaux et leur répartition sur le spectre de photoluminescence obtenu***

Mots-clefs du projet :

***Silicium***

***Nanocristaux***

***Photoluminescence***

## TABLE DES MATIERES

1. Introduction .....	6
2. Méthodologie / Organisation du travail .....	7
3. Travail réalisé et résultats .....	8
3.1. Préambule.....	8
3.2. La photoluminescence .....	10
3.2.1. Principe de la photoluminescence .....	10
3.2.2. Obtention de la luminescence dans le silicium .....	11
3.3. Formation des nanocristaux de Si dans des matrices type SiO <sub>2</sub> .....	13
3.4. Applications des nanocristaux de silicium.....	15
3.4.1. Application en microélectronique.....	15
3.4.2. Application Photovoltaïque.....	15
3.4.3. Application dans l'imagerie médicale.....	17
3.4.4. Application des diodes électroluminescentes : .....	17
3.5. Modélisation du signal de photoluminescence.....	19
3.5.1. Présentation du modèle .....	19
3.5.2. Comportement du modèle (modification des paramètres) .....	19
3.5.3. Comparaison avec des résultats expérimentaux .....	22
4. Conclusions et perspectives.....	25
5. Bibliographie .....	26
6. Index des illustrations.....	29

## NOTATIONS ET GLOSSAIRE

**NC-Si** : nanocristaux de silicium

**PL** : Photoluminescence

**Jonction p-n** : Il s'agit de la surface de contact entre un semi-conducteur dopé N (excès d'électrons) et un second dopé P (déficit d'électrons).

**Substrat** : Ce qui sert de support.

**Semi-conducteur intrinsèque** : semi-conducteur parfait, non dopé et ayant une structure régulière.

**Phonon** : Particule similaire au photon mais ne possédant pas les mêmes caractéristiques physiques.

**Matrice** : Matériau servant de liant dans un matériau composite

**Effet tunnel** : Pour expliquer ce terme, prenons l'analogie d'une personne souhaitant se rendre de l'autre côté de la montagne. Pour s'y rendre, elle doit fournir beaucoup d'énergie pour atteindre dans un premier temps le sommet. Alors que par effet tunnel, une particule quantique peut traverser la montagne en se créant un tunnel.

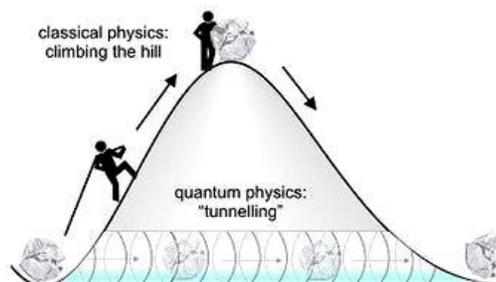


Figure 1: Analogie de l'effet tunnel

# 1. INTRODUCTION

Depuis maintenant plusieurs années, l'utilisation de nouvelles technologies telles que les écrans et les panneaux photovoltaïques ont révolutionné notre quotidien. Mais connaissez-vous le point commun entre ces derniers et l'imagerie médicale ?

Dans ce rapport, nous allons nous attacher à expliquer en quoi le silicium est l'un des éléments le plus utilisé dans le domaine des nouvelles technologies. En effet, le silicium et plus particulièrement ses nanocristaux, font de lui un matériau très prisé des industries, en raison de son abondance et de ses propriétés physiques particulières : une capacité à émettre et absorber la lumière.

Notre projet a donc consisté, dans une première partie, à étudier le principe de photoluminescence propre aux nanocristaux de silicium. Nous avons ensuite porté notre attention sur un travail de modélisation, au cours duquel nous avons pu étudier un modèle de profil de photoluminescence, et voir si ce dernier concordait avec des résultats expérimentaux, obtenus par sonde atomique.

## 2. METHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Dans le cadre de notre deuxième année à l'INSA, nous avons dû réaliser divers travaux de groupe dont le projet P6. Nous avons donc dû choisir il y a quelques mois un intitulé de sujets et notre choix s'est porté sur la luminescence des nanocristaux de silicium. Par semaine, 1h30 était consacrée à l'élaboration de ce projet cependant nous avons également fourni un travail personnel conséquent afin de pouvoir respecter les délais qui nous ont été fixés. Pour nous aider dans nos recherches nous avons été encadré par Monsieur Rémi DEMOULIN.

Concernant l'élaboration du projet, nous nous sommes organisés de la manière suivante. Tout d'abord durant les deux premières séances Monsieur Rémi DEMOULIN nous a expliqué les différents termes du sujet et ce qu'il attendait de nous. La troisième séance a été consacrée à l'initiation de la modélisation. Puis, nous avons décidé de faire des recherches chacun de notre côté afin de trouver un maximum d'informations sur notre sujet. Nous avons ensuite fait une liste de tous les sites que nous jugions intéressants sur un Google drive afin de pouvoir partager nos différentes recherches et d'avoir une vue d'ensemble de notre projet, tout au long de l'avancement de celui-ci. Les séances suivantes ont été consacrées à l'élaboration d'un plan que nous avons réalisé grâce aux diverses informations collectées. Une fois le plan réalisé nous nous sommes répartis le travail de la manière suivante. Nous avons dans un premier temps réalisé le préambule ensemble puis nous nous sommes mis d'accord sur les parties que nous voulions traiter. Ainsi Justine BARBARA a pris en charge la première partie sur la photoluminescence. Auriane GILLES s'est occupée de la partie de la formation des nanocristaux. Clara BROSOLO s'est chargée de la partie concernant les applications des nanocristaux de Silicium. Enfin Nathan FLAMBARD a travaillé sur tout l'aspect modélisation.

Mise à part le Google drive, nous avons également créé un groupe Facebook afin de pouvoir communiquer plus facilement sur le projet lorsque cela était nécessaire. Enfin, nous avons lors des dernières séances, mis au point les derniers détails du dossier, réaliser le poster et travailler sur le diaporama pour l'oral du 25 juin 2018.

## 3. TRAVAIL REALISE ET RESULTATS

### 3.1. Préambule

Le silicium de symbole Si est l'élément le plus abondant de la croûte terrestre après l'oxygène. En effet, le silicium constitue **27%** de la croûte terrestre solide contre 46% pour l'oxygène. C'est l'élément essentiel du verre.

Le silicium naturel est présent dans 3 de ses isotopes : le silicium 28 (92,2%) le silicium 29 (4,7%) et le silicium 30 (3,1%) On compte aussi divers isotopes artificiels.

Le silicium se trouve dans l'écorce terrestre sous forme de silice ou de silicates que ce soit à l'état solide, fluide ou résineux. Mais il se trouve en quantité dix fois plus faible que celle du carbone dans l'univers et son abondance chute à 7% dans le système solaire. Malgré une abondance relative du silicium dans l'espace, seules 4 molécules ont été découvertes : SiO, SiS, SiC<sub>2</sub>, SiH<sub>4</sub>. Nous pouvons trouver de la silice en abondance seulement dans les eaux chaudes de certains geysers tels que ceux du parc de Yellowstone aux États-Unis ou ceux d'Islande. Ces eaux parfois colorées peuvent contenir jusqu'à 700 mg de silice par litre. Le silicium est donc un élément loin d'être inactif.

Les propriétés du silicium sont nombreuses. En effet, le silicium est plus adapté aux hautes températures que le carbone. Mais aux basses températures, la structure du silicium reste très stable et se prête facilement au stockage de l'information. A partir de -220°C, les réactions chimiques sont fortement ralenties.

De plus, le silicium échange difficilement ses électrons, il n'est donc pas utilisé dans les échanges entre cellules et ne peut donc s'associer facilement avec d'autres atomes. Il n'est pas soluble dans l'eau.

Le silicium est un élément essentiel pour l'électronique, en effet c'est un **semi-conducteur intrinsèque** qui a le même comportement chimique que les métaux.

Nous allons maintenant aborder le sujet des semi-conducteurs afin de mieux comprendre ce que c'est ainsi que d'où proviennent les propriétés du silicium. D'autant que le silicium de numéro atomique 14 est l'élément semi-conducteur le plus courant. Les semi-conducteurs se trouvent dans la colonne IV du tableau périodique.

Tout d'abord, regardons l'énergie des électrons. En effet, un électron isolé, c'est-à-dire détaché de tout atome ou de tout matériau peut prendre n'importe quelle valeur d'énergie. Cette dernière peut prendre toutes les valeurs à l'intérieur d'un intervalle qui va dépendre de la structure du matériau, on parle de **bandes d'énergie**. L'énergie des électrons peut appartenir à plusieurs bandes : ce sont les **bandes permises**. A l'inverse, il ne peut y avoir d'électrons dont l'énergie appartient aux **bandes interdites** (Figure 3).



Figure 3: Bande permise/Bande interdite



Figure 2: Élément de silicium

Chaque bande peut contenir un nombre précis d'électrons sachant que les bandes sont remplies d'électrons par niveaux d'énergie croissant.

A l'état fondamental de la matière, c'est-à-dire quand la température tend vers le zéro absolu (0 Kelvin), deux bandes ont un rôle particulier :

- La dernière bande d'énergie complètement remplie d'électrons appelée la **bande de Valence** ;
- La bande d'énergie supérieure ou égale à celle de la bande de valence, mais qui n'est pas remplie appelée la **bande de conduction**.

L'énergie séparant ces deux bandes est appelée **gap**, ou **bande interdite** (Figure 4).

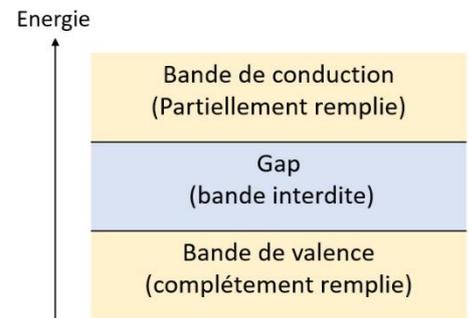


Figure 4: Disposition des différentes bandes

La cohésion locale d'un solide ou d'un matériau est permise grâce aux électrons appartenant à la bande de valence : ils vont interagir avec les atomes voisins pour rendre la structure plus stable.

En ce qui concerne les électrons de la bande de conduction, on dit qu'ils sont **délocalisés** : c'est-à-dire qu'ils peuvent se déplacer au sein du matériau, d'atome en atome, afin de participer à la conduction électrique.

Finalement pour savoir si un matériau est isolant, conducteur ou semi-conducteur, il faut regarder le remplissage des bandes de valence et de conduction, et la taille du gap à l'état fondamental de la matière.

- Le matériau est dit **conducteur** si sa bande de conduction et sa bande de valence se chevauchent (pas de gap dans ce cas). Sa conduction électrique est alors permise par les électrons au sein du matériau.
- Si la bande de conduction est vide, deux cas sont possibles :
  - Le matériau est dit **isolant** si le gap est grand (plusieurs électrons-volt). Il n'y a donc aucun électron du matériau qui participe à la conduction.
  - Le matériau est au repos, isolant, si le gap est suffisamment petit (de l'ordre de l'électron-volt). Mais la moindre excitation, thermique ou électrique, va permettre à certains électrons de la bande de valence de franchir le gap et de rendre le matériau conducteur. On dit alors que le matériau est **semi-conducteur**.

Lorsqu'un électron quitte la bande de valence pour la bande de conduction, on dit qu'un **trou** est créé. Ce trou est en fait une lacune en charge négative qui est assimilable à une charge positive.

Maintenant que nous avons compris ce qu'est le silicium et plus particulièrement sa propriété de semi-conducteur, nous allons nous intéresser à sa luminescence et plus particulièrement au principe de la photoluminescence.

## 3.2. La photoluminescence

### 3.2.1. Principe de la photoluminescence

Tout d'abord définissons la photoluminescence. La photoluminescence (PL) est une émission par la matière d'un rayonnement électromagnétique qui a une intensité plus forte que celle du rayonnement thermique produit par cette même matière à la même température. Elle correspond à une émission de lumière c'est-à-dire de photons qui est dû aux interactions entre particules chargées.

Celle-ci provient généralement des transitions électroniques dans la matière. Mais en premier lieu, elle a tendance à venir d'un apport d'énergie qui peut prendre différentes formes.

La PL est une technique de spectroscopie qui permet la caractérisation des propriétés optiques du matériau que l'on veut étudier.

La PL est une méthode facile à mettre en place car elle n'utilise qu'un laser et un cryostat (Récipient thermiquement isolé permettant de maintenir des produits à des températures très basses). D'autant qu'elle ne détériore pas la surface de l'échantillon comme pourrait le faire l'électroluminescence.

Le principe de la photoluminescence est simple, il consiste à exciter les électrons de la bande de valence en leur apportant une énergie supérieure à celle du gap. Ces électrons vont donc passer de la bande de valence à la bande de conduction. Les paires électrons-trous qui se sont ainsi créées vont se recombiner en émettant des photons. C'est donc la mesure de cette énergie qui va nous indiquer la nature de la recombinaison. La PL nous permet de collecter les photons émis et ainsi tracer le spectre d'émission du matériau que l'on souhaite étudier. Par la suite, l'étude du spectre nous donnera des informations concernant les différentes propriétés du matériau telles que son gap, sa composition ou bien la présence d'éventuels défauts à sa surface.

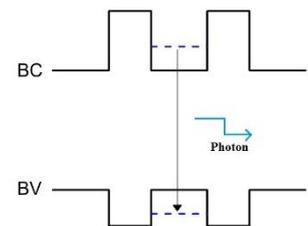


Figure 5: Emission de photon lors de la photoluminescence

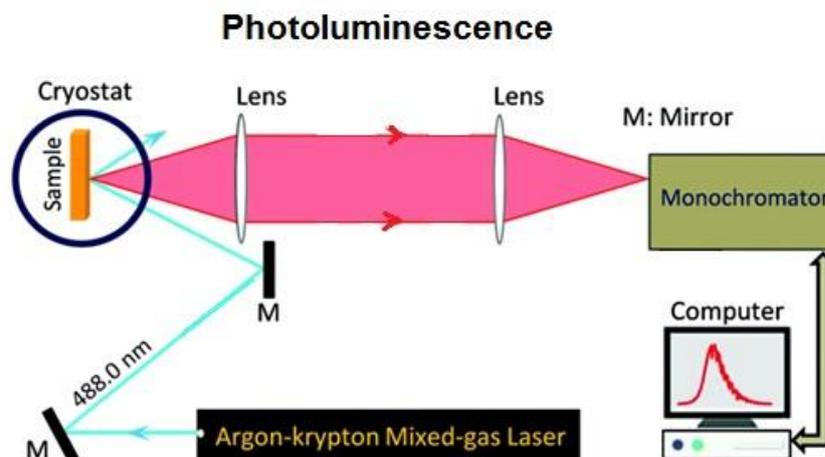


Figure 6: Principe de la photoluminescence

Comme vous pouvez le voir sur le schéma de principe de la photoluminescence ci-dessus (Figure 6), l'échantillon est placé tout d'abord dans le cryostat sous ultra vide et à basse température. Ensuite, le laser va envoyer un faisceau lumineux, préalablement émis et réfléchi sur deux miroirs, focalisé sur l'échantillon à l'aide d'une lentille permettant son excitation. Après la désexcitation, des photons sont émis du matériau et vont être diffractés vers un monochromateur qui va sélectionner la longueur d'onde par longueur d'onde. Le monochromateur va alors renvoyer le faisceau vers un détecteur (non présent sur ce schéma) qui le transformera en signal électrique. Nous pourrons ainsi tracer le spectre d'émission de l'échantillon à l'aide d'un ordinateur. Dans le cas d'impuretés présentes à la surface, une émission à une énergie différente sera visible sur le spectre d'émission.

### 3.2.2. *Obtention de la luminescence dans le silicium*

Tout d'abord, afin de mieux comprendre comment la luminescence du silicium peut être obtenue, nous allons expliquer la différence entre gap direct et gap indirect. Pour commencer, rappelons que le gap est la largeur de la bande interdite c'est-à-dire l'intervalle entre l'état de plus haute énergie de la bande de valence et l'état de plus basse énergie de la bande de conduction.

Si le minimum de la bande conduction coïncide avec le maximum de la bande de valence, alors on dit que le gap est direct (Figure 8). Cela signifie que la bande d'énergie interdite peut être franchie sans changement de vecteur d'onde.

Au contraire, si le maximum n'est pas à la verticale du minimum, alors cette transition va impliquer une modification du vecteur d'onde, on parle donc de gap indirect (Figure 7).

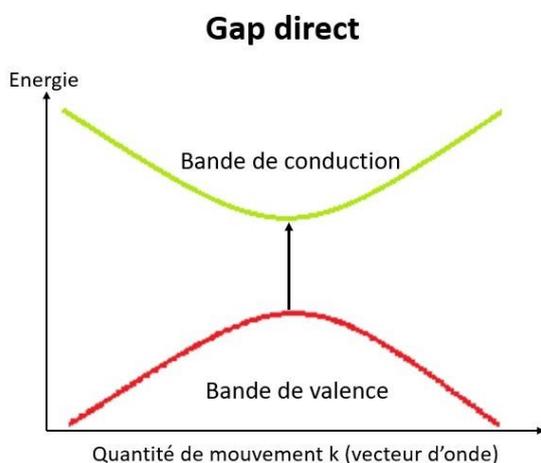


Figure 7: Schéma du gap direct pour un semi-conducteur

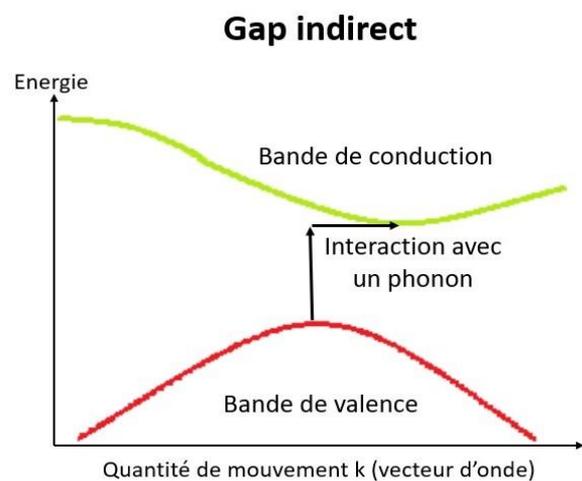


Figure 8: Schéma du gap indirect pour un semi-conducteur

Dans le cas de semi-conducteur à gap direct, la recombinaison radiative des électrons et des trous peut se faire à travers la bande interdite par simple émission de photons, ce qui rend la transition radiative très probable. Tandis que dans le cas de semi-conducteur à gap indirect, la recombinaison des porteurs de charge nécessite en supplément l'interaction avec des phonons du réseau cristallin; ce qui va donc rendre la transition radiative bien moins probable car la recombinaison radiative des porteurs y est bien plus lente.

C'est donc cette émission de photons permise par la recombinaison des paires électrons-trous qui donne lieu à une émission de lumière. L'émission de phonons va entraîner une augmentation de la température du matériau.

Afin d'obtenir suffisamment de lumière émise et donc un signal détectable, il est nécessaire que l'intensité de la source d'excitation soit assez intense.

La probabilité d'émettre un photon pour du silicium massif (Figure 10) est donc quasi nulle. Réduire sa taille à l'état de nanocristaux est une nécessité afin d'augmenter la probabilité de présence et donc la possibilité d'émettre un photon (Figure 9). En effet le trou ou l'électron peut se "déplacer" seulement sous la courbe de la fonction d'onde (courbe gaussienne), plus la fonction d'onde sera étalée, plus la probabilité de présence augmente. Ce qui entraîne une possibilité de recombinaison entre le trou et l'électron étant donné qu'ils peuvent être sur la même verticale.

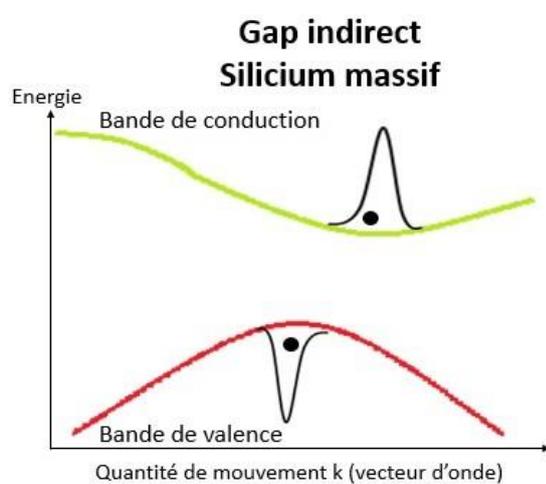


Figure 10: Cas du silicium massif

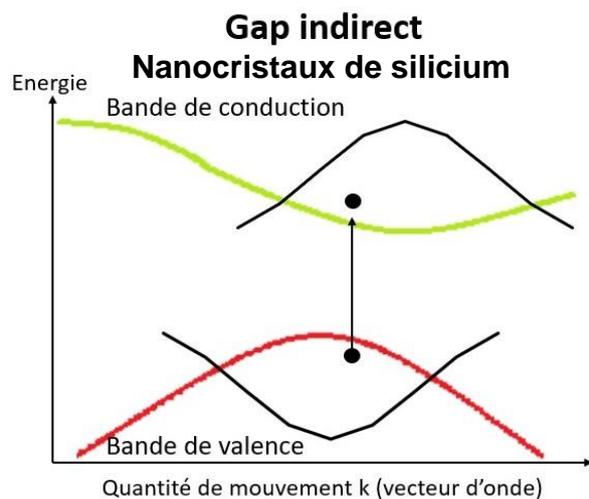


Figure 9: Cas des nanocristaux de silicium

Il est donc primordial de mettre le silicium sous forme de nanocristaux afin d'en tirer le meilleur profit en terme de luminescence. Mais comment ces nanocristaux de silicium sont-ils formés ?

### 3.3. Formation des nanocristaux de Si dans des matrices type SiO<sub>2</sub>

Plusieurs techniques peuvent contribuer à la formation de nanocristaux de Si dans des matrices de type SiO<sub>2</sub>.

Premièrement, l'obtention de silicium poreux a été l'une des premières formes de nanostructure du silicium. Le silicium poreux est obtenu grâce à la dissolution électrochimique au sein d'un électrolyte, du silicium sous la forme cristalline.

Une deuxième méthode consiste en l'obtention de nanocristaux de silicium par implantation ionique. Pour se faire, des ions de silicium initialement présents dans une matrice de silice sont bombardés par de très hautes énergies pouvant atteindre plusieurs centaines de keV. La formation de nanocristaux est ensuite obtenue par diffusion des ions Si dans la matrice, lors d'un recuit à 1000°C. La taille des nanocristaux de silicium peut varier en fonction de la concentration initialement présente en ions.

Lors d'une co-pulvérisation magnétron active, une matrice de SiO<sub>2</sub> contenant du silicium en excès est obtenue, après que des atomes de SiO<sub>2</sub> et de Si soient ôtés simultanément d'une cible puis déposés sur un substrat. Ici encore, la formation de nanocristaux de silicium se fait par apparition d'agrégats de silicium ayant migré lors d'un recuit entre 900°C et 1100°C. Au cours de cette technique, la température de recuit joue un rôle sur la taille des nanocristaux.

Cependant, ces trois méthodes comportent un inconvénient majeur : le contrôle de la taille des nanocristaux est incertain, ce qui implique une grande dispersion de leur taille.

C'est donc sur une dernière méthode que nous allons nous concentrer : les « **super réseaux** » ou **multicouches Si/SiO<sub>2</sub>, SiO/SiO<sub>2</sub>** (Figure 11)

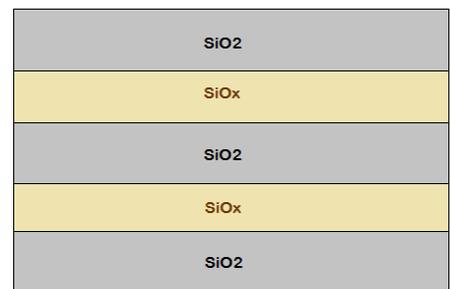


Figure 11: Réseau multicouche

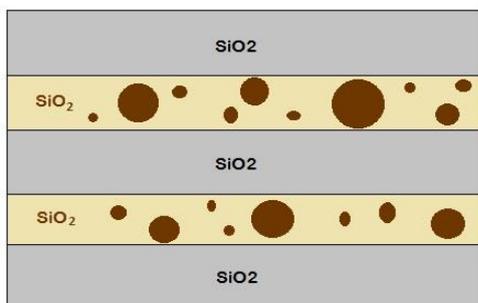


Figure 12: Agrégats de silicium pur et cristallisé

Lors de cette technique, des couches successives de SiO<sub>2</sub> et SiO<sub>x</sub> (formées par évaporation ou pulvérisation) sont empilées les unes sur les autres au sein d'une matrice, créant un super réseau. C'est la couche de SiO<sub>x</sub> riche en silicium, homogène et instable qui va pouvoir en libérer, selon la formule suivante :



Encore une fois, c'est sous l'activation d'un recuit que la précipitation sous forme de nanoparticules va se faire.

Lors du recuit, l'excès de silicium va migrer et précipiter pour former des agrégats de silicium pur et cristallisé, qui vont continuer de grossir, jusqu'à atteindre deux phases bien distinctes : des nanocristaux de Silicium et une matrice de silice pure (Figure 12). Les plus gros nanocristaux vont ensuite continuer à grossir au dépend des plus petits (Figure 13).

Un des grands avantages de cette technique est le fait que la taille des nanoparticules de silicium peut aisément être contrôlée. En effet, les couches de SiO<sub>2</sub> initialement présentes dans le super réseau, forment des barrières de diffusion qui empêchent la progression de la taille des nanocristaux de silicium. Ainsi, le diamètre des nanocristaux ne peut excéder l'épaisseur de la couche de SiO<sub>x</sub>. A l'équilibre, on s'attend donc à obtenir des nanocristaux possédant tous la même taille : celle de l'épaisseur de la couche de SiO<sub>x</sub> initiale (Figure 13).

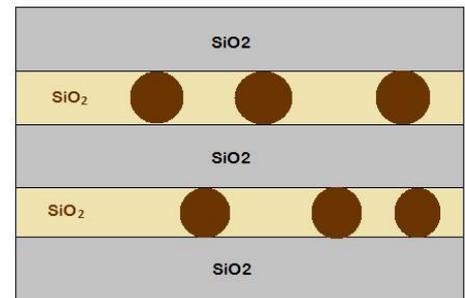


Figure 13: Nanocristaux de même taille

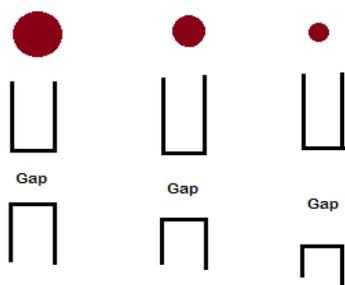


Figure 14: Largeur du gap en fonction de la taille du nanocristal

Le silicium étant un semi-conducteur, il est possible en contrôlant sa taille de contrôler la largeur de son gap et par conséquent, l'émission de photons qui va de pair : plus la taille diminue, plus la largeur du gap augmente et plus l'énergie d'émission du photon sera élevée (Figure 14).

De plus, l'excès en silicium incorporé dans la couche de SiO<sub>x</sub> influe également sur la photoluminescence des nanocristaux : plus l'excès de silicium sera important (plus l'épaisseur de SiO<sub>x</sub> sera importante), plus la taille des nanocristaux sera

grande et plus le spectre de photoluminescence se rapprochera des faibles énergies. Il en découle la relation suivante :

$$E_{\text{gap}} = E_0 + 3,73 / d^{1,39}$$

Pour résumer, l'avantage de l'obtention de nanocristaux de silicium par la technique du système multicouche est double en comparaison avec les trois méthodes précédemment citées :

- Comparé au silicium poreux qui a tendance à s'oxyder à l'air libre et à avoir une faible résistance mécanique et thermique, le réseau multicouche lui permet de protéger les nanocristaux au sein d'une matrice de SiO<sub>2</sub>.
- La taille des cristaux peut ici être facilement contrôlée grâce à l'importance de l'excès de silicium dans la couche de SiO<sub>x</sub> mais surtout grâce à des barrières constituées de SiO<sub>2</sub>, contrairement aux trois méthodes précédentes.

Pour conclure, comme évoqué dans la partie précédente, l'intérêt de former des nanocristaux de silicium est d'acquiescer une structure de silicium capable d'émettre des photons et d'ainsi avoir une photoluminescence, ce qui n'est pas le cas du silicium massif.

## 3.4. Applications des nanocristaux de silicium

### 3.4.1. Application en microélectronique

Le silicium est le matériau le plus adapté pour la microélectronique. En effet, les nanocristaux de Silicium sont très utilisés dans la fabrication de transistors (Transistor MOS). Effectivement, l'utilisation des nanocristaux de silicium a permis une diminution constante de la dimension des transistors ce qui a engendré l'augmentation constante des performances des systèmes microélectroniques avec une diminution des coûts de fabrication. Le nombre de Transistors est alors passé d'un millier à près de 2 milliards par puces en 2015. La dimension des Transistors était de l'ordre de 10 micromètres en 1970, de 1 micromètre en 1985 et en 2017, elle est de l'ordre de 10 nanomètres. Cependant la diminution constante de la dimension des systèmes microélectroniques dû à l'utilisation des nanocristaux de silicium peut atteindre une limite. En effet, si cette limite est atteinte, cela peut créer des fuites par effet tunnel empêchant le fonctionnement des dispositifs. Une solution plausible pour palier à ce problème est l'utilisation d'autres composés comme le germanium afin de le mélanger au silicium pour augmenter sa capacité diélectrique et ainsi empêcher les effets tunnels.

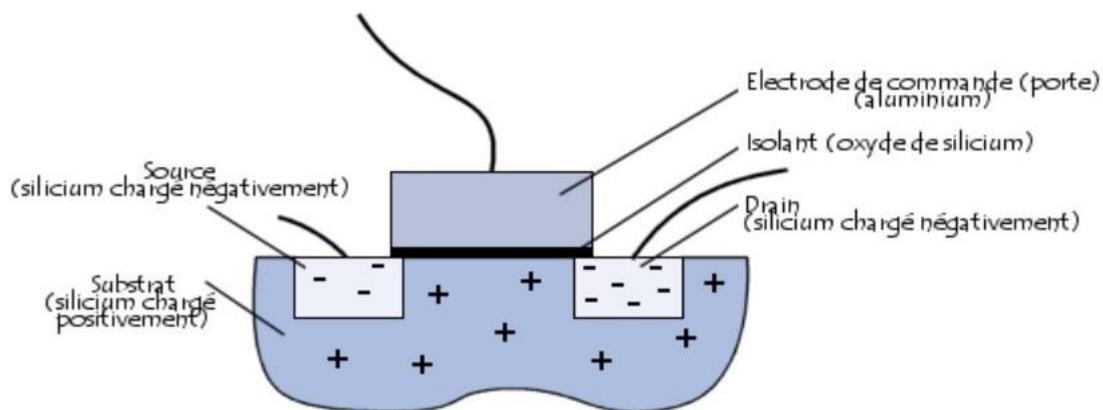


Figure 15 : Modèle de transistor

### 3.4.2. Application Photovoltaïque

Le silicium sous forme cristalline est généralement utilisé comme matériau semi-conducteur afin d'être utilisé comme cellule photovoltaïque basée sur une seule jonction p-n. On utilise deux types de silicium pour la fabrication des panneaux photovoltaïques, le silicium monocristallin et le silicium polycristallin.

Les cellules faites en silicium polycristallin, présentent un bon rapport performances-prix. Cependant la température a un impact considérable sur la production d'énergie. En effet, plus la température ambiante augmente, moins la quantité d'énergie produite est importante.



Figure 16 : Cellule polycristalline

Une cellule monocristalline est constituée d'un seul gros cristal. Les cellules monocristallines sont bleues foncées ou noires. Celles-ci présentent de bonnes performances et les pertes en atmosphère chaude sont faibles.



Figure 17 : Chaîne de fabrication du photovoltaïque

Le procédé d'absorption de la lumière est simple. En premier lieu, les photons qui composent la lumière du soleil vont heurter la surface du panneau solaire. Dans un deuxième temps, les électrons présents vont se mettre en mouvement dans une direction particulière engendrant un courant électrique continu.

En effet les photons dont l'énergie est supérieure au gap optique sont absorbés par des cellules photovoltaïques. Cela permet alors de créer une paire électron-trou qui va ensuite être séparée par le champ électrique créé par la jonction p-n. Puis cette paire va enfin être collectée par le circuit électrique permettant de créer un courant électrique. Le silicium a l'avantage d'avoir un gap presque optimal. En outre, les nanoparticules de silicium permettent d'obtenir un gap ajustable en raison de l'effet de confinement quantique. Dans l'optique de maximiser la quantité d'énergie produite et de minimiser les coûts de production, l'utilisation des nanotechnologies semble être parfaitement adaptée.

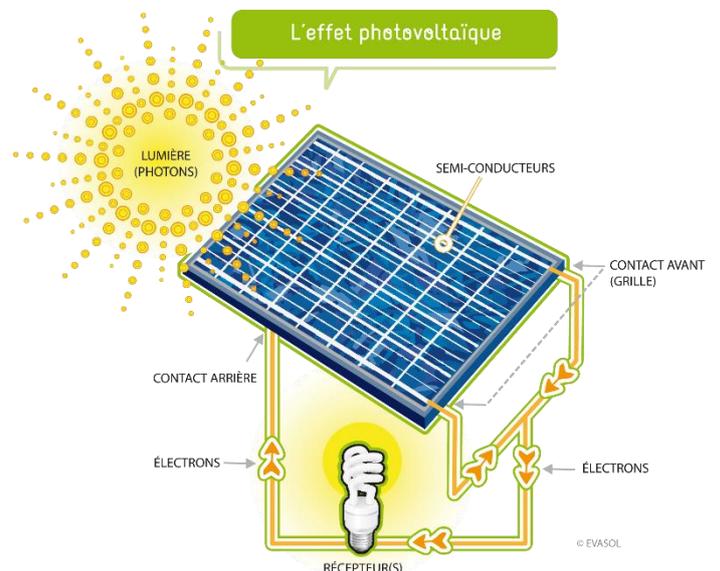


Figure 18 : Fonctionnement du panneau photovoltaïque

Effectivement, les boîtes quantiques de silicium permettent une abondance de silicium et un coût relativement faible en énergie.

### 3.4.3. Application dans l'imagerie médicale

En présence d'un rayonnement infrarouge, les nanoparticules de silice possèdent un rayonnement qui leur est propre elles sont également biocompatibles, ce qui les rend très utiles dans le domaine de l'imagerie médicale. C'est pourquoi aujourd'hui, les nanoparticules de silice sont de plus en plus utilisées en imagerie médicale. En effet, le rayonnement de celles-ci permet de suivre les déplacements de cellules cancéreuses et ainsi de localiser précisément les tumeurs. On greffe aux nanoparticules des fibres de polymères où sont attachés des éléments de détection des métastases afin que les nanoparticules de silice se fixent aux cellules cancéreuses.

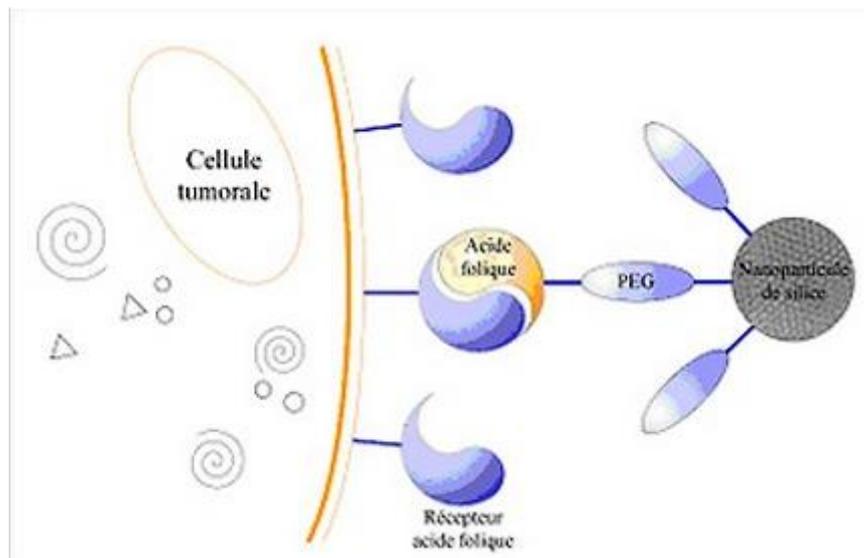


Figure 19 : Modèle de détection de cellules cancéreuses

L'utilisation du silicium présente plusieurs avantages. D'une part, notre corps possède naturellement du silicium qui est évacué dans l'urine. D'autre part, il est plus facile pour le médecin de suivre le déplacement des métastases grâce au silicium car celui-ci se dégrade très lentement permettant donc à la nanoparticule de rester intacte le plus longtemps possible.

### 3.4.4. Application des diodes électroluminescentes :

Des recherches ont montré que la conception de diodes électroluminescentes peut être réalisée grâce à l'utilisation des nanocristaux de silicium. L'impact de ces recherches est considérable dans le domaine des semi-conducteurs et particulièrement pour l'éclairage des écrans haute résolution.

Le silicium présente de nombreux avantages notamment pour l'environnement puisque ces LED sont donc conçues sans l'utilisation de métaux lourds. De plus, les nanocristaux de silicium ont également un impact sur le coût de fabrication puisque le silicium est très abondant contrairement au saphir généralement utilisé comme substrat pour la fabrication de LED.

Enfin, les SiLED pourraient permettre aux diodes électroluminescentes de remplacer définitivement les ampoules à incandescence. Le silicium a et aura donc un impact considérable dans le domaine de l'électronique grand public avec la démocratisation des écrans à haute définition que ce soit sur télévision, ordinateur ou téléphone portable.

En outre, les nanocristaux de silicium augmentent la stabilité et donc la durée de vie des LED.

Les réglages de la longueur d'onde et donc de la couleur émise sont acquis par séparation des nanoparticules suivant leur dimension. De plus, les développements révèlent une homogénéité considérable des zones lumineuses, ce qui est une propriété avantageuse pour la conception d'écrans.

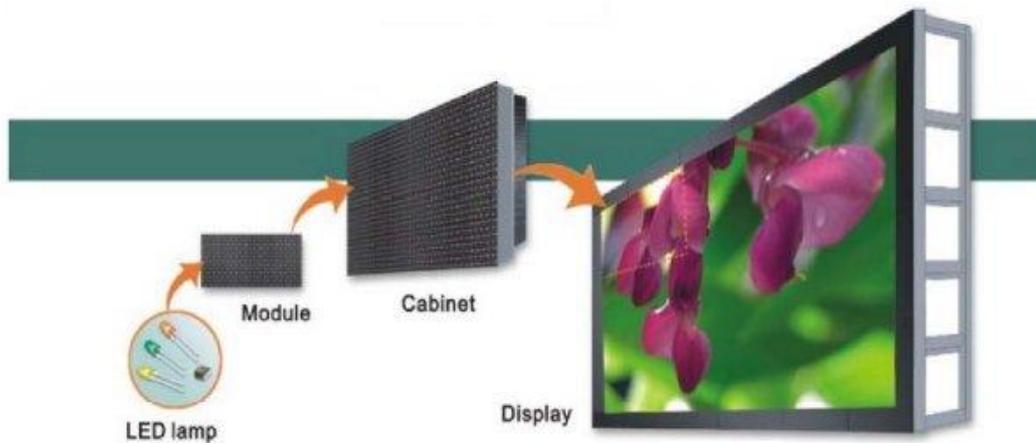


Figure 20: De la LED à l'écran

Au terme de cette analyse nous pouvons constater que les nanocristaux de silicium sont présents dans divers domaines qu'ils soient médicaux ou technologiques. Le silicium reste encore et toujours un matériau innovant qui ne cesse de faire progresser la science. Nous avons en effet pu constater qu'il existe des outils mathématiques permettant de connaître parfaitement le domaine d'émission des nanocristaux de silicium sans avoir recours à l'expérimental qui est très coûteux. Cela est très important car la taille des nanocristaux de silicium est déterminante selon les différentes applications que l'on peut en faire.

## 3.5. Modélisation du signal de photoluminescence

### 3.5.1. Présentation du modèle

On propose de modéliser la photoluminescence d'un échantillon de nanocristaux de silicium en utilisant l'intensité de la lumière émise (noté  $I$ ) en fonction de l'énergie nécessaire d'émission d'un photon (noté  $E$ ). Pour cela on utilise le modèle suivant :

$$I(E) \propto \frac{(C/(E - E_g))^{(6-\alpha+n)/n}}{nC\sigma} \exp\left(\frac{-[(C/(E - E_g))^{1/n} - L_0]^2}{2\sigma^2}\right)$$

Où :

- $L_0$  et  $\sigma$  sont le diamètre moyen des nanocristaux de l'échantillon et l'écart-type des diamètres de l'échantillon dans le cas d'une distribution des tailles de nanocristaux suivant une loi normale. Ils sont à exprimer en nanomètres (nm)
- $C$  et  $n$  sont des constantes liées au calcul du confinement quantique.  $C$  peut varier en fonction des différentes caractéristiques des matériaux utilisés, on considérera cependant  $C$  constant pour des échantillons produits avec le même procédé et dans les mêmes conditions.
- $\alpha$  dépend des propriétés du matériau et en particulier de l'éventail des tailles de nanocristaux contenus dans l'échantillon.
- $E_g$  est le gap du silicium massif et sa valeur vaut 1 eV.

Pour notre projet on considérera que les paramètres  $\alpha$  et  $n$  sont constants et valent respectivement 1,39 pour  $n$  et 3 pour  $\alpha$ .

### 3.5.2. Comportement du modèle (modification des paramètres)

Afin de mieux comprendre le modèle étudié, on observe le comportement de la courbe de  $I(E)$  quand on fait varier les différents paramètres. Comme notre modèle est une relation de proportionnalité on s'intéressera à la courbe de notre coefficient de proportionnalité ce qui nous permettra de récupérer la valeur de  $E$  pour laquelle l'intensité lumineuse est maximum et l'aspect de la courbe de  $I(E)$ .

#### Le paramètre $L_0$ :

Le diamètre des nanocristaux que nous étudions est de l'ordre de grandeur de quelques nanomètres ; on trace donc les courbes d'intensité lumineuse pour des valeurs de  $L_0$  comprises entre 1 nm et 6 nm et on obtient le résultat suivant :

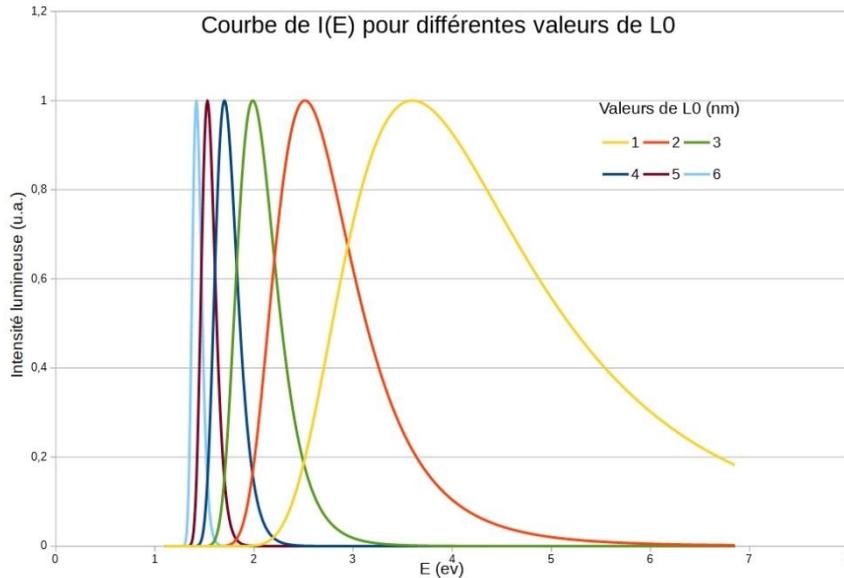


Figure 21: Courbes de  $I(E)$  pour différentes valeurs de  $L_0$

On remarque que plus la valeur de  $L_0$  augmente plus le maximum correspond à une faible valeur de  $E$  et plus la cloche est resserrée.

Ainsi d'après le modèle plus les nanocristaux sont larges plus l'émission de PL se fera dans les grandes longueurs d'onde (car un photon de faible énergie correspond à une grande longueur d'onde ( $E=h.c/\lambda$ )) et moins le spectre des longueurs d'ondes émises sera large.

### Le paramètre $\sigma$ :

Ici les valeurs possibles de  $\sigma$  dépendent de la valeur de  $L_0$  en effet comme les diamètres des nanocristaux ne peuvent pas sortir d'un certain intervalle, on ne fera pas varier directement  $\sigma$  mais le rapport  $\sigma/L_0$ . On se place dans le cas où  $L_0 = 3$  nm et on obtient donc les courbes suivantes :

courbes de  $I(E)$  pour différentes valeurs du rapport  $\sigma/L_0$  (ici  $L_0 = 3$  nm)

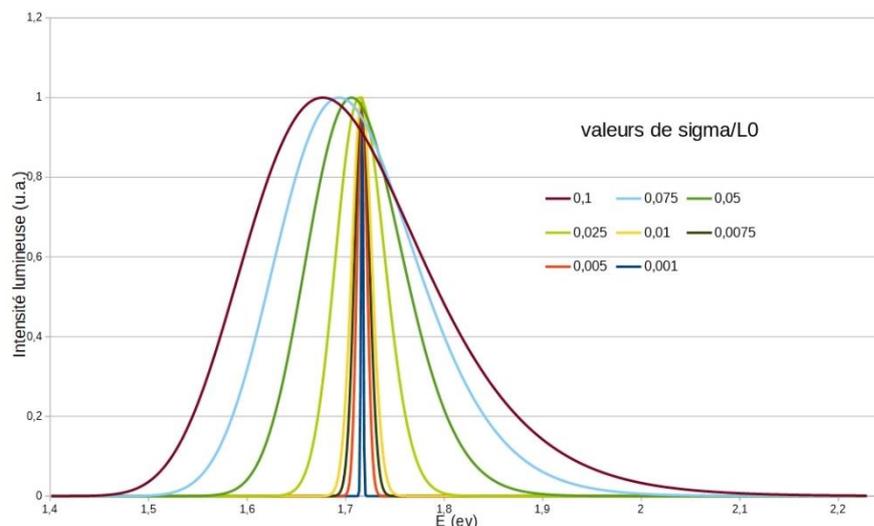


Figure 22: Courbes de  $I(E)$  pour différentes valeurs du rapport  $\sigma/L_0$

On peut observer que quand le rapport  $\sigma/L_0$  augmente la courbe a tendance à s'élargir et le maximum d'intensité lumineuse se décale dans le sens des E décroissants. Donc selon le modèle, plus les diamètres des nanocristaux d'un échantillon sont variables et plus la photoluminescence émettra de grandes longueurs d'ondes et plus le spectre de ces longueurs d'ondes s'élargira.

**Le paramètre C :**

Les valeurs prises par C sont en général de l'ordre de grandeur de quelques électrons-volts. On trace donc l'allure de quelques courbes correspondantes à ces valeurs.

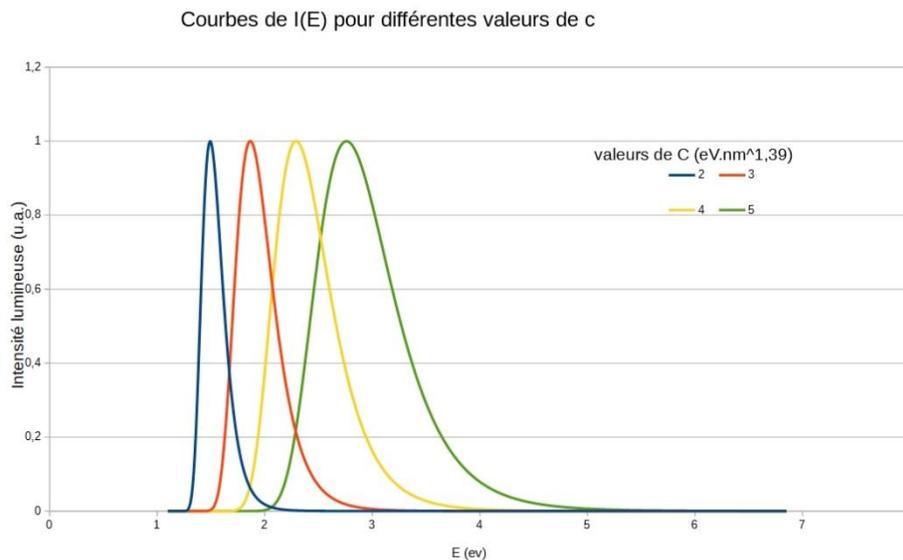


Figure 23: Courbes de I(E) pour différentes valeurs de C

On peut observer que quand C augmente, la courbe s'élargit légèrement et le maximum se décale dans le sens des E croissants. Donc plus le paramètre C est élevé, plus la photoluminescence émettra de grandes longueurs d'ondes et plus le spectre émis sera large.

**Contribution des paramètres à la position du maximum d'émission**

On sait que les trois paramètres  $L_0$ ,  $\sigma$  et C influent sur les longueurs d'onde émises par le phénomène de photoluminescence. On peut se demander à quel point ces paramètres influencent et si certains le font plus que d'autres. On propose pour cela de tracer l'évolution de la position du maximum en fonction des valeurs prises par les différents paramètres.

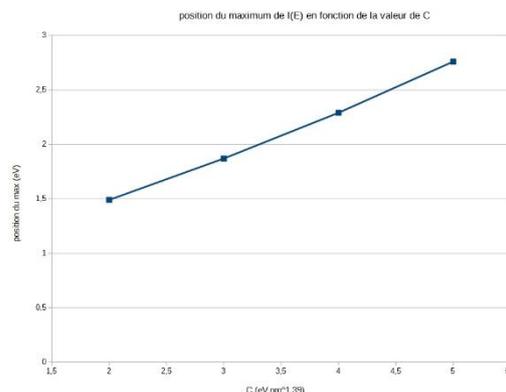


Figure 24: Position du maximum de I(E) en fonction de la valeur de C

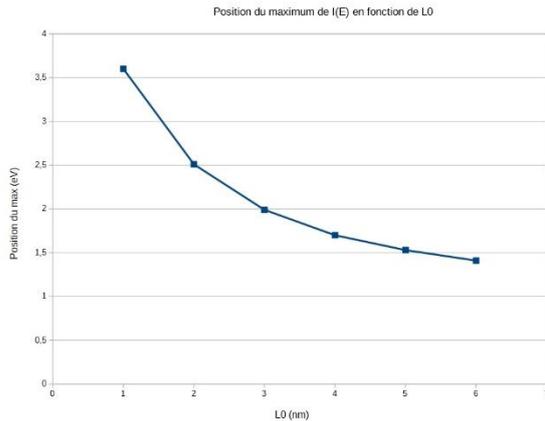


Figure 26: Position du maximum de  $I(E)$  en fonction  $L_0$

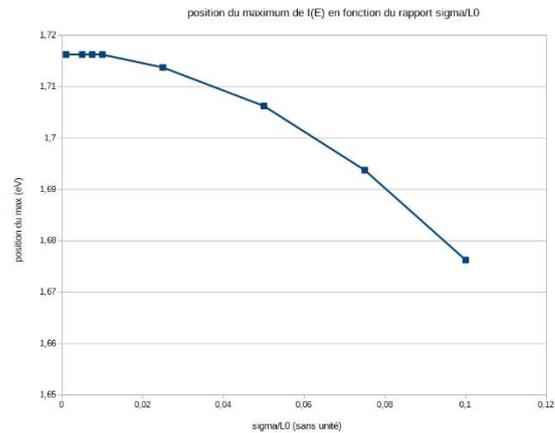


Figure 25: Position du maximum de  $I(E)$  en fonction du rapport  $\sigma/L_0$

On remarque que si le paramètre  $C$  semble avoir une influence constante sur la position du maximum (courbe linéaire) ce n'est pas le cas pour le paramètre  $L_0$  et le rapport  $\sigma/L_0$ . En effet pour  $L_0$  plus la position du maximum se stabilise quand la valeur de  $L_0$  augmente (profil de courbe hyperbolique). Pour le rapport  $\sigma/L_0$  on constate que la contribution augmente quand les valeurs du rapport augmentent.

On retrouve bien que plus les diamètres des nanocristaux sont faibles (donc plus  $L_0$  est petit) plus le spectre de photoluminescence se décale vers les hautes énergies et donc plus le gap sera large. Le modèle est donc en accord avec les propriétés des nanocristaux énoncées dans la partie bibliographique.

L'étude des paramètres du modèle nous permet de déterminer quel profil de répartition de tailles des nanocristaux correspond à quel profil de spectre de photoluminescence. En effet  $\sigma$  impactant surtout la largeur du spectre de photoluminescence, on utilisera donc des ensembles de nanocristaux dont les diamètres varient peu si l'on veut émettre une longueur d'onde précise. À l'inverse si l'on a besoin d'émettre une gamme de longueurs d'ondes plus large, on choisira des nanocristaux avec des diamètres très dispersés.

### 3.5.3. Comparaison avec des résultats expérimentaux

Afin de vérifier la validité du modèle et de tester ses limites, on compare les distributions de l'intensité lumineuse données par le modèle avec les distributions de trois échantillons : C743, C747 et C749.

Ces trois échantillons de nanocristaux ont été formés avec la méthode des multicouches  $\text{SiO}_x/\text{SiO}_2$ . Pour tous ces échantillons, on a empilé des couches de  $\text{SiO}_x$  de 4 nm avec des couches de  $\text{SiO}_2$  d'épaisseurs différentes pour chaque échantillon: 1,5 nm pour C743, 3nm pour C747 et 10 nm pour C749.

Les diamètres des nanocristaux de Silicium de chaque échantillon ont été calculés avant le début du projet, à partir d'expériences de sonde atomique tomographique. Afin d'obtenir les paramètres  $L_0$  et  $\sigma$  pour les différents échantillons, on utilise Matlab pour obtenir les paramètres de la loi normale se rapprochant le plus de la répartition des diamètres des nanocristaux dans l'échantillon.

On trace ensuite les histogrammes de répartition des diamètres de nanocristaux et on les compare avec les fonctions de répartition des lois normales correspondantes.

répartitions des diamètres des nanocristaux pour l'échantillon C743

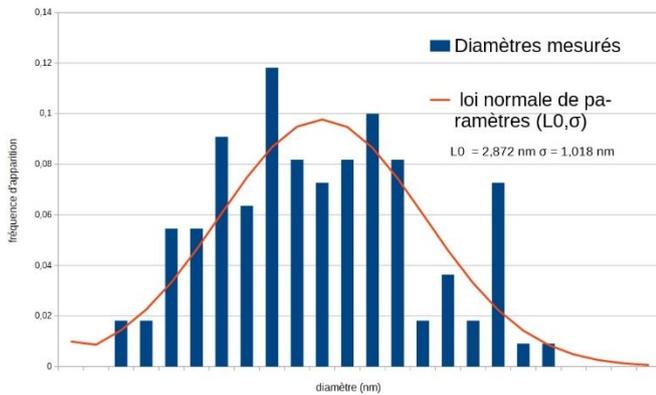


Figure 28: Répartition des diamètres des nanocristaux pour l'échantillon C743

répartitions des diamètres des nanocristaux pour l'échantillon C747

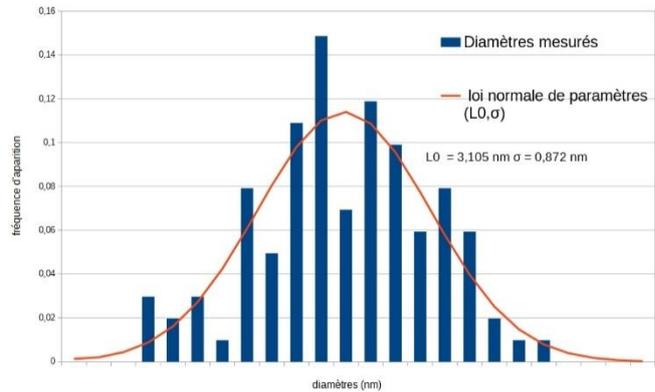


Figure 27: Répartition des diamètres des nanocristaux pour l'échantillon C747

répartitions des diamètres des nanocristaux pour l'échantillon C749

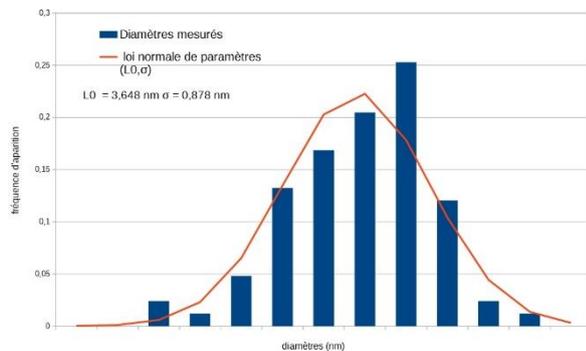


Figure 29: Répartition des diamètres des nanocristaux pour l'échantillon C749

On remarque que si les échantillons C743 et C747 ont des répartition proches de celle d'une loi normale, celle du C749 correspond moins à ce type de répartition (répartition non symétrique par rapport à la valeur de  $L_0$  et décroît rapidement après son maximum).

Il nous faut maintenant déterminer le paramètre  $C$  qui correspond à nos échantillons. Pour cela, on cherche la valeur de  $C$  qui approche le mieux les résultats expérimentaux à l'aide de l'équation suivante :

$$I(E) = a \frac{(C/E - Eg)^{(6-\alpha+n)/n}}{nC\sigma} \exp\left(\frac{-[(C/E - Eg)^{1/n} - L_0]^2}{2\sigma^2}\right)$$

Ici tous les échantillons étudiés proviennent du même endroit donc le paramètre  $C$  peut être considéré comme constant. On utilise la box "Curve fitting" de Matlab afin de déterminer les paramètres «  $a$  » (constante permettant d'ajuster les courbes en intensité) et  $C$  pour l'échantillon C747 et on obtient la courbe suivante :

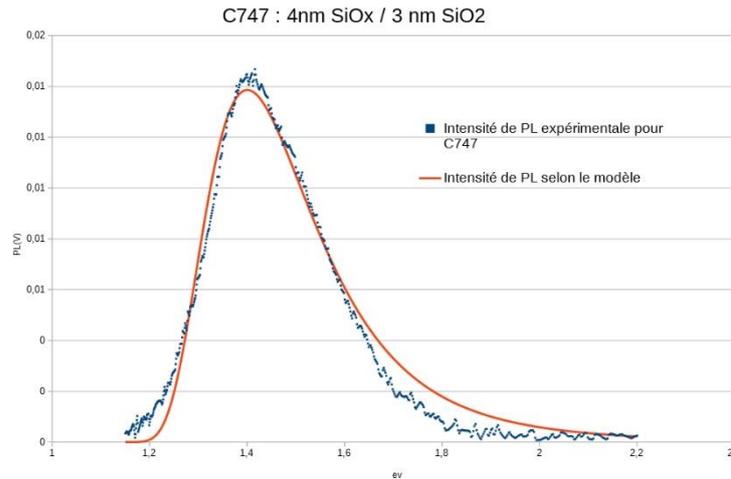


Figure 30: Courbe d'intensité de PL pour C747

On remarque que le modèle est très proche des résultats expérimentaux et on trouve  $C = 2,695 \text{ eV.nm}^{1.39}$ . Comme dit précédemment, les échantillons étant élaborés dans les mêmes conditions, on gardera cette valeur pour les 2 autres échantillons. En utilisant les paramètres L0 et sigma des échantillons C743 et C749 on peut alors obtenir les résultats suivant :

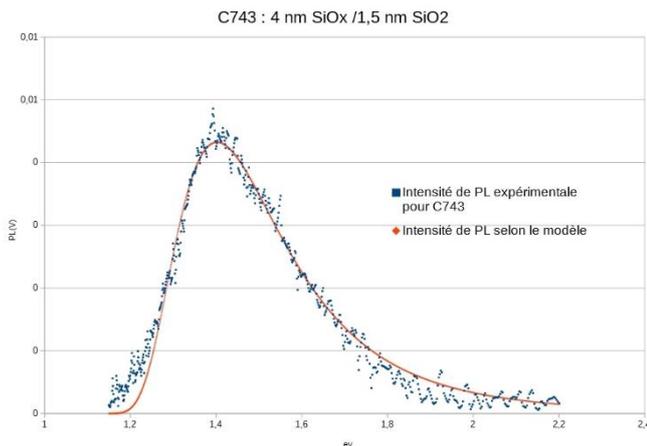


Figure 31: Courbe d'intensité de PL pour C743

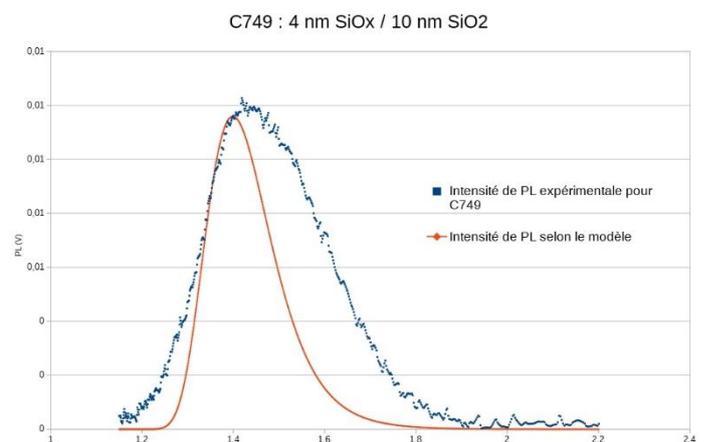


Figure 32: Courbe d'intensité de PL pour C749

On constate que le modèle semble bien correspondre aux valeurs expérimentales pour l'échantillon C743 de plus si on cherche les meilleurs paramètres « a » et C pour C743 on retrouve un C proche de celui fixé précédemment (2.692). En revanche pour l'échantillon C749, les valeurs expérimentales correspondent beaucoup moins au modèle. On rappelle cependant que pour cet échantillon la répartition des tailles des nanocristaux correspond moins à une loi normale que pour les deux autres. Ceci peut donc expliquer que le modèle ne fonctionne plus dans ce cas.

On peut donc établir le constat suivant : le modèle permet d'approcher efficacement le spectre de photoluminescence pour des échantillons de nanocristaux dont les diamètres sont répartis selon une loi normale. Cependant quand la distribution de tailles suit une répartition différente, la modélisation s'écarte du spectre de photoluminescence déterminé expérimentalement. Le modèle semble donc valide mais est contraignant car il ne peut pas être appliqué à n'importe quel échantillon.

## 4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Pour conclure, ce projet nous a amené à travailler sur les nanocristaux de silicium et plus particulièrement sur la luminescence qui en résulte. Nous avons pu voir que la maîtrise de la formation de nanocristaux et le contrôle de leur taille rendent possible l'obtention d'une certaine luminescence. En effet, nous avons pu constater que, grâce au modèle de spectre de photoluminescence, lorsque nous jouons sur la taille des diamètres des nanocristaux ainsi que sur leur répartition nous pouvons contrôler le spectre de photoluminescence. La connaissance de ce principe sert de nos jours dans de nombreux domaines d'applications tels que les écrans et les panneaux photovoltaïques.

Pour aller plus loin dans ce projet, nous aurions pu travailler sur d'autres formes de distributions afin d'ajuster le modèle. Nous aurions pu également nous demander si le modèle était toujours valable dans le cas d'une distribution normale pour un échantillon dopé. Effectivement, le silicium dopé c'est-à-dire dans lequel ont été insérés d'autres atomes afin d'augmenter sa conductivité, est plus performant et se rapproche du silicium utilisé dans les technologies d'aujourd'hui.

Enfin sur un plan plus personnel, ce projet a enrichi nos connaissances aussi bien dans le domaine scientifique que pour notre culture générale. Etant donnée l'utilisation courante du silicium dans les nouvelles technologies d'aujourd'hui dont nous nous servons constamment au quotidien comme notre téléphone portable. Nos compétences informatiques ont également été approfondies avec l'utilisation de divers logiciels comme Paint, la suite Microsoft Office et Matlab. De plus, cela nous a permis de développer une cohésion de groupe et d'acquérir des méthodes de travail qui seront importantes pour notre future carrière d'ingénieur.

## 5. BIBLIOGRAPHIE

- David AMANS. Microsources photoniques à base de nanocristaux de silicium. [En ligne]. Validé à la date du 28/05/2018. Disponible à l'adresse : [http://bibli.ec-lyon.fr/exl-doc/TH\\_T1891\\_damans.pdf](http://bibli.ec-lyon.fr/exl-doc/TH_T1891_damans.pdf)
- Introduction aux semi-conducteurs. [En ligne]. Validé à la date du 28/05/2018. Disponible à l'adresse : <https://openclassrooms.com/courses/l-electronique-de-zero/introduction-aux-semi-conducteurs>
- La chimie du silicium. [En ligne]. Validé à la date du 28/05/2018. Disponible à l'adresse : <http://www.astrosurf.com/luxorion/bioastro-chimiesi.htm>
- Silicium-Si. [En ligne]. Validé à la date du 28/05/2018. Disponible à l'adresse : <https://www.lenntech.fr/periodique/elements/si.htm>
- A. CHOVET et P. MASSON. Physique des semi-conducteurs. [En ligne]. Validé à la date du 28/05/2018. Disponible à l'adresse : <http://clasesadomicilio.wifeo.com/documents/Cours-de-physique-des-SC---Poly---BAC-3.pdf>
- C. DONNE et O. CONTE. Photoluminescence. [En ligne]. Validé à la date du 28/05/2018. Disponible à l'adresse : <http://physique.unice.fr/sem6/2016-2017/PagesWeb/PT/Surfaces/nupl.html>
- Photoluminescence. [En ligne]. Validé à la date du 28/05/2018. Disponible à l'adresse : <http://physique.unice.fr/sem6/20132014/PagesWeb/PT/Heterostructure/page9.html#titre9>
- Luminescence. [En ligne]. Validé à la date du 28/05/2018. Disponible à l'adresse : <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-luminescence-10069/>
- P.E. JANOLIN. De l'effet photovoltaïque aux cellules photoélectriques. [En ligne]. Validé à la date du 28/05/2018. Disponible à l'adresse : <https://www-techniques-ingenieur-fr.ezproxy.normandie-univ.fr/base-documentaire/sciences-fondamentales-th8/fondamentaux-en-chimie-42106210/de-l-effet-photovoltaique-aux-cellules-photoelectriques-af6240/anatomie-d-une-cellule-photovoltaique-af6240niv10002.html#niv-s11226918>
- Gap direct et gap indirect. [En ligne]. Validé à la date du 28/05/2018. Disponible à l'adresse : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Gap\\_direct\\_et\\_gap\\_indirect](https://fr.wikipedia.org/wiki/Gap_direct_et_gap_indirect)

- J. BARBE. Fabrication et caractérisation de nanocristaux de silicium encapsulés dans des matrices siliciées amorphes : rôle des interfaces et de la matrice sur les propriétés structurales, optiques et électriques. [En ligne]. Validé à la date du 28/05/2018. Disponible à l'adresse : <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00904856/document>
- T.T NGUYEN. Synthèse et contrôle de la taille de nanocristaux de silicium par plasma froid. Application dans les domaines de l'optoélectronique et de la nanoélectronique. [En ligne]. Validé à la date du 28/05/2018. Disponible à l'adresse : <https://pastel.archives-ouvertes.fr/pastel-00004159/document>
- R. BOULESTIN. Des LED en nanocristaux de silicium mises au point par des chercheurs. [En ligne]. Validé à la date du 28/05/2018. Disponible à l'adresse : [https://www.silicon.fr/des-led-en-silicium-monocristallin-mises-au-point-par-des-chercheurs-83812.html?inf\\_by=5a7de8b4681db876708b45f6](https://www.silicon.fr/des-led-en-silicium-monocristallin-mises-au-point-par-des-chercheurs-83812.html?inf_by=5a7de8b4681db876708b45f6)
- P. REISS et F. CHANDEZON. Nanocristaux semi-conducteurs fluorescents. Des nanoparticules aux applications multiples. [En ligne]. Validé à la date du 28/05/2018. Disponible à l'adresse : <https://www-techniques-ingenieur-fr.ezproxy.normandie-univ.fr/base-documentaire/innovation-th10/nanotechnologies-pour-l-electronique-l-optique-et-la-photonique-42198210/nanocristaux-semi-conducteurs-fluorescents-des-nanoparticules-aux-applications-multiples-nm2030/>
- Nanomatériaux pour la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire. [En ligne]. Validé à la date du 28/05/2018. Disponible à l'adresse : <https://www.researchgate.net/profile/Jean-Francois-Guillemoles/publication/260267100/Chapter/5-Nanomateriaux-pour-la-conversion-photovoltaique-de-l-energie-solaire/links/02e7e53068d13091e4000000/Chapitre-5-Nanomateriaux-pour-la-conversion-photovoltaique-de-lenergie-solaire.pdf>
- G. LEDOUX et B. MASENELLI. Nanomatériaux luminescents. [En ligne]. Validé à la date du 28/05/2018. Disponible à l'adresse : <https://www-techniques-ingenieur-fr.ezproxy.normandie-univ.fr/base-documentaire/innovation-th10/nanotechnologies-pour-l-electronique-l-optique-et-la-photonique-42198210/nanomateriaux-luminescents-nm2025/applications-nm2025niv10002.html>
- B. DRIDI REXGUI. Etude des propriétés optiques, électriques et structurales de nanoparticules de silicium insérées dans une matrice diélectrique et étude de leur intégration pour des cellules photovoltaïques à haut rendement [En ligne]. Validé à la date du 28/05/2018. Disponible à l'adresse : <http://theses.insa-lyon.fr/publication/2010ISAL0090/these.pdf>
- Médecine et nanotechnologies. [En ligne]. Validé à la date du 28/05/2018. Disponible à l'adresse : <https://nanosciencesmedecine.wordpress.com/nanotechnologie-dans-la-medecine/>

- Nadri. Modélisation de la microstructure des grains dans le silicium multicristallin pour le photovoltaïque. [En ligne]. Validé à la date du 28/05/2018. Disponible à l'adresse : [https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00870335/file/19874\\_NADRI\\_2012\\_archivage.pdf](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00870335/file/19874_NADRI_2012_archivage.pdf)
- Quel est le processus technique de production des panneaux photovoltaïques ? [En ligne]. Validé à la date du 28/05/2018. Disponible à l'adresse : <http://www.evasol.fr/P-15-129-E1-la-chaine-technique-du-photovoltaïque.html>
- Comment fonctionnent les panneaux photovoltaïques ? [En ligne]. Validé à la date du 28/05/2018. Disponible à l'adresse : <http://panneaux-solaires-photovoltaïques.evasol.fr/photovoltaïque-pourquoi-fois-je-le-faire.html>
- Projet photovoltaïque. [En ligne]. Validé à la date du 28/05/2018. Disponible à l'adresse : <http://projet.solaire.drome.free.fr/Pages/Panneaux-photovoltaïque-comment-choisir.html>

Parties de thèse envoyées par notre tuteur :

- Etude bibliographique
- Les nanoparticules de silicium : de l'élaboration aux applications
- Du silicium massif au silicium nanométrique

## 6. INDEX DES ILLUSTRATIONS

Figure 1: Analogie de l'effet tunnel .....	5
<a href="https://www.matierevolution.fr/spip.php?article3126">https://www.matierevolution.fr/spip.php?article3126</a>	
Figure 2: Élément de silicium.....	8
<a href="https://www.biologik.com/2018/01/silicium-mineral-capital-sante-humaine/">https://www.biologik.com/2018/01/silicium-mineral-capital-sante-humaine/</a>	
Figure 3: Bande permise/Bande interdite .....	8
Figure 4: Disposition des différentes bandes .....	9
Figure 5: Emission de photon lors de la photoluminescence .....	10
<a href="http://physique.unice.fr/sem6/2013-2014/PagesWeb/PT/Heterostructure/page9.html#titre9">http://physique.unice.fr/sem6/2013-2014/PagesWeb/PT/Heterostructure/page9.html#titre9</a>	
Figure 6: Principe de la photoluminescence .....	10
<a href="http://physique.unice.fr/sem6/2016-2017/PagesWeb/PT/Surfaces/exppl.html">http://physique.unice.fr/sem6/2016-2017/PagesWeb/PT/Surfaces/exppl.html</a>	
Figure 7: Schéma du gap direct pour un semi-conducteur.....	11
Figure 8: Schéma du gap indirect pour un semi-conducteur.....	11
Figure 10: Cas des nanocristaux de silicium.....	12
Figure 9: Cas du silicium massif .....	12
Figure 11: Réseau multicouche .....	13
Figure 12: Agrégats de silicium pur et cristallisé .....	13
Figure 13: Nanocristaux de même taille .....	14
Figure 14: Largeur du gap en fonction de la taille du nanocristal .....	14
Figure 15 : Modèle de transistor .....	15
<a href="http://abmag.online.fr/CommentCaMarche/pc/cpu.htm">http://abmag.online.fr/CommentCaMarche/pc/cpu.htm</a>	
Figure 16 : Cellule polycristalline.....	15
<a href="http://projet.solaire.drome.free.fr/Pages/Panneaux-photovoltaïque-comment-choisir.html">http://projet.solaire.drome.free.fr/Pages/Panneaux-photovoltaïque-comment-choisir.html</a>	
Figure 17 : Chaîne de fabrication du photovoltaïque.....	156
<a href="http://www.evasol.fr/P-15-129-E1-la-chaîne-technique-du-photovoltaïque.html">http://www.evasol.fr/P-15-129-E1-la-chaîne-technique-du-photovoltaïque.html</a>	
Figure 18 : Fonctionnement du panneau photovoltaïque .....	16
<a href="http://panneaux-solaires-photovoltaïques.evasol.fr/photovoltaïque-pourquoi-fois-je-le-faire.html">http://panneaux-solaires-photovoltaïques.evasol.fr/photovoltaïque-pourquoi-fois-je-le-faire.html</a>	
Figure 19 : Modèle de détection de cellules cancéreuses.....	17
<a href="http://nanotech35.e-monsite.com/pages/2-applications-dans-la-medecine/medecine-preventive-1/ciblage/page-1.html">http://nanotech35.e-monsite.com/pages/2-applications-dans-la-medecine/medecine-preventive-1/ciblage/page-1.html</a>	
Figure 20: De la LED à l'écran.....	18
<a href="http://www.solar-constructions.com/wordpress/ecran-led/">http://www.solar-constructions.com/wordpress/ecran-led/</a>	
Figure 21: Courbes de I(E) pour différentes valeurs de L0 .....	20
Figure 22: Courbes de I(E) pour différentes valeurs du rapport sigma/L0 .....	20
Figure 23: Courbes de I(E) pour différentes valeurs de C.....	21
Figure 24: Position du maximum de I(E) en fonction de la valeur de C.....	21

Figure 25: Position du maximum de $I(E)$ en fonction du rapport $\sigma/L0$ .....	22
Figure 26: Position du maximum de $I(E)$ en fonction $L0$ .....	22
Figure 27: Répartition des diamètres des nanocristaux pour l'échantillon C747 .....	23
Figure 28: Répartition des diamètres des nanocristaux pour l'échantillon C743 .....	23
Figure 29: Répartition des diamètres des nanocristaux pour l'échantillon C749 .....	23
Figure 30: Courbe d'intensité de PL pour C747 .....	24
Figure 31: Courbe d'intensité de PL pour C743 .....	24
Figure 32: Courbe d'intensité de PL pour C749 .....	24

Les autres images, schémas et courbes ont été produits par nous-mêmes.