



**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**Université Abbes Laghroukhenchela**

**Faculté des Science et de la Technologie**

**Département de Génie Industriel**

**Mémoire de fin d'étude**

**Pour l'obtention du diplôme de Master**

**Filière : Automatique**

**Spécialité : Automatique et Informatique Industriel**

**Thème**

**Etude par simulation d'un  
conditionneur du signal d'un**

**Présenté par:**

- ❖ MILEK CHAHRA
- ❖ ZEDIRA MED AMINE

**Soutenu :Septembre / 2021**

**DEVANT LE JURY:**

Univ. Abbes Laghrour-  
Khenchela

Mme. AOURAGH SALIMA Président :

Univ. Abbes Laghrour-  
Khenchela

Mr.DJEMOUI DJAMAI Promoteur :

Univ. Abbes Laghrour-  
Khenchela

Mr. BOUMAARAF ABDAALI Examineur  
:

Année universitaire : 2020 /2021

---

---

## REMERCIEMENTS

*Nous remercions **ALLAH** qui nous aide et nous donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude*

*Toute notre gratitude va vers notre encadreur,  
Mr**DJEMOUAI DJAMAI**, pour la confiance qu'elle nous  
accordée en acceptant d'encadrer ce travail.*

*On tient aussi à remercier **Mme. AOURAGH SALIMA** qui a  
fait l'honneur de présider notre jury de soutenance.*

*Nos profonds remerciements vont aussi à **Mr.**  
**BOUMAARAF ABDAALI** qui a aimablement accepté  
d'examiner ce travail.*

---

## **DEDICACE**

A nos familles  
A tous nos amis  
A tous nos collègues  
Nous dédions ce travail

**AMINE et CHAHRA**

# SOMMAIRE

Liste des Tableaux.....	I
Liste des figures.....	II
Liste des abréviations.....	V
Introduction générale.....	1

## Chapitre 1. LE LHC ET DETECTEURS DE PARTICULES

1.1. Le grand accélérateur d'hadrons LHC.....	5
1.2. Détecteur des particules de pixels en physique des particules.....	8
1.3. Détecteur micro-strip.....	8
1.4. Détecteur pixels hybrides.....	12
1.5. Détecteur monolithique.....	12
Les captures planaire.....	13
Bords fins et actifs .....	13
Taille de cellule de pixel plus petite avec RD53A .....	13
Les captures 3D.....	14
Conclusion.....	16

## Chapitre 2. DETECTEURS A BASE DE SILICIUM

2.1. Détecteurs de silicium .....	18
-----------------------------------	----

2.2. Jonction p-n.....	18
2.3. Détecteurs de particules.....	23
2.4. Détecteurs semi-conducteurs.....	24
Conclusion.....	27

### **Chapitre 3. LOGICIEL PSPICE**

3.1. Logiciel PSPICE.....	38
3.1.1 Introduction.....	38
3.2. Les Icônes de simulation avec PSPICEORCAD.....	40
3.2.1. Icônes d’Orcad Capture relatives à la simulation.....	40
3.2.2. Icônes d’Orcad PSPICE.....	41
3.3. Unités.....	43
3.3.1 Particularités d’un schéma destiné à être simulé.....	44
3.4. Définition des signaux d’entrée.....	44
3.4.1 Sources analogiques.....	44
3.4.2 Autres sources.....	48
3.4.3 Sources logiques.....	39
3.4.4. Editeur de stimulus.....	40
3.5. Spécification des signaux à visualiser.....	43
3.6. Les profils de simulation.....	44
3.6.1 Création d’un profil de simulation.....	44
3.6.2. Modification d’un profil de simulation.....	46
3.6.3. Ajout d’un profil de simulation.....	46
3.7. Lancement d’une simulation.....	47
3.7.1. Lancement du simulateur.....	47
3.7.2 Erreurs possibles.....	47
3.8. Exploitation d’une simulation.....	49

3.8.1. Affichage des points calculés.....	49
3.8.2. Ajout de courbes sans revenir dans Capture.....	49
3.8.3. Ajout de courbes.....	50
3.8.4. Fonctions définies dans PSpice.....	50
3.8.5. Ajout d'une fenêtre de visualisation de courbes.....	51
3.8.6. Sauvegarde des paramètres de visualisation.....	52
3.8.6. Utilisation des marqueurs.....	53
Conclusion.....	54

## **Chapitre 04. SIMULATIONS ET RESULTATS**

4.1 Structure modélisée et équations de base

4.2 Modèle comportemental du détecteur

**Annexes**

**Résumés**

# Liste des figures

**Figure 1** : Le grand collisionneur d'hadrons.

**Figure 2** : Vue schématique de l'ensemble du détecteur compact à solénoïde à muons.

**Figure 3** : Installation du détecteur ATLAS.

**Figure 4** : Schéma d'un détecteur microstrip a une seule cote [31].

**Figure 5** : schématique d'un détecteur à pixels hybrides [32].

**Figure 6** : Section transversale d'un des premiers détecteurs pixels monolithiques

Développe [31].

**Figure 7** : Jonction p-n abrupte : a) densité d'atomes d'impuretés ; b) densité de charge due aux atomes d'impuretés ionisés ; c) champ électrique sur la structure ; d) répartition du potentiel sur la jonction.

**Figure 8** : Principe de fonctionnement d'un détecteur de particules de silicium entièrement appauvri.

**Figure 9** : Détecteurs semi-conducteurs. a) diode à barrière de surface ; b) diode au silicium compensé au lithium.

**Figure 10** : Détecteur semi-conducteur a) schéma électrique équivalent; b) amplificateur de charge associé.

**Figure 11** : Schéma d'une coupe d'un détecteur en Si-a :H. Les paires électron-trou sont générées à la position  $x_0$  dans la région déplétée. Les électrons générés diffusent jusqu'à  $x=d$  ( $x=0$ ) puis ils sont collectés.

**Figure 12** : Schéma SPICE du circuit équivalent de détecteur

**Figure 13** : Le circuit électronique utilisé pour la simulation du conditionneur de capteur par PSPICE

**Figure 14** : Intégrale du signal représentant la charge totale collectée par 1000e- créés à la position  $x_0$  de la région déplétée du détecteur, pour une diode d'épaisseur de  $20\mu\text{m}$  et une polarisation inverse de 200V.

**Figure 15** : Courant absolu généré par 1000e- créés à la position  $x_0$  de la région déplétée du détecteur, pour une diode d'épaisseur de  $20\mu\text{m}$  et une polarisation inverse de 200V.

**Figure 16** : Intégrale du signal représentant la charge totale collectée par 10800e- pour une diode d'épaisseur de  $20\mu\text{m}$  pour différentes tensions de polarisation inverse

## Liste des tableaux

**Tableau 4-1**: Résumé des caractéristiques géométriques de la conception du capteur [6]

**Tableau 3-1** : Groupes de commandes Atlas avec les instructions principales dans chaque groupe [48].

## Liste des symboles

$N_A$  \_ Densité d'atomes d'impuretés accepteurs

$N_D$  \_ Densité d'atomes d'impuretés donneurs

$-x_p$  \_ limite de la région d'épuisement du côté p

$x_n$  \_ limite de la région d'épuisement du côté n

$E_F$  \_ Niveau d'énergie de Fermi

$V_{bi}$  \_ potentiel construit

$E_v$  \_ niveau d'énergie de la bande de valence

$E_c$  \_ niveau d'énergie de la bande de conduction

$\rho$  \_ densité de charge électrique

$\epsilon_s$  \_ permittivité du semi-conducteur

$q$ \_ Charge élémentaire  
 $E_{\max}$ \_ maxchamps électrique maximal  
 $W$ \_ largeur de la région d'épuisement  
 $D$ \_Épaisseur du détecteur  
 $V_{fd}$ \_ Tension d'épuisement complet  
 $C$ \_ capacité  
 $Q_c$ \_ charge par unité de surface  
 $A$ \_ zone active du détecteur  
 $J_s$ \_ courant de saturation  
 $D_p$ \_ Constante de diffusion des trous  
 $D_n$ \_ Constante de diffusion des électrons  
 $p_n0$ \_ densité de trous du côté n en équilibre  
 $n_p0$ \_ densité d'électrons du côté p en équilibre  
 $L_p$ \_ Longueur de diffusion des trous  
 $L_n$ \_ Longueur de diffusion des électrons  
 $G$ \_ courant de génération  
 $n_i$ \_ Concentration intrinsèque en porteurs  
 $\tau_{gen}$ \_ durée de vie de génération  
 $N_C$ \_ Densité d'états dans la bande de conduction  
 $N_V$ \_ Densité d'états dans la bande de valence  
 $E_g$ \_ Énergie de bande interdite  
 $k_B$ \_ Constante de Boltzmann  
 $n$ \_ Densité d'électrons  
 $p$ \_ Densité de trous  
 $\mu_n$ \_ Mobilité des électrons  
 $\mu_p$ \_ Mobilité des trous  
 $J_n$ \_ Densité de courant électronique  
 $J_p$ \_ Densité de courant de trou

$\tau_{eff}$  \_ constante de temps de piégeage efficace  
 $v_{dr}$  \_ Vitesse du porteur de charge  
 $E_v$  \_ Champ électrique causé par le potentiel de l'unité  
 $t_{dr}$  \_ temps de dérive  
 $n_0$  \_ densité électronique injectée  
 $(t)$  \_ courant transitoire  
 $(x)$  \_ Champ électrique  
 $(t)$  \_ courant du détecteur  
 $Q$  \_ frais collectés  
 $CCE$  \_ efficacité de collecte des charges  
 $CCE_g$  \_ facteur géométrique de CCE  
 $CCE_t$  \_ facteur de piégeage induit du CCE  
 $\varphi$  \_ potentiel électrostatique  
 $G_n$  \_ taux de génération d'électrons  
 $R_n$  \_ taux de recombinaison des électrons  
 $G_p$  \_ taux de génération des trous  
 $R_p$  \_ taux de recombinaison des trous

## Liste des abréviations

ALICE \_ Une grande expérience de collisionneur d'ions

ATLAS \_ Appareil toroïdal LHC

CCE \_ Efficacité de la collecte des charges

CERN \_ Organisation européenne pour la recherche nucléaire

CID \_ Détecteur à injection de courant

CMS \_ Solénoïde compact à muons

HEP \_ physique des hautes énergies

LHC \_ Grand collisionneur d'hadrons

RD39\_Collaboration CERN : Détecteurs cryogéniques de poursuite

RD48\_Collaboration CERN : Recherche et développement sur le silicium pour de futures expériences (ROSE)

RD50\_Collaboration CERN : Dispositifs semi-conducteurs à rayonnement dur pour collisionneurs à très haute luminosité

SCR \_ Région de charge d'espace

TCT \_ Technique de courant transitoire

# **Introduction**

## **générale**

### Introduction générale

Le grand collisionneur de hadrons (en anglais : *Large Hadron Collider-LHC*) de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN) est le plus grand accélérateur de particules au monde[1].

Lors de la première exécution réussie du LHC de 2010 à 2013, la dernière particule restante du modèle standard de physique des particules, le boson de Higgs, a été découverte [2], [3].

Au cours des prochaines années, le LHC sera mis à niveau et amélioré et la phase «haute luminosité» commencera en 2023. La luminosité instantanée sera multipliée par un facteur sept par rapport à la luminosité de conception du LHC ( $10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ). Cette amélioration est un défi pour les capteurs au silicium pixélisés qui sont des détecteurs de trace les plus précis pour le suivi des particules chargées dans les expériences de la physique des hautes énergies. Situés au plus près du point d'interaction, les capteurs en silicium sont tenus de fonctionner dans un environnement de rayonnement hostile [4].

L'objectif principal de ce travail est d'étudier une nouvelle structure de détecteur, implémentée sur un substrat de type p (n-on-p) avec un

bord actif et d'analyser ses caractéristiques électriques[5].

La recherche de solutions pour réduire significativement la taille de la région inactive des capteurs planaires n-on-p, à partir de simulations détaillées TCAD. Les pixels de la trajectographie actuelle d'ATLAS comportent des régions inactives en bord de capteur variant entre 200 et 1100  $\mu\text{m}$ . Dans ce mémoire, nous avons travaillé sur des structures de 100  $\mu\text{m}$  d'épaisseur fabriquées par ADVACAM-VTT [6].

Dans ces capteurs la région inactive sur le bord est seulement 100  $\mu\text{m}$ .

Les simulateurs Atlas, un des outils de simulation du logiciel SPICE Est utilisé pour étudier les performances électriques et pour la simulation du capteur... La tension de claquage, le courant de fuite, les distributions des porteurs de charge (trous, électrons) et la distribution du champ électrique avant irradiation sont présentés.

Ce mémoire se compose de quatre chapitres:

Le premier chapitre présente un bref aperçu du CERN, ses recherches et ses découvertes.

Dans le deuxième chapitre, des propriétés de base des détecteurs de particules à base de silicium sont décrites.

Le troisième chapitre est consacré à la description du logiciel PSPICE et les méthodes de simulation.

Le quatrième chapitre est consacré aux résultats de simulation

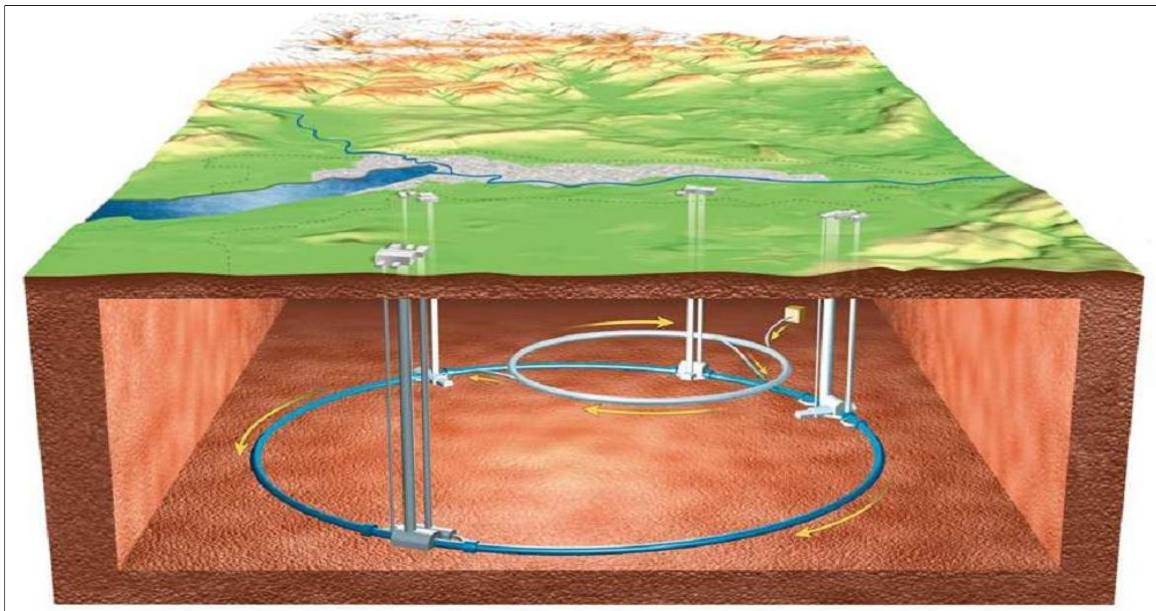
Enfin, nous terminons par une conclusion résumant les résultats de ce mémoire.

# **Chapitre 1**

## **Le LHC et détecteurs de particules**

### 1.1 Le grand accélérateur d'hadrons LHC

Le 10 septembre 2008, après vingt ans de planification et dix ans de construction, les premiers faisceaux circulent dans le plus grand et le plus puissant accélérateur de particules au monde - Large Hadron Collider (LHC) construit par l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire CERN. Il a été construit pour vérifier les prédictions de diverses théories de la physique des particules et trouver la particule de Higgs théorisée. Le LHC permet d'atteindre une plus grande énergie des particules en circulation et dispose de nouveaux dispositifs et méthodes pour explorer les propriétés des particules. Il



a une importance considérable pour la communauté scientifique internationale dans le domaine de la physique expérimentale des hautes énergies (HEP) [1]. Le grand collisionneur d'hadrons est illustré à la figure 1.

**Figure 1.** Le grand collisionneur d'hadrons [1].

De nos jours, le modèle standard est la théorie principale de toute la physique des particules. Le boson de Higgs est la pierre angulaire de ce modèle. Il s'agit d'une particule élémentaire scalaire massive théorisée par Peter Higgs [2]. Selon sa théorie, il a été prédit que les particules porteuses et les particules de matière interagissent.

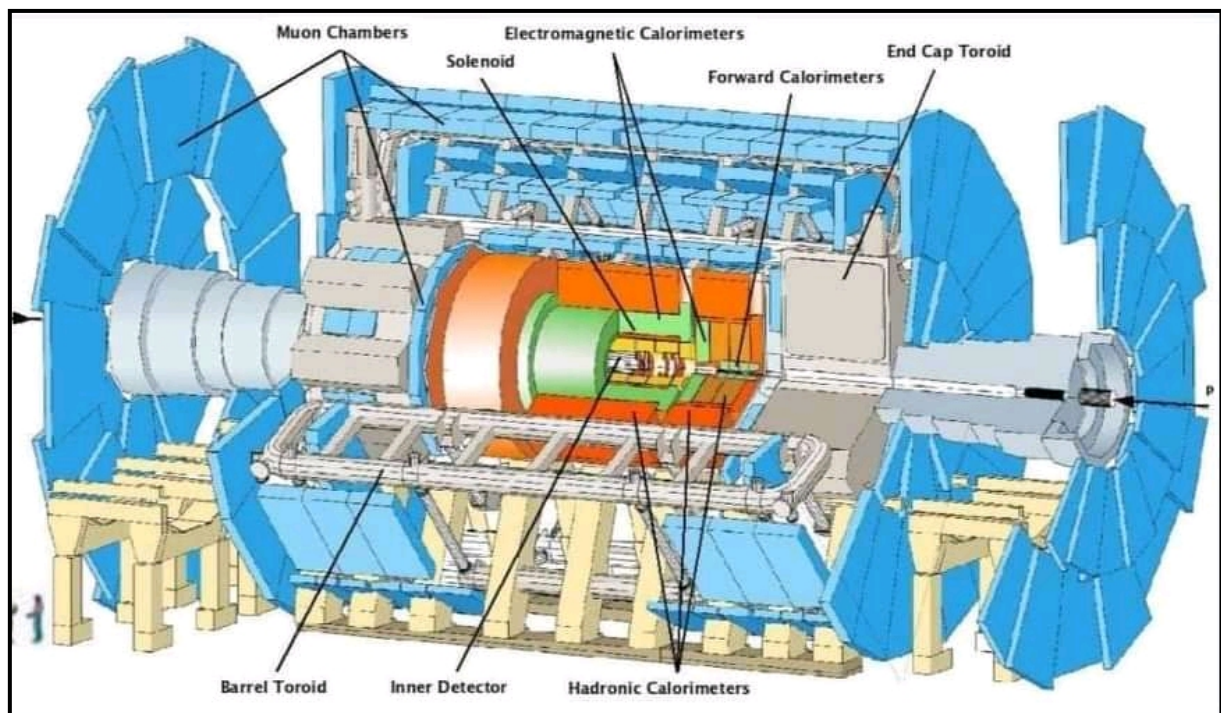
La découverte du boson de Higgs a été annoncée le 4 juillet 2012 par l'équipe ATLAS et CMS du Large Hadron Collider et a été qualifiée de « monumentale » [3], le 14 mars 2013 cette découverte a été confirmée. La masse découverte du boson de Higgs est d'environ

$125,5 \text{ GeV}/c^2$  - particule assez lourde. Prédite dans le modèle standard, la durée de vie moyenne est  $1,56 \times 10^{-22}$ .

Le plus grand collisionneur d'hadrons se compose d'un anneau accélérateur qui comprend 9 300 aimants. Cet anneau est situé à 100 mètres sous terre dans un tunnel de 27 kilomètres de long. Les particules pourraient être accélérées autour du cercle dans les deux sens dans des tubes de faisceau séparés. Il existe deux grands types de particules accélérées : les protons et les ions plomb. Les aimants utilisés dans le Grand collisionneur d'hadrons sont basés sur le principe supraconducteur, car un champ magnétique élevé est nécessaire pour focaliser le faisceau de particules. Par conséquent, il est nécessaire d'atteindre une température très basse pour faire fonctionner les aimants d'accélérateur. Les faisceaux de particules pourraient atteindre une vitesse proche de la vitesse de la lumière. L'énergie d'une seule particule atteint jusqu'à 7 TeV [4].

Il y a quatre parties expérimentales principales du LHC où se produisent les

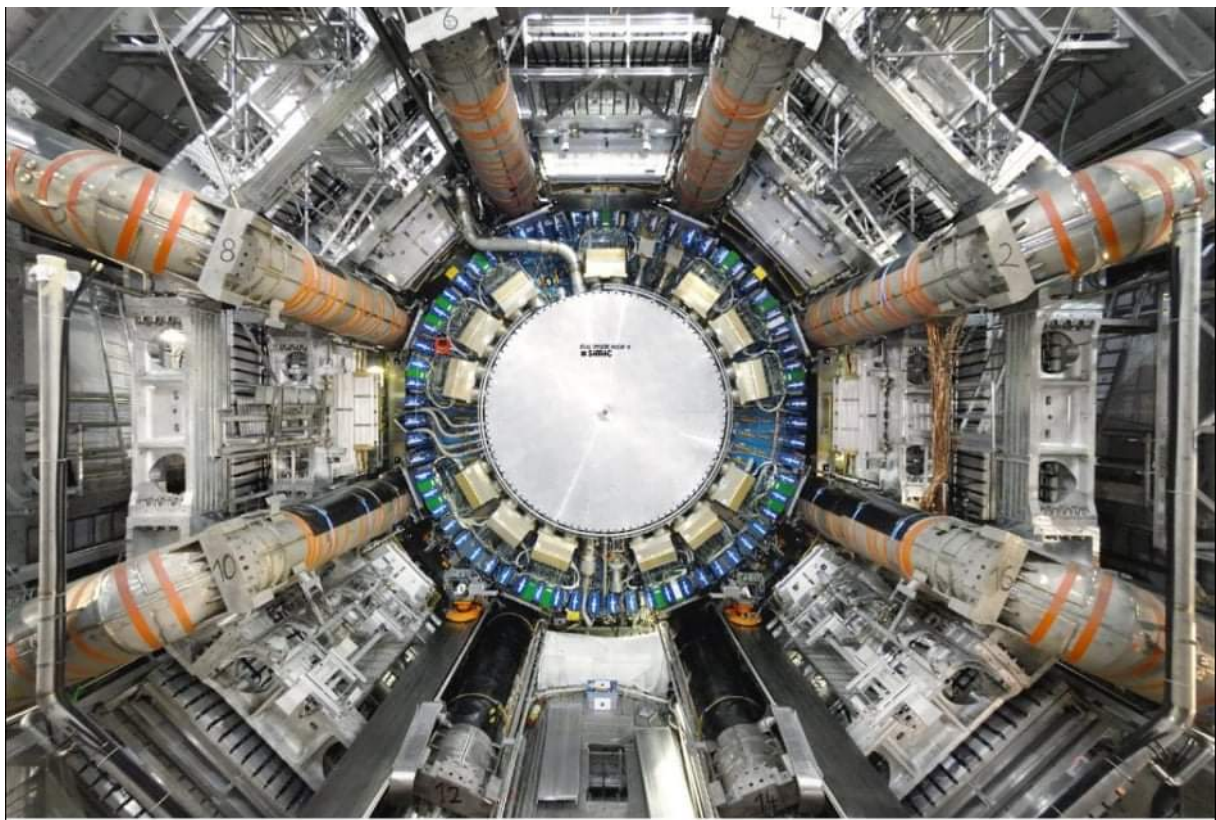
collisions entre les particules : CMS, ATLAS, ALICE et LHCb. Le détecteur Compact Muon Solenoid (CMS) est un détecteur à usage général illustré à la Figure 2. Le CMS est conçu pour détecter toute particule apparaissant à haute énergie. Des expériences avec des désintégrations de particules dans cette gamme d'énergie pourraient aider à vérifier les théories physiques. Ce détecteur pourrait également rechercher le boson de Higgs et fournira de grandes données aux chercheurs sur la matière noire, l'antimatière et la théorie des cordes [5].



**Figure 2.** Vue schématique de l'ensemble du détecteur ATLAS [6].

Le CMS se compose de nombreuses parties qui sont nécessaires pour déterminer différentes particules. Il y a le tracker pour identifier les traces de particules, deux types de calorimètres et le système de muons, qui pourraient détecter leurs traces [6]. Le système de suivi tout silicium du détecteur Compact Muon Solenoid comprend des détecteurs basés sur différents

principes [7]. Les détecteurs de pixels offrent la résolution spatiale la plus élevée. C'est pourquoi ils sont installés au plus près du point d'interaction des particules. La couche suivante est située derrière les détecteurs de pixels et se compose de détecteurs à bande de silicium. Système de traqueur au silicium exposé à un rayonnement de particules très étendu. L'installation de ce système est illustrée à la figure 3.



**Figure 3.**Installation du détecteur ATLAS [7].

Le rayonnement provoque la détérioration des performances des détecteurs au silicium. La capacité de résister à ce processus est appelée dureté de rayonnement. Il est calculé que les détecteurs à pixels installés dans Atlas atteindront les limites de leur fonctionnalité au cours des cinq prochaines années et que les détecteurs à bande seront fonctionnels pendant environ dix

ans. Les limitations de fonctionnalité des détecteurs sont causées par le rayonnement de particules étendu décrit précédemment. L'une des principales méthodes d'examen des détecteurs est la technique du courant transitoire (TCT) qui a été développée par des chercheurs de l'Institut Ioffe et du Laboratoire national de Brookhaven [8]. La méthode présente plusieurs avantages: Elle est plus Efficace que les mesures C-V traditionnelles pour les structures fortement irradiées et cette méthode est non destructive. Différents paramètres du détecteur pourraient être extraits à l'aide de cette technique, tels que la tension d'épuisement complet, l'efficacité de collecte de charge et le temps de piégeage effectif.

Ce projet de thèse porte sur la mise en place de mesures TCT de simulation dans le cadre TCAD. La simulation de la technique du courant transitoire du détecteur de base et du détecteur à bande de type p conventionnel est effectuée.

Le contexte théorique de la jonction p-n et du détecteur de particules de silicium est présenté au chapitre 2. Le chapitre 3 se concentre sur la méthode de TCT décrivant le principe de la technique et le montage de mesure. Le chapitre 4 est consacré au cadre TCAD et aux modèles mathématiques utilisés dans ce logiciel. Les résultats de la simulation TCT dans l'outil MixedMode sont présentés au chapitre 5. Le chapitre 6 en résume le contenu.

## **1.2. Détecteur des particules de pixels en physique des particules**

### **Pixels et détecteurs de pixels**

Le traitement d'image pour décrire le plus petit élément discernable dans un processus ou un appareille donner est introduit la notion de pixel (pixel : courte pour élément d'image).

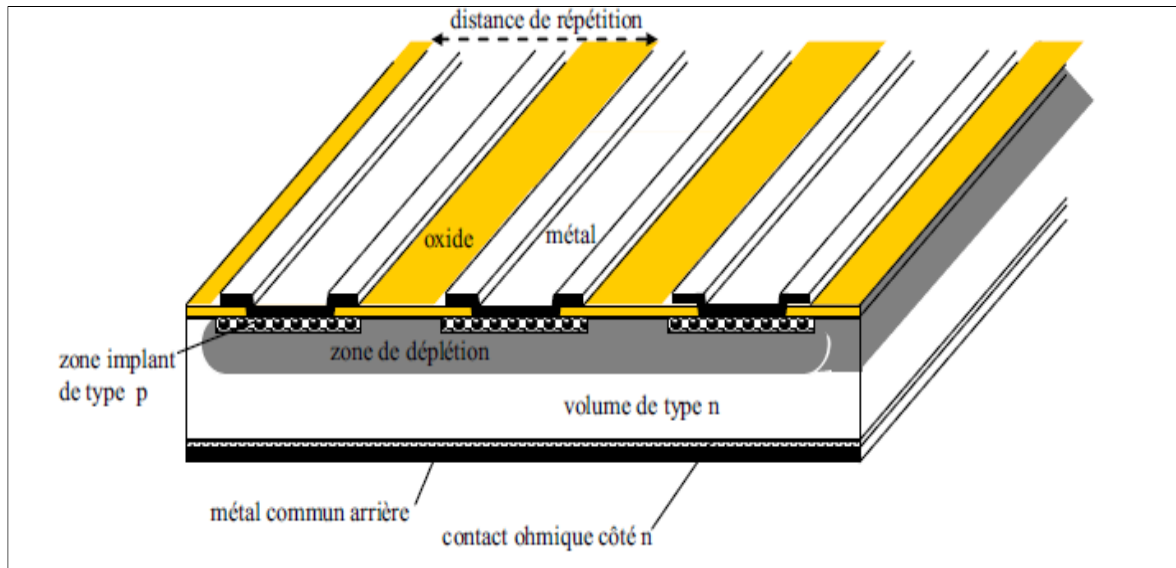
Un détecteur pixels est donc un dispositif capable de détecter une image, et la taille du pixel correspond à la granularité de l'image.

On concéder comme un exemple typique de détecteurs pixels (les appareils photo numérique omniprésents). Dans ce cas, les photons de différentes énergies sont intègres dans les éléments de détection (pixel) pendant une courte période d'exposition et génèrent une distribution d'imagerie qui est l'image.

Dans ce travaille nous intracé à les détecteurs ou l'image est générée dans un SC et est traitée électroniquement et ou les données sont en parallèle[31].

### **1.3. Détecteur micro-strip**

Le détecteur micro-stripreprésenté dans la Figure 1- 11, est un cas particulière de détecteurs de semi-conducteurs dans lesquels une électrode est segmentée en fines bandes parallèles. L'implantation des ions et les technique photo lithographique sont utilisée pour doper sélectivement les surfaces de la plaquette semi-conductrice d'épaisseur typiquement de 300um et pour déposer les modèles de métallisation nécessaires pour extraire les signaux, ce type de technique, mise au point par kemmer, est dérivée du traitement standard utilisé en microélectronique et profite donc des grands investissements et des normes de haute qualité de l'industrie du circuit intégré[31].



**Figure 4:** Schéma d'un détecteur microstrip a une seule cote [31].

Il est possible de modeler le contact arrière avec de mince segment incliné par rapport aux bandes implantées sur la face avant. Si la jonction PN est uniquement sur la face avant, il faut faire attention pour éviter que les bandes sur la face arrière ne soient court-circuités par une couche d'accumulation de charge. Ce processus plus complexe permet de produire des détecteurs micro-strip à face double et ensuite de mesurer, avec le même substrat, deux coordonnées [31].

Pour décrire le fonctionnement d'un détecteur de micro-strip en Silicium de  $300\mu\text{m}$  d'épaisseur avec un plaquette dopé N (c-à-dire dopé avec l'ajout d'impureté pentavalente comme le phosphore) et les band parallèles dopé P (c-à-dire dopé avec l'ajout d'impureté trivalent). Le dopage doit être suffisamment grand pour dépasser la densité intrinsèque des porteur à la température ambiante  $\approx 10^{-10} \text{ cm}^{-3}$  et il va déterminer l'abondance des électrons libres dans la zone N, ainsi que des trous libres dans la zone P.

La résistance du silicium dopé ne dépend que de la densité dopant  $N$  et de mobilité majoritaire du transporteur selon :

$$\rho = \frac{1}{eN\mu}$$

$e$  : la charge élémentaire.

À l'interface entre la zone dopée  $N$  et la zone dopée  $P$ , les porteurs majoritaires de chaque région vont diffuser et recombinaison avec les charges de signe opposées ce qui génère un champ électrique grâce à la charge en excès des atomes fixes du réseau qui contrebalancent la diffusion et qui d'équilibre caractérise par l'absence de charges qui peuvent se déplacer librement s'appelle zone de déplétion possédant une certaine épaisseur  $W$  qui dépend de la concentration dopant  $N$  du matériaux et de la tension  $V$  à travers la jonction selon :

$$W = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_{si} V}{eN}} = \sqrt{\frac{2\varepsilon_0 \varepsilon_{si} V\mu_p}{eN}} \quad \mathbf{1-2}$$

L'augmentation de la tension de polarisation inverse  $V$  augmente l'épaisseur de la zone de déplétion et réduit la capacité et les deux effets augmentent le rapport signal sur bruit semi-conducteur. Les détecteurs ayant une zone de déplétion généralisée à toute l'épaisseur de la couche de silicium est donc le meilleur semi-conducteur.

Si les diodes du détecteur sont polarisées en inverse c.-à-d. l'application d'une tension positive côté dopée  $N$  et la zone dopée  $P$  contacté à la terre à travers son amplification de lecteurs, très faible courant est circulé les porteurs majoritaires (les électrons du côté  $N$ ) subissent une barrière à cause de la tension appliquée à l'extérieur.

Les porteur minoritaire (les trous) sont constamment retirés de la zone de déplétion par le champ dans la jonction, donc ils génèrent un très faible courant connu sous le nom courant d'obscurité, comme le porteur sont générés thermiquement, ce courant dépend de la température connue sous le nom du courant de fond thermique.

Les particules traversant le détecteur de silicium, ou les photons absorbés dans celui-ci génèrent des porteurs chargés (en moyenne 1 paire d'électrons-trous (e/h) par 3.6eV d'énergie déposée) si ces porteurs sont générés dans la zone de déplétion, ils conduisent à un signal actuel beaucoup plus grand que le courant de fond thermique et qui est donc détectable.

La zone de déplétion constitue donc le volume actif du détecteur au contraire, dans la zone non déplétées il y a un champ électrique trop bas pour percevoir des charges en peu de temps et trop de porteurs majoritaires qui facilitent la recombinaison de charge.

Pour comprendre comment ce courant est généré et comment il peut être détecté, la particule perd de l'énergie à travers de nombreuses collisions avec les électrons du cristal et génère 80 paires e/h par micromètre de parcours dans un cylindre de quelques micromètres de largeur autour de la trajectoire. Ces charges dérivent sous l'action du champ électrique externe à une vitesse qui dépend du champ électrique mais sature à des valeurs  $\approx 10^3$  cm/s pour le champ de l'ordre de 10<sup>4</sup> V/cm, les charges sont donc collectées en moins de 10 ns et produisent un courant de 0.5  $\mu$ A.

Pendant la dérive, les charges ne suivent pas exactement les lignes de champ électrique, mais diffusent à la suite du mouvement thermique aléatoire dans le treillis de cristal la répartition de la charge en raison de cet effet peut être

décrite comme une distribution gaussienne avec déviation standard

$$\sigma = \sqrt{2Dt} \quad 1-3$$

Qui se traduit par une propagation de quelques micromètres à l'électrode de collecte, en supposant une constante typique de diffusion électronique de  $35\text{cm}^2/\text{s}$  et un temps de transit des porteurs de 10ns. La constante de diffusion est plus élevée pour les électrons que pour les trous, car elle s'évolue avec la mobilité.

Les champs magnétiques intenses (B) allant jusqu'à 4T sont doivent utiliser dans les expériences de physique des particules pour permettre de l'amante des particules chargées par la déviation de leurs trajectoires dues à la force de Lorentz.

Le champ magnétique agit sur toutes les particules chargées et donc aussi sur les électrons et les trous qui dérivent à l'intérieur du silicium, qui s'écartent des lignes de champ électriques par l'angle Lorentz

$$\tan\theta = \mu_H B \approx \mu_V B \quad 1-4$$

Où :

B : est le composant du champ magnétique perpendiculaire au champ électrique.

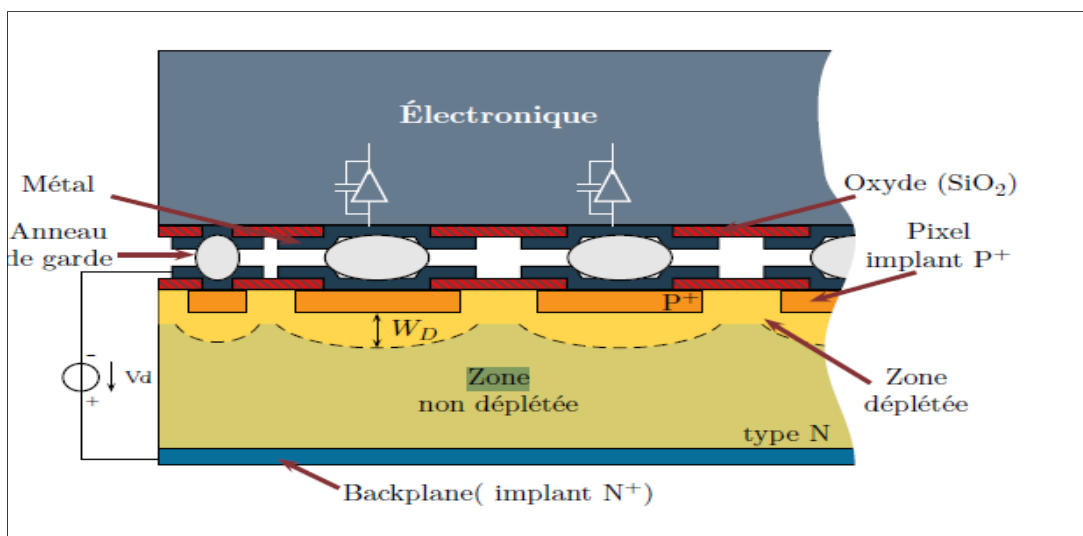
$\mu_H$  : est la mobilité des trous.

$\mu_V$  : est la mobilité des porteurs.

$\theta_L$  : Les angles typiques de lorentz varient de quelques à 20 [30].

### 1.4. Détecteur pixels hybrides

Représenté dans la Figure 1- 12. Les détecteurs à pixels hybrides ont vu le jour pour la première fois en 1994 dans l'expérience .Delphi du LEP au CERN, le pixel est dit hybride car chaque segment de silicium est relié à son électronique de lecture. La couche capteur peut être réalisée avec quatre types de structures différentes en fonction du dopage des électrodes et du substrat. Les électrodes de collection peuvent être obtenues par un dopage de type N+ ou P+ dans un substrat de type N ou P. La manière la plus simple et la moins onéreuse est de placer des implants (pixels) dopés P+ sur un substrat de type N.



Le principe de fonctionnement est d'appliquer un champ électrique sur le semi-conducteur, et les particules à détecter sont ionisées. L'avantage de ce type de détecteur est qu'il résiste bien aux radiations.

**Figure 5:** schématique d'un détecteur à pixels hybrides[32].

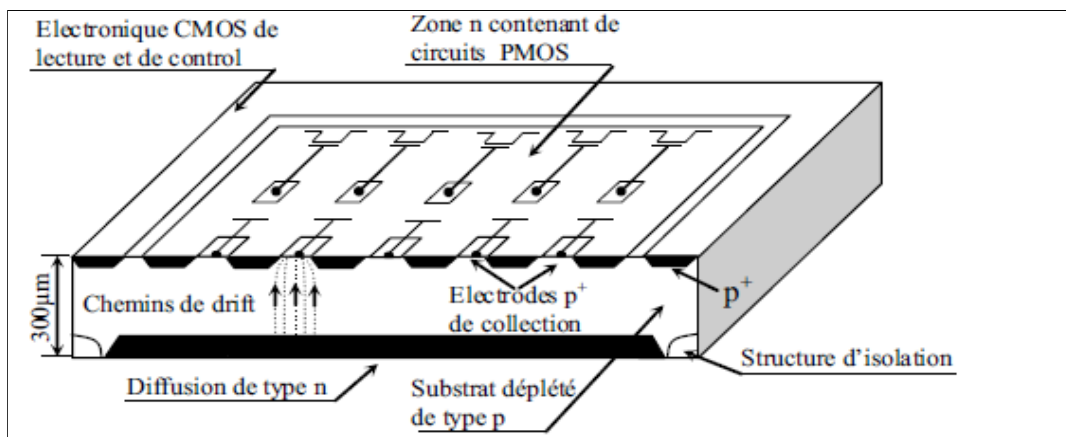
Mais celles-ci ne sont pas sans effets négatifs. L'application d'une tension

aux bornes de détecteur augmente la zone de déplétion qui croît à partir des pixels, l'augmentation du courant de fuite lors des irradiations [31].

### **1.5. Détecteur monolithique**

Représenté dans la Figure 5. Les lectures des circuits du détecteur Fabriqués en silicium est un matériau de base, une idée monolithique à la place Les appareils hybrides sont très attractifs. Il offre une possibilité d'entrée très faible Les capacités puis les nombres de bruit sont très faibles, évitant en même temps Un processus d'hybridation complexe et coûteux. Plusieurs tentatives ont été La tendance des années 80. Cependant, des développements ont été limité aux petits prototypes. Aucun véritable détecteur de particules ou de rayonnement n'a émergé. Aujourd'hui, la situation concernant les appareils monolithiques reste inchangée. Plusieurs développements semblent prometteurs mais doivent encore prouver des caractéristiques essentielles nécessaire pour la détection de particules à haute énergie, notamment le rayonnement tolérance, certains de ces nouveaux concepts sont présentés. La frontière entre des pixels vraiment monolithiques, où le capteur et l'amplification et les circuits de lecture sont une entité et les dispositifs semi-monolithiques, où une certaine hybridation est toujours nécessaire, n'est pas bien définie. Les pixels hybrides utilisent l'électronique circuit dans chaque cellule de pixel avec des centaines de transistors. Dans les appareils monolithiques le nombre maximum mis en œuvre à ce jour est de 15 transistors, permettant seulement une implémentation logique simple. Un traitement supplémentaire du signal est reporté au cadre extérieur d'une matrice de pixels.

Le premier développement réussi d'un prototype de détecteur de pixels monolithique utilisé comme télescope à faisceau de particules a été fabriqué dès 1992. Comme une réalisation historique. L'appareil est basé sur une haute pureté, diode PIN en vrac de type p à haute résistivité dont la jonction est créée par une couche de diffusion de type n. En haut, un réseau de contacts



ohmiques avec le substrat sert d'électrodes de collecte. La jonction de diode est formée à l'arrière [31].

**Figure 6:** Section transversale d'un des premiers détecteurs pixels monolithiques  
Développe[31].

### Les captures planaire

La technologie des capteurs planaires n<sup>+</sup>-en-p est la technologie choisie pour être implémentée dans les modules instrumentant les processus simplifié avec un traitement simple face , il présente une option rentable avec les capteurs planaires n<sup>+</sup> - en -n traités recto-verso en cours de mise en œuvre dans les détecteur de pixels ATLAS , la structure GR est implémentée avec les implants n<sup>+</sup> pixels sur la face avant du capteur Bien que ce côté soit

---

interconnecté à l'autre, le potentiel de base des lecteurs lus est transféré aux pixels. Le GR étant situé sur le capteur et étant sur un potentiel différent de la terre, des étincelles peuvent se produire entre la puce de lecture et le bord du capteur. Cela se produit sur tout dans le cas où des tensions de polarisation élevées sont appliquées après l'irradiation sans mesures protection. Différent à la technologie des capteurs n<sup>+</sup>-en-n, le module a besoin d'une couche d'isolation supplémentaire entre le capteur les solutions explorées possibles sont un dépôt de Benzocyclobutène (BCB) sur le capteur ou la puce de lecture avant l'interconnexion ou le revêtement de pyralène, effectué au niveau du module, pour assurer un fonctionnement à des tensions de polarisation élevées[26].

### **Bords fins et actifs**

Les capteurs planaires minces n<sup>+</sup>-en-p peuvent être traités avec une extension de l'implantation arrière au bord du capteur. Les implantations latérales peuvent être réalisées grâce à des tranchées, gravées au périmètre du capteur. Avec ce processus, la région appauvrie s'élargit et crée des côtés verticaux activés. Les autres champs doivent répéter les bords avec des capteurs standards sans être activés pour aider à augmenter le nombre de RG nécessaires et par la suite pour augmenter la zone active. Ceci est important, étant donné le fait, que dans l'ITk, des capteurs avec des limites inférieures à 200 µm sont nécessaires, en particulier dans la région la plus intérieure proche du point d'interaction, pour permettre des formes minimalement inactives aux périphéries du module pour la haute résistance de la trace.

### **Grille de polarisation**

Pour l'assurance de la qualité du capteur avant l'interconnexion à la puce de lecture, une structure de polarisation est mise en place sur le capteur avant.

Il permet de mettre à la terre tous les implants de pixels du capteur par une mise en œuvre supplémentaire de structures perforées (structures p-t). Il a été mesuré que les structures en p entraînent une diminution de la charge collectée dans la zone, où elles sont mises en œuvre, en particulier après l'irradiation, Comme la perte d'efficacité résultante a un effet encore plus grand sur les petites tailles de pixels, en raison du fait qu'une plus grande fraction de la cellule de pixels est occupée par eux, une grille de polarisation alternative, créée avec cette couche temporaire, est étudiée pour les futures productions de capteurs. La couche temporaire est utilisée pour court-circuiter tous les pixels afin de mesurer les courants de fuite avant l'interconnexion et supprimés avant de poursuivre le traitement et l'interconnexion à la puce de lecture. Dans cette thèse, l'accent est mis sur le développement et la performance de grilles de biais avec différentes implémentations de structures en p-t.

### **Taille de cellule de pixel plus petite avec RD53A**

Pour garantir la compatibilité du capteur avec la puce RD53A avec une grille de  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$ , ainsi que pour maintenir la performance des détecteurs de pixels à haute densité de particules, la taille de cellule de pixel des capteurs est conçue pour être  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$  ou  $25 \times 100 \mu\text{m}^2$ . La taille réduite des cellules photoélectriques améliorera encore la résolution de la meilleure position dans l'ITk[26].

---

### **Les captures 3D**

Parallèlement aux modules de pixels planaires n<sup>+</sup>-in-p, des modules 3D sont prévus pour instrumenter le futur détecteur de pixels ATLAS. En raison de la tension de fonctionnement plus élevée et de la dissipation de puissance plus élevée qui en résulte pour les modules de pixels planaires dans un environnement à rayonnement élevé d'environ  $10^{16}$  neq cm<sup>-2</sup>, la technologie du capteur 3D est choisie comme base de référence pour la couche la plus interne, L<sub>0</sub>. La zone relativement petite à couvrir dans la couche la plus interne ne peut être que marginalement affectée par le rendement inférieur et les coûts de production élevés des capteurs 3D. De même que pour les modules de pixels planaires, la taille des cellules de pixels est affectée à  $50 \times 50 \mu\text{m}^2$  ou  $25 \times 100 \mu\text{m}^2$ , ce qui améliore encore leur dureté de rayonnement. Ceci est expliqué par le fait que, selon la même mesure, l'espacement entre les électrodes, actuellement  $67 \mu\text{m}$ , les capteurs 3D compatibles FE-I4 diminueront jusqu'à  $28 \mu\text{m}$  ou  $35 \mu\text{m}$ , selon la taille de pixel choisie. Dans les deux cas, cela entraînera une réduction du piégeage. Pour minimiser davantage le coût, les dispositifs CMOS représentent une option pour couvrir le cinquième étage du détecteur leur coût estimé 4 fois plus faible. Cette technologie est basée sur l'approche, ce capteur de pixels et la puce de lecture sont intégrés dans une seule unité contrairement aux modules de pixels hybrides, où une procédure d'interconnexion coûteuse et laborieuse est nécessaire. Étant donné qu'en termes de taux et de tolérance aux rayonnements, les modules à pixels hybrides sont inégalés, la technologie du CMOS n'adopte que pour la L4, une zone à faible occupation et faible niveau de rayonnement dans l'ITk[26].

**Conclusion**

Dans ce chapitre explique le modèle standard dans la physique des particules et l'importance de LHC pour production des nouvelles particules. Au cours de la prochaine décennie, le grand collisionneur de hadrons (LHC) du CERN devrait être mis à niveau vers le LHC dit à haute luminosité (HL-LHC), D'ici là, la collaboration ATLAS sera équipé d'un nouveau détecteur de pixels. Le LHC et les détecteurs installés auprès de lui vont être soumis à de perpétuelles mises à jour, leur programme s'étalant à l'heure actuelle jusqu'en 2035, permettant de sonder des énergies et des luminosités jusqu'alors jamais atteintes. Malgré ces perspectives, d'autres accélérateurs et détecteurs se développent pour l'ère post-LHC. Par exemple, l'ILC (International Linear Collider) se propose de réaliser des collisions électrons positrons à haute énergie, permettant d'étudier des phénomènes (tels que la production de boson de Higgs).

# **Chapitre 2**

## **Détecteurs à base de silicium**

### 2.1. Détecteurs de silicium

Le Large Hadron Collider possède des détecteurs de particules de silicium, qui sont basés sur le principe de diodes p-n polarisées en inverse. Lorsque la tension de polarisation est appliquée, le champ électrique s'étend sur toute l'épaisseur du détecteur. Les particules ionisantes, qui traversent le détecteur, génèrent des paires électron-trou le long de leur trajet dans la masse du silicium. Le champ électrique inverse déplace ces porteurs de charge libres vers les côtés opposés du détecteur et ils y sont collectés. Les détecteurs au silicium sont un bon choix pour la surveillance dans un environnement à taux d'interaction élevé car ils ont une faible énergie de création de paires électron-trou et un temps de collecte de charge élevé. Les chapitres suivants sont basés sur le livre S. M. Sze. « Physique des dispositifs à semi-conducteurs » [9].

### 2.2. Jonction p-n

Dans le silicium, la quantité d'électrons et de trous sans équilibre peut être contrôlée en dopant la structure par des donneurs ou des accepteurs. Lorsque des atomes d'impuretés remplacent certains atomes de Si dans le réseau, cela crée des niveaux d'énergie proches de la bande de valence ou de conduction. Ces niveaux sont appelés niveaux peu profonds. Les donneurs sont des atomes d'impuretés, qui ont un électron de plus que les atomes du matériau hôte. Ils donnent cet électron à la bande de conduction et, dans ce cas, l'atome donneur

## Chapitre 2 Détecteurs à base silicium

---

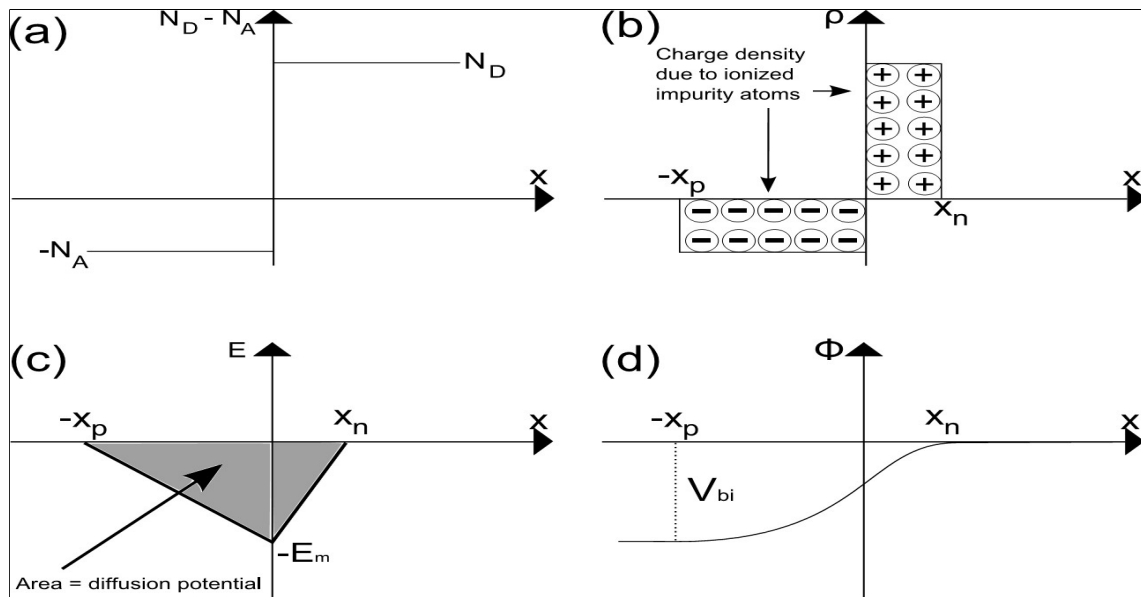
devient un ion positif. Les accepteurs sont des atomes d'impuretés, qui ont un électron de moins que les atomes du matériau hôte. Ils peuvent accepter un électron de la bande de valence et y créer un trou. Après cet atome accepteur devient chargé négativement.

Lorsque la concentration d'impuretés dans un semi-conducteur passe brusquement des impuretés acceptées  $NA$  aux impuretés donneuses  $ND$ , comme le montre la figure 4a, cela crée une jonction abrupte combinée de deux parties indépendantes : une partie est de type p et l'autre de type n. Dans le cas d'une densité d'impuretés plus élevée d'un côté de la jonction que de l'autre (par exemple  $NA \gg ND$ ), on obtient une jonction p<sup>+</sup>-n (ou n<sup>+</sup>-p) abrupte unilatérale. Après la création d'une interface commune entre les régions de type p et de type n, les électrons libres du côté n et les trous du côté p diffusent de l'autre côté de la jonction, où ils se recombinent, jusqu'à ce que la structure obtienne un équilibre thermique. Les électrons vont du côté p, laissent leur position dans les régions de type n et créent des ions donneurs jusqu'à (figure 4b). La migration des trous laisse la région p avec un réseau d'ions accepteurs de charge négatifs jusqu'à  $x_p$  (Figure 4b). La région entre  $x_p$  et est appelée région d'appauvrissement ou région de charge d'espace (SCR). Il est vide de porteurs et contiennent des ions négatifs et positifs. Après avoir atteint le nouvel état d'équilibre, le flux de courant s'arrête.

La concentration d'impuretés influence le niveau d'énergie de Fermi  $EF$ , dans le semi-conducteur de type p elle se rapproche de la bande de valence et de la bande de conduction dans le semi-conducteur de type n. La condition de passage de courant nul nécessite que le niveau de Fermi soit constant sur l'ensemble de la structure. Cette condition conduit à un potentiel intégré  $V_{bi}$ , qui pourrait être décrit comme le potentiel correspondant au champ électrique créé dans la région de charge d'espace entre les ions ionisés de charge opposée.

## Chapitre 2 Détecteurs à base silicium

La figure 4d montre la répartition du potentiel sur l'ensemble de la structure.



**Figure 7 :** Jonction p-n abrupte : a) densité d'atomes d'impuretés ; b) densité de charge due aux atomes d'impuretés ionisés ; c) champ électrique sur la structure ; d) répartition du potentiel sur la jonction.

Les propriétés électriques de la jonction p-n pourraient être décrites mathématiquement à partir de l'équation de Poisson :

$$\frac{dE}{dx} = \frac{\rho}{\epsilon_s} \quad (2-1)$$

La densité de charge électrique  $\rho$  pourrait être trouvée à partir de la concentration d'atomes d'impuretés correspondante (dans le cas de l'ionisation de tous les atomes d'impuretés) : pour le dopage accepteur  $-qN_A$  et  $qN_D$  pour les donneurs. L'équation 1 peut être réécrite de la manière suivante :

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{qN_D}{\epsilon_s} \text{ for } 0 < x \leq x_n \quad (2-2)$$

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{qN_A}{\epsilon_s} \text{ for } -x_p < x \leq 0 \quad (2-3)$$

La figure 4c montre que le maximum du champ électrique se situe à  $x = 0$  et qu'il est égal à zéro à  $-x_p$  et  $x_n$ . La distribution du champ électrique pourrait être obtenue en intégrant les équations ci-dessus :

$$E(x) = -\frac{qN_D}{\epsilon_s} \left( x - x_n \right) \text{ for } 0 < x \leq x_n \quad (2-4)$$

$$E(x) = -\frac{qN_A}{\epsilon_s} \left( x + x_p \right) \text{ for } -x_p < x \leq 0 \quad (2-5)$$

Le champ électrique maximum qui existe à  $x = 0$  est donné par :

$$|E_{\max}(x=0)| = \frac{qN_A x_p}{\epsilon_s} = \frac{qN_D x_n}{\epsilon_s} \quad (2-6)$$

Le potentiel d'intégration pourrait être trouvé en intégrant deux fois les équations 2 et 3 :

$$V_{bi} = \frac{qN_A x_p^2}{2\epsilon_s} - \frac{qN_D x_n^2}{2\epsilon_s} = \frac{1}{2} E_{max} \left( \frac{x_p}{p} + \frac{x_n}{n} \right) = \frac{1}{2} E_{max} W \quad (2-7)$$

Où  $W$  est la largeur d'épuisement qui est la distance de  $-x_p$  à  $x_n$ . Valeur de  $-x_p$  et  $x_n$

Pourrait être obtenu en résolvant l'équation 6, ce qui pourrait donner :

$$x_c + x_p = E_{max} \frac{\epsilon_s}{q} \left( \frac{1}{N_A} + \frac{1}{N_D} \right) \quad (2-8)$$

Après avoir obtenu à partir de l'équation 6, l'équation précédente pourrait être réécrite de la manière suivante :

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_{bi}}{q} \left( \frac{N_A + N_D}{N_A N_D} \right)} \quad (2-9)$$

Dans le cas d'une jonction n+p unilatérale où  $N_D \gg N_A$ , cela signifie que la majorité de la région de variation de potentiel et d'appauvrissement sera à l'intérieur du côté légèrement dopé [9].

L'équation 9 se réduit à :

$$W = \sqrt{\frac{2\epsilon_s V_{bi}}{qN_A}} \quad (2-10)$$

## Chapitre 2 Détecteurs à base silicium

---

En revanche, si la concentration d'impuretés acceptées est supérieure à celle des donneurs  $N_A \gg N_D$  le calcul sera le même et la largeur de déplétion s'étendra du côté du dopage donneur. Dans de nombreux cas pour les détecteurs, il est important que la largeur d'appauvrissement augmente jusqu'à l'épaisseur totale du détecteur  $D$ . Cette condition est réalisée en appliquant au détecteur une polarisation inverse ; cette tension est appelée tension d'épuisement total. Par conséquent, l'équation 10 pourrait être réécrite pour une structure de type p à un côté, où  $W = D$ .

$$V_{bi} - V_{fd} = \frac{qN_A D^2}{2\epsilon_s} \quad (2-11)$$

L'équation 11 montre qu'il existe deux possibilités d'obtenir une faible tension d'appauvrissement complet : diminution de l'épaisseur du détecteur ou de la concentration en impuretés. Une autre manière est liée au changement du matériau de la structure, cela changera  $V_{bi}$  et  $\epsilon_s$ .

La capacité de la couche d'appauvrissement par unité de surface est définie comme :

$$C \equiv \frac{dQ_c}{dV} = \frac{\epsilon_s}{w} \quad (2-12)$$

Où est la charge d'épuisement incrémentielle de chaque côté de la jonction (la charge totale est nulle) lors d'une charge incrémentielle de la tension appliquée. Pour les jonctions abruptes unilatérales, la capacité par unité de surface est donnée par [9]

$$C = \frac{\epsilon_s}{w} = \sqrt{\frac{q\epsilon_s N_A W \leq D, V \leq V_{fd}}{2(V_{bi}-V)}} \quad (2-13)$$

Dans le cas d'un détecteur entièrement appauvri, la capacité de la couche d'appauvrissement par unité de surface n'est déterminée que par la géométrie de la structure :

$$C = \frac{\epsilon_s A}{D} \quad (2-14)$$

Où est une zone active de la diode. La caractéristique C-V peut donner une tension d'épuisement complète  $V_{fd}$ .

Le courant de diffusion saturé est défini par la loi idéale du courant de diode :

$$J_s = \frac{qD_p p_{n0}}{L_p} + \frac{qD_n n_{p0}}{L_n} \quad (2-15)$$

Où  $D_n$  et  $D_p$  sont des constantes de diffusion pour les électrons et les trous,  $L_n$  et  $L_p$  sont la longueur de diffusion des porteurs de charge libres,  $n_{p0}$  et  $p_{n0}$  sont les densités d'équilibre du côté n et du côté p.

Si le détecteur polarise par tension inverse, le courant de génération

$J_{gen}$ , qui se produit dans la région d'épuisement, pourrait être calculé par :

$$J_{gen} = \frac{q n_i w}{\tau_{gen}} \quad (2-16)$$

Où la durée de vie est déterminée par  $\tau_{gen}$  et  $n_i$  est la concentration de porteurs dans le semi-conducteur intrinsèque, qui pourrait être dérivée de :

$$n_i^2 = np = N_c N_v e^{\frac{-E_g}{k_B T}} \quad (2-17)$$

Dans l'équation 17,  $E_g$  est la bande interdite du semi-conducteur, la constante de Boltzmann est déterminée par  $k_B$ ,  $T$  – la température et  $N_c$  ( $N_v$ ) sont des densités d'états effectives pour la bande de conduction (valence).

Lorsque le détecteur (diode) est appliqué à une faible tension de polarisation inverse, il existe plusieurs composants dans le courant de fuite inverse total. Premièrement, le courant de génération a lieu dans la région d'appauvrissement de la structure. Deuxièmement, le courant de diffusion se produit dans les zones du dispositif où aucune région de charge d'espace ne se trouve. Troisièmement, le courant de fuite total est affecté par les courants parasites ; l'un d'eux est le courant de génération de surface.

D'autre part, lorsque le détecteur est complètement épuisé, le courant de fuite total n'est défini que par le courant de génération  $J_{gen}$  (équation 16). Il faut considérer que, bien que la durée de vie des porteurs de charge générés  $\tau_{gen}$  ait une faible dépendance de la température, l'équation 17 montre que  $n_i$  dépend fortement de la température. Par conséquent, le courant de génération lorsque les détecteurs sont complètement épuisés dépend également fortement de la température.

### 2.3. Détecteurs de particules

Une diode dans le régime de détection, puis une polarisation inverse est appliquée à une structure semi-conductrice. Dans le Grand collisionneur d'hadrons, les affrontements apparaissent dans des périodes de 25 nanosecondes, et les signaux des détecteurs doivent être traités dans ces courts intervalles de temps. Le dispositif de détection est basé sur un courant de dérive suffisamment rapide pour diviser les signaux en de courts intervalles.

## Chapitre 2 Détecteurs à base silicium

---

Par conséquent, il n'y a qu'une seule façon de le faire - mesurer le courant de dérive.

Habituellement, les détecteurs sont des structures semi-conductrices à base de substrat de silicium massif de type n, qui est fortement dopé des deux côtés par des implantations. La face avant du détecteur est fortement dopée avec des impuretés de type accepteur qui forment une implantation de type p<sup>+</sup> et une jonction fortement asymétrique avec un substrat massif de type n. Cette jonction peut être expliquée en utilisant la théorie de la jonction unilatérale, qui a été présentée dans la section précédente. Le dopage du donneur crée une implantation de type n<sup>+</sup> à l'arrière du détecteur, ce qui facilite le contact entre le semi-conducteur et le métal.

La structure de la diode dans le mode de détection doit être complètement épuisée par la tension de polarisation inverse. Les particules incidentes génèrent des porteurs de charge libres dans la région de charge d'espace, qui dérivent par champ électrique appliqué aux contacts correspondants. Les trous dérivent vers le nœud avec un potentiel négatif et les électrons dérivent vers le contact avec un potentiel positif. Ce processus est illustré à la figure 5.

La bande interdite du silicium est de 1,17 eV et elle est indirecte. Par conséquent, pour exciter les électrons de la bande de valence à la bande de conduction pour créer une paire de trous d'électrons, il faut non seulement changer l'énergie potentielle de l'électron, mais également change l'impulsion de la particule. Ce processus excite les phonons avec une énergie spécifique pour compenser les changements de quantité de mouvement. Par conséquent, à température ambiante, l'énergie d'ionisation minimale pour les détecteurs au silicium est supérieure à la bande interdite et égale à 3,67 eV [10].

Les particules ionisantes minimales (MIP) pourraient générer environ 70 paires électron-trou par micron dans un silicium entièrement appauvri de 300  $\mu\text{m}$  d'épaisseur. Le champ électrique moyen de 104 V/cm fait dériver les

électrons à travers un détecteur semi-conducteur de  $300 \mu\text{m}$  d'épaisseur jusqu'à un contact positif d'environ 10 ns, et dans ce champ, les trous sont collectés en environ 25 ns [10]. Les temps de collecte des électrons et des trous sont liés à leurs mobilités, qui déterminent respectivement les vitesses de dérive des porteurs de charge. Ainsi, comme les mobilités des porteurs de charge dépendent de la température : avec une température décroissante, la mobilité augmente. Ainsi, les vitesses de dérive et les mesures sont également affectées par la température.

**Figure 8 :** Principe de fonctionnement d'un détecteur de particules de silicium entièrement appauvri.

### 2.4. Détecteurs semi-conducteurs

La particule reçue par le détecteur y provoque l'ionisation d'atomes du semi-conducteur c'est-à-dire la formation de paires électron-trou. La perte d'énergie  $W_i$  nécessaire à la formation d'une paire est de l'ordre de quelques eV (3,6 eV pour le silicium à 300 K) : elle est donc près de dix fois inférieure à l'énergie  $W_m$  nécessaire pour ioniser une molécule de gaz, d'où, pour une perte d'énergie donnée, création d'un nombre de porteurs dix fois supérieur et un signal de sortie d'autant plus élevé. Afin d'éviter une recombinaison immédiate de l'électron et du trou, ces charges doivent être libérées dans une zone soumise à un champ électrique intense qui en assure la séparation rapide et la collecte : c'est le cas dans la zone de déplétion d'une jonction PN (diode) polarisée en inverse (§ 5.7). La largeur  $l_d$  de cette zone est donnée par une expression de la forme :

$$l_d \cong \sqrt{\rho \cdot V} \quad (2-18)$$

Où  $\rho$  est la résistivité du semi-conducteur dans la partie voisine de la jonction,  $V$  est la tension inverse appliquée. L'accroissement du volume utile du détecteur est obtenu par l'élargissement de la zone de déplétion ce qui amène donc,

-d'une part à augmenter la résistivité du matériau dans la région proche de la jonction,

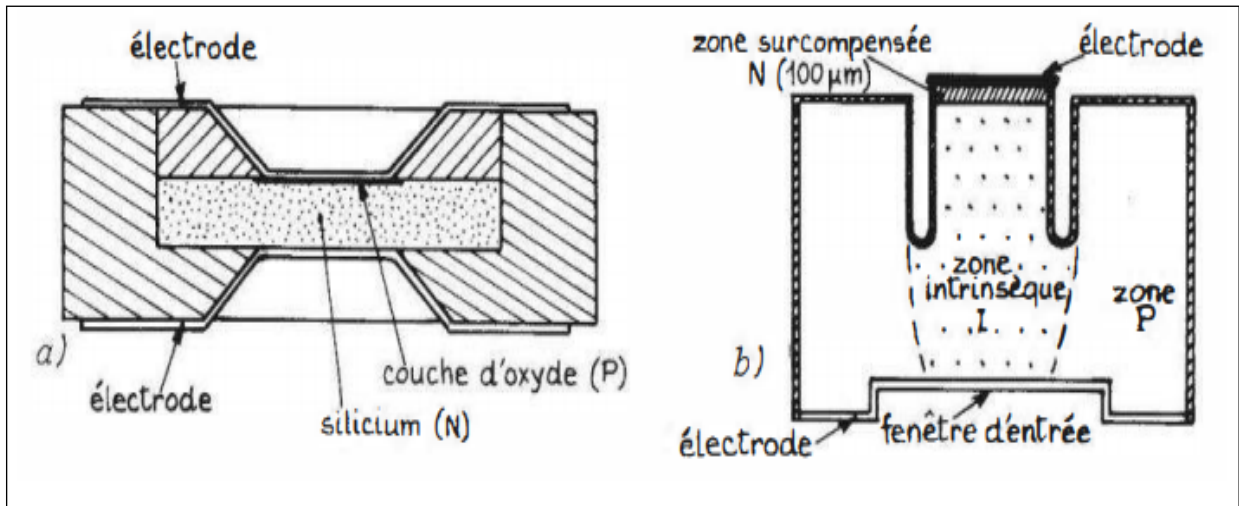
-d'autre part à polariser la jonction sous une tension inverse importante, inférieure cependant à la tension disruptive.

En outre, afin de limiter la perte d'énergie de la particule dans la partie de son parcours qui est en dehors de la zone de déplétion et qui constitue la zone morte, cette dernière doit être très mince afin que la zone de déplétion s'étende jusqu'au voisinage immédiat de la face d'entrée du détecteur.

C'est en particulier à ces deux points : élargissement de la zone de déplétion et réduction de la zone morte que s'attachent les diverses technologies de réalisation.

- **Diode à barrière de surface**

La jonction est formée par l'oxydation superficielle de silicium N, la couche d'oxyde étant de type P; une mince électrode d'or ( $\cong 200\text{\AA}$ ) est ensuite déposée (figure 6 a). La zone de déplétion peut s'étendre sur toute l'épaisseur du silicium ( $\cong 1\text{ mm}$ ) donc sans zone morte ni à l'avant ni à l'arrière. Application: détection des particules  $\alpha$  et  $\beta$ .



**Figure 9 :** Détecteurs semi-conducteurs : a) diode à barrière de surface ; b) diode au silicium compensé au lithium.

- **Diode au silicium ou germanium compensé au lithium**

Le détecteur est formé par diffusion thermique et migration sous champ électrique de lithium, atome donneur, dans du silicium ou germanium P dont il neutralise les impuretés acceptrices ( $\approx 10^{13} / \text{cm}^3$ ). Le strict contrôle du processus permet la formation d'une diode à trois régions (figure 16.11b) :

- une région de type N où le lithium (N) surcompense le caractère P du semi-conducteur initial;
- une région de type I, intrinsèque donc de résistivité élevée, où le lithium compense le caractère P initial ;
- une région de type P, non modifiée par le lithium.

Il s'agit donc d'une diode de type PIN. La diode au germanium doit être utilisée uniquement à basse température (77 K) afin d'éviter la précipitation du lithium ; la diode au silicium peut être utilisée jusqu'à 300 K. Application :

- Si (Li) à 300 K : particules  $\alpha$  et  $\beta$
- Si (Li) et Ge(Li) à 77 K : X et  $\gamma$ .

- **Diode au germanium de haute pureté (Ge H.P.)**

Le germanium peut être obtenu avec une très faible concentration

## Chapitre 2 Détecteurs à base silicium

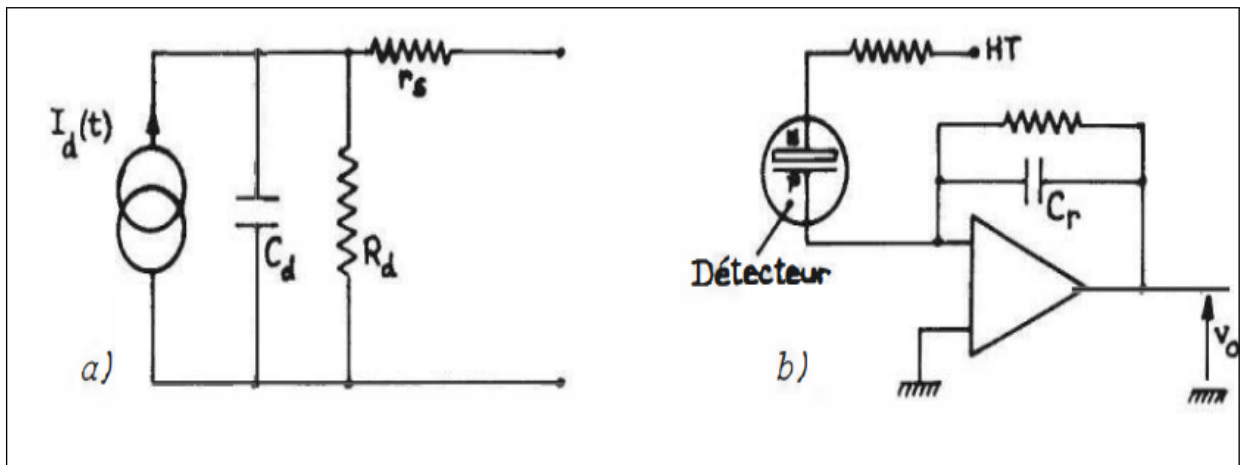
d'impuretés acceptrices ( $\cong 10^{10}$  /cm<sup>3</sup>) et donc avec une résistivité élevée ; la région N très mince (0,4 μm) est formée par implantation d'ions donneurs. La zone de déplétion peut s'étendre dans tout le volume de germanium P avec une profondeur de plusieurs cm. Ce type de détecteur est utilisable à la température ambiante. Application : détection du rayonnement X et γ.

Le schéma électrique équivalent d'une diode de détection de rayonnements nucléaires est semblable à celui de la photodiode (figure 16.12 a) ; lorsqu'une particule cède son énergie au détecteur, la source de courant délivre l'impulsion  $I_d(t)$ . La charge correspondante,  $Q_d$ , est convertie en une impulsion

de tension d'amplitude  $v_o$  au moyen d'un amplificateur de charge (§ 10.1.5.3) :

$$v_o = \frac{Q_d}{C_r} \quad 2-19$$

$C_r$  : étant la capacité de réaction de l'amplificateur (figure 7).



**Figure 10 :** Détecteur semi-conducteur : a) schéma électrique équivalent; b) amplificateur de charge associé.

La charge  $Q_d$  peut être exprimée en fonction d'une part de l'énergie  $W$

## Chapitre 2 Détecteurs à base silicium

---

cedée par la particule au détecteur et d'autre part de l'énergie  $W_l$  nécessaire à la formation d'une paire électron-trou (3,6 eV pour Si à 300 K) :

$$Q_d = \frac{W_l}{W} \cdot q_e \quad (q_e : 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C})$$

D'où :

$$V_0 = \frac{W_l}{W C_r} \cdot q_e \quad 2-21$$

Numériquement, dans le cas d'un détecteur au silicium et pour  $C_r = 10^{-12}$  F, on

a:

$$\frac{V_0}{W} = 44 \text{ mV/MeV}$$

Intérêt des détecteurs semi-conducteurs :

- encombrement réduit, robustesse ;
- linéarité, le signal étant proportionnel à l'énergie reçue ;
- rapidité, le temps de réponse pouvant être de l'ordre de  $10^{-9}$  s.

### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons rappelé quelques notions de base sur semi-conducteurs extrinsèque et intrinsèque et la jonction PN polarisé en inverse, Quelques équations qui nous servent dans notre sujet comme le courant de fuite Tension de déplétion totale. Dans notre travail, nous avons utilisé du silicium monocristallin, qui est la base de fabrication des détecteurs.

# **Chapitre 3**

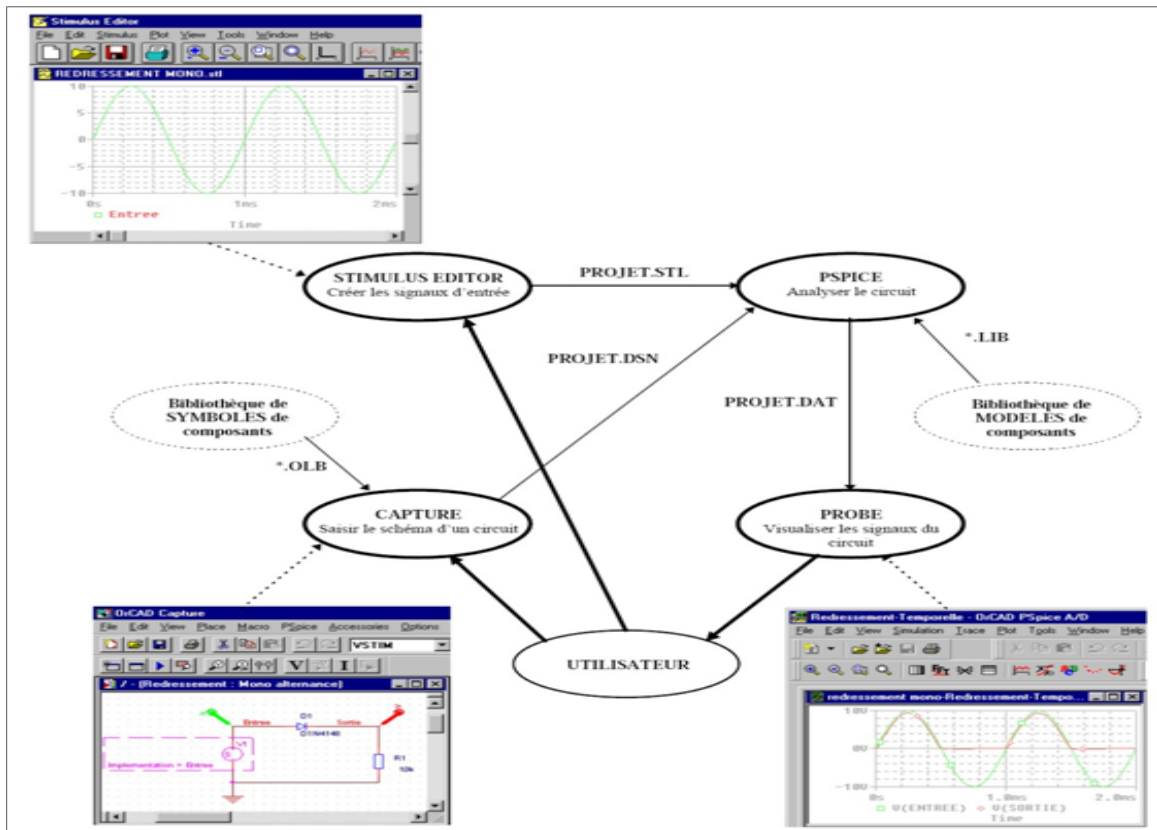
## **LOGICIEL PSPICE**

### 3.1. Logiciel PSPICE

#### 3.1.1 Introduction

OrCadP Spice est un logiciel de simulation mixte (analogique et/ou logique). La mise en œuvre d'une simulation repose principalement sur :

- une description des composants et des liaisons figurant sur un schéma, sous forme de fichier « Circuit»
- une description des signaux d'entrée appliqués sur les schémas sous forme de fichier « Stimulus»
- une description des modèles de simulation des composants sous forme de fichiers « modèles».



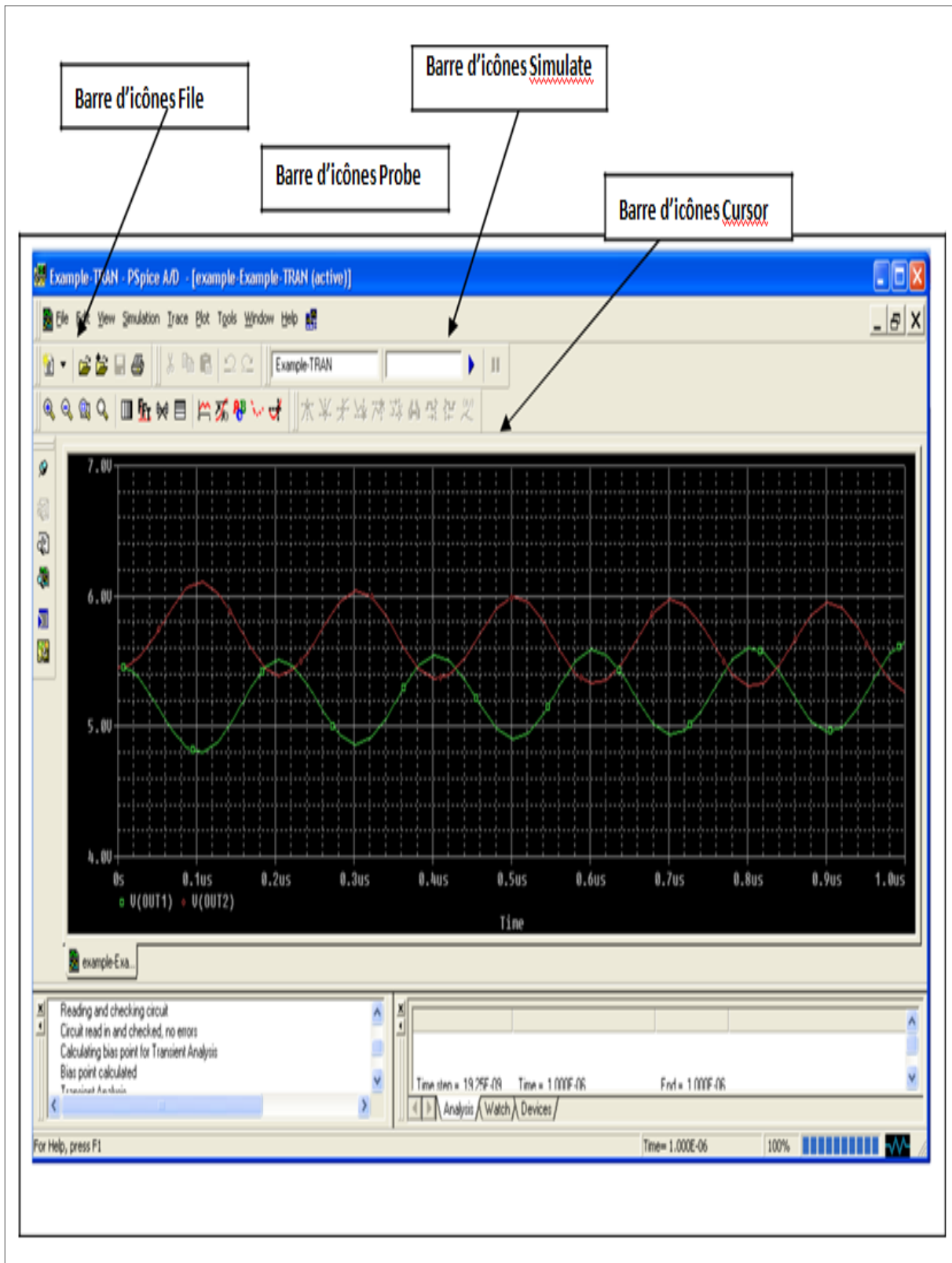
La visualisation des résultats de simulation s'effectue dans une partie du logiciel appelée «Probe ».

## 3.2.Les Icônes de simulation avec PSPICEORCAD

### 3.2.1.Icônesd'OrcadCapturerelativesàlasimulation
















# Chapitre 3 LOGICIEL PSPICE








### Barres d'icônes de OrCad PSpice

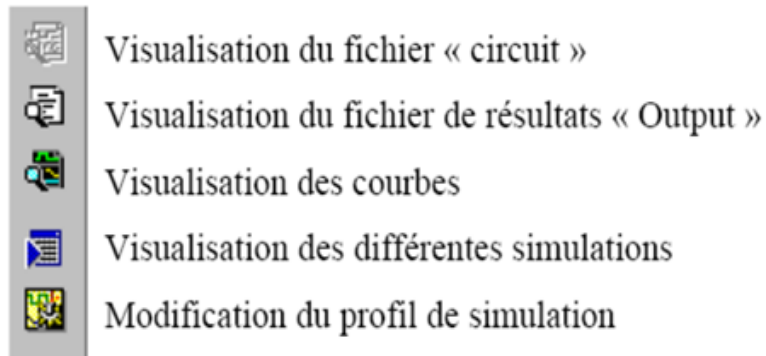
#### Barre d'icônes « Probe »

	Zoom + (agrandissement)
	Zoom - (diminution)
	Zoom d'une zone
	Zoom de la totalité de la simulation
	Modification échelle linéaire / échelle logarithmique en X
	Transformée de Fourier rapide
	Analyse des performances
	Modification échelle linéaire / échelle logarithmique en Y
	Ajout d'une trace
	Evaluation d'une fonction à partir d'un tracé
	Ajout de texte
	Activation / Désactivation de l'affichage des points calculés
	Activation / Désactivation des curseurs

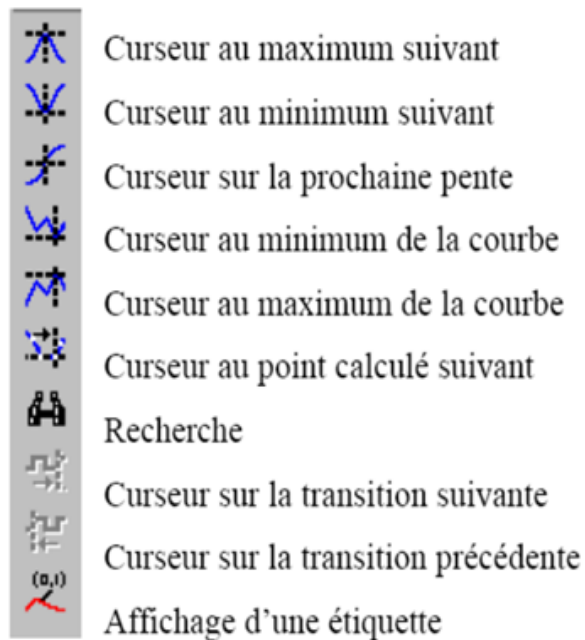
#### Barre d'icônes « File »

	Création d'un nouveau profil de simulation ou d'un fichier texte
	Ouverture d'un fichier de résultats de simulation
	Ouverture d'un fichier de résultats de simulation pour ajout
	Enregistrement d'un fichier texte
	Impression des courbes

### Barre d'icônes « View »



### Barre d'icônes « Cursor »



### Barre d'icônes « Simulate »



Lancement / Arrêt de la simulation

### 3.3 Unités

Les valeurs numériques doivent être spécifiées avec le point décimal et non la virgule (ex : 4,7mH interdit).

Le symbole des unités des différentes grandeurs (Tension, Courant, Capacité, Fréquence ...) peut être mentionné, mais ce n'est pas une obligation. Seul le symbole  $\Omega$  ne peut être spécifié.

Il est formellement interdit de laisser un espace entre la valeur numérique et l'unité (ex : 4.7 mH interdit).

Les préfixes des unités doivent respecter la syntaxe suivante :

P : pico  $10^{-12}$

n: nano  $10^{-9}$

u: micro  $10^{-6}$  (symbole  $\mu$  interdit)

m: milli  $10^{-3}$  (ne pas confondre avec meg)

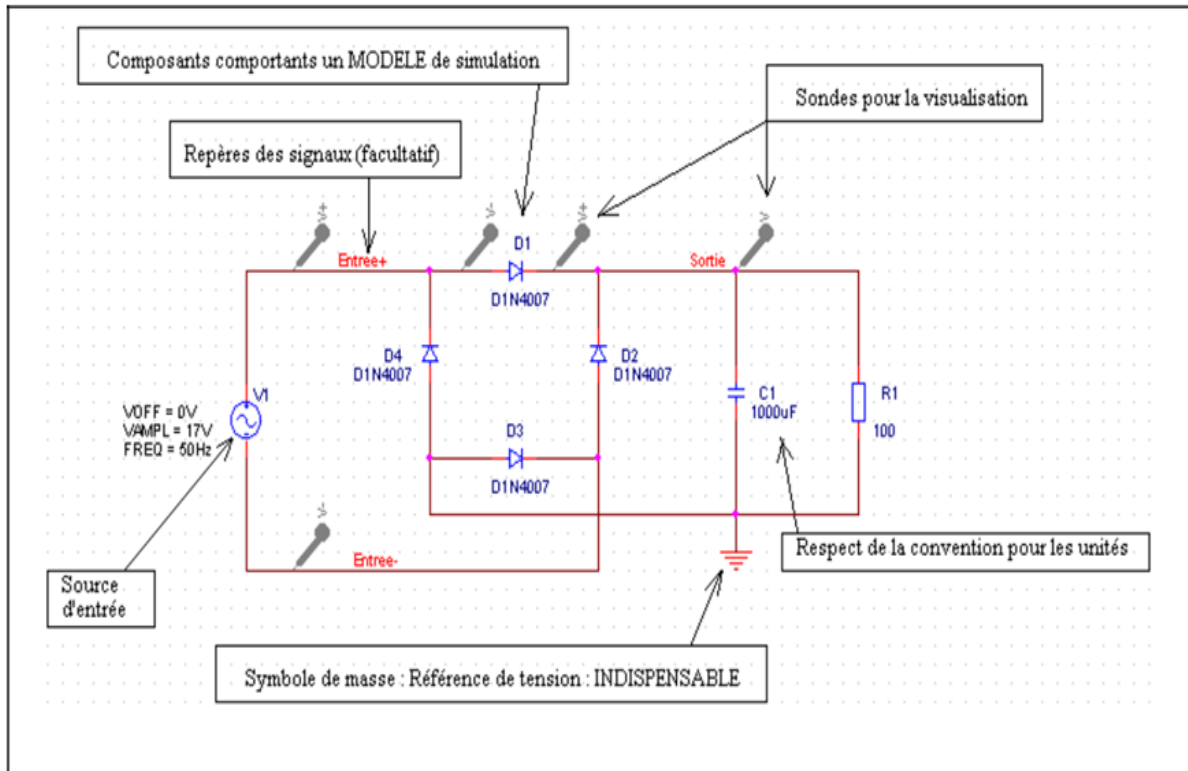
k: kilo  $10^3$

meg: méga  $10^6$  (ne pas utiliser M : milli !)

G: giga  $10^9$

#### 3.3.1 Particularités d'un schéma destiné à être simulé

Un schéma devant être simulé doit respecter les contraintes suivantes :




### 3.4. Définition des signaux d'entrée

#### 3.4.1 Sources analogiques

Référence de tension :

Toute simulation nécessite obligatoirement une référence de tension : le symbole de masse dont le nom est 0

Symbole : 

Ce symbole est placé sur le schéma par l'intermédiaire de l'icône (Place Ground) ou Place-Ground ou raccourci clavier « g ».

Les différentes sources analogiques, accessibles dans la librairie « SOURCE.OLB », présentent des propriétés spécifiques. Dans la partie suivante, chaque source de tension (il existe l'équivalent pour des sources de courant) est représentée ainsi que les différentes propriétés associées. Certaines de celles-ci sont visibles et modifiables directement sur le schéma. D'autres ne le sont que par l'intermédiaire de l'éditeur de propriétés.

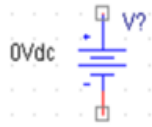
## Chapitre 3 LOGICIEL PSPICE

**VAC** : tension sinusoïdale : **ne convient que pour les analyses fréquentielles**



Vac Amplitude de la composante sinusoïdale  
Vdc Valeur moyenne

**VDC** : tension continue : utilisée pour les sources d'alimentation, quelque soit le type de simulation.



Vdc Tension continue

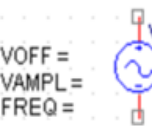
**V SRC** : source de tension générique : **convient pour les sources d'alimentation ainsi que les analyses continues et fréquentielles**



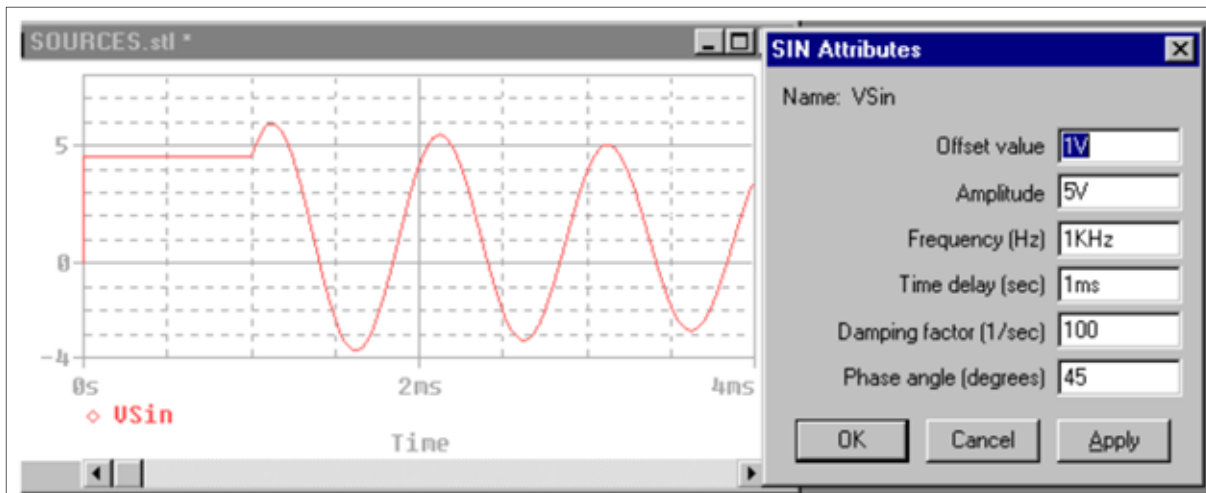
Vdc Tension continue  
Vac Amplitude de la composante sinusoïdale

**V SIN** : tension sinusoïdale : cette source permet d'effectuer une simulation temporelle.

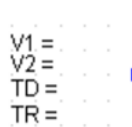
Elle convient néanmoins pour une simulation fréquentielle, à condition de spécifier une valeur dans la propriété « AC » (invisible par défaut)



VOFF =	VOFF	Offset value	valeur moyenne	
VAMPL =	VAMPL	Amplitude	amplitude	
FREQ =	FREQ	Frequency	fréquence	
	TD	Time delay	retard	0 par défaut
	DF	Damping factor	facteur d'amortissement	0 par défaut
	PHASE	Phase angle	déphasage	0 par défaut

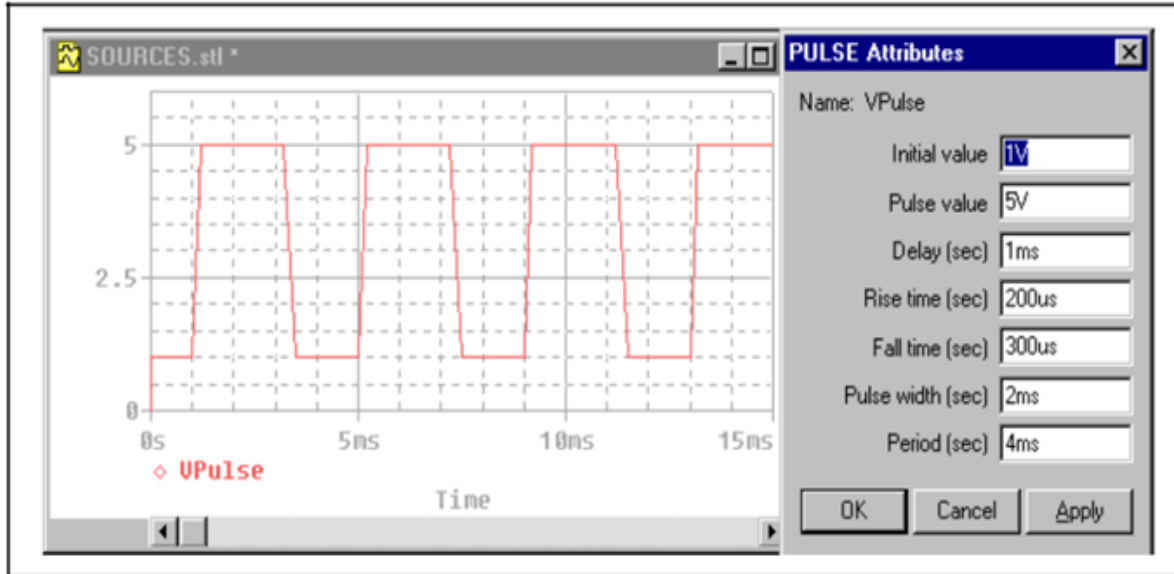


**V PULSE** : tension « rectangulaire »



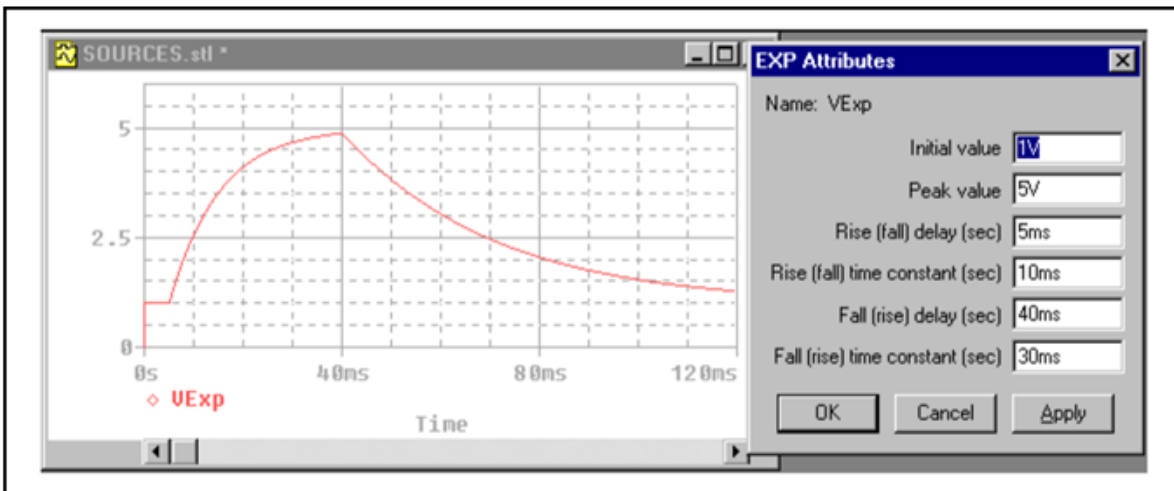
V1 =	V1	Initial value	niveau bas	
V2 =	V2	Pulse value	niveau haut	
TD =	TD	Delay	retard	
TR =	TR	Rise time	temps de montée	<b>ne peut être égal à 0</b>
TF =	TF	Fall time	temps de descente	<b>ne peut être égal à 0</b>
PW =	PW	Pulse width	durée au niveau haut	
PER =	PER	Period	période	

## Chapitre 3 LOGICIEL PSPICE



**V EXP** : tension « Exponentielle »


V1 =		V1	Initial value	valeur initiale	à t = 0
V2 =		V2	Peak value	valeur asymptotique	
TD1 =		TD1	Rise delay	retard	0 par défaut
TC1 =		TC1	Rise time constant	constante de temps de montée	
TD2 =		TD2	Fall delay	temps avant la descente	
TC2 =	TC2	Fall time constant	constante de temps de descente		

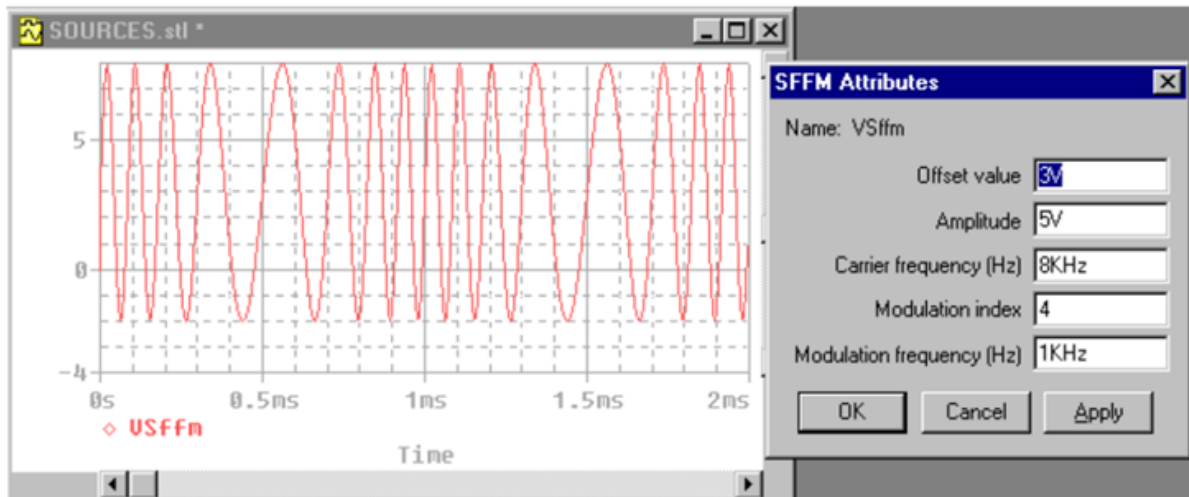


Remarque : si la valeur asymptotique est inférieure à la valeur initiale, les termes « descente » et « montée » (« fall » et « rise ») sont permutés.

## Chapitre 3 LOGICIEL PSPICE

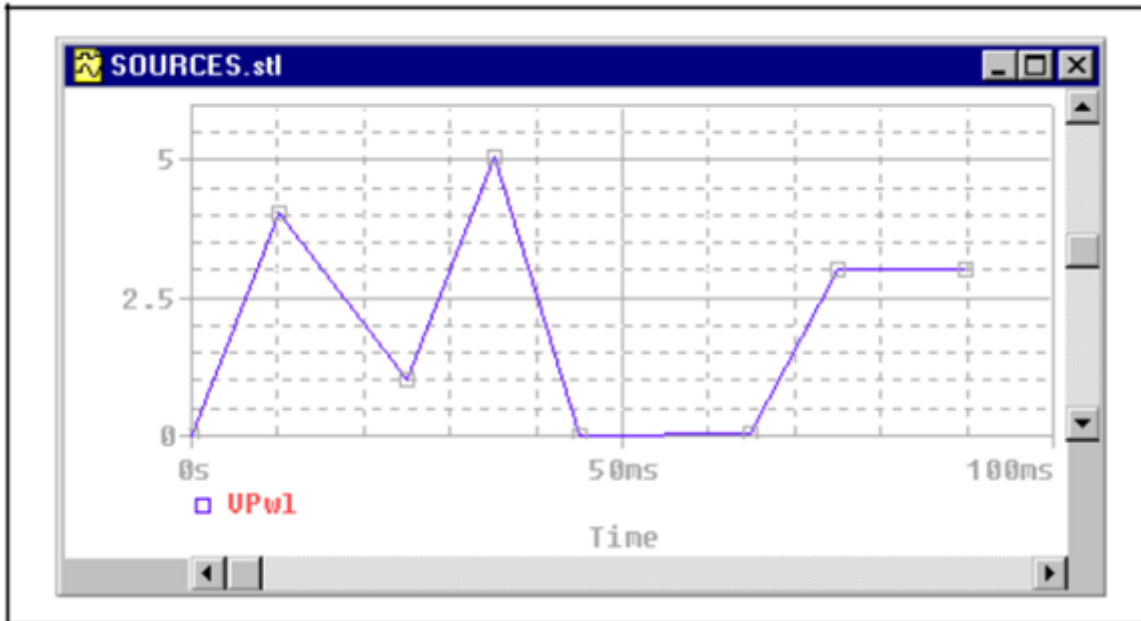
### V SFFM : tension modulée en fréquence

VOFF =		VOFF	Offset value	valeur moyenne	
VAMPL =		VAMPL	Amplitude	amplitude	
FC =		FC	Carrier frequency	fréquence de la porteuse	
MOD =		MOD	Modulation index	index de modulation	0 par défaut
FM =		FM	Modulation frequency	fréquence de modulation	



### V PWL : tension définie par segments





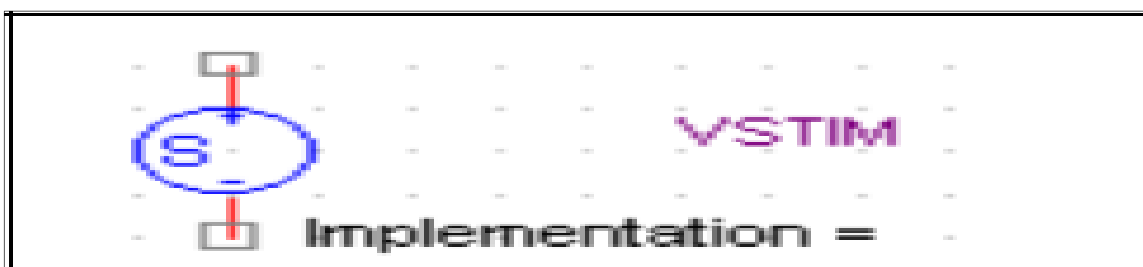
La courbe est définie par des paires de valeurs : (temps, tension). Il ne peut s'agir d'une tension périodique.

### 3.4.2. Autres sources

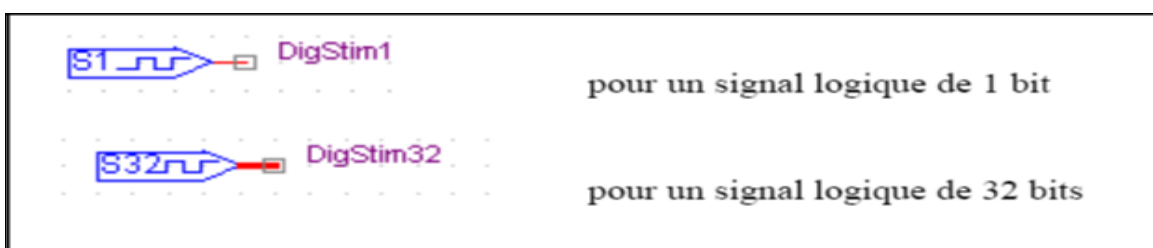
Il est possible d'utiliser le symbole ci-dessous, accessible dans la librairie « SOURCESTM.OLB », puis de lui affecter un stimulus : définition d'un signal d'entrée. Ceci s'effectue grâce à l'éditeur de stimulus en sélectionnant ce symbole puis en choisissant l'option Edit - PSpice stimulus.

Cette source est utilisable en analogique (stimulus EXP / PULSE / PWL / SFFM / SIN) et en logique (stimulus CLOCK / SIGNAL). Voir § 4.4.

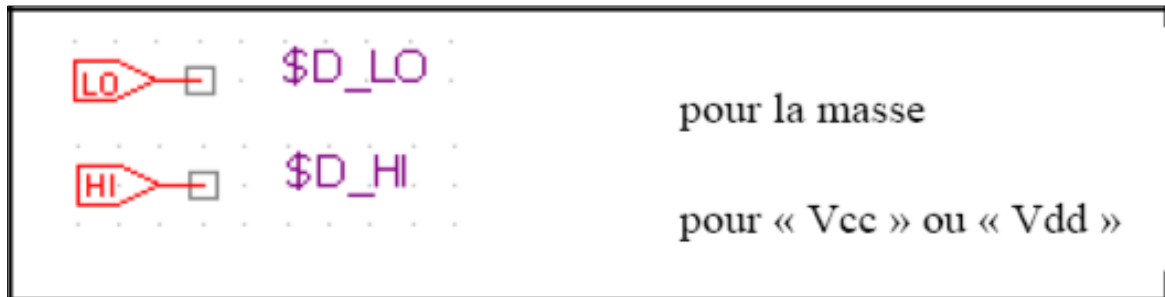
### 3.4.3 Sources logiques



Les signaux logiques sont représentés par l'un des symboles suivants (accessibles dans la librairie « SOURCESTM.OLB »):



Les entrées de circuits **logiques** câblés à l'alimentation doivent l'être par l'intermédiaire des symboles spécifiques accessibles grâce aux icônes (Place Ground) ou (Place Power)



### 3.4.4. Editeur de stimulus

L'éditeur de stimulus permet de définir les caractéristiques d'un signal d'entrée représenté sur le schéma par l'un des symboles « DigStim » ou par le symbole spécifique VSTIM accessible dans la librairie « SOURCESTM.OLB »

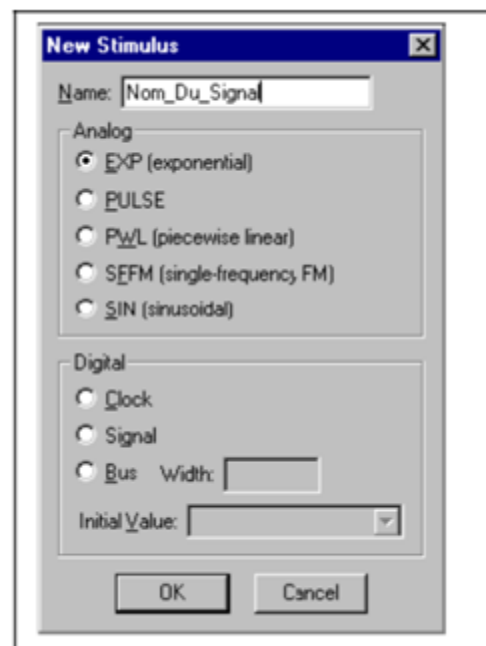


## Chapitre 3 LOGICIEL PSPICE

Sélectionner le symbole complet puis choisir l'option Edit – Pspice stimulus.

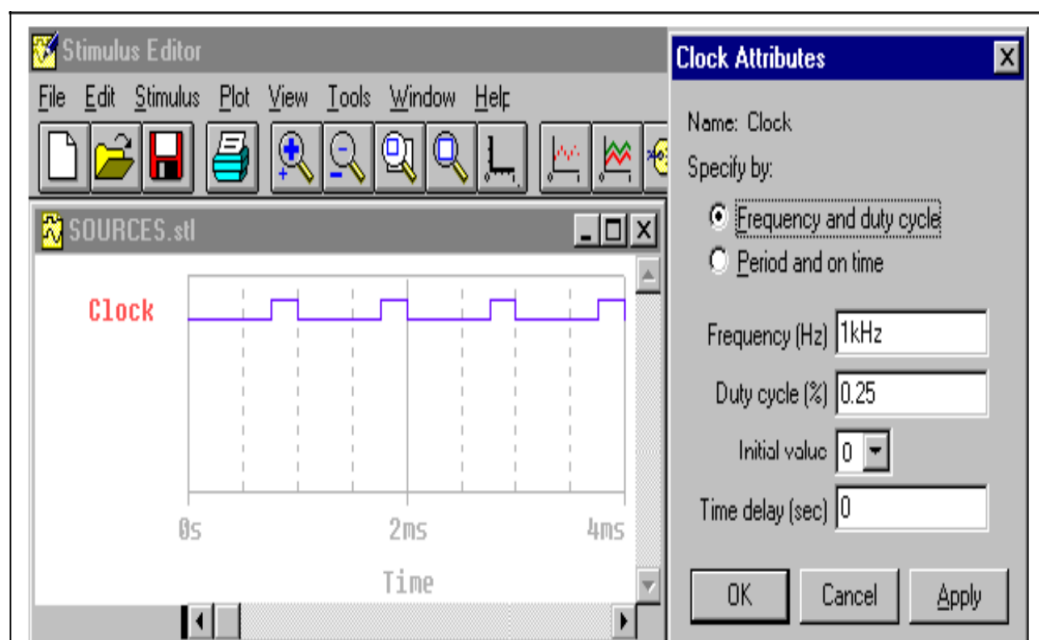
La fenêtre ci-contre doit être complétée avec :

- le nom donné au signal (il est préférable d'utiliser le même nom que le net alias figurant sur le schéma)
- la spécification du type de stimulus
  - analogique (EXP / PULSE / PWL / SFFM / SIN)
  - digital (Clock / Signal / Bus)



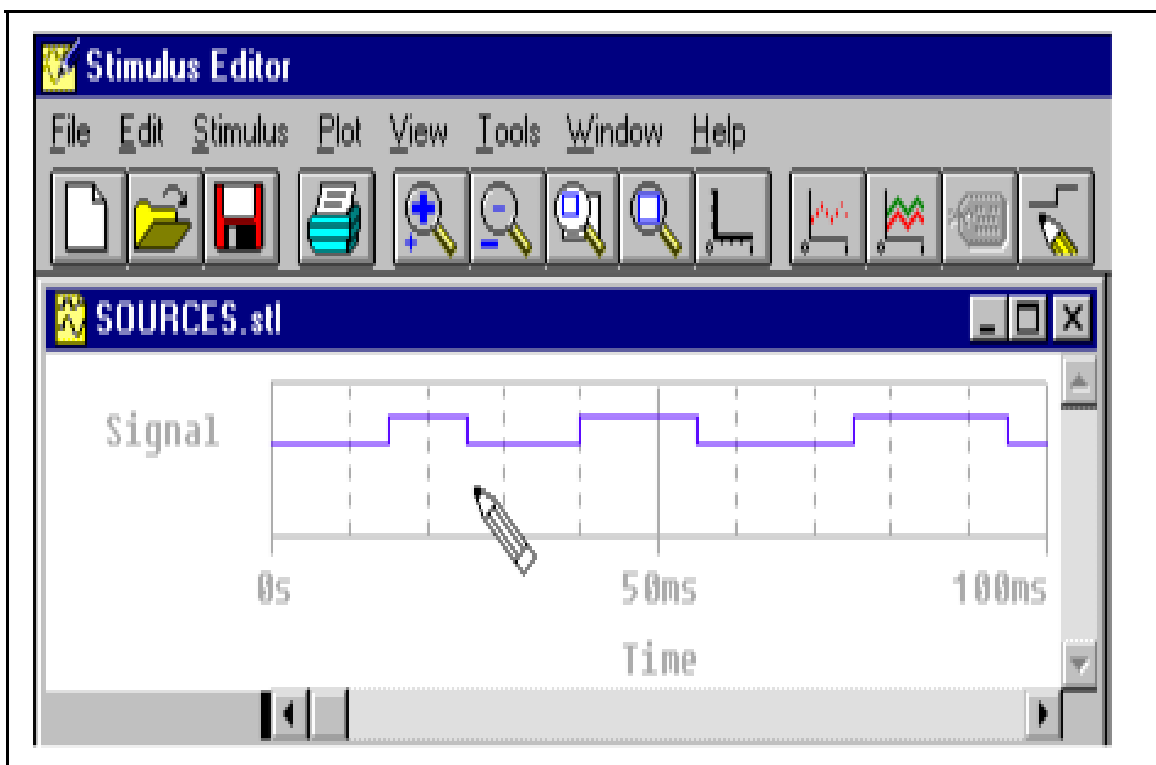
Les paramètres des signaux logiques sont :

- Stimulus « Clock » :



- Stimulus « Signal » :

- Stimulus « Signal » :



**Un stimulus défini avec l'option « Signal » ne peut être périodique.**

La définition de chaque changement d'état s'effectue en cliquant sur l'icône



Le curseur change alors de forme : il est représenté par un crayon



Chaque clic introduit un changement d'état à l'endroit spécifié.

**L'annulation de ce mode de fonctionnement s'effectue par un clic droit.**

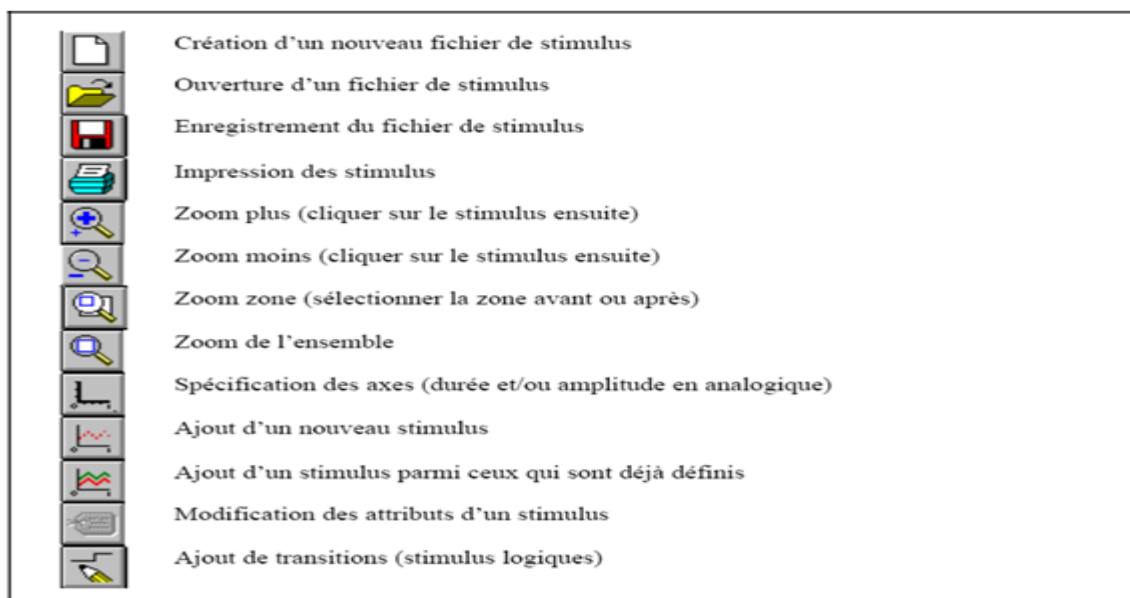
La suppression d'une transition s'effectue en sélectionnant la transition, puis en appuyant sur la touche « Suppr »

Le déplacement d'une transition s'effectue en la sélectionnant, puis en la déplaçant à la souris

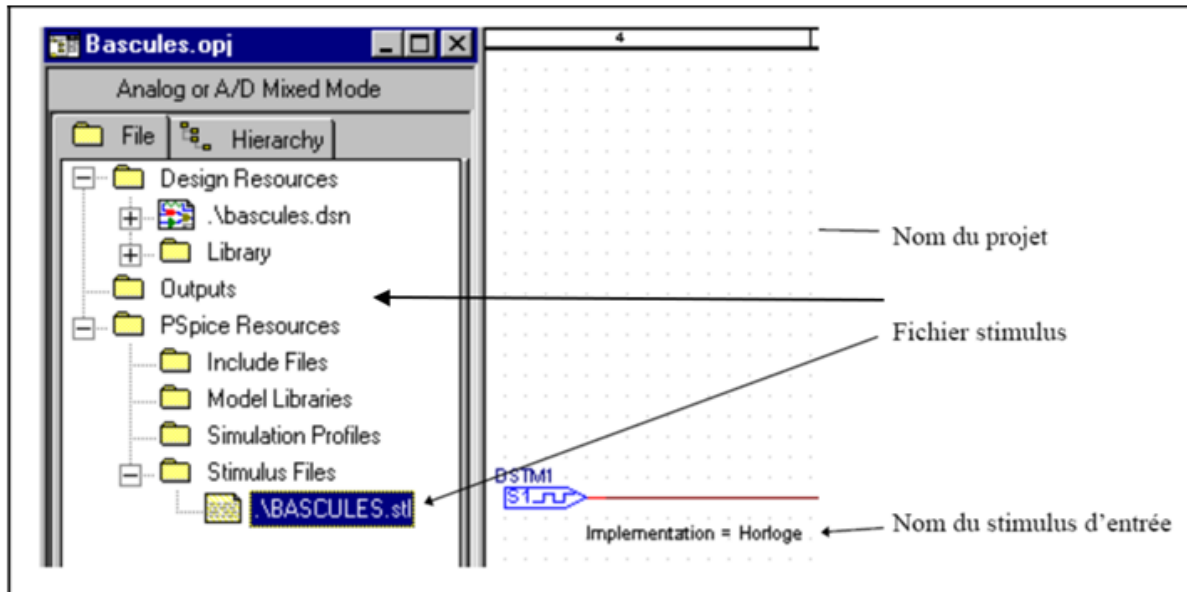
La modification de la date d'une transition (pour obtenir une valeur précise) s'effectue par un double-clic sur la transition à modifier, puis en spécifiant la date souhaitée.

Stimulus « Bus » : après avoir mentionné le nombre de bits constituant le bus, les actions possibles sont les mêmes que pour un « Signal ».

Barred'icônes de OrCadPSpice Stimulus Editor:



La fermeture de l'éditeur de stimulus entraîne la sauvegarde du fichier de stimulus « NomDuProjet.STL » et l'attribution du nom donné au stimulus à la propriété « Implémentation » de la source utilisée (en répondant « Oui » aux demandes de sauvegarde).






### 3.5 Spécification des signaux à visualiser

Il est nécessaire de définir dans OrCad Capture les différents signaux à visualiser en :

- donnant un nom de label (Net Alias) aux fils de liaison correspondants. Ceci est facultatif, mais permet d'avoir des noms de courbes plus explicites : V(Entree) au lieu de V (U2A : Y) par exemple.

Espaces et lettres accentuées totalement interdit.

- plaçant des « sondes » de mesure sur les fils de liaison grâce à l'option PSpice - Markers - ... ou en cliquant sur l'une des icônes  (sonde de tension)  (sonde de courant)  (sonde différentielle).


### 3.6. Les profils de simulation

#### 3.6.1. Création d'un profil de simulation

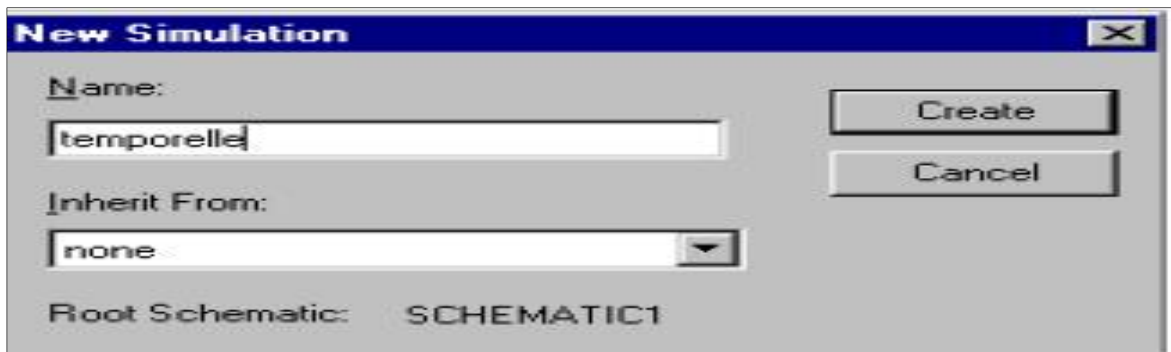
Un profil de simulation permet de définir les paramètres de la simulation :

- type d'analyse (temporelle, fréquentielle, continue ...)
- durée, plages de fréquences, limites de variation

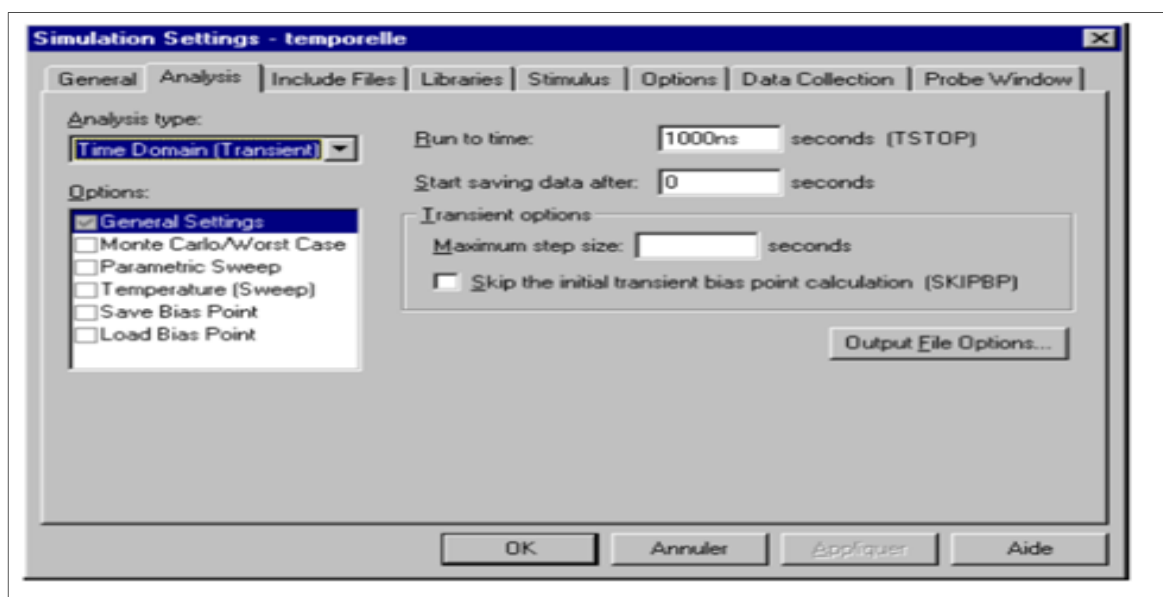
-bibliothèques de modèles de simulation utilisées

La création d'un nouveau profil de simulation s'effectue en choisissant l'option PSpice–New Simulation Profile ou en cliquant sur l'icône 

- La fenêtre suivante s'affiche :

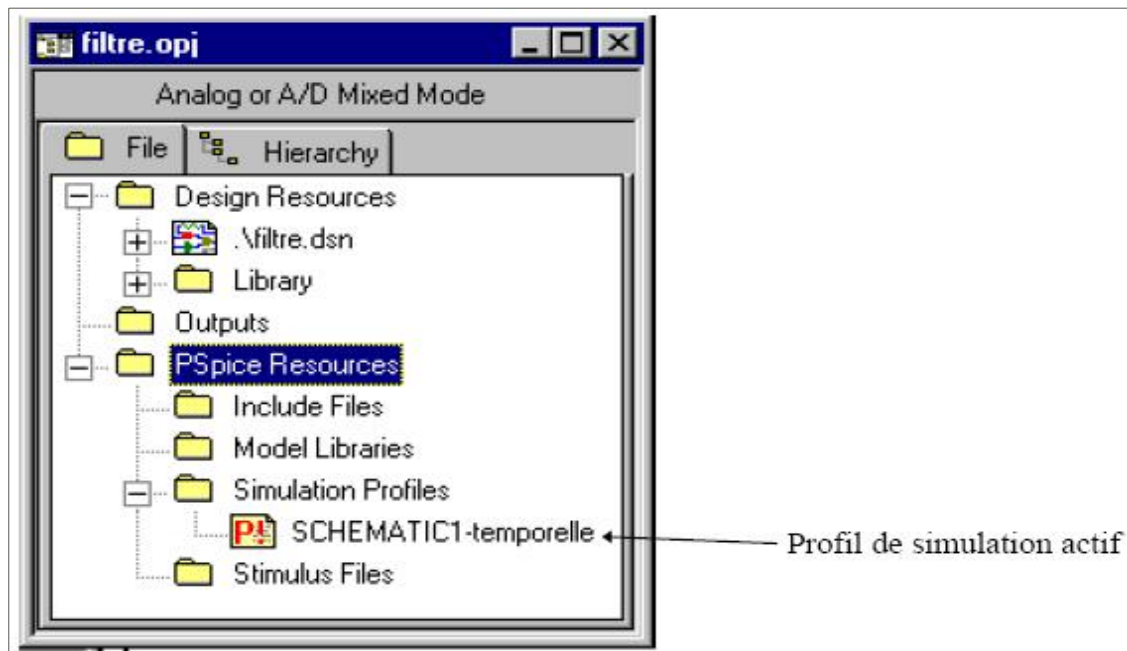


- Spécifier (dans la zone « Name ») un nom pour la simulation souhaitée (exemple : temporelle ou fréquentielle ou continue). La fenêtre suivante s'affiche :



- Choisir l'option correspondante à l'analyse souhaitée dans la boîte « Analysis type » :
  - time domain (transient) : analyse temporelle
  - DC sweep : analyse continue
  - AC sweep / Noise : analyse fréquentielle
  - Bias point : calcul des points de polarisation
- Valider par « OK »


Un fichier apparaît alors dans le Gestionnaire de projet, dans la section « PSpiceResources / Simulation Profiles » :




### 3.6.2. Modification d'un profil de simulation

La modification des paramètres de simulation peut s'effectuer :

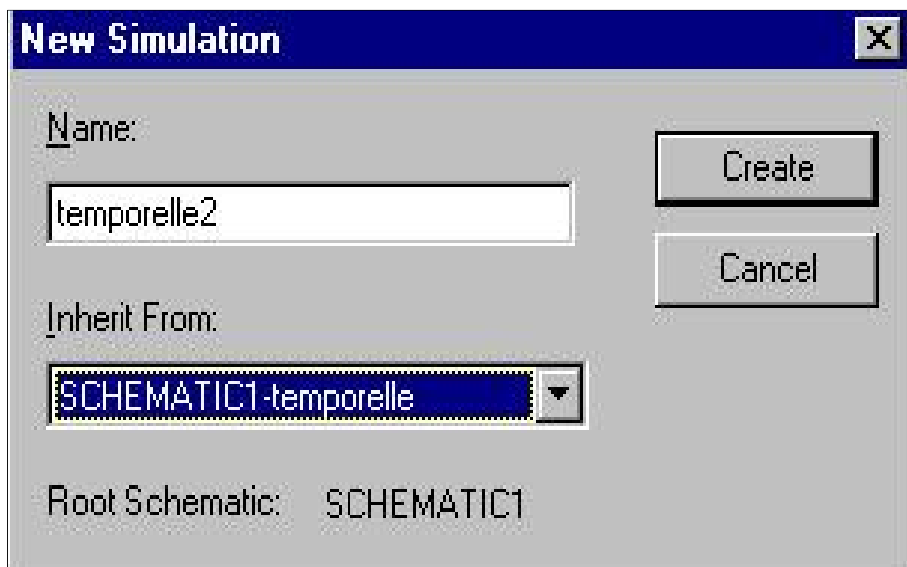
Soit dans OrCad Capture en choisissant l'option PSpice - Edit Simulation Settings ou en cliquant sur l'icône 

Soit dans OrCadPSpice en choisissant l'option Simulation - Edit Profile ou en cliquant sur l'icône 

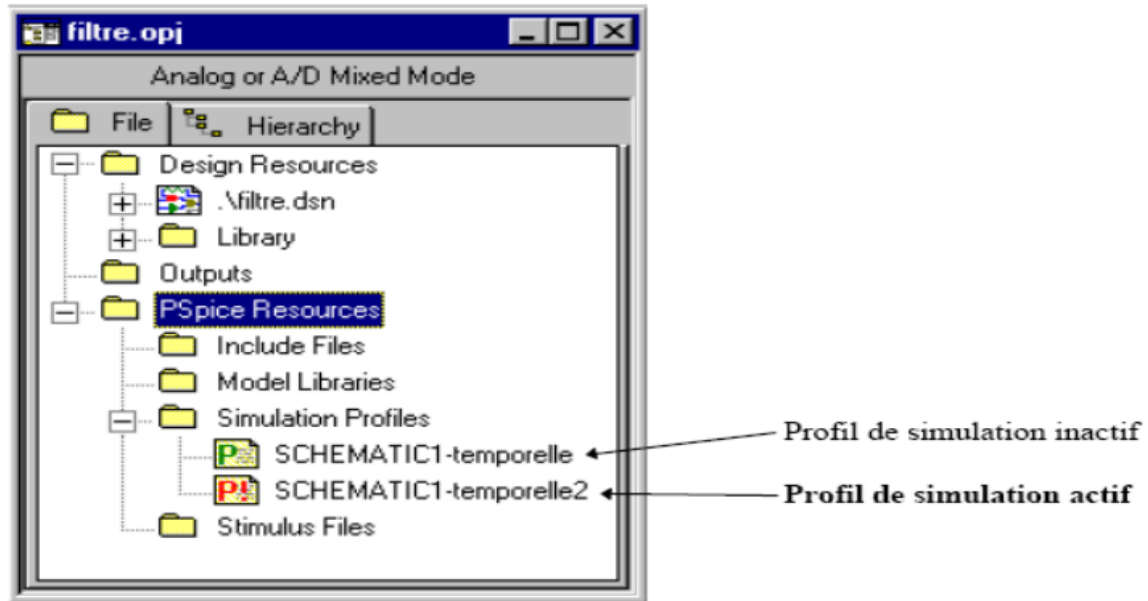
### 3.6.3. Ajout d'un profil de simulation

Il est possible, pour un même schéma, de définir plusieurs simulations (plages de fréquences différentes pour une analyse fréquentielle par exemple). L'ajout d'un profil de simulation s'effectue dans OrCad Capture en cliquant sur l'icône . Spécifier un nom pour la simulation souhaitée (exemple : temporelle ou fréquentielle...).

Sélectionner, éventuellement, un Profil précédemment défini comme modèle dans la boîte « Inheritfrom » :



Un nouveau fichier apparaît alors dans le Gestionnaire de projet, dans la section « PSpiceResources / Simulation Profiles »



Le choix du profil de simulation à prendre en compte pour la prochaine simulation s'effectue en :

☞ cliquant du bouton droit de la souris sur le nom du profil de simulation souhaité

☞ choisissant dans le menu contextuel l'option « Make active »

L'icône associée au profil de simulation choisi présente alors un point d'exclamation (!) et devient rouge.

### 3.7.Lancement d'une simulation

#### 3.7.1.Lancement du simulateur

Le lancement d'une simulation entraîne les actions suivantes :

- vérification de l'annotation des composants (numérotation des repères)
- génération du fichier Netlist
- calcul des différents courants et tensions du schéma en fonction de l'analyse demandée
- affichage des courbes des courants et tensions pour lesquels une « sonde » a été placée sur le schéma.

Il s'effectue en choisissant:

- dans OrCad Capture : l'option PSpice - Run ou en cliquant sur l'icône
- dans OrCadPSpice : l'option Simulation - Run ou en cliquant sur l'icône



### 3.7.2. Erreurs possibles

Le lancement de la simulation peut provoquer les erreurs suivantes :

- erreur d'annotation de composants : une fenêtre dans OrCad Capture mentionne cette erreur.

Le détail est affiché dans le fichier « Session Log ». Afficher celui-ci en choisissant l'option Window - Session Log

```
The following 1 points have been identified as net connectivity change points from the last operation
-----
(1.80, 0.70)
Creating PSpice Netlist
Writing PSpice Netlist D:\PROJETS\PROJETS ORCAD\ESSAIS\FILTRE-SCHEMATIC1.net
ERROR [NET0051] Duplicate reference found 'R1'.
```

Solution : lancer une annotation automatique ou modifier chacun des repères des composants comportant une erreur.

- oubli d'un symbole de masse servant de référence pour le calcul de toutes les tensions. Ce symbole est indispensable à toute simulation analogique. Le message d'erreur s'affiche dans OrCadPSpice :

```
ERROR -- Node N00022 isfloating
```

Solution : placer le symbole de masse sur le schéma (nom du symbole : 0) grâce à l'icône (Place Ground).

- le modèle de simulation d'un composant n'a pas été trouvé parmi les

librairies de modèles sélectionnées par défaut. Le message d'erreurs'affichédansOrCadP Spice :

ERROR -- Subcircuit 7400A used by X\_U1A is undefined


Solution : vérifier la liste des librairies de modèles de simulation en choisissant l'onglet « Libraries » du profil de Simulation

- un composant utilisé sur le schéma ne comporte pas les paramètres nécessaires pour une simulation (exemples : Bornier, Connecteur ou composant choisi dans une librairie de symboles incorrecte). Un point vert signale cette erreur sur le schéma. Ceci se produit pour un schéma destiné à la simulation et au routage.



### 3.8. Exploitation d'une simulation

#### 3.8.1. Affichage des points calculés

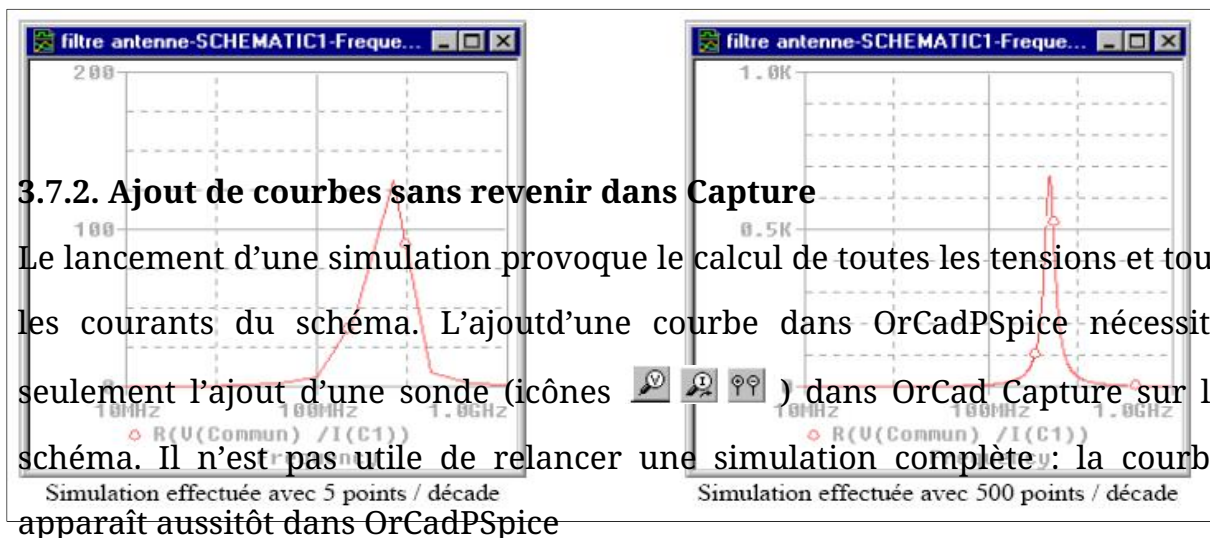
Lors d'une simulation temporelle, le pas de calcul (step size) est adapté automatiquement en fonction de la variation des grandeurs calculées : une variation forte entraîne une diminution du pas de calcul.

Pour une simulation fréquentielle ou continue, le nombre de points de calcul est spécifié dans le profil de simulation. Dans certains cas, le résultat obtenu manque de précision. Afficher alors les différents points de calculs en cliquant sur l'icône .

Si on constate des points de calculs trop espacés, diminuer le pas de calcul maximum (maximum step size) ou augmenter le nombre de points de calcul,

en modifiant le profil de simulation (icône ) puis relancer une simulation (icône ).


Attention : un pas de calcul trop faible entraîne une durée de simulation excessive.



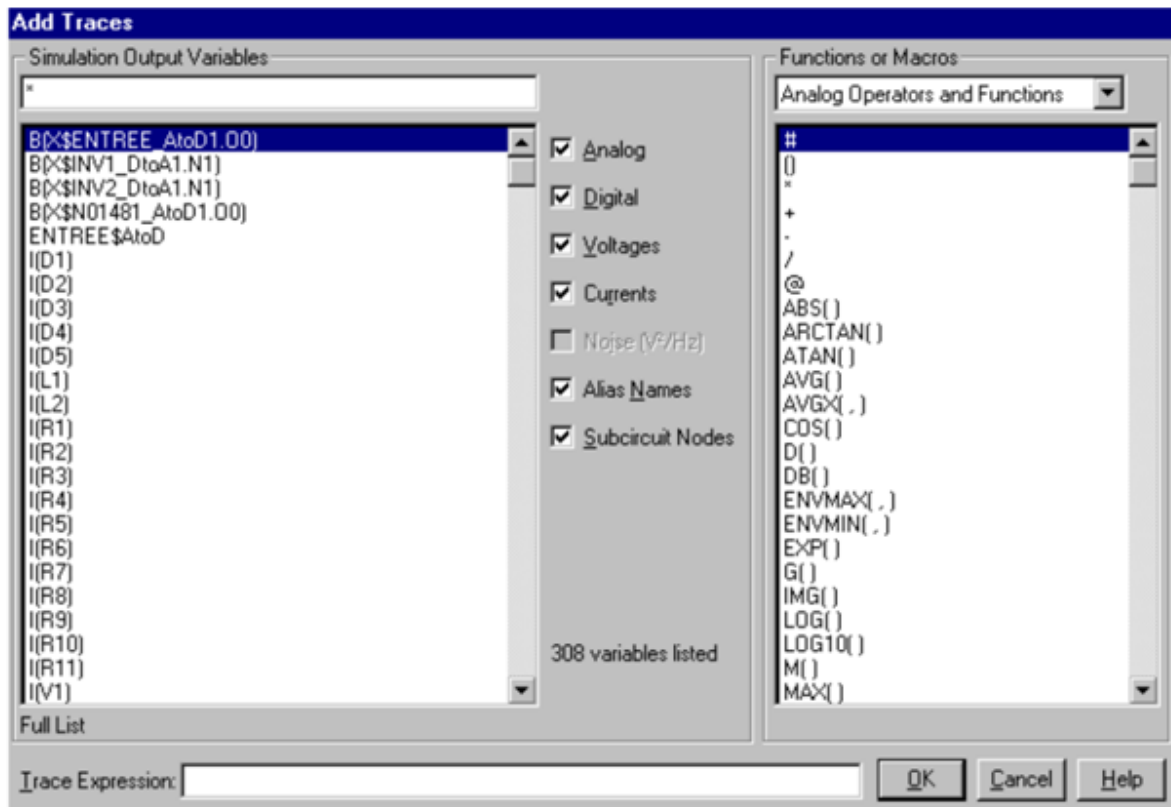
### 3.7.3. Ajout de courbes

La visualisation de courbes dans OrCadPSpice peut correspondre à des opérations mathématiques entre plusieurs courbes, comme par exemple :  $20\text{LOG}_{10}(V(S) / V(E))$ .

Ceci s'effectue en choisissant l'option Trace - Add Trace ou en cliquant sur

l'icône 

La fenêtre suivante permet de définir les différentes courbes à ajouter ou les opérations à effectuer :



Remarque : il est possible de limiter le nombre de courbes listées en décochant les options non souhaitées :

Analog	grandeurs analogiques	Currents	Courants
Digital	grandeurs logiques	Alias Names	Noms de Label
Voltages	Tensions	Subcircuit Nodes	sous-circuits internes

La case « Trace expression » sert à indiquer le nom des grandeurs à visualiser, ainsi que les fonctions mathématiques à réaliser. Il suffit de cliquer sur un élément de la zone « Variables » ou de la zone « Fonctions ».

### 3.7.4. Fonctions définies dans PSpice

Les fonctions suivantes sont définies dans OrCadPSpice

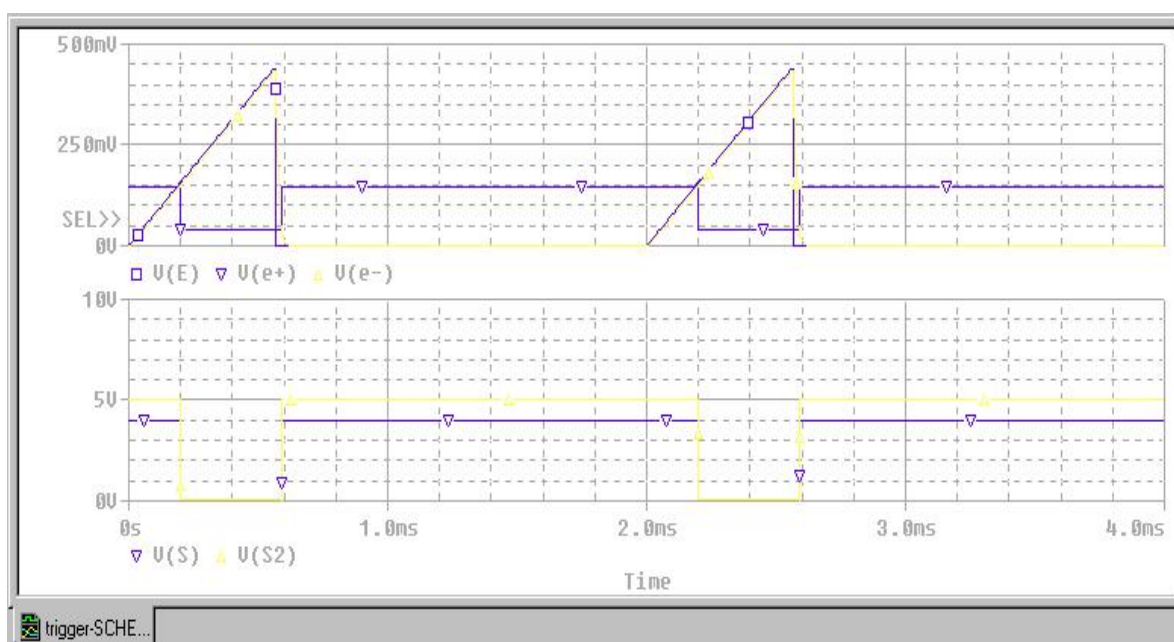
ABS(x)	valeur absolue de x	M(x)	Magnitude de x
ARCTAN(x)	Arc tangente de x (en radians)	MAX(x)	Maximum de x
ATAN(x)	Arc tangente de x (en radians)	MIN(x)	Minimum de x
AVG(x)	Valeur moyenne de x sur l'intervalle des abscisses	P(x)	Phase de x (en degrés)
AVGX(x,d)	Valeur moyenne de x sur l'intervalle des abscisses commençant à d	PWR(x,y)	Puissance ( $x^y$ )
COS(x)	Cosinus de x (en radians)	R(x)	Partie réelle de x
D(x)	Dérivée de x par rapport à la variable d'abscisse	RMS(x)	Valeur efficace de x
DB(x)	Gain en décibel de x	S(x)	Intégrale de x sur la variable d'abscisse
EXP(x)	Exponentielle de x	SGN(x)	Signe ( $x>0 : 1 / x=0 : 0 / x<0 : -1$ )
G(x)	Délai de groupe de x	SIN(x)	Sinus de x (en radians)
IMG(x)	Partie imaginaire de x	SQRT(x)	Racine carrée de x
LOG(x)	Logarithme népérien de x	TAN(x)	Tangente de x (en radians)
LOG10(x)	Logarithme décimal de x		

### 3.7.5. Ajout d'une fenêtre de visualisation de courbes

Dans le cas où plusieurs courbes doivent être visualisées avec des échelles différentes, il est nécessaire d'ajouter une ou plusieurs fenêtres de visualisation. Celles-ci peuvent être soit sur le même écran, soit sur des écrans distincts.

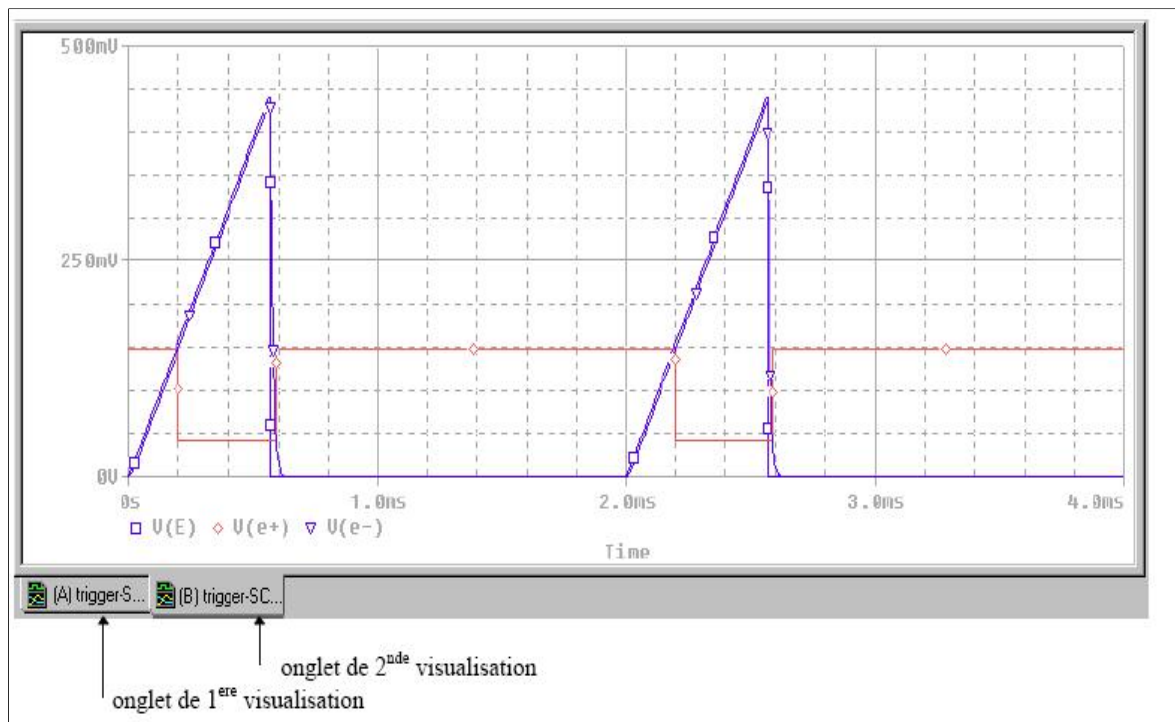
#### Ajout de fenêtres de visualisation sur le même écran :

choisir l'option Plot - Add Plot to Window : une fenêtre supplémentaire apparaît sur le même écran (il est possible d'en avoir 3 simultanément).



### Ajout de fenêtres de visualisation sur un nouvel écran :

Choisir l'option Window - New Window : un nouvel écran de simulation apparaît. Voir le § 3.16.2 pour mentionner les nouvelles courbes à visualiser. Il est ensuite possible de basculer d'un écran à un autre en cliquant sur l'onglet correspondant.



### 3.7.6. Sauvegarde des paramètres de visualisation



Dans certains cas, la visualisation des courbes nécessite diverses opérations pouvant être fastidieuses :

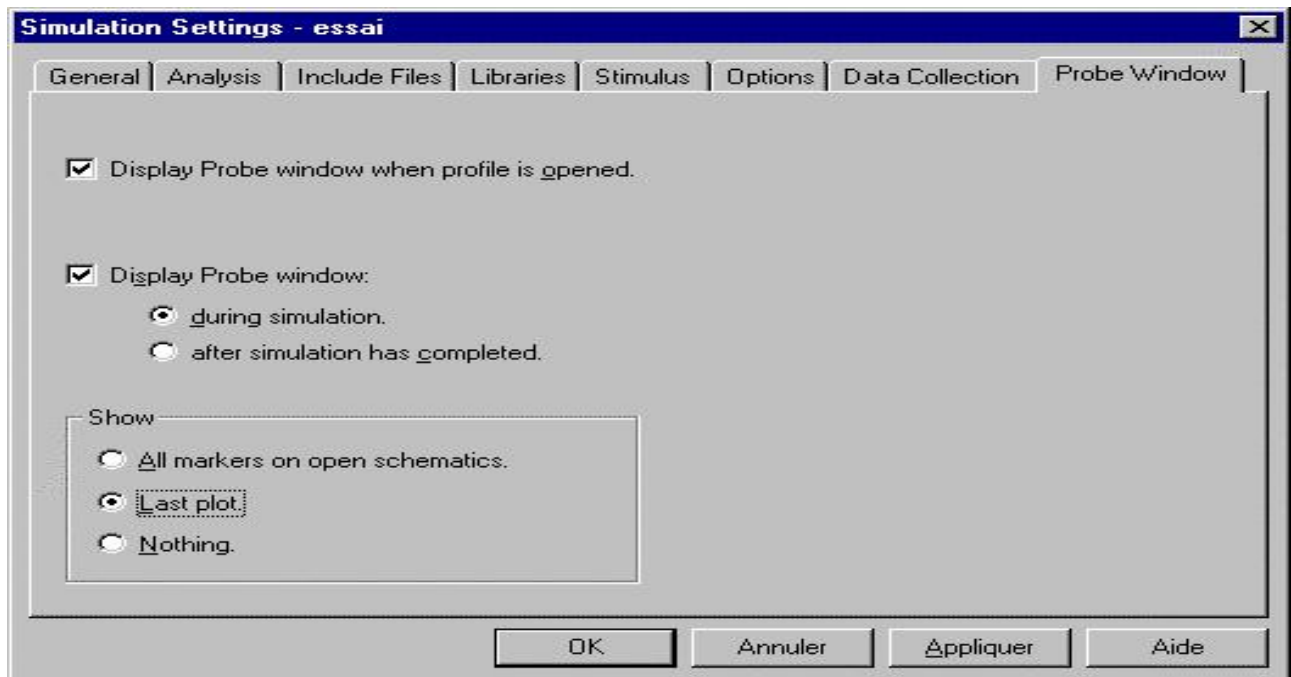
- ajout de fenêtres de visualisation sur le même écran
- spécification d'échelles particulières
- ajout de courbes résultant de calculs...

Pour éviter d'avoir à redéfinir les paramètres de visualisation après chaque nouvelle simulation, il est possible de:

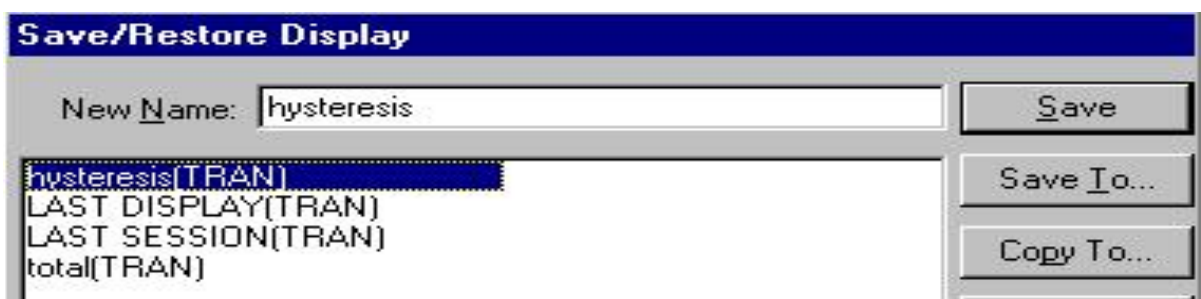
- conserver les conditions de visualisation de la simulation précédente :

## Chapitre 3 LOGICIEL PSPICE

Cocher la case « Show - Last plot » dans l'onglet « Probe Window » du profil de simulation (activé en cliquant sur l'icône  de OrCad Capture ou l'icône  de OrCadPSpice).




- sauvegarder les conditions de visualisation en choisissant l'option Window - Display Control dans OrCadPSpice. Donner un nom aux paramètres de visualisation puis cliquer sur « Save » et enfin sur « Close ».



La restitution des paramètres de visualisation s'effectue en choisissant l'option Window - Display Control puis en double cliquant sur le nom donné auparavant aux paramètres de visualisation.

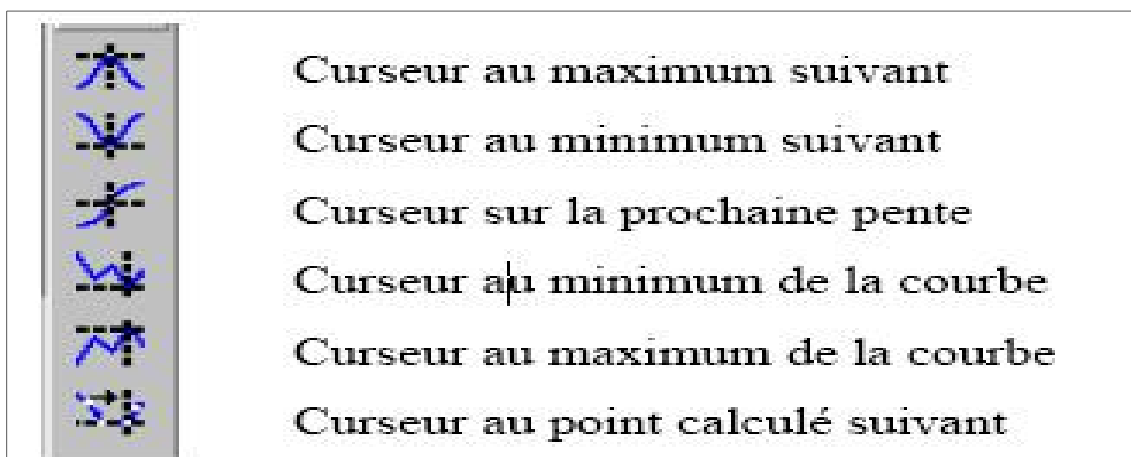
### 3.7.6. Utilisation des marqueurs

La mesure de grandeurs à partir des courbes visualisées s'effectue en cliquant sur l'icône .

Le choix des curseurs s'effectue en sélectionnant le symbole associé à la courbe considérée (et non le nom du signal). Un clic du bouton gauche sélectionne le premier marqueur (A1). Un clic du bouton droit sélectionne le second marqueur (A2).

Le déplacement des curseurs s'effectue en maintenant le bouton de la souris appuyé et en la déplaçant (bouton gauche : 1<sup>er</sup> curseur ; bouton droit : 2<sup>nd</sup> curseur).

Les icônes suivantes permettent de positionner automatiquement le curseur :



### **Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le principe de fonctionnement du logiciel PSPICE que nous allons utiliser principalement pour modéliser et optimiser et simuler le détecteur au silicium n-in-p. De façon très succincte, nous pouvons dire que ce simulateur de dispositifs est basé sur la résolution simultanée de l'équation de Poisson et de l'équation de continuité. Il calcule à chaque instant et en tout point de l'espace en une suite d'éléments finis, la concentration des électrons et des trous et la valeur du potentiel électrostatique. PSPICE, nous permettons d'expérimenter l'effet modification d'un paramètre technologique sur une structure.

# **Chapitre 04**

## **Simulations et résultats**

#### 4.1 Structure modélisée et équations de base

Le principe de détection d'un détecteur semi-conducteur est basé sur l'établissement d'une zone de charge libre dans le détecteur où un champ électrique règne. Une radiation va interagir avec le détecteur en créant des paires électron-trou.

Les charges libres créées par une radiation dans un détecteur semi-conducteur sont accélérées par le champ électrique interne jusqu'à leur collection aux électrodes. Leur mouvement induit un signal électrique image sur les électrodes du détecteur. ce courant induit a été donné par l'équation suivante:

$$I_{oi}(t) = - \frac{qN(t)}{(d + d_2)} \cdot d \sqrt{\frac{2 \cdot q N_{db}}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{si}}} \cdot \sqrt{V} \cdot \exp^{-t/\tau_c} \quad (4.1)$$

Ou  $q$  est la charge de l'électron,  $N(t)$  est le nombre des électrons diffusés pendant une impulsion de laser,  $k$  la constante de Boltzmann, la constante de temps de collection qui définit le mouvement de l'électron est donnée par:

$$\tau_c = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{si}}{q \cdot d \cdot N_{db}}$$

Ce temps est déterminé par la mobilité de diffusion  $\mu_d$  et par la densité des défauts ionisés  $N_{db}$ ,  $V$  est la tension de polarisation du capteur. La charge totale créée par les électrons diffusés est définie par :

$$Q_{pic} = -\frac{qN(t)}{(d+d_2)} \cdot d \sqrt{\frac{2 \cdot q N_{db}}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_{si}}} \cdot \sqrt{V} \cdot \tau_c \left[ \left( \frac{\tau_c}{t_1} \exp\left(-\frac{t_1}{\tau_c}\right) - 1 \right) + \exp\left(-\frac{t_2}{\tau_c}\right) \right] \quad (4.2)$$

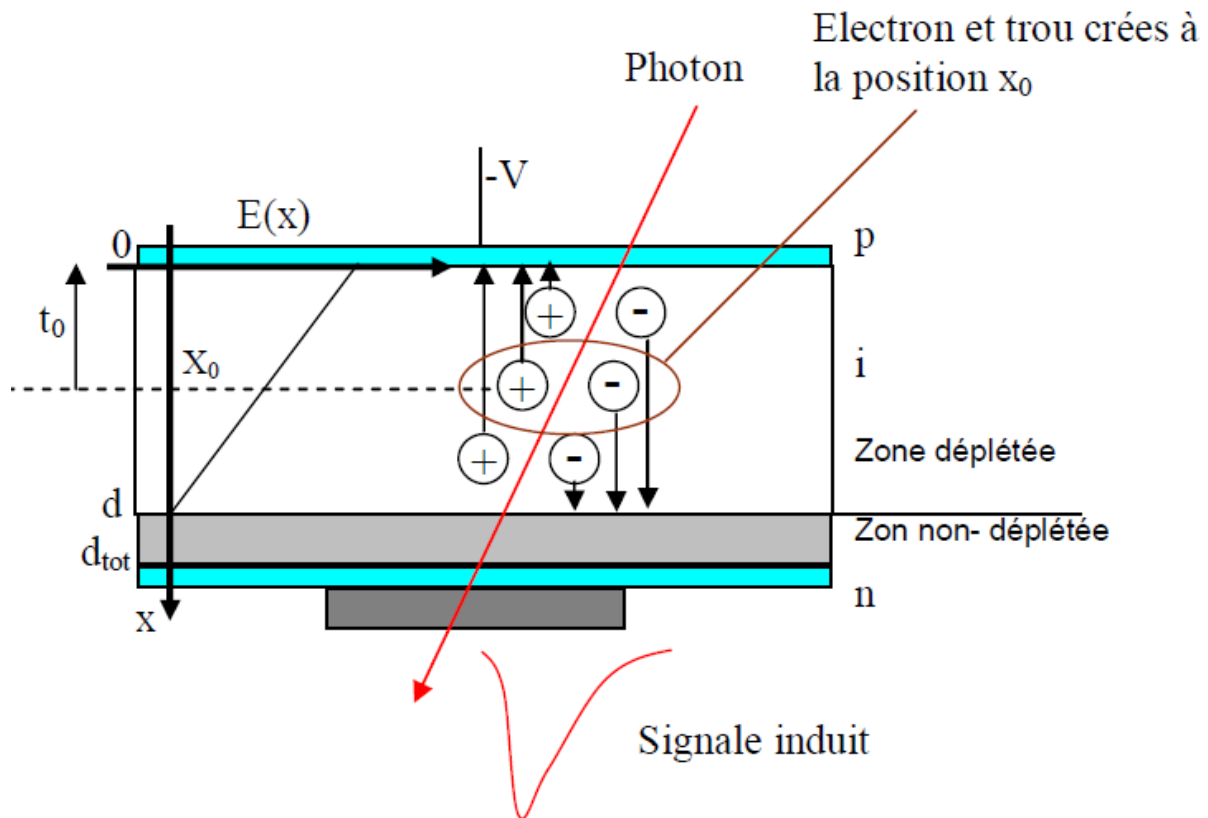
$Q_{pic}$  peut être calculée par l'intégration de l'équation (1) de  $t_1$  à  $t_2$  et  $N(t)=N$ , où  $N$  est le nombre total des électrons diffusés.

Notre définition pour le courant d'obscurité en polarisation directe est basée sur l'équation :

$$I_{od} = I_s \cdot (e^{q \cdot V / N_f \cdot k \cdot T_e} - 1) \quad (4.3)$$

Où  $N_f$  est le facteur d'idealité,  $T_e$  est la température ambiante.

$$I_{Obscurit} = I_{od} + I_{oi} \quad (4.4)$$



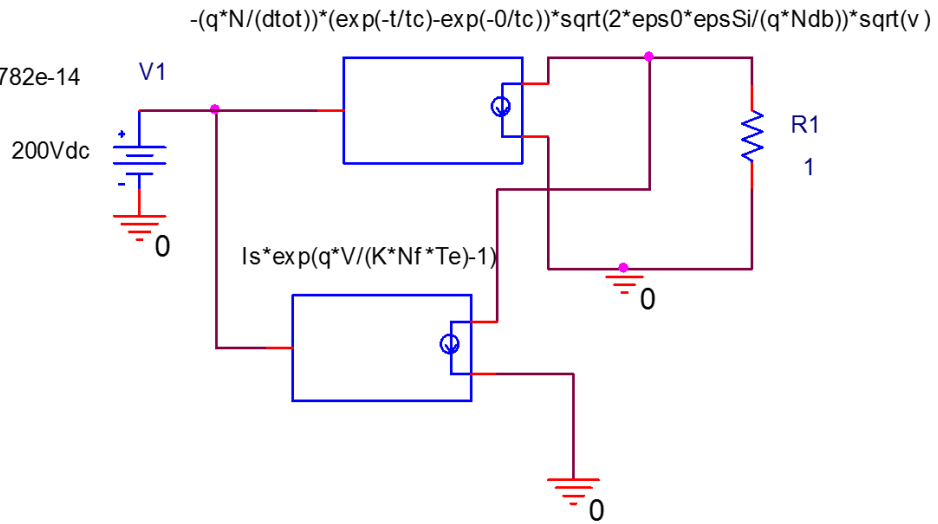
**Fig 11:** Schéma d'une coupe d'un détecteur en Si-a :H. Les paires électron- trou sont générées à la position  $x_0$  dans la région déplétée. Les électrons générés diffusent jusqu'à  $x=d$  ( $x=0$ ) puis ils sont collectés.

#### 4.2 Modèle comportemental du détecteur

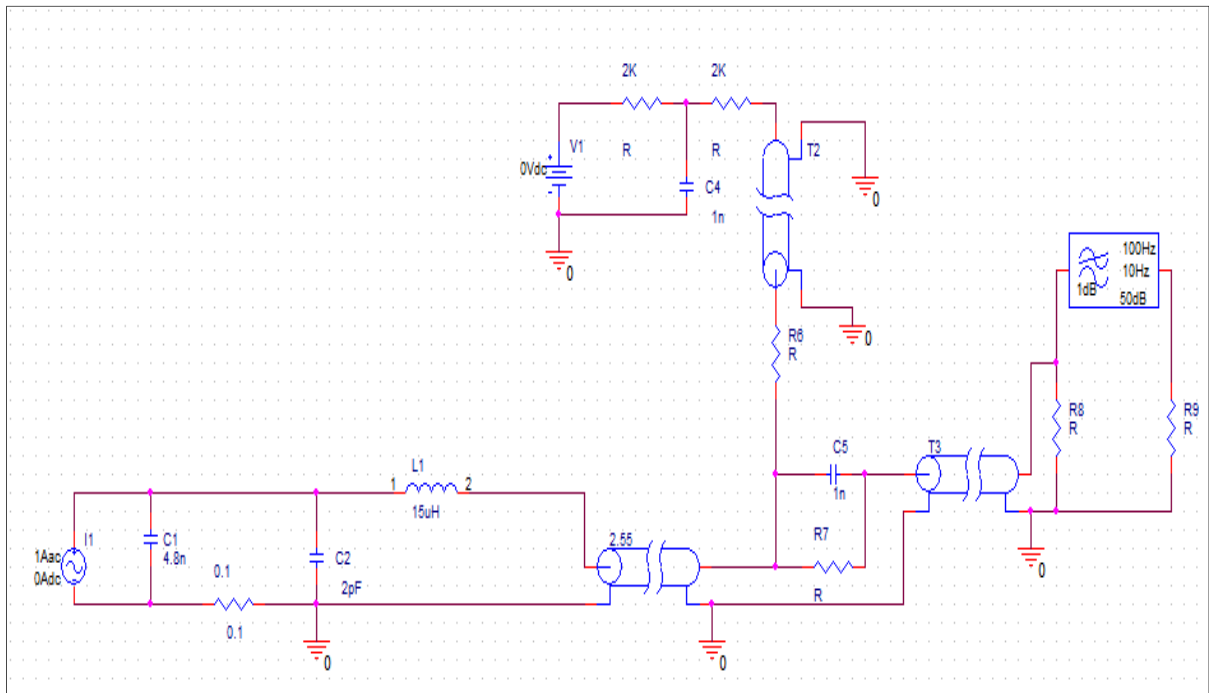
La modélisation de détecteur est présentée sur la figure 4-1. Le circuit équivalent de détecteur utilise une combinaison des différents composants électroniques de base figure 4-2 et 4-3. Il est à remarquer que le circuit est commandé en tension, les calculs et la lecture sont faites en courant. Le courant d'obscurité a été simulé avec deux générateurs de courants commandés en tension, un pour la polarisation directe, et l'autre pour la polarisation inverse. Le courant sous radiation a été simulé à l'aide du paramètre  $N$  qui représente le nombre des électrons créés par une radiation.

**PARAMETERS:**

$t_c = 5e-9$   
 $t = 20n$   
 $N = 10800$   
 $d = 1\mu$   
 $q = 1.6e-19$   
 $ud = 2$   
 $Ndb = 6.11e14$   
 $eps0 = 8.85418782e-14$   
 $epsSi = 12$   
 $x = 4e-6$   
 $dtot = 20u$   
 $Is = 50f$   
 $V = 200$   
 $K = 1.38e-23$   
 $Te = 300$   
 $Nf = 1.6$   
 $R1 = 1$



**Figure 12 :** Schéma SPICE du circuit équivalent de détecteur

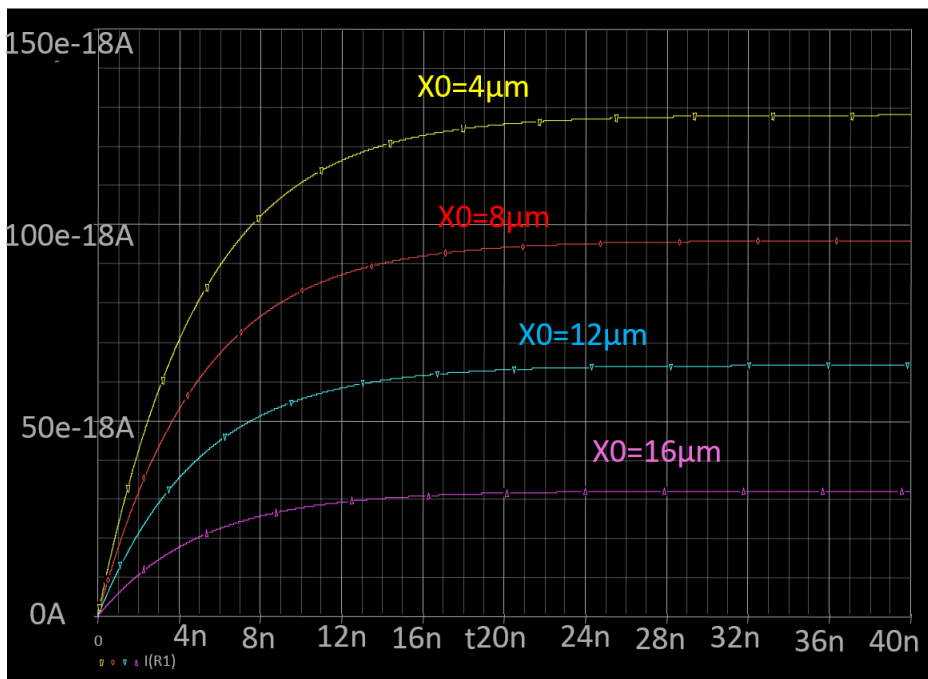


**Figure 13 :** Le circuit électronique utilisé pour la simulation du conditionneur

de capteur par PSPICE

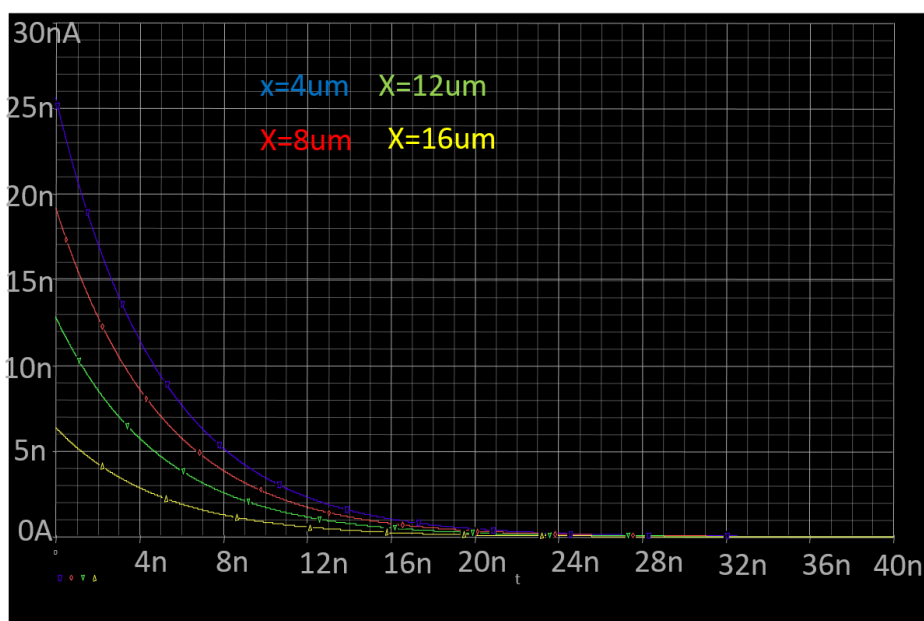
Le signal induit par 1000 électrons créés à différentes positions, pour un détecteur d'épaisseur de  $20\mu\text{m}$  du détecteur à une tension de polarisation inverse de  $200\text{V}$ , a été simulé. Les résultats obtenus sont présentés dans la figure 4-3.

La charge totale  $Q_e$  induite par  $N$  électrons créés à la position  $x_0$  peut être calculée par intégration de l'équation 4-1 avec  $t=0$  jusqu'à un temps  $t$ . La charge totale dépend de la longueur de diffusion totale des électrons. Cette relation est illustrée par la simulation présentée dans la figure 4-3. La charge totale  $Q_e$  est intégrée pendant  $20\text{ns}$ . Le signal induit par les électrons créés diminue linéairement avec l'augmentation de la longueur le long de laquelle les électrons sont créés. : Nous remarquons qu'au-delà la valeur de la charge créée à la position  $x_0$  croît rapidement pour atteindre finalement un maximum. Plus la distance est grande et plus la charge collectée est faible et le maximum est atteint plus rapidement. En effet, les charges étant loin de

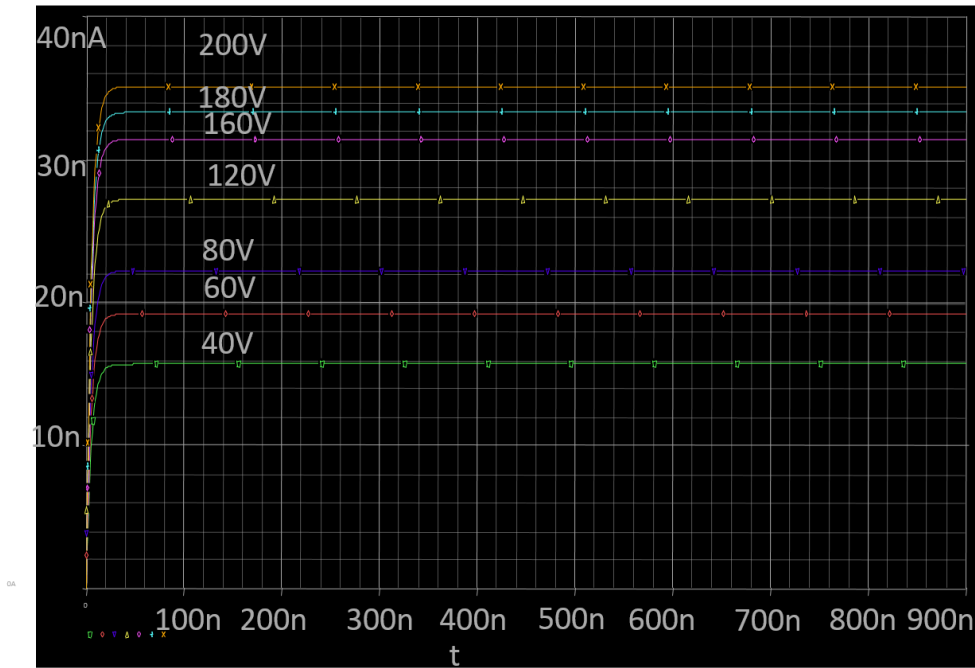


l'électrode, l'énergie nécessaire pour atteindre celle-ci est grande. De ce fait, la probabilité pour atteindre l'électrode devient faible. Par ailleurs, nous constatons que plus la tension de polarisation du détecteur est faible plus la charge collectée diminue.

**Figure 14 :** Intégrale du signal représentant la charge totale collectée par 1000e- créés à la position  $x_0$  de la région déplétée du détecteur, pour une diode d'épaisseur de  $20\mu\text{m}$  et une polarisation inverse de 200V.



**Figure 15 :** Courant absolu généré par 1000e- créés à la position  $x_0$  de la région déplétée du détecteur, pour une diode d'épaisseur de  $20\mu\text{m}$  et une polarisation inverse de 200V.



**Figure 16 :** Intégrale du signal représentant la charge totale collectée par  $10800e^-$  pour une diode d'épaisseur de  $20\mu\text{m}$  pour différentes tensions de polarisation inverse.

La faisabilité de détection des radiations par un détecteur à base de silicium amorphe a été démontré et les mécanismes nécessaires à la création du signal ont été étudiés dans le but de comprendre les performances et les limites de ce type de détecteur. Les résultats de simulation que nous avons obtenus ainsi que l'approche théorique qui a permis d'y aboutir, montrent que les détecteurs épais peuvent offrir une détection optimisée. En effet, le signal induit par les électrons est maximum pour une déplétion complète du détecteur, De ce fait, l'utilisation des détecteurs épais améliore l'efficacité de détection par augmentation du volume actif et permet également d'appliquer une tension inverse élevée, ce qui augmente le signal induit par les trous. Le désordre et par conséquent la présence d'un grand nombre de défauts dans le Si-a:H complique l'analyse des résultats; En plus de l'aspect économique et la possibilité de déposer de larges surfaces ; tous ces avantages font du matériau

Si-a:H un candidat potentiel dans l'utilisation de détection de radiation, pour un coût raisonnable , à des basses températures, ainsi qu'une haute absorption optique

# **Conclusion générale**

Dans ce travail nous avons d'abord présenté Le grand collisionneur d'hadrons (*LHC*) de l'Organisation européenne pour la recherche nucléaire (CERN) et l'expérience Atlas. Nous avons ensuite présenté le défi pour les capteurs au silicium pixélisés pour le suivi des particules chargées dans les futures expériences de la physique des hautes énergies. Nous avons présentée principe de fonctionnement des capteurs de particules au silicium et les bases théoriques nécessaires pour cette étude. Afin de simuler la structure et les caractéristiques électriques nous avons utilisé le logiciel SPICE. Après avoir présenté ce simulateur, la structure a été construite en tenant compte des différents paramètres géométriques et physiques trouvées dans la littérature. La tension de polarisation et la collection des charges sont des paramètres importants pour les détecteurs des particules. La méthode de simulation proposée permettra de prévoir l'évolution des différents paramètres pour réaliser des économies en temps et en coût sur les tests relatifs à la variation des paramètres physiques et technologiques des capteurs. Une extension de cette simulation au capteur sous d'irradiation (protons ou neutrons) est envisagée et fera l'objet d'un travail futur.

# **Références bibliographiques**

## Références bibliographiques

- [1] CERN. The Large Hadron Collider. <http://home.web.cern.ch/topics/large-hadroncollider>. Referred 1.05.2014.
- [2] CERN. The Higgs boson. <http://home.web.cern.ch/topics/higgs-boson>. Referred 1.05.2014.
- [3] CERN. The birth of a Higgs boson. <http://home.web.cern.ch/about/updates/2013/05/birth-higgs-boson>. 1.05.2014.
- [4] CERN. How CMS detects particles. <http://cms.web.cern.ch/news/how-cms-detectsparticles>. Referred 2.05.2014.
- [5] CERN. CMS Physics. <http://cms.web.cern.ch/content/cms-physics>. Referred 2.05.2014.
- [6] CERN. CMS detector design. <http://cms.web.cern.ch/news/cms-detector-design>. Referred 2.05.2014.
- [7] The CMS tracker: addendum to the Technical Design Report. Technical Design Report CMS. CERN, Geneva, 2000.
- [9] S. M. Sze. Physics of semiconductor devices, 2nd edition. New York, WileyInterscience, 1981.
- [10] C. Amsler et al. Review of particle physics. Phys. Lett., B667:1, 2008.
- [9] S. M. Sze. Physics of semiconductor devices, 2nd edition. New York, WileyInterscience, 1981.

- [10] C. Amsler et al. Review of particle physics. Phys. Lett., B667:1, 2008.
- [11] M. Maksimow. Transient current technique characterization of silicon particle detectors. TKK, 2009.
- [12] S. Ramo. Currents induced by electron motion. Proc. IRE, 27:584–585, 1939.
- [13] G. Kramberger, V. Cindro, I. Mandic, M. Mikuz, and M. Zavrtanik. Determination of effective trapping times for electrons and holes in irradiated silicon. Nucl. Instrum. Meth., A476:645–651, 2002.

### Ouvrages

- Blanc D., Les rayonnements ionisants : détection, dosimétrie, spectrométrie, Paris, Masson, 1 997.
- Blanc D., Physique nucléaire : particules, Paris, Masson, 1 995.
- Fisher C., Les radioéléments et leurs utilisations, Paris, Eyrolles, 1 980.
- Knoll G.F., Radiation Detection and Measurement, New York, John Wiley & Sons, 2000.
- Leo WR., Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiment. A how-to approach, Berlin, Springer, 1 994.

### Périodiques

- Han J. et al., « Microfabricated high energy particle detector », Sensors and Actuators A, 54, 1 996, p. 594.
- Johansen G., Abro E., « A new CdZnTe detector system for low energy gamma ray measurement », Sensors and Actuators A, 54, 1 996, p. 493.
- Sellin P., « Recent advances in compound semiconductor radiation detectors », Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A, 513, 2003, p. 332.
- Turala M., « Silicon cracking detectors-historical overview », Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A, 541, 2005, p. 1.
- « Rayonnements ionisants », Numéro spécial du Bulletin d'information du BNM, N° 37, 1 979.

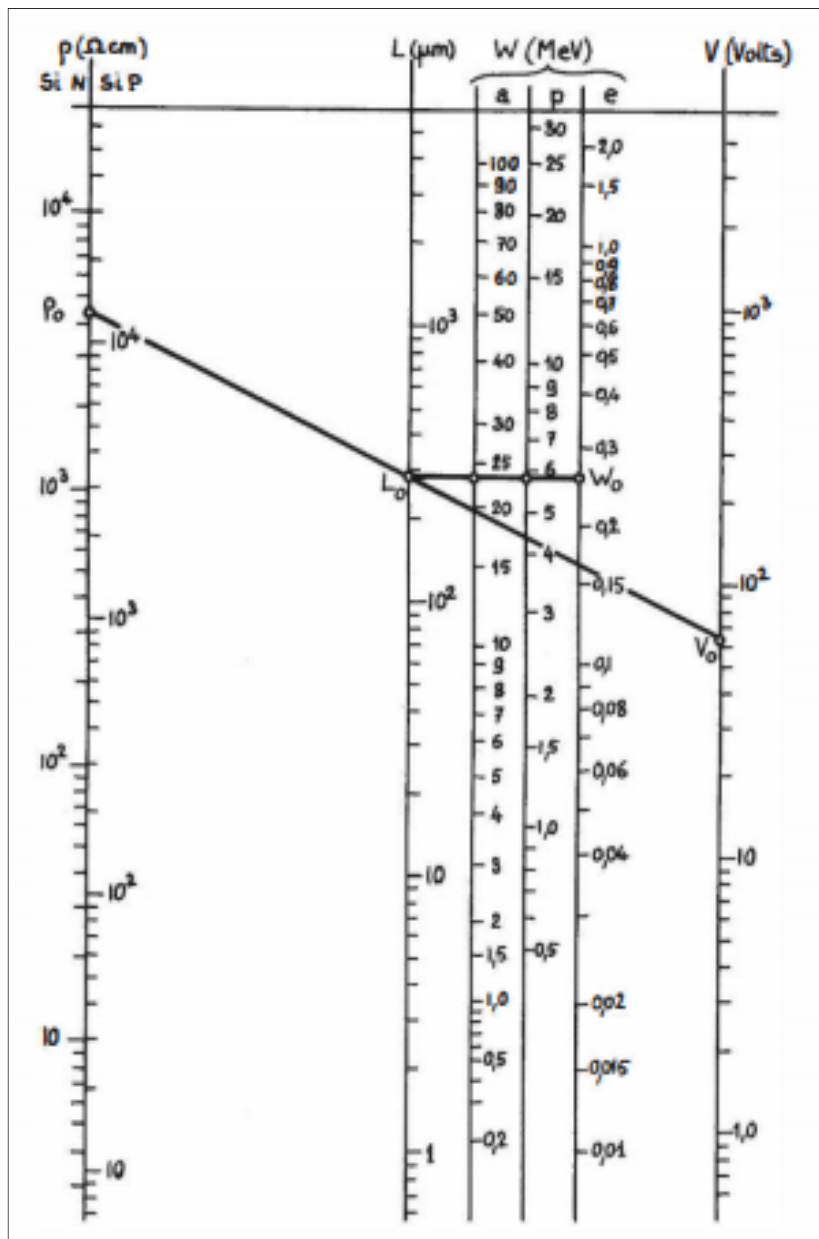
### Sites web:

(Site1) <http://www.biblio-scientifique.blogspot.com/>

# **Annexes**

## **Annexe**

Abaque pour la détermination des paramètres des détecteurs au silicium



Pour une particule chargée ( $\alpha$ :  $\alpha$  ;  $p$ : proton ;  $e$ : électron) d'énergie  $W$ : donnée, un segment horizontal détermine la largeur  $L_0$  de la zone de déplétion nécessaire pour arrêter la particule. La résistivité  $\rho_0$  du silicium de la diode étant connue, le prolongement du segment  $L_0\rho_0$  coupe l'axe des tensions en  $V_0$  qui est la valeur de la polarisation à employer. [D'après].L. Blankenship, IEEE

Trans. Nucl.Sei. NS7 (2 - 3), 1 90 - 195 (1 960)]

# Résumés

## ملخص

سيخضع مجمع مسرع مصادم الهادرونات الكبير (LHC) لترقيات متتالية حتى عام 2025 للانتقال إلى مرحلة اللعان العالي (HL-LHC).

لمواجهة التحديات التجريبية لزيادة السطوع اللحظي بما يصل إلى 7 عامل من تصميم LHC 1034 cm<sup>2</sup>s -1 ، ستخضع تجربة ATLAS لاستبدال كامل لجهاز التتبع الداخلي (InnerTracker - ITk) لنظام المراقبة للحفاظ على وتحسين أداء الكاشف الحالي. في الواقع ، تتوافق هذه التحسينات مع زيادة بنحو 140 إلى ~ 200 حدث لكل عبور حزمة مقارنة بـ 50 تصادمًا في LHC ؛ لهذا الغرض ، تم اختيار تقنية السيليكون بالكامل.

لأسباب تتعلق بتحسين تكلفة الإنتاج لأسطح السيليكون الكبيرة وزيادة كفاءة جمع الشحنات ، تعد مستشعرات البكسل المستوية مرشحة واعدة لتجهيز الأجزاء. نظام البكسل الجديد لـ HL-LHC.

في هذا العمل ، تمت دراسة أداء المستشعرات المستوية n-on-p ذات الحواف النشطة قبل التشعيع. الأداء المستهدف في هذه الدراسة هو جهد الانهيار ، تيار التسرب وتم الحصول على تمثيل دقيق للهيكل من حيث ملف تعريف المنشطات لمكونات الكاشف. تمت دراسة المعلمات الفيزيائية ، مثل توزيع كثافة الثقب والمجال الكهربائي في عمق مستشعر بسمك 4,8,12,16 ميكرون باستخدام أدوات TCAD لبرنامج PSpice.

الكلمات المفتاحية: ATLAS، TCT، كاشف السيليكون ، البرمجيات، TCAD

### Résumé

Le complexe d'accélérateurs du grand collisionneur d'hadrons (en anglais *Large Hadron Collider - LHC*) fera l'objet de mises à niveau successives jusqu'à 2025 pour passer à la phase de haute luminosité (HL-LHC).

Pour relever les défis expérimentaux de l'augmentation de la luminosité instantanée jusqu'à un facteur 7 par rapport à la valeur  $10^{34} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$  de conception de LHC, l'expérience ATLAS subira un remplacement complet du trajectomètre interne (en anglais *InnerTracker - ITk*) du système de suivi pour maintenir et améliorer

les performances du détecteur actuel. En effet, ces améliorations correspondent à une augmentation d'environ de 140 à ~200 évènements par croisement de paquets comparé aux 50 collisions au LHC ; à cette fin, une technologie tout silicium a été choisie.

Pour des raisons d'optimisation de coût de production pour des grandes surfaces en silicium et d'augmentation d'efficacité de collecte de charges, les capteurs de pixels planaires n-on-p à bords très minces sont des candidats prometteurs pour équiper des parties du nouveau système de pixels du HL-LHC.

Dans ce travail, les performances des capteurs planaires n-on-p à bords actifs ont fait l'objet d'études avant d'irradiation. Les performances visées dans cette étude sont la tension de claquage, le courant de fuite ainsi, une représentation précise de la structure a été obtenue en termes de profil de dopage des constituants du détecteur. Les paramètres physiques, tels que la distribution de la densité des trous et du champ électrique dans la profondeur du capteur de 4,8, 100  $\mu\text{m}$  d'épaisseur ont été étudiés à l'aide des outils TCAD du logiciel PSPICE.

**Mots clés:** ATLAS, TCT, détecteur de silicium, logiciel TCAD

### ABSTRACT

The Large Hadron Collider (LHC) accelerator complex will undergo successive upgrades until 2025 to the high-luminosity phase (HL-LHC).

To meet the experimental challenges of increasing the instantaneous luminosity by up to a factor of 7 over the LHC design value of  $10^{34} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ , the ATLAS experiment will undergo a complete replacement of the InnerTracker (ITk) of the tracking system to maintain and improve the performance of the current detector. Indeed, these improvements correspond to an increase of about 140 to  $\sim 200$  events per packet crossing compared to the 50 collisions at the LHC; for this purpose, an all-silicon technology has been chosen.

For reasons of production cost optimisation for large silicon areas and increased charge collection efficiency, very thin-edged n-on-p planar pixel sensors are promising candidates to equip parts of the new HL-LHC pixel system.

In this work, the performance of active edge n-on-p planar sensors was investigated before irradiation. The performance targets in this study are breakdown voltage, leakage current and a precise representation of the structure was obtained in terms of the doping profile of the detector components. The physical parameters, such as hole density and electric field distribution in the  $100 \mu\text{m}$  thick sensor depth, were studied using the TCAD tools of SILVACO software and PSPICE software.

**Key words:** ATLAS, TCT, silicon detector, TCAD software