

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département :Géni électrique
Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الكهرباء
المرجع:.....

Mémoire présenté en vue de l'obtention
du diplôme de
Magister en : Electronique

Option : Signaux et communication

**Acquisition du signal transitoire dû à la réponse des
dispositifs à semi-conducteurs à une tension
alternative**

Présenté par :
Lakhdari Issam

Soutenu publiquement le 06-11-2014

Devant le jury composé de :

Pr. Tobbeche Souad
Pr. Sengouga Nouredine
Dr. Debilou AbdErrezak
Dr. Hemaizia Zahra

Professeur
Professeur
Maitre de Conférences 'A'
Maitre de Conférences 'A'

Présidente
Rapporteur
Examineur
Examinatrice

Université de Biskra
Université de Biskra
Université de Biskra
Université de Biskra

REMERCIEMENTS

Avant tout, je présente ma gratitude à Dieu tout puissant de m'avoir donné la volonté, le courage et la patience pour terminer ce modeste travail.

Je tiens à remercier dans un premier temps Monsieur P. SENGOUGA Nouredine, pour m'avoir confié ce travail, et pour son aide et ses conseils, sa gentillesse, et en particulier l'attention accordée à la lecture et à la correction de ce mémoire.

Mes sincères Remerciements aussi à l'ensemble des membres des jurys. J'aimerais adresser un remerciement particulier à M : RAHMANI Nacer eddine, qui m'a aidé beaucoup avec son expérience depuis le début

J'en profite pour remercier tous les professeurs et maitres assistance, du département, pour leur soutien, leurs encouragements, et leur transfert d'expérience.

Sans oublier le soutien affectif; de la famille et celui des amis Adel et Salah

À ma mère et mon père

À ma femme

À mes frères et mes soeurs

ملخص:

للولصل إلى اكتشاف العيوب في المواد الشبه ناقله، تعتبر طريقة DLTS الأكثر استخداما لهذا الغرض، هذه الأخيرة تعتمد على قياس الإشارة المتغيرة السريعة (signale transitoire). في هذا العمل الميداني قمنا بتركيب نظام يمكننا من قياس قيمة المكثفة المتغيرة (capacité transitoire) بعد إثارة كهربائية للعينة، وأيضا قمنا بتهييج ضوئي ليزري طول موجته (337nm) واستخلاص الاستجابة السريعة، وبتغيير درجة الحرارة تتم القياسات وتخزن في الحاسوب على شكل ملفات من نوع (*.txt) و(*.cvs)، ليتم استغلالها بتطبيق النظريات الفيزيائية عليها .

الكلمات المفتاحية : إدخال المعلومات، الإشارة المتغيرة السريعة، شبه موصل، خصائص المواد الشبه ناقله ، DLTS.

Résumé :

Dans le bute de déterminé les défauts des composants a semi-conducteur, la méthode DLTS est la plus utilisable pour cette phénomène, ce dernier repose sur l'acquisition des signaux transitoire. Noua avons réalisé expérimentalement un banc d'acquisition de capacité transitoire mesuré après une excitation électrique et une excitation optique depuis une source d'impulsion laser, avec une Longueur d'onde 337 nm.

Avec un changement de température commandé avec le cryostat, les réponses (capacité transitoire) acquérir a l'ordinateur, et enregistré ces donnée sous forme d'un document (*.txt) ou (*.cvs) pour utiliser ultérieurement .

Mots-clés: Acquisition, régime transitoire, semi-conducteur, caractérisation des semi-conducteurs, durée de Vie, DLTS.

Abstract :

In abuts determined defects in a semiconductor component, the DLTS method is the most used for detecting this phenomenon, this latter based on the acquisition of transient signals. we made an experimentally system for acquisition measured transient capacity of semiconductor component after an electrical excitation and an optical excitation pulse from a laser source with a wave length of 337 nm, with a change of the temperature controlled barrier cryostat, responses (transient capacity) acquisition computer and recorded his often given as a document (*. txt) or (*.cvs) for later use.

Keywords: Acquisition, transient signal, semiconductor, characterization, lifetime, DLTS.

Table des Matières

Table des matières	i
Liste des figures	ii
Introduction générale	1

Chapitre I : Généralité sur les signaux

1. Introduction	03
2. Classification des signaux	03
2.1. Classification phénoménologique	03
2.1.1. Les signaux déterministes	03
2.2. Classification énergétique	04
2.2.1. Les signaux à énergie finie	04
2.2.2. Les signaux à puissance moyenne finie	04
2.3 Classification morphologique	05
2.4 Autres classes importantes	05
2.4.1 Classification spectrale	05
2.4.2 Signaux pairs ou impairs	07
2.4.3 Signaux de durée finie	07
3. Le régime transitoire	08
4. Le régime transitoire dans différents domaines	08
4.1. Le régime transitoire dans un circuit électrique	08
4.2. Le régime transitoire dans un system mécanique	09
4.3. Exemple d'un système hydraulique	10
4.4. Exemple d'un système électrothermique	11
4.5. Système asservi en régime transitoire	12
4.6. Caractérisation photo détecteur selon une méthode quasi-stationnaire état photo conductance carie	12
4.7. Mesure des propriétés thermiques des polymères	13
4.8. Test D'alimentation Continue	14
5. Récapitulation	15
6. Bibliographie du chapitre I	16

Chapitre II : Acquisition des signaux

1. Introduction	18
2. Définition et application de système d'acquisition	18
3. Constitution de la chaîne d'acquisition	19
4. Schéma de principe d'une acquisition	19
5. Matériel d'acquisition de données	21
5.1. La carte d'acquisition de signaux	22
5.2. La carte PCI 6036E d'acquisition	22
5.3. La carte USB d'acquisition (USB 6212)	24
5.4. Instrumentation PXI	25
5.5. Oscilloscope numérique de Tektronix	26
5.5.1. Branchement	26
5.5.2. Réglages	26
5.5.3. Mesures	27
5.5.4. Impression sur une disquette	27
6. Récapitulation	28
7. Bibliographie du chapitre II.....	29

Chapitre III : Les semi-conducteurs

1. Introduction	31
2. Les Semi-conducteurs dopés ou extrinsèques	31
2.1 Dopage de type N	31
2.2 Dopage de type P	32
3. La jonction PN	33
3.1. Zone de charge d'espace (ZCE)	34
3.2. Le champ électrique	34
3.3. Caractéristiques courant-tension	34
3.3.1. Caractéristique idéale	34
3.3.2. Caractéristique réelle	35
3.4. Influence de la température	36
4. Génération Et Recombinaison Des Porteurs	37
4.1. Introduction	37
4.2. Définition	38
4.3. Génération	39

4.3.1. Génération par photons	39
4.3.2. Génération par radiations ionisantes	40
4.3.3. Génération par champ électrique intense	40
5. Recombinaison	41
5.1. Recombinaison directe	41
5.2. Recombinaison indirecte	42
6. Durée de vie	43
6.1. Durée de vie en présence de la recombinaison directe	43
6.2. Durée de vie en présence de recombinaison assistée	44
6.3. Retour à l'équilibre	45
6.4. Recombinaison dans une zone désertée	46
7. Les Defaults in semiconductors	47
7.1. Types de défaut	47
7.2. L'effet des défauts	47
8. Récapitulation	49
9. Bibliographie du chapitre III	50

Chapitre IV : Caractérisation des semi-conducteurs

1. Introduction	52
2. Caractérisation des semi-conducteurs	52
3. Caractérisation d'une photopile en régime transitoire.	52
3.1. Techniques en régime statique	52
3.2. Techniques en régime dynamique	52
3.2.1. Le régimes dynamique fréquentiel	53
3.2.2. Le régime dynamique transitoire	53
4. Méthodes de caractérisation des cellules-solaires	54
4.1. Mesure du déclin du courant de court-circuit	54
4.2. Mesure de la décroissance de la tension de circuit-ouvert	55
5. Mesure de la décroissance de la photoconductivité	56
6. Spectroscopie transitoire des niveaux profonds (DLTS)	57
7. Récapitulation	61
8. Bibliographique du chapitre IV	62

Chapitre V : Réalisation pratique

1. Introduction	64
2 Réalisation pratique	64
3. Matériel utilisé	65
3.1 Oscilloscope TDS 3052	65
3.2. Le cryostat	66
3.3. Contrôleur De La Température ITC 502 S	67
3.4 Générateur de fonctions 15 MHz, mode arbitraire Hameg HM8131-2.	67
3.5. BOOTON 7200 Capacitance Mètre	69
3.6. Générateur d'impulsion laser VSL-337i	69
3.7. Adaptateur IEEE-USB	70
3.8. OpenChoice Desktop	70
3.9. La Programmation LABVIEW.	71
4. Résultat	72
5. Excitation électrique	72
5.1. Mesure de courant de Photodiode Bpw21r Excite Par Impulsion Positif	73
5.1.1. Montage expérimentale	73
5.1.2 Résultat de bonc de mesure	74
5.1.3 Effet de température sur le courant la diode	75
5.2 Mesure de courant de photodiode Bpw21r excité par impulsion négatif	76
5.2.1. Montage expérimentale	77
5.2.2 Résultat de mesure	77
5.2.3. Effet de température sur le courant	78
5.3. Mesure la capacité de Photodiode	80
5.3.1. Montage expérimentale	80
5.3.2. Résultat des mesure de Bonc	81
5.4. La Diode N777	82
5.4.1. Excitation positif	82
5.4.2. Excitation négatif (-1V, 0 V)	83
6. Excitation optique par impulsion laser	84
7. Récapitulation	86
Conclusion générale	87
Liste des abréviations	89
Liste des symbole	90
Annex	

Liste Des Figures

<i>Chapitre I</i>	
Figure 1.1: Exemples de signaux déterministes.....	04
Figure 1.2: Classification morphologique.....	05
Figure 1.3: Distribution spectrale d'un signal avec la largeur de bande ΔF	06
Figure 1.4: signaux de Basses fréquences.....	06
Figure 1.5: signaux de Hautes fréquences.....	06
Figure 1.6: signaux de Bande étroite.....	07
Figure 1.7: signaux à large Bande.....	07
Figure 1.8: Charge d'un condensateur.....	08
Figure 1.9: Un system mécanique simple.....	09
Figure 1.10: Un Système 1 ^{er} ordre Hydraulique.....	10
Figure 1.11: Remplissage d'un réservoir d'eau.....	10
Figure 1.12: Un chauffe-eau électrique.....	11
Figure 1.13: Chronogramme de la variation de la température en fonction de temps	11
Figure 1.14: Le comportement transitoire d'un système asservi.....	12
Figure 1.15: schéma de base pour une mesure de photoconductivité de décroissance et durée de vie des porteurs minoritaires.....	13
Figure 1.16: Cinétique de réaction d'un polymère.....	13
Figure 1.17: Paramétrage du test de la réponse transitoire de la charge.....	14
<i>Chapitre II</i>	
Figure 2.1: Structure de base d'une chaîne d'acquisition.....	19
Figure 2. 2: Schéma d'un système d'acquisition de petite dimension.....	30
Figure 2. 3: Schéma d'un système d'acquisition de grande dimension.....	20
Figure 2. 4: Des exemples de matérielle d'acquisition de données.....	21
Figure 2.5: La carte d'acquisition AD1220 de Quanta.....	22
Figure 2. 6: La carte d'acquisition PCI 6036E de NI, 16 Ch, 200kS/s, 16-Bit, 2 AO, 8 DIO, 2 24-Bit, 20 MHz counter/timers	23
Figure 2. 7: L'emplacement des ports PCI sur une carte mère de PC.....	23
Figure 2. 8: La carte d'acquisition USB6212 de NI.....	24
Figure 2. 9: Instrumentation PXI 642 de NATIONAL INSTRUMENT.....	25
Figure 2. 10: L'oscilloscope numérique à mémoire TDS 3052 de Tektonix.....	26
Figure 2. 11: Des exemples d'impression d'écran de TDS3052.....	27
<i>Chapitre III</i>	
Figure 3.1: Représentation d'une jonction PN à l'équilibre thermodynamique	32
Figure 3.2: Caractéristique $i - v$ idéale d'une diode pn ($I_S = 10^{-14}$ mA.....	34
Figure 3.3: Caractéristique $i - v$ typique d'une diode pn commerciale.....	35
Figure 3.4: Variation de la tension v en fonction de la température, à i constant et en polarisation directe.....	36
Figure 3.5: Génération par photon.....	39
Figure 3.6: recombinaison directe	40
Figure 3.7: Recombinaison indirecte	41
Figure 3.8: retour à l'équilibre.....	45
Figure 3.9: Défauts ponctuels communs en semi-conducteurs. les défauts substitutionnel et interstitiels impliquent un ion séparé, tandis que les interstitiels d'individu sont dus à un atome original.....	47
<i>Chapitre IV</i>	
Figure 4.1: Schéma du montage expérimental pour la mesure du déclin du courant de court-circuit induit par une polarisation électrique	55
Figure 4.2: Schéma du montage expérimental pour la mesure de la durée de vie des porteurs minoritaires à partir du déclin de la tension de circuit-ouvert induite par une polarisation électrique R_i est la résistance du circuit d'entrée et D la diode interruptrice.....	56

Figure 4.3: Schéma du montage expérimental pour la mesure de la photoconductivité en régime transitoire.....	57
Figure 4.4: Schéma des bandes d'énergie d'une jonction p-n avec un niveau donneur	58
Figure 4.5: Illustration schématique de la construction d'un spectre DLTS dans la technique de fenêtre de temps.....	60
Figure 4.6 : Schéma bloc de système de mesure DLTS	60

Chapitre V

Figure 5.1: La face avant de l'oscilloscope tectronix TDS 3052.....	
Figure 5.2: Allure et Schéma interne du cryostat.....	65
Figure 5.3: Contrôleur De La Température ITC 502 S	66
Figure 5.4: Générateur de fonctions 15 MHz, HAMEG HM8131-2.....	67
Figure 5.5: BOOTON 7200 Capacitance Mètre.....	68
Figure 5.6: VSL-337i_OEM_Nitrogen_Laser_99alone_LaserInnovations.....	68
Figure 5.7: L' Adaptateur IEEE-USB	69
Figure 5.8: Interface de logiciel OpenChoice Desktop.....	69
Figure 5.9: L'interface de programme qui pilote le montage d'acquisition de signale transitoire a partir d'un oscilloscope Tectronix TDS 3052.....	70
Figure 5.10: Le signale de sortie de la GBF excité le circuit.....	71
Figure 5.11: le montage de mesure le courant	72
Figure 5.12.a : Schéma synoptique pour la mesure de courant transitoire.....	72
Figure 5.12.b : montage Banc de mesure le courant transitoire.....	73
Figure 5.13: Représentation du courant de la photodiode PBW 21R301 en régime de commutation. T=30°C, et numérisés à l'aide de l'oscilloscope TDS3052...	74
Figure 5.14: le courant de photodiode PBW 21R301 a défèrent températures pour un front de montée (0v ; 1v).....	76
Figure 5.15: le courant de photodiode PBW 21R301 a défèrent températures pour un front de descendant (1v ;0v).....	76
Figure 5.17: L'allure de courant de réponse de circuit a une impulsion négative.....	77
Figure 5.18: Le courant de photodiode PBW 21R301 a défèrent températures pour un front de montée (0v ; -1v).....	78
Figure 5.19: le courant de photodiode PBW 21R301 a défèrent températures pour un front de montée (-1v, 0v).....	78
Figure 5.20 : Spectre CDLTS pour une Photodiode PN BPW 21R301 mesuré a une impulsion de 1v d'amplitude.....	79
Figure 5.21: Banc de mesure de Capacité d'une dispositif a semi-conducteurs	80
Figure 5.22: Schéma synoptique pour la mesure de la capacité.....	80
Figure 5.23: Le changement de capacité en temps dans déférant température.....	81
Figure 5.24: Spectre DLTS d'une photodiode PN Silicon BPW 21R 301	81
Figure 5.25: Le Circuit de mesure le courant	83
Figure 5.26: La réponce de diode N777 a la front monté (0v ;1v).....	83
Figure 5.27: La réponce de diode N777 a la front monté (-1v ;0v).....	84
Figure 5.28: Signal de changement de capacité en fonction de temps de diode N777 sous des déférentes températures.....	84
Figure 5.29: Le spectre DLTS pour la Diode N777.....	85
Figure 5.30: Bonc d'acquisition de réponse de photodiode a une impulsion laser.....	85
Figure 5.31: La Réponse de photodiode a une impulsion lumineuse laser (337), température 33°C.....	86
Figure 5.32: Zoome dans le signale de la réponse de photodiode en fonction du temps numérisés à l'aide de l'oscilloscope TDS3052.....	86

Introduction Générale

Introduction Générale

Pour se renseigner sur les propriétés physiques d'un semi-conducteur (comme le silicium), on le fait interagir avec une excitation externe, on récupère ensuite la réponse du semi-conducteur sous différentes formes; comme par exemple, un courant, luminescence (Photoluminescence), changement de conductivité ou de la tension électrostatique à la surface; La réponse ainsi obtenue est riche en information sur les semi-conducteur étudié, L'analyse de ces informations nous permettra a l'extraction des paramètres électriques du semi-conducteurs (longueur de diffusion, durée de vie, vitesse de recombinaison aux surface et interfaces des porteurs de charges libres),mais aussi des composants fabriqués à partir de ce semi-conducteur comme les cellules photovoltaïques (longueur de diffusion des porteurs, rendements quantiques, tension en circuit ouvert et la caractéristique $I(V)$).

Beaucoup de travaille basé sur des méthodes des mesures transitoire, par exemple utilisé dans la Photo réluctance transitoire d'hétéro structures AlInN / GaN[1], et aussi dans la caractérisation de couche épitaxiale par l'application de méthode OCVD (open circuit voltage decay) [2].La mesurer de capacité transitoire est de courte durée adapté pour la technique DLTS (Deep-level transient spectroscopy), est une méthode puissante pour déterminer quelques-unes des caractéristiques de semi-conducteurs[3].

Ce travail de mémoire s'inscrit dans ce contexte et a pour objectif d'acquisitiondes signaux transitoires (la réponse de composant a semi-conducteur à une excitation extérieur).

Le premier chapitre rappelle sur les notions fondamentales de signaux, ainsi d'une étude de régime transitoire dans quelque domaine. Le deuxième chapitre est consacré à l'acquisition des donnés et une description des instruments utilisé dans ce travail. Dans le troisième chapitre, nous présentons une rappelle approche sure les semi-conducteur. Le quatrième chapitre, traite quelque méthode de mesure en régime transitoire. Finalement le cinquième chapitre présente la réalisation pratique des systèmes d'acquisition des signaux transitoire Sur des photodiode et diodes Schottky, après Des Excitation électrique et optique.

Bibliographie

[1] S. Marcinkevičius, J. Yang et al, [American Institute of Physics](#), AIP ADVANCES **2**, 042148 (2012).

[2] Milan ˇTapajna, et al, Journal of Electrical Engineering, VOL. 55, NO. 9-10, 2004, 239–244.

[3] J. Phys, E: Sci, Instrum, **22** (1989) 664-666, Imprimé à l'UK.

Chapitre I

Généralité sur les signaux

- 1. Introduction**
- 2. Classification des signaux**
 - 2.1. Classification phénoménologique**
 - 2.1.1. Les signaux déterministes**
 - 2.2. Classification énergétique**
 - 2.2.1. Les signaux à énergie finie**
 - 2.3. Classification morphologique**
 - 2.4. Autres classes importantes**
 - 2.4.1. Classification spectrale**
 - 2.4.2. Signaux pairs ou impairs**
 - 2.4.3. Signaux de durée finie**
- 3. Le régime transitoire**
- 4. Le régime transitoire dans différents domaines**
 - 4.1. Le régime transitoire dans un circuit électrique**
 - 4.2. Le régime transitoire dans un système mécanique**
 - 4.3. Exemple d'un système hydraulique**
 - 4.4. Exemple d'un système électrothermique**
 - 4.5. Système asservi en régime transitoire**
 - 4.6. Caractérisation photo détecteur selon une méthode quasi-stationnaire état photo conductance carie**
 - 4.7. Mesure des propriétés thermiques des polymères**
 - 4.8. Test D'alimentation Continue**
- 5. Récapitulation**
- 6. Bibliographie**

Chapitre 01

Généralité sur les signaux

1. Introduction

Les signaux sont usuellement des fonctions du temps, qui peuvent avoir une ou plusieurs dimensions [1]. Un signal issu d'un capteur simple (e.g. accéléromètre) sera unidimensionnel (ou scalaire) $x(t)$. S'il est généré par un ensemble de capteurs observant un même phénomène physique il sera dit vectoriel $x(t) = [x_1(t), \dots, x_N(t)]^t$ (e.g. antenne acoustique N capteurs), ou multidimensionnel $I(x,y,t)$ dans le cas de la dépendance au temps et à d'autres variables (e.g. image animée). En outre, le paramètre temporel peut être continu, ou discret, selon que le signal est laissé sous forme 'analogique' ou 'échantillonnée'. On notera dans la suite $x(t)$ dans le cas continu, $x(n)$ dans le cas discret. Enfin, les valeurs du signal peuvent être réelles ou complexes.

On distingue diverses classes de signaux.

2. Classification des signaux :

Ils existent plusieurs modes de classification pour les signaux suivant leurs propriétés [1].

2.1. Classification phénoménologique :

On considère la nature de l'évolution du signal en fonction du temps. Il apparaît deux types de signaux : signaux déterministes et aléatoires.

2.1.1. Les signaux déterministes :

Encore dits signaux certains, leur évolution en fonction du temps peut être parfaitement modélisé par une fonction mathématique. On retrouve dans cette classe les signaux périodiques, les signaux transitoires, les signaux pseudo-aléatoires, etc... Parmi les signaux déterministes, on distingue :

- Les signaux périodiques, satisfaisant à la relation : $x(t) = x(t + kT)$

Avec : k entier qui obéissent à une loi de répétition cyclique régulière, de période T .

- Les signaux non périodiques, qui ne jouissent pas de cette propriété.

La figure 1.1 représente des exemples de signaux déterministes.

Les signaux sinusoïdaux sont un cas particulier de ces signaux qui sont périodiques :

$$s(t) = A \cdot \sin [(2 \cdot \pi / T)t + \phi]$$

Les signaux non périodiques sont d'autres exemples de signaux déterministes:

$$x(t) = e^{-at} \text{ pour } t > 0 \text{ sinon } x(t) = 0 ;$$

$$y(t) = t \text{ pour } t > 0 \text{ sinon } t < 0 ;$$

$$z(t) = 1$$

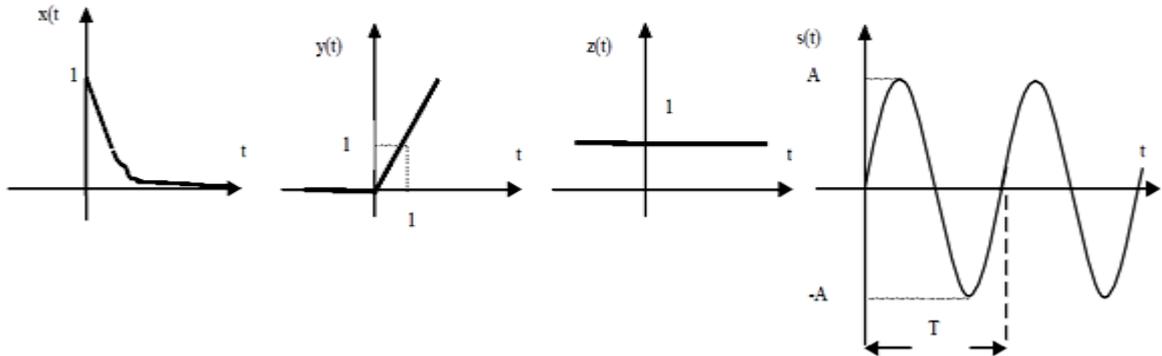


Figure 1.1 : Exemples de signaux déterministes.

2.2. Classification énergétique :

L'énergie d'un signal $x(t)$ est donnée par

$$W_x = \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt$$

La puissance d'un signal $x(t)$

$$p_x = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{+\infty} |x(t)|^2 dt$$

Dans cette classification, on considère l'énergie des signaux. On distingue : Les signaux à énergie finie et Les signaux à puissance moyenne finie.

2.2.1.° Les signaux à énergie finie : Ils possèdent une puissance moyenne nulle et une énergie finie.

2.2.2 Les signaux à puissance moyenne finie : il possède une énergie infinie et sont donc physiquement irréalisable.

2.3. Classification morphologique :

On distingue les signaux à variable continue et des autres à variable discrète ainsi que ceux dont l'amplitude est discrète ou continue, la figure 1.2 présente la classification morphologique des signaux.

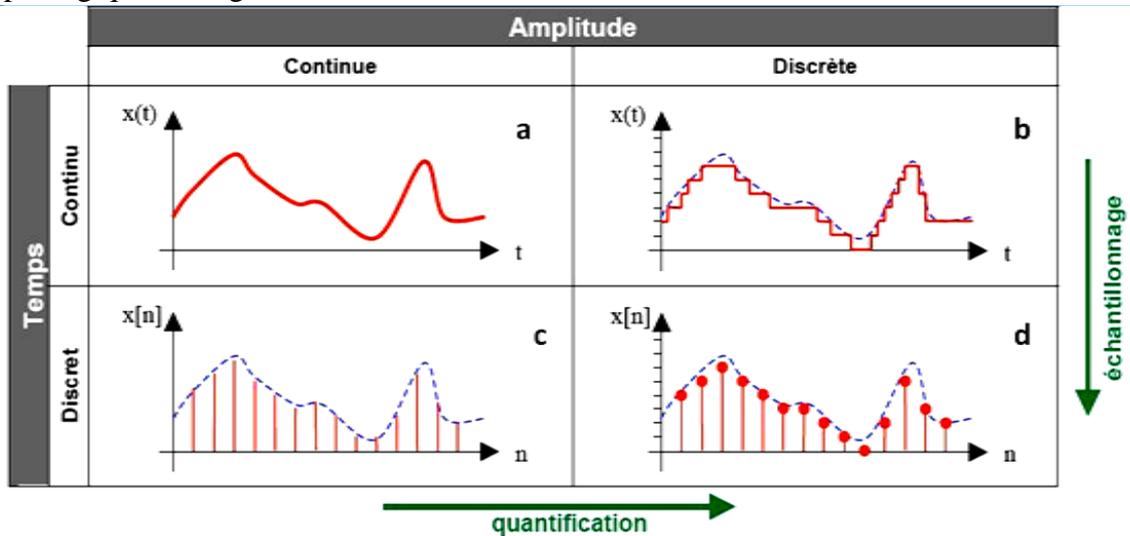


Figure 1.2 : Une classification morphologique des signaux, **a)** l'amplitude et le temps sont continus, **b)** l'amplitude est discrète et le temps continu, **c)** l'amplitude est continue et le temps discret. **d)** l'amplitude et le temps sont discrets.

On obtient donc 4 classes de signaux :

- Les signaux analogiques dont l'amplitude et le temps sont continus.
- Les signaux quantifiés dont l'amplitude est discrète et le temps continu.
- Les signaux échantillonnés dont l'amplitude est continue et le temps discret.
- Les signaux numériques dont l'amplitude et le temps sont discrets

2.4. Autres classes importantes :

2.4.1. Classification spectrale :

Un signal peut être classé suivant la distribution $\Phi_x(f)$ de son énergie ou de sa puissance en fonction de sa fréquence (spectre du signal).

La largeur de bande ΔF d'un signal est le domaine principal des fréquences (positives ou négatives) occupé par son spectre. Elle est définie par la relation :

$$\Delta F = F_{\max} - F_{\min}$$

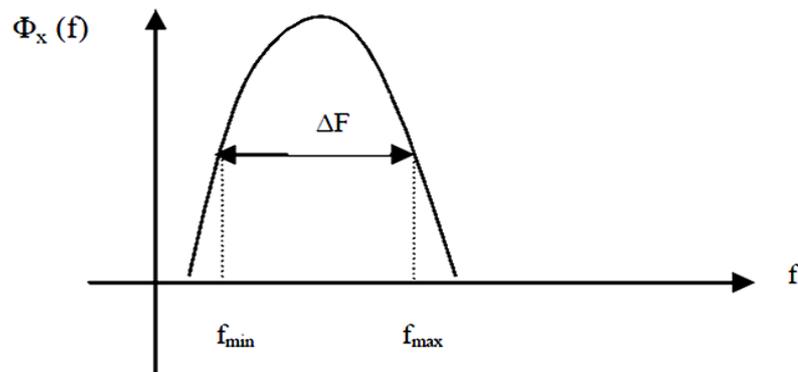


Figure 1.3 : Distribution spectrale d'un signal avec la largeur de bande ΔF

On peut distinguer quatre types de signaux :

- Les signaux de basses fréquences ($f_{\min} = 0$ ou proche de zéro).
- Les signaux de hautes fréquences.
- Les signaux à bande étroite avec ($f_{\max} \approx f_{\min}$).
- Les signaux à large bande avec ($f_{\max} \gg f_{\min}$).

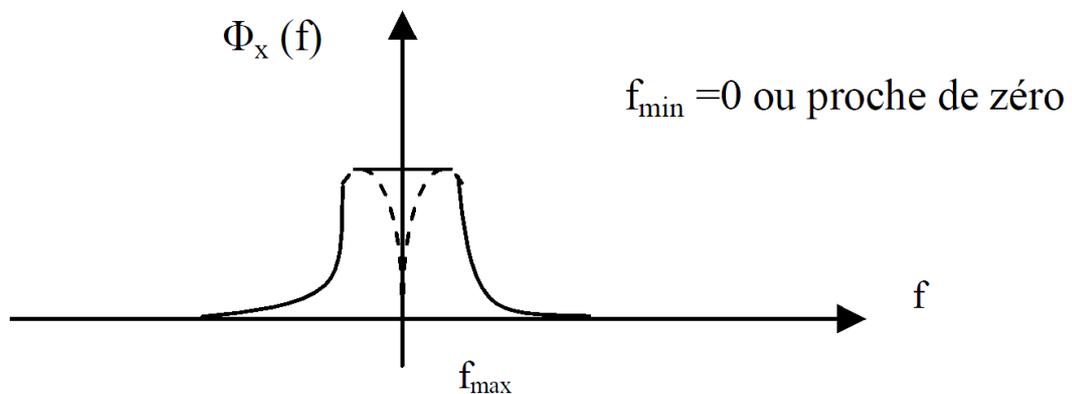


Figure 1.4 : Signaux de basses fréquences.

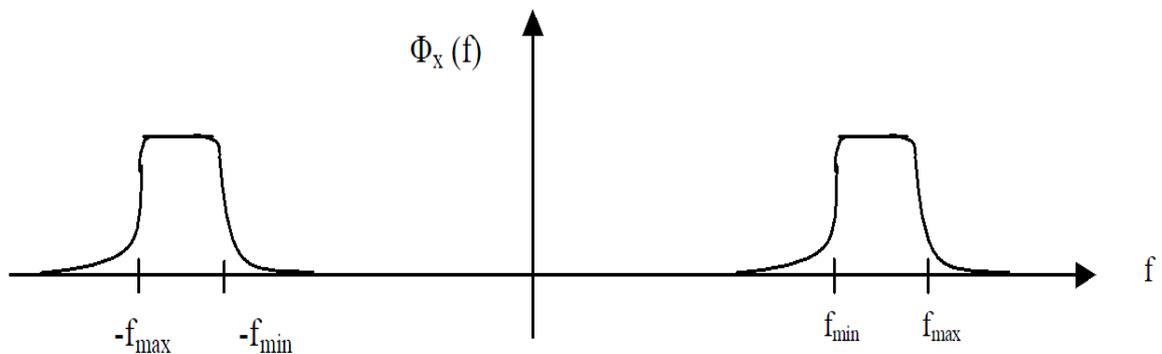


Figure 1.5 : Signaux de hautes fréquences.

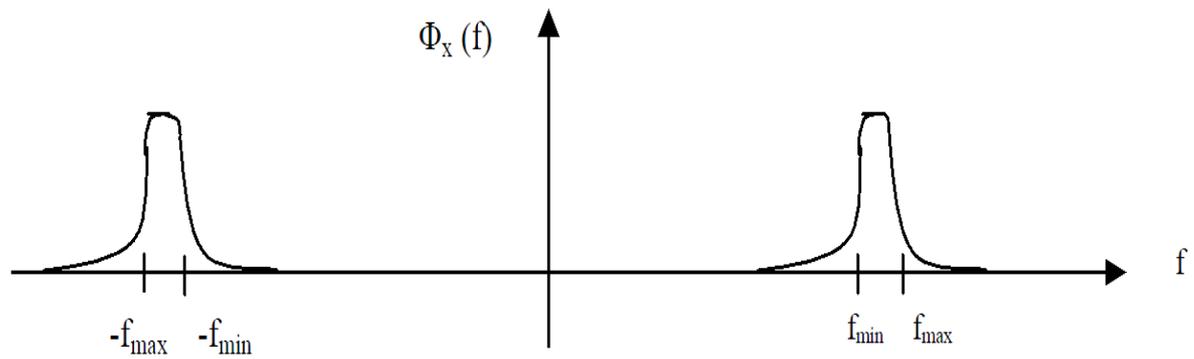


Figure 1.6 : Signaux de bande étroite.

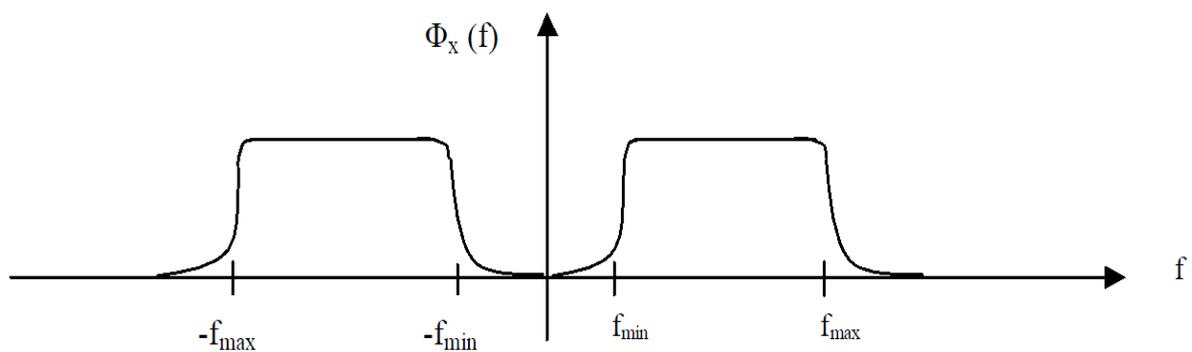


Figure 1.7 : Signaux à large bande.

2.4.2. Signaux pairs ou impairs :

Un signal est pair si $x(t) = x(-t)$ Un signal est impair si $x(t) = -x(-t)$

2.4.3. Signaux de durée finie :

Les signaux dont l'amplitude s'annule en dehors d'un intervalle de temps T prescrit

$x(t) = 0$ pour $t \notin T$; Sont appelés signaux de durée limitée ou à support borné.

Certains signaux possèdent trois parties bien distinctes. La partie transitoire, la partie stationnaire, et l'extinction,

On se intéresse dans la suite de ce chapitre à la partie transitoire.

3. Le Régime transitoire:

Pour un circuit électrique un régime transitoire apparaît par exemple à l'ouverture ou à la fermeture d'un interrupteur, les courants et les tensions mettent un certain temps à s'établir. C'est le régime transitoire [2].

En physique, un *régime transitoire* est le régime d'évolution d'un système qui n'a pas encore atteint un état stable ou un régime permanent (continu ou périodique).

Un régime transitoire peut apparaître lors d'une modification d'un système. Il peut être caractérisé par un taux d'amortissement, un temps de relaxation ou encore un facteur de qualité [3].

4. Le régime transitoire dans différents domaines :

Un régime transitoire apparaît dans tout les domaines, on cite dans la suite quelque exemple de différents domaines.

4.1. Le Régime transitoire dans un circuit électrique :

Le régime transitoire apparaitre bien dans les circuits électrique surtout dans la charge et décharge par exemple d'un condensateur. L'allure de la tension aux bornes du condensateur en fonction du temps est schématisée dans la figure 1.8. C'est une variation entre deux états stables : il y a continuité de la tension à l'instant initial. La tension et la charge tendent vers une valeur finale.

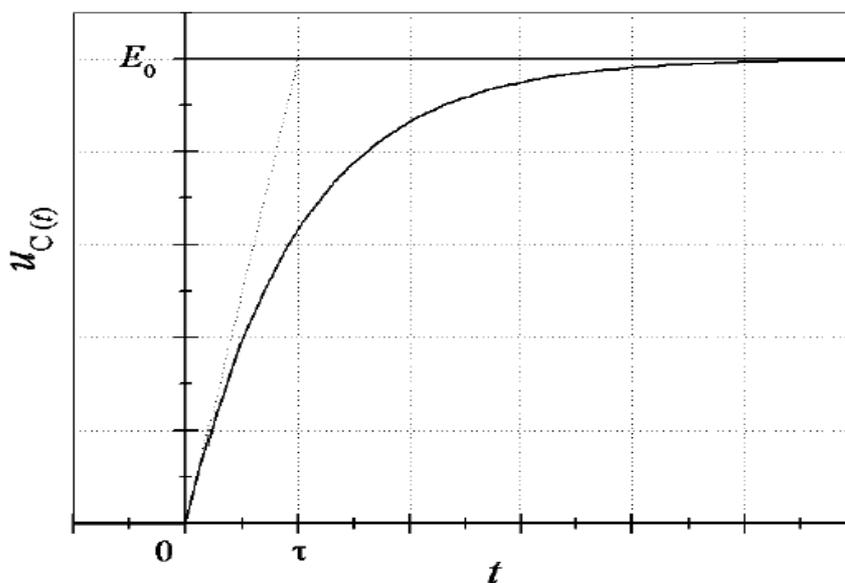


Figure 1.8 : Charge d'un condensateur [4].

Le régime transitoire, pendant lequel la tension u_C varie, évolue donc vers un régime permanent ou régime stationnaire (indépendant du temps), pour lequel la tension u_C devient constante, avec une valeur imposée par la source de tension [4].

Un signal transitoire est caractérisé par une constante de temps τ qui caractérise la durée du régime transitoire, car on peut dire: au bout de quelques τ , le régime continu est établi, le régime transitoire est fini. Il y a plusieurs méthodes pour trouver la constante de temps τ d'un circuit :

- **Méthode 1** : méthode des 3 τ . U_C atteint 95% de sa valeur finale quand $t = 3 \tau$. (voir figure ci-dessous).
- **Méthode 2** : méthode de la tangente à l'origine. On trace la tangente au début de la charge. Elle atteint la valeur finale au temps $t = \tau$.
- **Méthode 3** : méthode des 63%. La charge atteint 63% de la valeur maximale au bout du temps $t = \tau$.

4.2. Le régime transitoire dans un system mécanique :

Dans un système mécanique composé d'un ressort et un amortisseur d'un véhicule. Dans la figure 1.9, un exemple du régime transitoire dans un système mécanique est représenté. On note dans cet exemple que x est la position des roues tandis que y est la position de châssis.

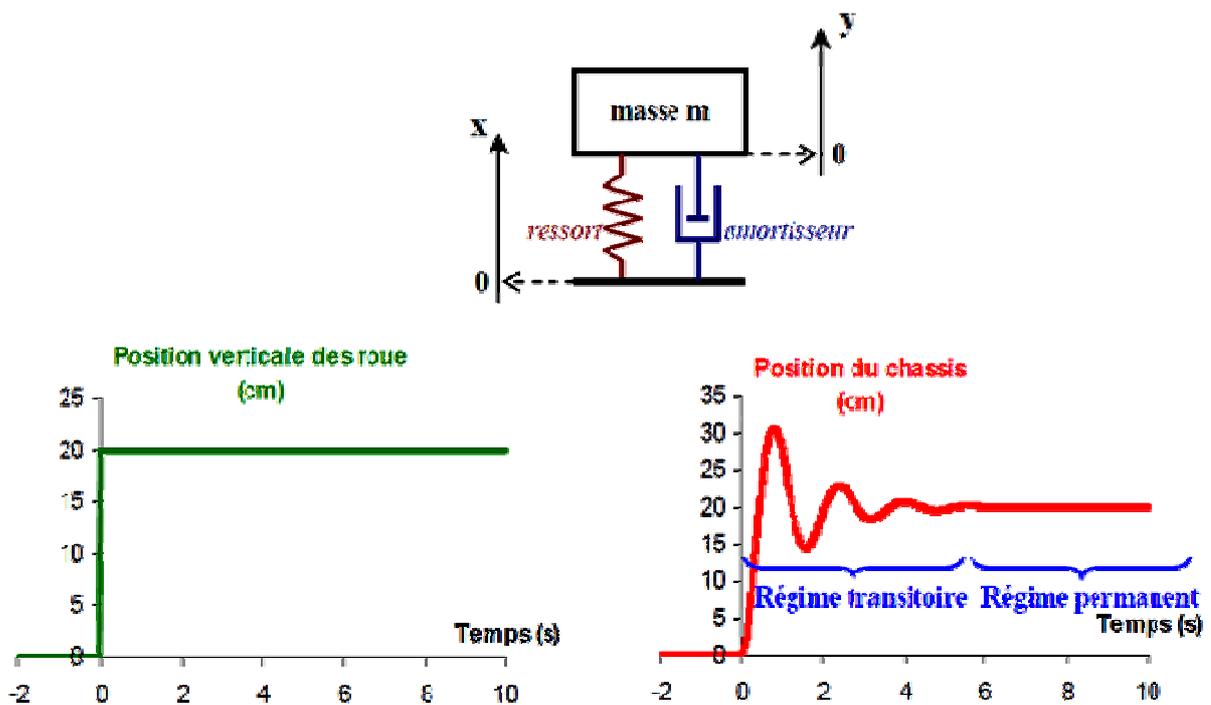


Figure 1.9 : Un system mécanique simple.

Dans cet exemple, le régime transitoire est de type « oscillant amorti » alors que le régime permanent est de type « continu ou constant » [5].

4.3. Exemple d'un système hydraulique:

Un exemple de système hydraulique est le système constitué d'un réservoir d'eau (vide à l'instant $t=0$) avec remplissage et vidage [6], comme montré dans la figure 1.10 :

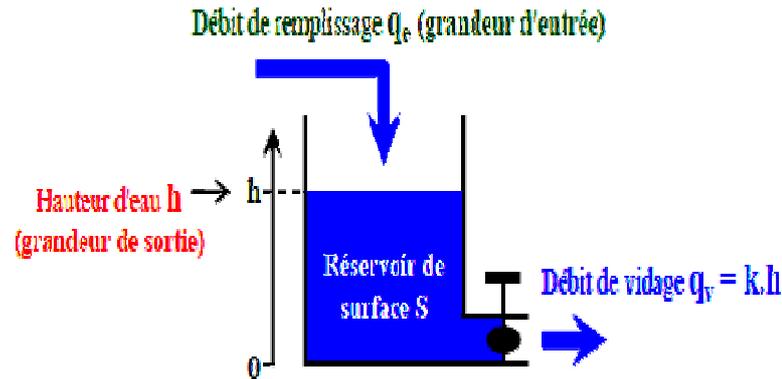


Figure 1.10 : Un Système 1^{er} ordre Hydraulique.

Le débit de vidage est proportionnel à la hauteur : $q_v = k.h$. La différence de débit entre l'entrée et sortie ($q_e - q_v$) est responsable de la variation dV/dt du volume $V=S.h$. q_e est un échelon d'amplitude Q_e (débit constant Q_e à partir de $t = 0$).

Remarque : $-\frac{Q_e}{k}e^{-t/\tau}$ représente le régime transitoire et Q_e/k le régime permanent.

Le chronogramme ci-dessous représente $q_e(t)$ et $h(t)$ pour $Q_e = 100m^3/h$ $s = 80m^2$ et $K = 40m^2/h$ $\tau = s/k = 2h$.

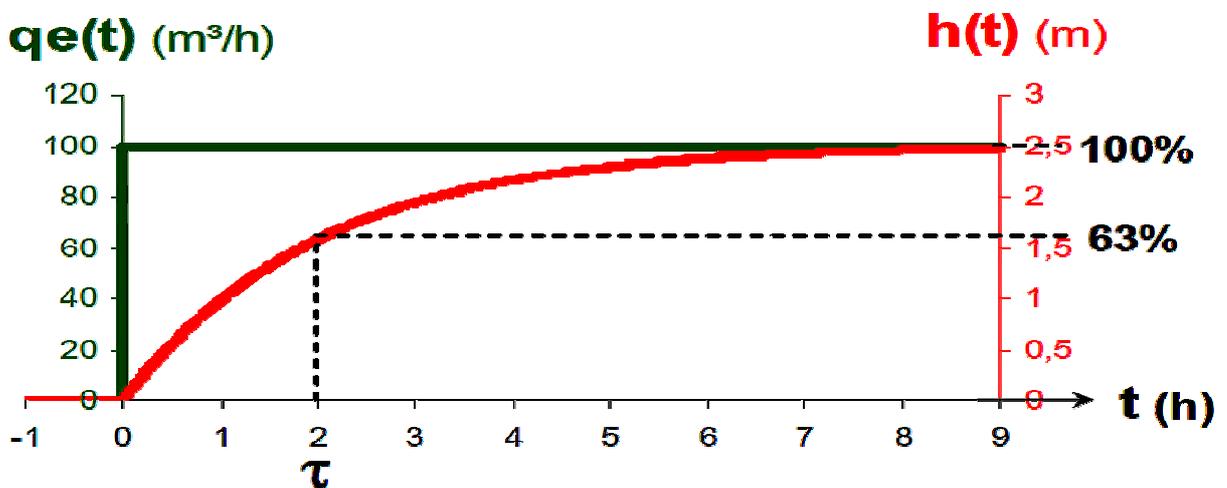


Figure 1.11 : Remplissage d'un réservoir d'eau.

4.4. Exemple d'un système électrothermique :

Considérons un chauffe-eau électrique constitué d'une résistance électrique (puissance P) plongée dans une cuve d'eau (Volume V et température initiale $T=T_0$). La cuve présente des pertes thermiques (résistance thermique R_{th} avec l'extérieur de température ambiante T_{ext}) [6].

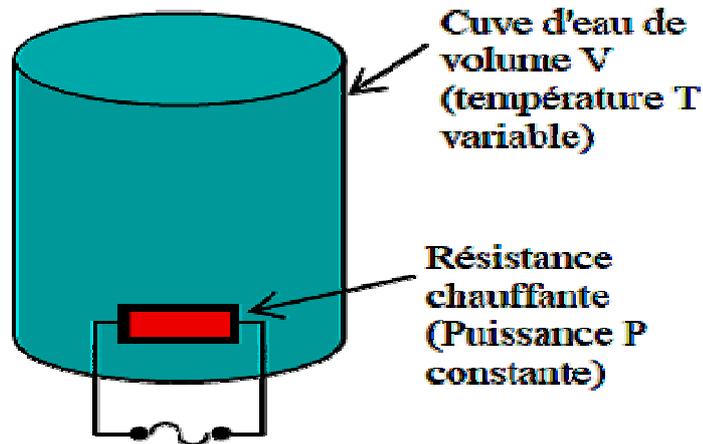


Figure 1.12 : Un chauffe-eau électrique.

L'entrée du système est la puissance thermique P apportée par la résistance et la sortie du système est la température variable T de l'eau (uniforme dans toute la cuve).

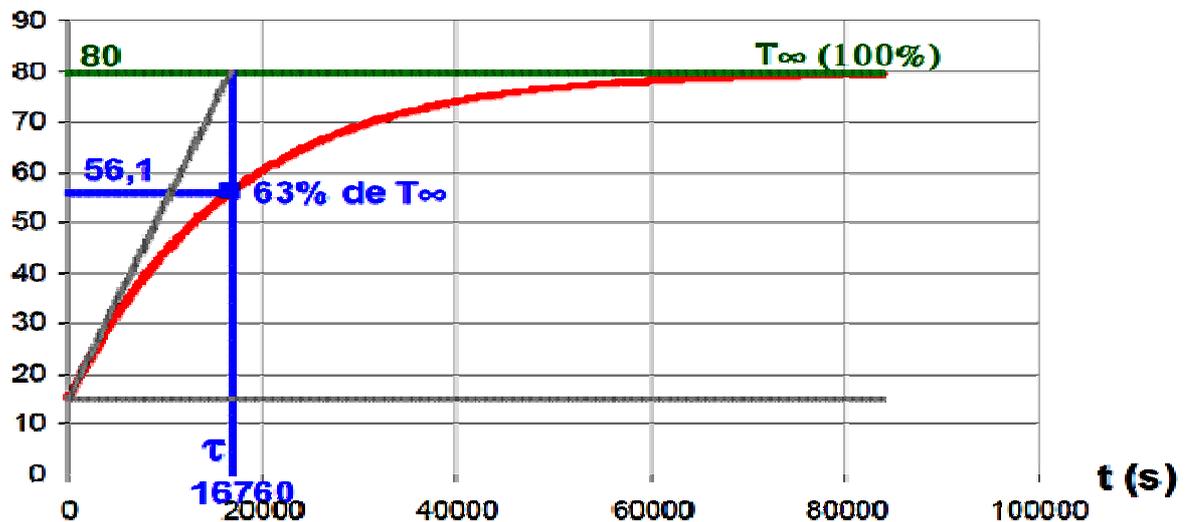


Figure 1.13: Chronogramme représentant la variation de la température en fonction de temps.

4.5. Système asservi en régime transitoire :

Le comportement transitoire d'un système asservi doit être assez court et bien amorti (figure 1.15). Pour des raisons de commodité, un système de commande ne doit pas présenter un régime transitoire trop long. Un régulateur de vitesse d'une automobile qui prendrait 15 minutes avant d'être en régime permanent ne serait pas apprécié! L'amortissement d'un système de commande est également un facteur important à considérer pour des raisons de sécurité. Les pointes des oscillations peuvent être dangereuses ou nuire au fonctionnement du système physique. Un système de commande d'un niveau du liquide dans un réservoir ne doit pas osciller comme le deuxième graphe de la figure 1.14. Les pointes importantes peuvent amener le débordement du réservoir. Finalement, les régimes transitoires prennent une importance considérable lorsqu'on constate que les systèmes asservis sont rarement en régime permanent .[7]

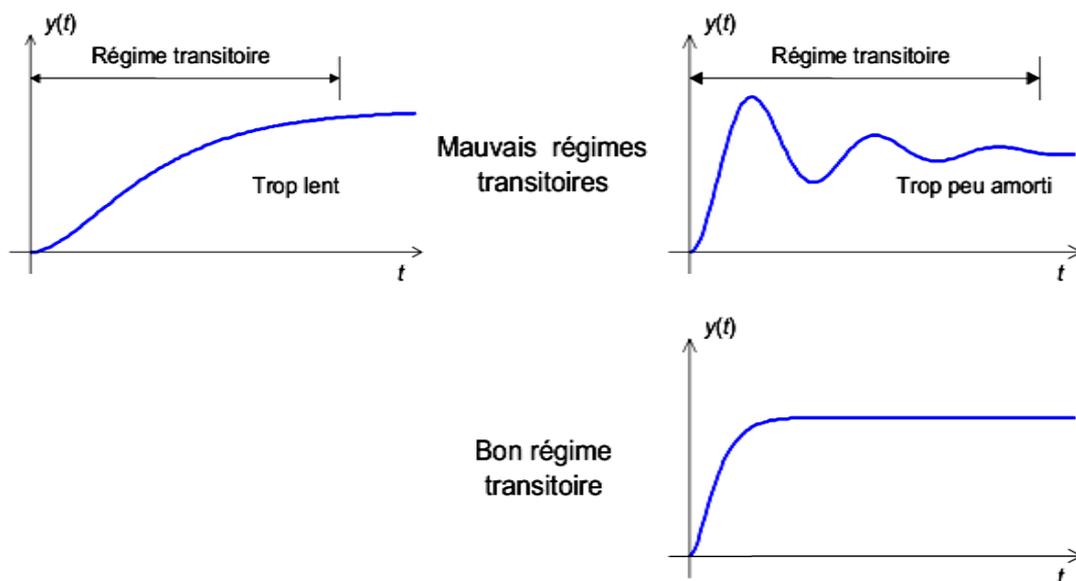


Figure 1.14 : Le comportement transitoire d'un système asservi.

4.6. Caractérisation photo détecteur selon une méthode quasi-stationnaire état photo conductance carie :

Quand un matériau est irradié par un rayonnement électromagnétique, il devient plus conducteur de l'électricité en raison de l'absorption de ce rayonnement. Ceci est du à la génération d'un bon nombre d'électrons et les trous libres. On appliquant une excitation de radiations (échelon), un phénomène transitoire simple mais intéressante dans la conductivité

est utilisé pour caractériser une photo détecteur à semi-conducteur afin de déterminer sa linéarité (photo-réponse). En utilisant la décroissance transitoire lorsque la source d'irradiation est arrêtée, la concentration de porteurs minoritaires, la durée de vie effective et la vitesse de recombinaison à la surface du détecteur sont peut être mesurées [8].

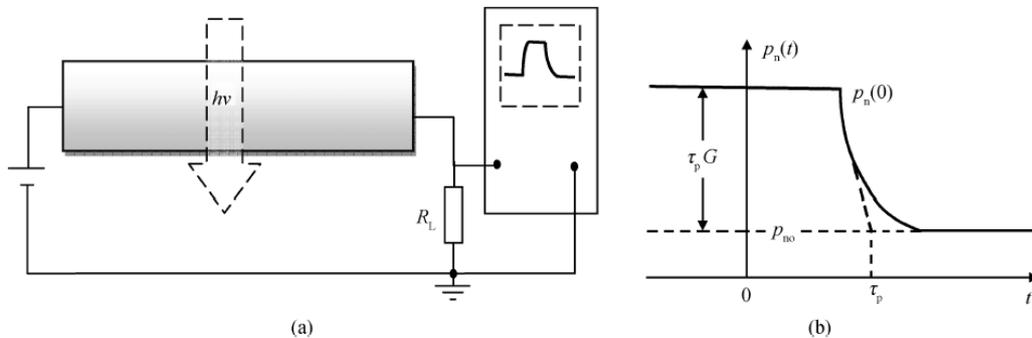


Figure 1.15 : schéma de base pour une mesure de photoconductivité de décroissance et durée de vie des porteurs minoritaires.

4.7. Mesure des propriétés thermiques des polymères :

La détermination des propriétés thermiques des polymères à partir du signal transitoire de la température. L'échantillon de polymère est placé dans une enceinte régulée et est soumis à une excitation thermique sur sa face avant, la température étant relevée sur la face arrière [9].

Les transferts de chaleur dans la pièce sont gouvernés par l'équation de la chaleur :

$$\rho(P, T, \alpha) C_p(P, T, \alpha) \frac{\partial T}{\partial t} - v \frac{\partial P}{\partial t} = \bar{\nabla} \left(\lambda(P, T, \alpha) \bar{\nabla} T \right) + \rho(P, T, \alpha) \Delta H \frac{\partial \alpha}{\partial t}$$

Ou v est le coefficient de dilatation isobare, ΔH représente l'enthalpie totale de la réaction et α l'avancement de la réaction chimique qui évolue, dans le cas de la vulcanisation isotherme, selon une cinétique décrite par la figure 1.16 (t_i étant le temps d'induction) .

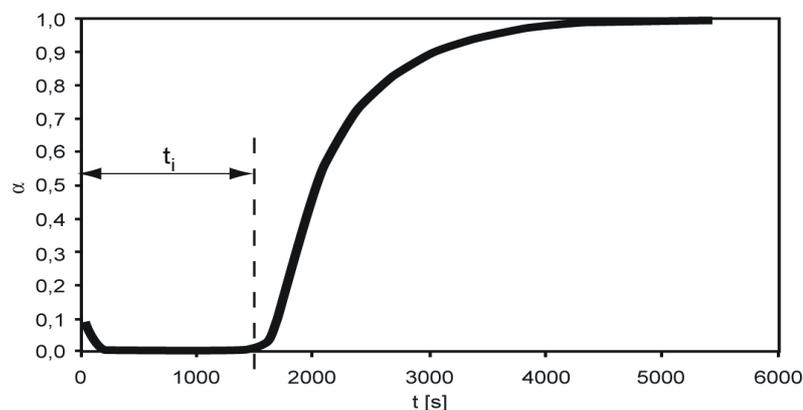


Figure 1.16 : Cinétique de réaction d'un polymère.

4.8. Test d'alimentation continue :

Pour vérifier et tester la conception, le besoin en alimentations conformes aux normes ne cesse de progresser au niveau technologique. C'est plus ou moins devenu une nécessité dans les appareils électroniques récents à tester avec des alimentations précises et complexes. Notamment, la réponse transitoire de la charge est l'un des éléments de test importants est la mesure de la réponse transitoire à une variation de la charge qui caractérise la capacité de l'alimentation à se stabiliser lors d'un changement brusque dans le courant de la charge. Pour vérifier la réponse, les mesures des temps de montée et de descente lors du changement brusque dans la charge est nécessaire. En général, ce type de test exige une charge capable de produire un temps de montée et de descente environ cinq fois plus rapide que l'alimentation. L'application suivante présentée sur la figure 1.16 décrit une approche efficace pour tester la réponse transitoire à une variation de charge de l'alimentation [10].

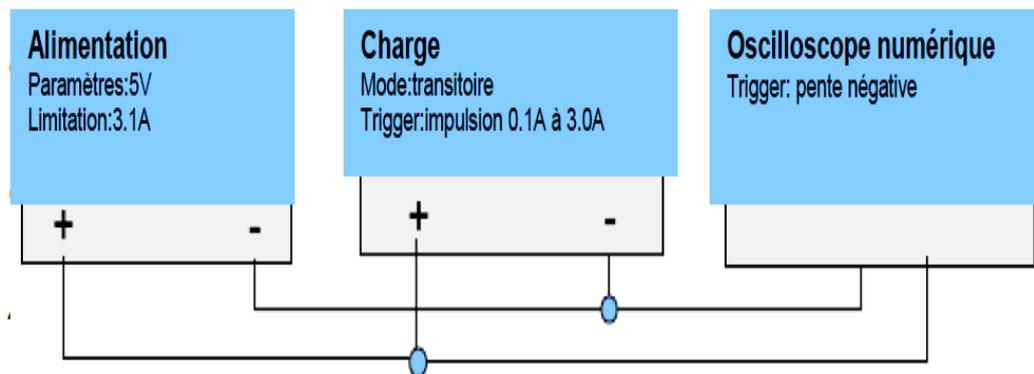


Figure 1.17. Paramétrage du test de la réponse transitoire de la charge.

5. Récapitulation :

Les phénomènes transitoires sont en général des phénomènes se déroulant très rapidement: leur durée est de l'ordre de dixièmes, de centièmes et parfois même de millièmes de seconde; on ne rencontre que rarement des phénomènes transitoires dont la durée est de l'ordre d'une seconde ou des dizaines de secondes.

Un système est dit en régime transitoire, pendant la durée de passage d'une situation stable à une autre situation stable. C'est le cas lors des démarrages, des changements de vitesse de moteur, charge et décharge du condensateur, à l'ouverture ou à la fermeture d'un interrupteur, le régime transitoire se trouve dans tout les domaines, et se produit avec tout les changements de n'importe quelle grandeur physique entre deux états stable.

Bibliographie du chapitre I:

- [1] Freddy Mudry, Traitement des Signaux, Haute Ecole d'Ingénierie et de Gestion du Canton de Vaud, Cameroun, 2011.
- [2] Michel Piou, Analyse des signaux et des circuits électriques, chapitre 13, IUT de Nantes – France, 2014.
- [3] http://fr.wikipedia.org/wiki/R%C3%A9gime_transitoire
- [4] Manneville Esquieu, éd. Dunod, Théorie du signal et composants, p. 13. Régimes transitoires. Hachette Éducation, 1ère génie électronique, p.112
- [5] Christian BISSIERES et Claude GIRAUD, Les régimes transitoires, cours, Brevet de technicien supérieur (Physique Appliquée), 2008.
- [6] Performances des systèmes de commande, Systèmes et commande linéaires GEL-2005, université LAVAL ,2013,p18.
- [7] Antoine Delmas, Étude transitoire du déclenchement de protections haute tension contre les décharges électrostatiques, thèse doctorat, école doctorale:UT3 Paul Sabatier, 2012.
- [8] O X Esebamen, N⁺P photo detector characterization using the quasi-steady state photoconductance decay method, Journal of Semiconductors (2012) Vol. 33, No. 12.
- [9] Zied Cheheb, et all ; Mesure des propriétés thermiques des élastomères(Conception d'un appareil de mesure), Communication 2011., ERT OPERP/GEPEA 2 avenue Jean Rouxel–44475 Carquefou.E:\travail en lign\2013\103.pdf
- [10] http://www.sefram.com/www/PDF_FR/NA_BK85XX_test_alimentations_FR.pdf

Chapitre II

Acquisition des signaux

- 1. Introduction**
- 2. Définition et application de système d'acquisition**
- 3. Constitution de la chaîne d'acquisition**
- 4. Schéma de principe d'une acquisition**
- 5. Matériel d'acquisition de données**
 - 5.1. La carte d'acquisition de signaux**
 - 5.2. La carte PCI 6036E d'acquisition**
 - 5.3. La carte USB d'acquisition (USB 6212)**
 - 5.4. Instrumentation PXI**
 - 5.5. Oscilloscope numérique de Tektronix**
 - 5.5.1. Branchement**
 - 5.5.2. Réglages**
 - 5.5.3. Mesures**
 - 5.5.4. Impression sur une disquette**
- 6. Récapitulation**

1. Introduction

Pour agir efficacement sur un processus physique, chimique ou biologique, naturel ou industriel, il importe, au préalable de bien connaître la chaîne d'acquisition, ou le système d'acquisition de données. C'est l'interface entre, d'une part, le mode analogique et, d'autre part, le mode numérique. Le premier est constitué par des capteurs de grandeurs physiques (qui ne sont pas nécessairement électriques) et des conditionneurs de signal. Le dernier est constitué de convertisseur analogique numérique et des organes de traitement numérique et de commande qui peuvent être des systèmes d'acquisition.

Sur un si large spectre d'applications, il est bien clair qu'on ne peut donner de règles universelles, l'analyse et le choix des caractéristiques du système étant fortement liés à l'application. Le choix d'une réalisation doit être le résultat d'un travail de synthèse entre les connaissances des moyens de mesure, des structures possibles et des éléments disponibles.

2. Définition et application de système d'acquisition

Le système d'acquisition des données (S.A.D) est un ensemble d'éléments (matériel et logiciel) destinés à recueillir des données physiques par l'intermédiaire de capteurs, à les stocker, afficher ou imprimer. Ces données peuvent être traitées pour le contrôle et la conduite de processus à temps réel. Le stockage, outre le traitement différé qu'il permet, constitue un bon moyen pour suivre les tendances du processus dans le temps [1].

3. Constitution de la chaîne d'acquisition :

Dans sa structure de base, Figure 2.1, une chaîne d'acquisition doit être constituée des éléments suivants :

- Capteurs et transducteurs,
- Installation, ou câblage électrique,
- Conditionneurs du capteur et/ou du signal,
- Carte d'acquisition, (hardware)
- PC (système d'exploitation),
- Logiciel d'acquisition de données (Software).

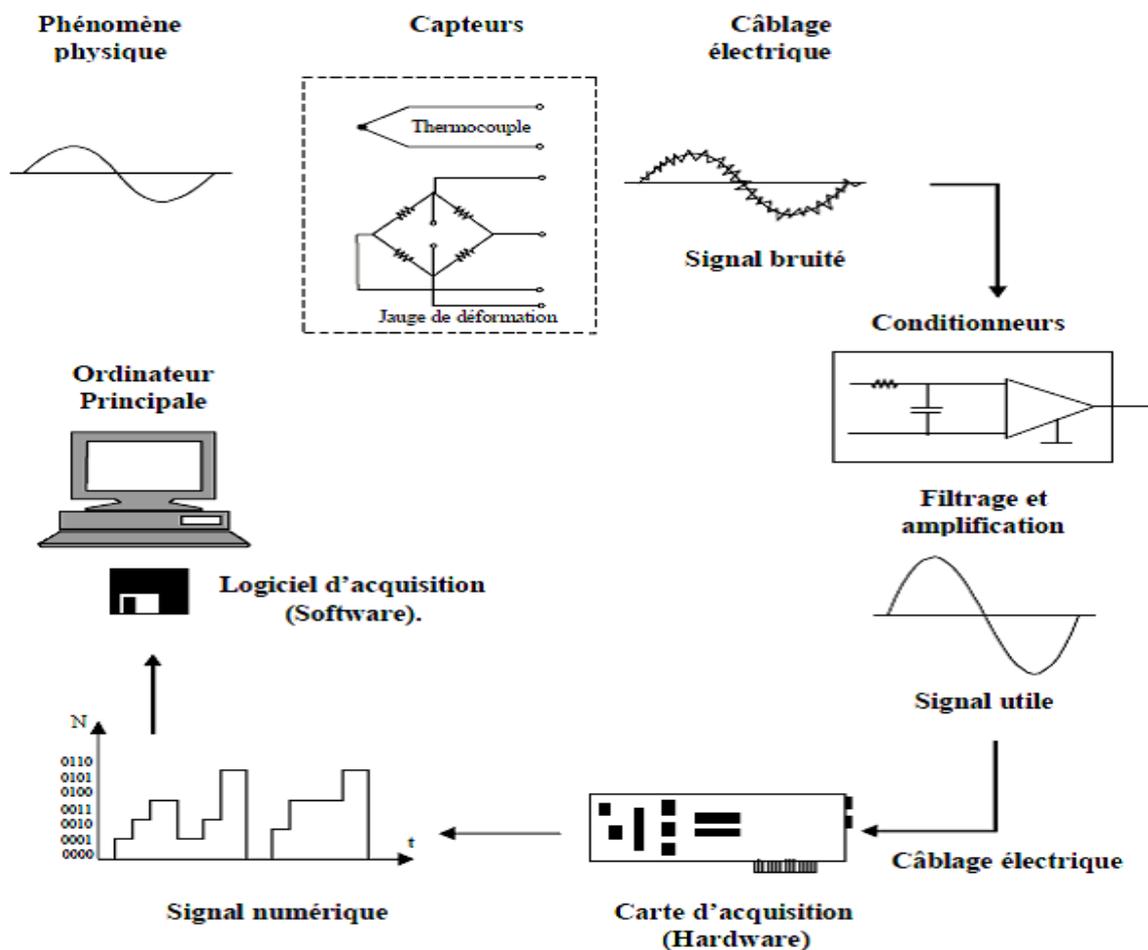


Figure 2.1: Un exemple d'une structure de base d'une chaîne d'acquisition.

4. Schéma de principe d'une acquisition:

Le principe de fonctionnement d'un système d'acquisition est représenté sur la Figure 2.2 [2]. Une carte d'acquisition se trouve dans le PC. Elle assure la conversion des signaux analogiques (les tensions) en signaux digitaux (les nombres). Pour amener les signaux analogiques depuis les divers capteurs jusque à la carte, il faut respecter l'ordonnancement

défini par son constructeur. C'est le rôle du *bornier* qui permet de diriger les signaux analogiques sur la carte d'acquisition, en suivant les prescriptions du fabricant de la carte.

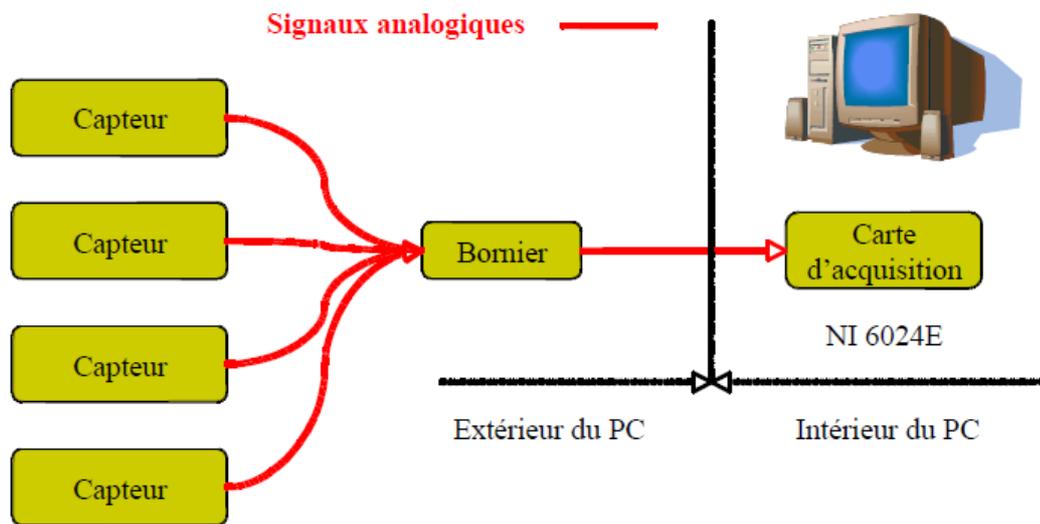


Figure 2. 2 : Schéma d'un système d'acquisition de petite dimension.

Dans le cas d'un système d'acquisition nécessitant la lecture d'un grand nombre de voies, on ne peut plus procéder ainsi. Il faut alors déporter les cartes assurant la digitalisation à l'extérieur du PC dans des châssis dédiés (souvent appelés *racks*) (Figure 2.3). Les signaux numériques sont ensuite lus par l'intermédiaire d'une carte réseau qui permet d'accéder à toutes les cartes d'acquisition. Vu le petit nombre de voies d'entrée qu'on aura à utiliser, on n'adoptera pas ce système dédié mais le précédent schématisé dans la Figure 2.2.

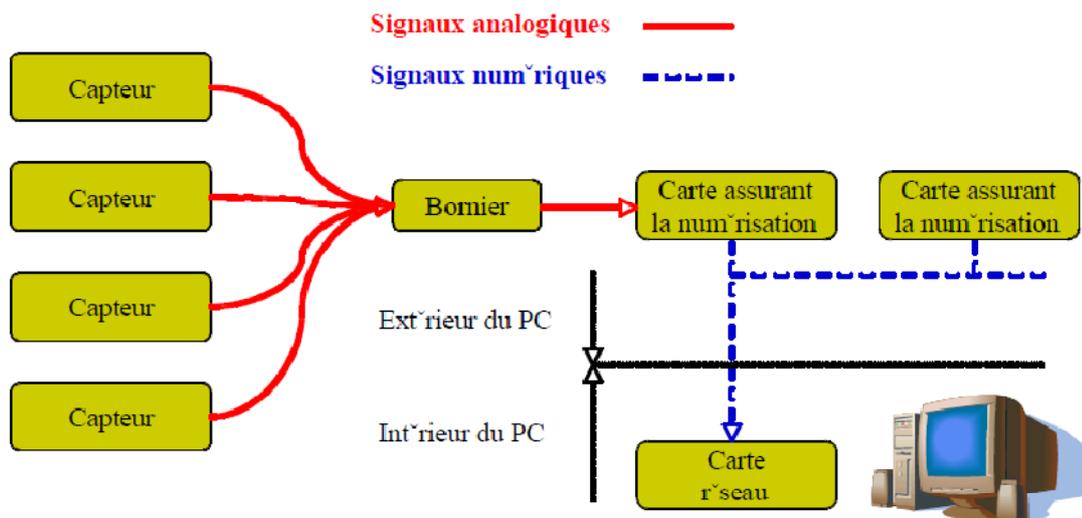


Figure 2. 3 : Schéma d'un système d'acquisition de grande dimension.

5. Matériel d'acquisition de données :

Le matériel d'acquisition de données sert d'interface entre l'ordinateur et le monde extérieur. Il fonctionne principalement comme un dispositif qui numérise les signaux analogiques entrants a fin que l'ordinateur puisse les interpréter.

National Instruments (NI) propose plusieurs plates-formes matérielles pour l'acquisition de données [3]. La plate-forme la plus facilement disponible est l'ordinateur de bureau. National Instruments périphérique Component InterConnect (NI PCI) fournit des conseils DAQ (*Data acquisition*) qui se branchent sur n'importe quel ordinateur de bureau. En outre, NI rend des modules DAQ pour PXI (PCI extensions for Instrumentation) / Compact PCI, une plateforme informatique modulaire plus robuste spécifiquement pour les applications de mesure et d'automatisation. Pour des mesures distribués, la plate-forme NI *Compact Field Point* offre modulaire I / O (in/out), le fonctionnement intégré et communication Ethernet. Pour les mesures portables ou de poche, appareils de National Instruments DAQ USB et PCMCIA travail avec les ordinateurs portables ou les PDA Windows Mobile (Figure 2.4). En outre, National Instruments a lancé périphériques DAQ pour le PCI Express, le PC de prochaine génération bus I / O, et pour le PXI Express, le bus PXI hautes performances.

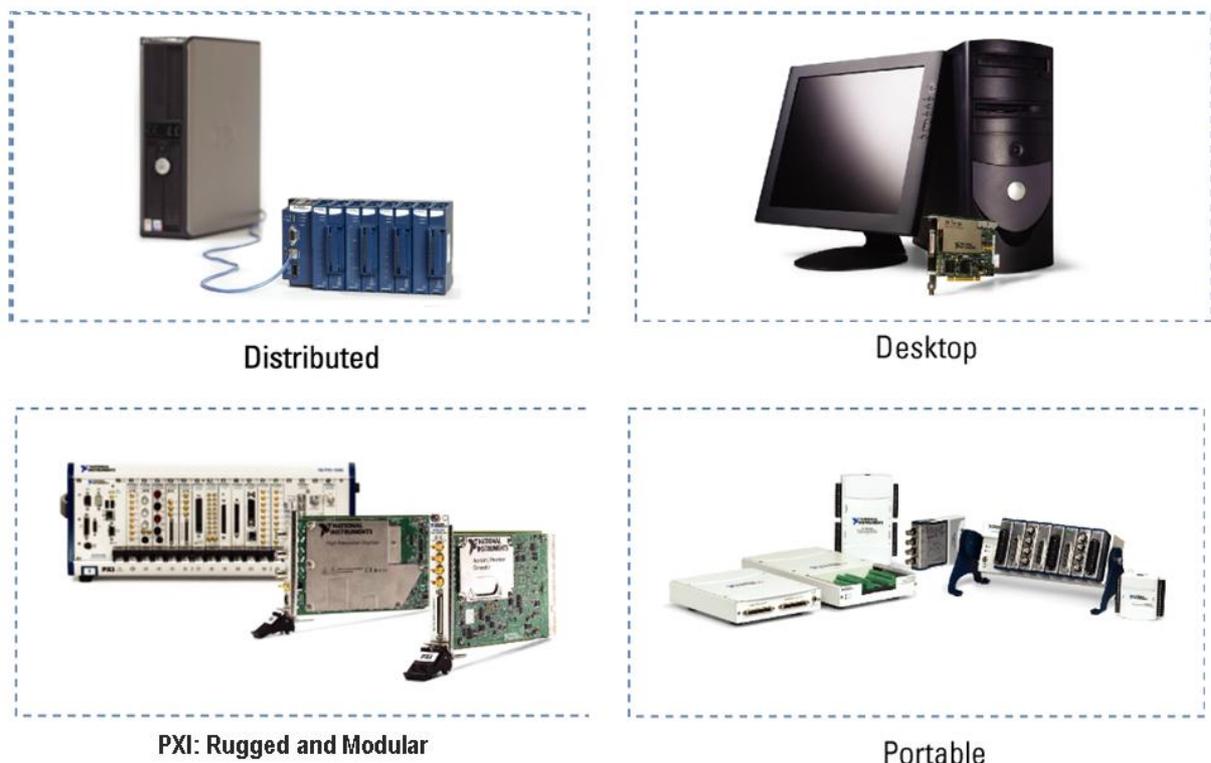


Figure 2. 4 : Des exemples de matérielle d'acquisition de données

5.1. La carte d'acquisition de signaux :

Pour faciliter la tâche de génération et d'acquisition des signaux électriques, et la rendre automatique à travers un PC, nous avons utilisé la carte d'acquisition et de génération de signaux analogiques et numériques (AD1220 de Quanta) (Figure2.5).

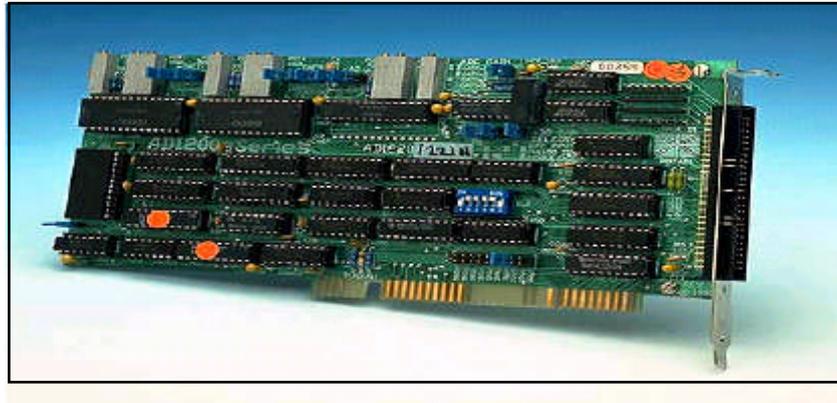


Figure 2.5 : La carte d'acquisition AD1220 de Quanta.

Cette carte est performante et souple a manipuler, grâce a une panoplie de bibliothèque soft pouvant être exploité avec plusieurs langages de programmation (Basic, C, Pascal, Fortran). Elle offre 16 canaux d'entrée analogiques pouvant être configurée en 2 ou 8 canaux différentiels , deux sortie analogique, 8 bit d'entrées numériques et 8 bits de sortie numériques, un Timer (8254) programmable et un gain d'entrée configurable au niveau de la carte.

5.2. La carte d'acquisition PCI 6036E :

Lorsque l'on cherche une carte d'acquisition de données pour étudier un signal, il vaut mieux avoir une idée préalable des caractéristiques du dit signal pour choisir au mieux son matériel. Avec ces informations, l'utilisateur doit ensuite la lecture des spécifications techniques des cartes disponibles, nombre de voies et vitesse d'acquisitions, résolution des entrées, sans oublier les sorties et les options de déclenchement...



Figure 2. 6 : La carte d'acquisition PCI 6036E de NI, 16 Ch, 200kS/s, 16-Bit, 2 AO, 8 DIO, 2 24-Bit, 20 MHz counter/timers .

La carte PCI vient s'enchâsser dans un connecteur PCI de la carte mère d'un PC, comme n'importe quelle carte périphérique (carte réseau, carte son, etc). Le bus sur lequel transiteront les données acquises par la carte est donc celui du PC qui est par conséquent une partie intégrante du système d'acquisition de données.

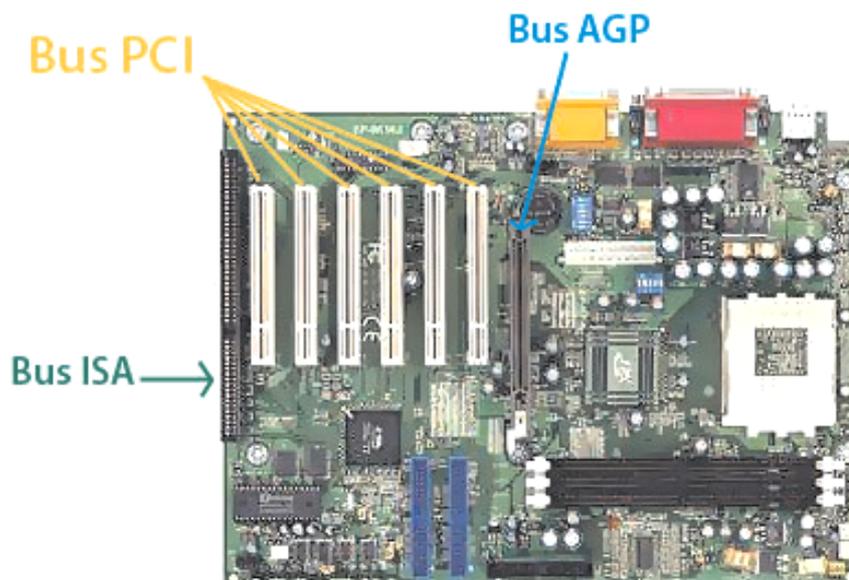


Figure 2. 7 : L'emplacement des ports PCI sur une carte mère de PC.

5.3. La carte d'acquisition USB (USB 6212) :

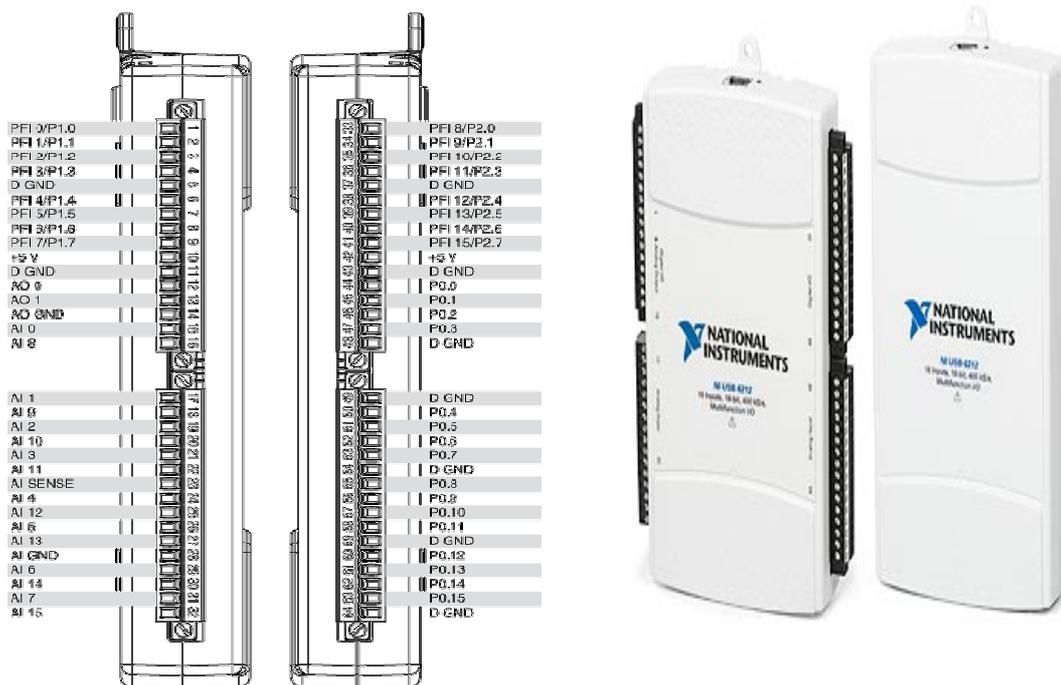


Figure 2. 8 : La carte d'acquisition USB6212 de NI.

Cette carte est utilisée pour les données. Ces caractéristiques principales sont [4]:

- 16 analogique inputs (16-bit, 400 kS/s)
- 2 analogique outputs (16-bit, 250 kS/s); 32 numérique I/O; 32-bit counters
- alimenté par bus USB pour une grande mobilité.
- Streaming des signaux de données haute vitesse soutenue flux via USB.
- Compatible avec LabVIEW, ANSI C/C++, C#, Visual Basic .NET, et Visual Basic 6.0.
- NI-DAQmx pilot software et LabVIEW SignalExpress.

5.4. Instrumentation PXI

Instrumentation (PXI) est une plateforme robuste basée sur PC qui offre une solution de déploiement de haute performance, à faible coût pour les systèmes de mesure et d'automatisation. PXI combine la PCI (Peripheral Component InterConnect) de bus électrique avec le robuste modulaire Eurocard emballage, mécanique de Compact PCI. En plus, elle peut être un bus de synchronisation spécialisé et des fonctionnalités logicielles majeures. Elle peut avoir également des fonctionnalités mécaniques, électriques et logiciels qui définissent des systèmes complets de test et de mesure, d'acquisition de données et les applications de fabrication. Ces systèmes servent des applications telles que le test de fabrication, militaire et aérospatiale, la surveillance des machines, l'automobile et test industrielle.

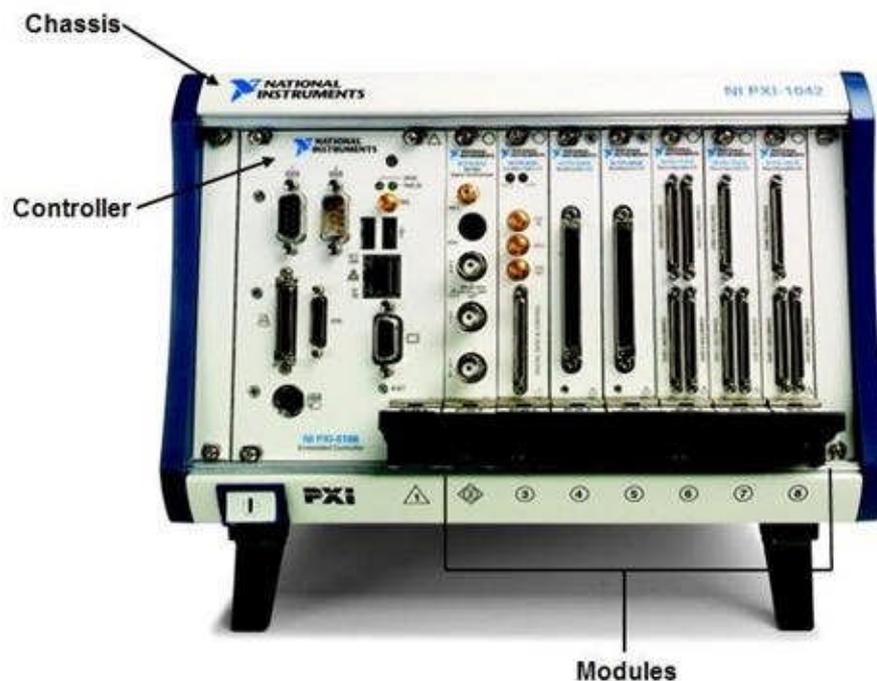


Figure 2. 9 : Instrumentation PXI 642 de NATIONAL INSTRUMENT.

5.5. L'oscilloscope numérique de Tektronix :

Le TDS 3052 est un oscilloscope numérique au phosphore avec deux canaux. L'affichage est en couleur, chaque signal correspondant à une couleur (jaune pour le canal 1, bleu pour le canal 2, rouge pour le signal mathématique et blanc pour le signal de référence), ce qui facilite la différenciation des signaux.

Les signaux seront ensuite récupérées à l'aide du port GPIB et leur rapport sauvegardé dans un fichier en fin de manipulation dans un PC.

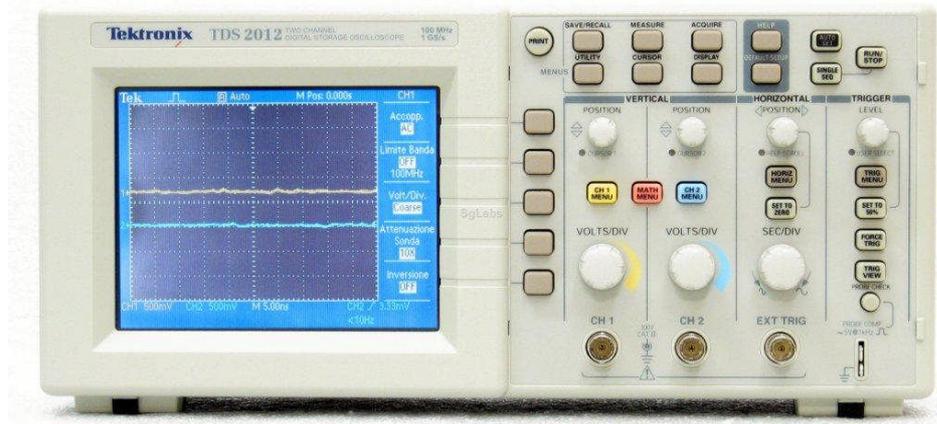


Figure 2. 10 : L'oscilloscope numérique à mémoire TDS 3052 de Tektonix.

5.5.1. Branchement :

Le branchement des signaux sur l'oscilloscope se fait à l'aide de sondes spéciales. Les sondes sont rangées à l'intérieur de l'instrument dans le compartiment arrière. Les sondes se branchent en vissant sur les connecteurs BNC à l'avant de l'appareil. La pince alligator noir représente la borne négative.

Pour allumer l'appareil, appuyer sur le bouton qui est placé à gauche en bas de l'oscilloscope. L'oscilloscope nécessite un temps de réchauffement avant que les mesures prises soient précises (environ 5 minutes). Lorsqu'on allume l'oscilloscope on voit les signaux s'afficher sur l'écran.

5.5.2. Réglages :

La meilleure manière de visualiser un signal dont la fréquence et l'amplitude sont inconnues est d'utiliser le bouton AUTOSET après la connexion du signal. Ceci permet de centrer le signal pour une visualisation optimale.

Il est possible par la suite de régler la position en x ou y du signal avec les boutons POSITION et de régler l'échelle x et y avec les boutons ECHELLE.

L'affichage d'un signal se fait en appuyant sur le bouton correspondant au signal voulu (CH 1, CH 2, MATH, REF). Dans le cas du signal de référence il faut ensuite appuyer sur le bouton d'écran du signal de référence voulue (1, 2, 3, 4). Le signal MATH permet de faire une opération mathématique sur le signal en choisissant le premier signal source, l'opérateur (+, -, x, /) et le deuxième signal source.

Ensuite, si on veut désactiver un signal, il suffit d'appuyer sur le bouton correspondant à celui-ci pour l'activer et à appuyer sur le boutons ~ OFF.

5.5.3. Mesures :

L'oscilloscope permet de prendre plusieurs mesures automatiques (fréquence, amplitude, période, largeur d'impulsion, temps de montée et de descente, rapport de cycle ou " duty cycle", ...).

Pour accéder aux mesures qu'il est possible d'obtenir, aller dans le menu mesure en appuyant sur le bouton MESURE et appuyer sur le bouton du signal voulu. Ensuite, on navigue dans les sous menu en appuyant sur SUITE. Pour activer une mesure il suffit d'appuyer sur le bouton correspondant. On voit aussitôt la mesure s'afficher à l'écran.

Pour sortir du menu MESURES, appuyer sur MENU OFF.

5.5.4. Impression sur une disquette :

Afin d'avoir des prises d'écran de l'oscilloscope, on doit régler l'impression sur fichier (TIFF ou BMP). Pour ce faire :

- Appuyer sur le bouton UTILITAIRE;
- Appuyer sur le boutons d'écran Système et sélectionner Impress en appuyant plusieurs fois;
- Ensuite, appuyer sur Format;
- Choisir BMP ou TIFF (Selon votre préférence). BMP est localisé dans la 3e page du menu;
- Appuyer sur le bouton d'écran Port et choisir Fichier.

Le réglage est maintenant fait. Pour obtenir une prise d'écran, il suffit ensuite d'appuyer sur le bouton d'impression (situé en bas à gauche, au dessus du bouton de mise en marche).

Voici un exemple d'impression:

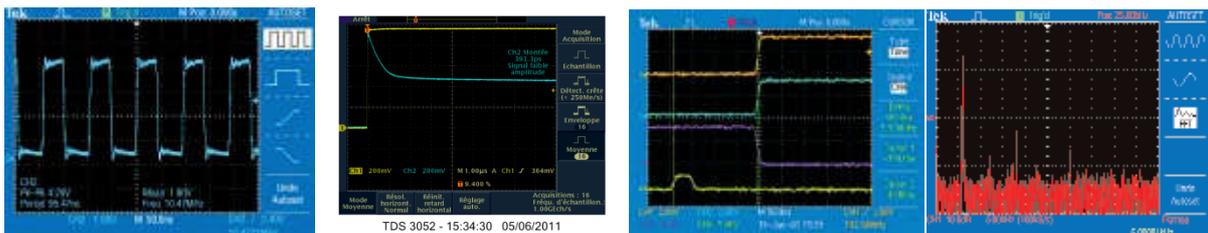


Figure 2. 11 : Des exemples d'impression d'écran de TDS3052.

6. Récapitulation :

L'acquisition, au fil du temps, de données relatives à l'état d'un système physique en permet son observation. Elle a pour but d'informer sur l'évolution temporelle de différentes grandeurs physiques. Ces dernières sont judicieusement choisies en fonction du but recherché: permettre l'étude d'un phénomène scientifique, générer la commande optimale d'un processus, surveiller l'usure d'un outil de production ou, plus simplement, garantir le bon fonctionnement d'un système industriel. Tant au sein des laboratoires de recherche que dans les sites industriels de production, l'acquisition et le traitement de signaux de mesure sont donc incontournables.

Par ailleurs, avec le développement des systèmes à microprocesseur, l'ordinateur et ses possibilités de calcul se sont trouvés démocratisés au point de pouvoir être embarqués à l'intérieur des systèmes de mesure et de contrôle.

Dans notre cas on va utiliser l'oscilloscope comme numériseur et acquéreur de donnée, a cause de sa bande passante de 500MHz et sa fréquence échantillonnage de 5GHz surtout pour les signaux rapides comme le signal transitoire dans notre étude.

Bibliographie du chapitre II :

[1] MOR Ndiaye, système d'acquisition et de traitement de Données, mémoire, Ecole Polytechnique De THIES, 1992, p3.

[2] Manuel d'initiation à l'acquisition de données, Magistère et M1 de Physique Fondamentale et Appliquée – Université Paris Sud date,2010.

[3] Introduction to data acquisition, tutorial of National Instruments, 2012.

[4] <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/en/nid/204360>.

Chapitre III

Les semi-conducteurs

- 1. Introduction.**
- 2. Les Semi-conducteurs dopés ou extrinsèques .**
 - 2.1 Dopage de type N.**
 - 2.2 Dopage de type P.**
- 3. La jonction PN .**
 - 3.1. Zone de charge d'espace (ZCE) .**
 - 3.2. Le champ électrique .**
 - 3.3. Caractéristiques courant-tension .**
 - 3.3.1. Caractéristique idéale .**
 - 3.3.2. Caractéristique réelle .**
 - 3.4. Influence de la température.**
- 4. Génération Et Recombinaison Des Porteurs.**
 - 4.1. Introduction .**
 - 4.2. Définition .**
 - 4.3. Génération.**
 - 4.3.1. Génération par photons .**
 - 4.3.2. Génération par radiations ionisantes .**
 - 4.3.3. Génération par champ électrique intense .**
- 5. Recombinaison .**
 - 5.1. Recombinaison directe .**
 - 5.2. Recombinaison indirecte.**
- 6. Durée de vie .**
 - 6.1. Durée de vie en présence de la recombinaison directe.**
 - 6.2. Durée de vie en présence de recombinaison assistée .**
 - 6.3. Retour à l'équilibre .**
 - 6.4. Recombinaison dans une zone désertée .**
- 7. Les Defaults in semiconductors.**
 - 7.1. Types de défaut.**
 - 7.2. L'effet des défauts.**
- 8. Récapitulation .**

1. INTRODUCTION

Actuellement les technologies de circuits intégrés utilisent encore le silicium comme matériau semi-conducteur de base. Le silicium étant un matériau semi-conducteur de largeur de bande interdite moyenne[1]. Les semi-conducteurs (germanium et silicium) possèdent 4 électrons sur leur couche périphérique car ils appartiennent à la 4ème colonne de la classification périodique des éléments. Il est possible de produire avec un haut degré de pureté (moins de 1 atome étranger pour 10¹¹ atomes de semi-conducteur): on parle alors de S.C. intrinsèque[2].

Le germanium est découvert par le savant **allemand Clemens Winkler** le 6 février 1886, il peut être trouvé à beaucoup d'endroits, mais en concentrations faibles. Le germanium a servi de substrat semi-conducteur jusqu'à ce que le silicium prenne sa place, vers les années 1970. Aujourd'hui il n'est plus utilisé que dans le domaine des hautes fréquences, et pour la réalisation de diodes à faible chute (0,3 V environ, application n détectons) [3]

2. Les Semi-conducteurs dopés ou extrinsèques

Dans un matériau pur, on introduit des impuretés par dopage. Pour que celui-ci soit contrôlable, il faut que le degré de pureté initial global soit supérieur au taux du dopage. Les taux de dopage utilisés sont de l'ordre de 10⁻⁸ à 10⁻¹¹. Une mole de silicium (28 g) correspond à 6,023.10²³ atomes et la densité du silicium est voisine de 7 : 1 cm³ de silicium contient donc environ 1,5.10²³ atomes. Avec un taux de dopage de l'ordre 10⁻¹⁰, il y a environ 1,5.10¹³ atomes d'impureté par cm³[4].

2.1 Dopage de type N

On introduit dans la matrice de silicium des atomes d'impuretés pentavalents tels que le phosphore P, l'arsenic As et l'antimoine Sb.

Chaque atome d'impureté amène un électron de valence supplémentaire. Cet électron est peu lié au noyau ($E \approx 0,01$ eV) et passe aisément dans la bande de conduction. La conductivité du matériau (conductivité extrinsèque) devient à cause du taux de dopage, très supérieure à celle du matériau pur. Les atomes pentavalents ou donneurs deviennent des ions positifs après le passage des électrons excédentaires dans la bande de conduction.

Les données numériques précédentes montrent que le nombre des électrons dans le matériau, fonction du taux de dopage, est supérieur au nombre des trous, fonction de la température,

d'un facteur supérieur à 10³. La conduction dite de **type N** (négative) est assurée par des électrons. *Les électrons sont les porteurs majoritaires.*

2.2 Dopage de type P

On introduit dans le réseau une impureté *trivalente* : bore B, aluminium Al, gallium Ga, indium In. Il manque à l'impureté un électron de valence pour assurer les 4 liaisons avec les atomes de silicium voisins. Un faible apport d'énergie ($\gg 0,05$ eV) suffit pour qu'un électron d'un silicium voisin soit capté par l'impureté : il y a formation d'un **trou** peu lié et donc mobile. Les atomes trivalents (*accepteurs*) deviennent des ions négatifs par capture d'un électron. Compte tenu des taux de dopage, ces trous sont beaucoup plus nombreux que les porteurs intrinsèques du cristal pur. La conduction de **type P** (positive) est assurée par des trous. *Les trous sont les porteurs majoritaires.*

3. La jonction PN :

Une jonction PN est constituée de deux zones respectivement dopées P et N et juxtaposées d'une façon que nous supposons abrupte (Figure 3.1), c'est à- dire que la transition de la zone P à la zone N se fait brusquement. Lorsque l'on assemble les deux régions, la différence de concentration entre les porteurs des régions P et N va provoquer la circulation d'un courant de diffusion tendant à égaliser la concentration en porteurs d'une région à l'autre. Les trous de la région P vont diffuser vers la région N laissant derrière eux des atomes ionisés, qui constituent autant de charges négatives fixes. Il en est de même pour les électrons de la région N qui diffusent vers la région P laissant derrière eux des charges positives. Il apparaît aussi au niveau de la jonction une zone contenant des charges fixes positives et négatives. Ces charges créent un champ électrique E qui s'oppose à la diffusion des porteurs de façon à ce qu'un équilibre électrique s'établisse [5].

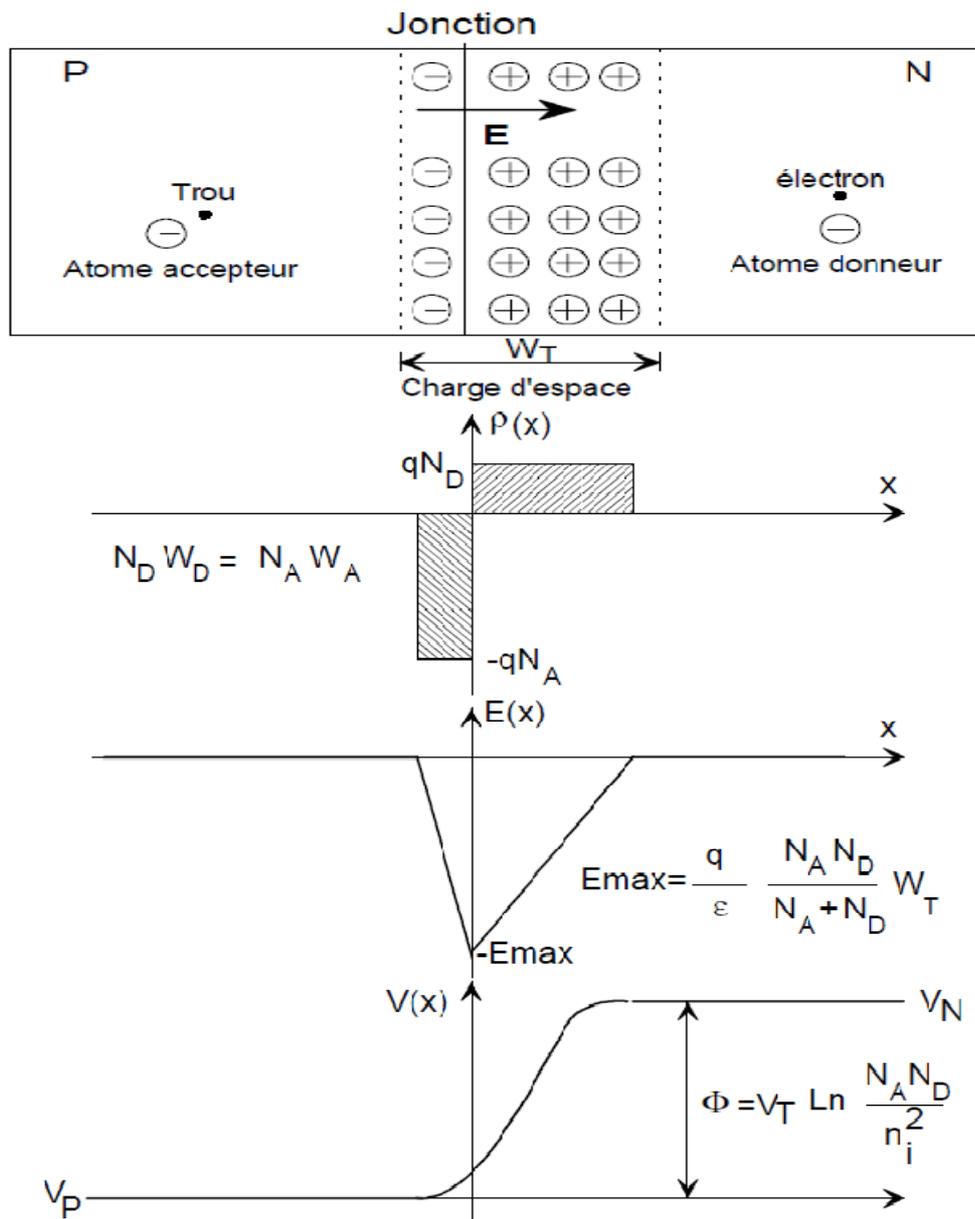


Figure 3.1 : Représentation d'une jonction PN à l'équilibre thermodynamique

Dans ces conditions les répartitions des charges, du champ électrique et du potentiel sont représentées sur la figure (3.1). La région dépeuplée de porteurs mobiles est appelée zone de charge d'espace (ZCE).

3.1. Zone de charge d'espace (ZCE) :

La zone de charge d'espace (ZCE), aussi appelée zone de déplétion, ou zone désertée, correspond à la région qui apparaît dans une jonction p-n, entre la zone dopée N et la zone dopée P. Elle est appelée "zone de déplétion" ou "zone désertée" parce qu'elle est dépourvue de porteurs libres, et elle est appelée "zone de charge d'espace" parce qu'elle est constituée de deux zones chargées électriquement (contrairement au reste du semi-conducteur N et du semi-conducteur P qui sont globalement neutres).

3.2. Le champ électrique :

Le champ électrique généré par la zone de charge d'espace (ZCE), orienté du sens des charges positives (en zone N) vers les charges négatives (en zone P), entraîne les électrons et les trous dans le sens opposé au phénomène de diffusion. Ainsi la jonction atteint un équilibre car le phénomène de diffusion et le champ électrique se compensent.

3.3. Caractéristiques courant-tension :

3.3.1. Caractéristique idéale :

La caractéristique $i - v$ d'une jonction est donné par la relation

$$i = I_S \left(e^{v/V_T} - 1 \right) \quad (3.1)$$

Pour une polarisation directe de quelques V_T , le courant de diffusion i_{diff} est prédominant et :

$$i \approx I_S e^{v/V_T} \quad (v \gg V_T) \quad (3.2)$$

A l'opposé, pour polarisation inverse de quelques V_T , le courant de saturation inverse est prédominant et : [6]

$$i \approx -I_S \quad (v \ll -V_T) \quad (3.3)$$

La caractéristique $i - v$ est fortement non linéaire : par exemple, doubler v dans l'éq. (3.2) augmente considérablement le courant i !

Pour une diode au silicium, une polarisation directe $v \approx 0.7$ V produit un courant i compris entre 1 mA et quelques dizaines de milliampères.

La caractéristique courant-tension correspondante est reprise à la Figure 3.2.

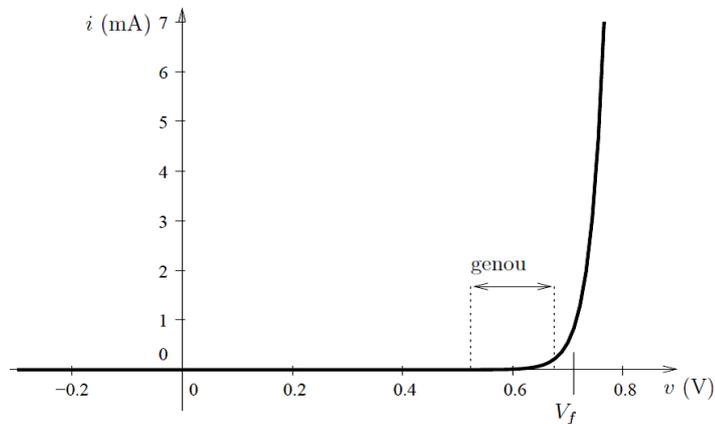


Figure 3.2 : Caractéristique $i - v$ idéale d'une diode pn ($I_S = 10^{-14}$ mA).

3.3.2. Caractéristique réelle :

Le modèle établi reproduit raisonnablement bien la caractéristique courant-tension réelle, mais quelques différences importantes apparaissent. La Figure 3.3 montre la caractéristique typique d'une diode commerciale. On peut y observer plusieurs écarts importants par rapport à la figure. 3.2.

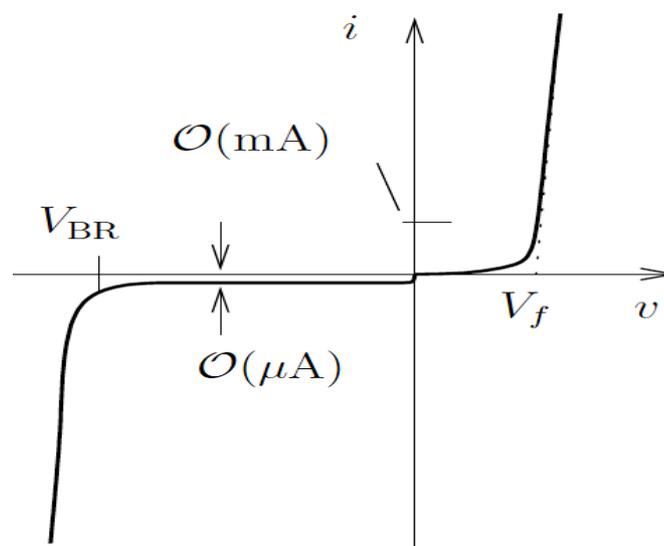


Figure 3.3: Caractéristique $i - v$ typique d'une diode pn commerciale.

3.4. Influence de la température

La température de fonctionnement est un paramètre fondamental dans la détermination du fonctionnement des dispositifs à semi-conducteurs. Dans le cas de la jonction P.N le courant de saturation est essentiellement du aux porteurs minoritaires générés par agitation thermique. Ce courant de saturation sera donc particulièrement sensible à la température. Son expression est donnée par [7] :

$$I_s = K \cdot T^m \cdot e^{\frac{-E_{go}}{2 \cdot k \cdot T}} \quad (3.4)$$

Avec $m=2$ pour le Germanium

$m=1.5$ pour le Silicium

et $m=1.5$ pour L'arséniure de Gallium

Pour trouver l'influence de la température sur la caractéristique de la jonction, dérivons l'expression simplifiée du courant soit :

$$I \cong I_s e^{\frac{V}{hV_T}} \quad (3.5)$$

Nous avons :

$$\frac{dI}{dT} = \frac{dI_s}{dT} \cdot e^{\frac{V}{hV_T}} + \frac{dV}{dT} \cdot \frac{I_s}{hV_T} \cdot e^{\frac{V}{hV_T}} - I_s \cdot \frac{q \cdot V}{hk \cdot T^2} \cdot e^{\frac{V}{hV_T}} \quad (3.6)$$

(dI_s/dT) Représente la variation du courant inverse en fonction de la température.

Pratiquement ce courant double tous les 10°C.

Cherchons maintenant la variation dV/dT lorsque le courant I est maintenu constant (à l'aide d'un circuit extérieur) soit lorsque $dI = 0$ dans l'expression précédente. Nous avons alors :

$$\frac{dV}{dT} = \frac{V}{T} - \frac{h \cdot V_T}{I_s} \cdot \frac{dI_s}{dT} \quad (3.7)$$

Pratiquement pour une jonction au Silicium, à la température ordinaire nous avons :

$$\frac{dV}{dT} = -2,5 \text{ mV}/^{\circ}\text{C} \quad (3.8)$$

La caractéristique $i - v$ varie en fonction de la température. Dans le cas d'une diode au silicium, sur une plage importante de T et à courant i constant, la tension v décroît approximativement de 2 mV à chaque élévation T d'un degré Celsius, comme illustré à la Figure. 3.4 [6].

Cette propriété de la diode est largement employée pour réaliser des capteurs de température électroniques.

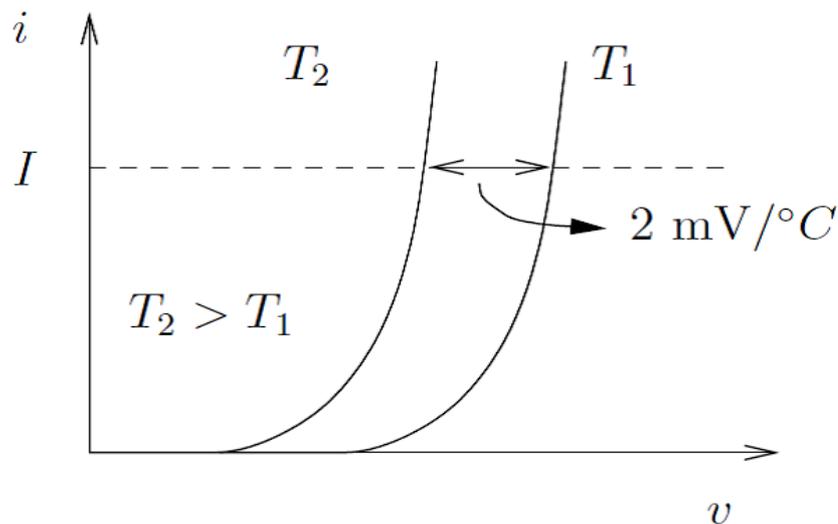


Figure 3.4 : Variation de la tension v en fonction de la température, à i constant et en polarisation directe.

4. Génération Et Recombinaison Des Porteurs

4.1. Introduction :

Les phénomènes thermostimulés sont intimement liés à la présence de défauts ponctuels dans le cristal. Ces derniers peuvent être des atomes étrangers (impuretés) ou des défauts natifs (lacunes, interstitiels). Ces défauts localisés, qui perturbent la périodicité cristalline du réseau, provoquent l'apparition de niveaux d'énergie permis dans la bande interdite et peuvent correspondre à des centres de piégeage ou de recombinaison. Les niveaux pièges à électron sont proches de la bande de conduction, les pièges à trous sont proches de la bande de valence, les centres de recombinaison se situent au voisinage du milieu de la bande interdite .

4.2. Définition :

Un électron se détache d'un atome (si l'énergie suffisante lui est fournie), il passe d'un état de la bande de valence (BdV) à un état de la bande de conduction (BdC), il est devenu électron libre (électron délocalisé) et il donne naissance à un trou dans la BdV : c'est le phénomène de génération d'une paire électron-trou.

Un électron libre passe d'un état de la BdC à un état vide de la BdV (disparition d'un trou), il perd de l'énergie : c'est le phénomène de recombinaison[8].

A l'équilibre thermodynamique : la génération et la recombinaison se compensent exactement. La densité des trous (p_0) et des électrons (n_0) sont indépendantes du temps (stationnaires) et suivent la loi d'action de masse:

$$n_0 p_0 = n_i^2 \text{ (cm}^{-6}\text{)} \quad (3.9)$$

Hors équilibre thermodynamique la densité des électrons est :

$$n = n_0 + Dc \quad (3.10)$$

(Dc : écart par rapport à l'équilibre)

la densité des trous est :

$$p = p_0 + Dc \quad (3.11)$$

(Dc : écart par rapport à l'équilibre)

et :

$$N p \neq n_i^2 \text{ (cm}^{-6}\text{)} \quad (3.12)$$

Deux cas peuvent se présenter :

- $p n < n_i^2$, il y a moins de porteurs qu'à l'équilibre thermodynamique. C'est un phénomène d'extraction (désertion appauvrissement).
- $p n > n_i^2$, il y a plus de porteurs qu'à l'équilibre thermodynamique. C'est un phénomène d'injection (génération, accumulation).

Dc est du même ordre que la densité des porteurs minoritaires, c'est une faible injection : la densité des porteurs majoritaires reste identique à celle de l'équilibre.

Dc est comparable à la densité des porteurs majoritaires, c'est une forte injection :

les densités des électrons et des trous deviennent voisines.

Densité des porteurs (cm ⁻³)	Equilibre	Faible injection	Forte injection
Ecart : Dc	0	10 ¹⁰	10 ¹⁵
Majoritaires n _n	2.2 10 ¹⁵	2.2 10 ¹⁵	3.2 10 ¹⁵
Minoritaires p _n	10 ⁵	10 ¹⁰	10 ¹⁵

Tableau 4-1: Conditions d'injection dans Si de type 'N'

4.3. Génération :

L'énergie nécessaire pour la création d'une paire électron-trou dans un semi-conducteur soumis à une perturbation extérieure peut être apportée par :

- un photon;
- une particule très énergétique (radiation ionisante, porteur chaud).
- un champ électrique intense.

G' : taux de génération (cm⁻³.s⁻¹) : nombre de paires électron-trou créées par unité de volume et unité de temps.

G_{th} : taux de génération thermique caractérise la génération provoquée par l'agitation thermique.

G : taux de génération spécifique qui découle de l'excitation du semiconducteur par la perturbation extérieure.

$$G' = G_{th} + G \quad (\text{cm}^{-3}.\text{s}^{-1}) \quad (3.13)$$

4.3.1. Génération par photons :

L'énergie du photon ($h\nu$) est inférieure à la hauteur de la bande interdite (BI) du SC (E_g), il n'est pas absorbé et le semi-conducteur est transparent.

L'énergie du photon ($h\nu$) est supérieure à la hauteur de la BI du SC (E_g), il est absorbé et son énergie provoque la création d'une paire électron trou.

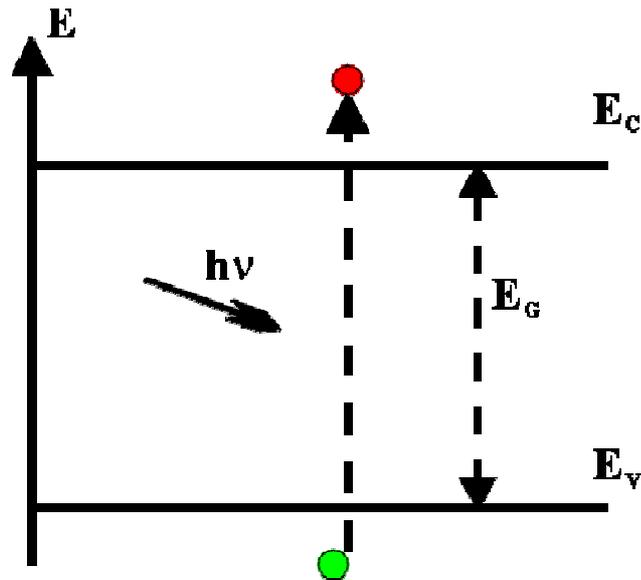


Figure 3.5 : Génération par photon

Les matériaux semi-conducteurs absorbent fortement les rayonnements dont la longueur d'onde est inférieure au seuil d'absorption fondamental :

$$\lambda \leq 1.24/E_g(\text{eV}) (\mu\text{m}) \quad (3.14)$$

4.3.2. Génération par radiations ionisantes :

Les particules de forte énergie perdent leur énergie en créant des paires électron-trou.

Dans le cas où la particule est complètement arrêtée dans le semi-conducteur, le nombre de paires électron-trou créées permettra de déterminer son énergie (détecteurs nucléaires).

4.3.3. Génération par champ électrique intense :

Dans un semi-conducteur soumis à un champ électrique très intense, les porteurs libres sont tellement rapides (porteurs chauds) qu'ils peuvent se comporter comme des particules ionisantes et créer des paires électron-trou.

Cet effet est cumulatif, les porteurs créés peuvent eux aussi acquérir de l'énergie et par "chocs ionisants" sur les atomes du réseau engendrer d'autres paires électron-trou.

Dans ce cas on est en présence de la multiplication des porteurs libres par le phénomène d'avalanche[8].

On caractérise l'efficacité de la création de porteurs libres par le phénomène d'avalanche par le coefficient d'ionisation α (cm^{-1}): nombre de paires créées par unité de longueur du parcours du porteur chaud.

5. Recombinaison :

Un excès d'électrons ou de trous par rapport à l'état d'équilibre entraîne l'augmentation du phénomène de Recombinaison pour ramener le système à son état d'équilibre.

R' : taux de recombinaison ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$) : nombre de paires électron-trou disparues par unité de volume et unité de temps.

5.1. Recombinaison directe :

Transition directe de l'électron de la BdC à la Bdv.

L'énergie récupérée peut

- être transformée en photons (recombinaison radiative avec émission de lumière).
- être transformée en phonons (recombinaison non radiative : dissipation de l'énergie sous forme thermique par échauffement du réseau cristallin).
- être cédée à un électron de la Bdv qui se trouve transféré à un niveau supérieur ou un trou de la Bdc qui se trouve transféré à un niveau inférieur : c'est la recombinaison Auger.

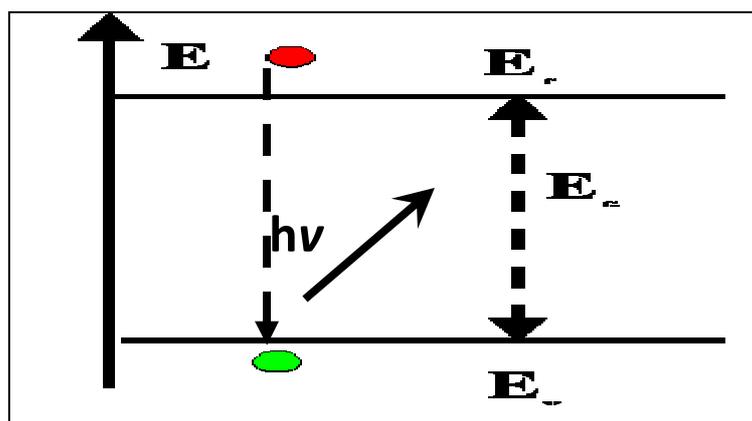


Figure 3.6 : recombinaison directe.

5.2. Recombinaison indirecte :

Les défauts du réseau cristallin (interstitiels, lacunes, dislocations), certaines impuretés chimiques (Au dans Si, Cu dans GaAs) donnent des niveaux discrets d'énergie situés vers le milieu de la BI : ce sont des niveaux profonds.

quand un niveau profond capte un électron :

- la probabilité de capturer un trou est plus importante que celle de renvoyer l'électron, elle va faire une recombinaison c'est donc un centre de recombinaison.
- la probabilité de réémettre l'électron dans la BdC, le niveau a simplement retenu le porteur pendant un certain temps, c'est un piège.

Ces transitions mettent en jeu des énergies plus faibles qu'une transition directe, elles sont donc beaucoup plus probables qu'une transition bande à bande [8].

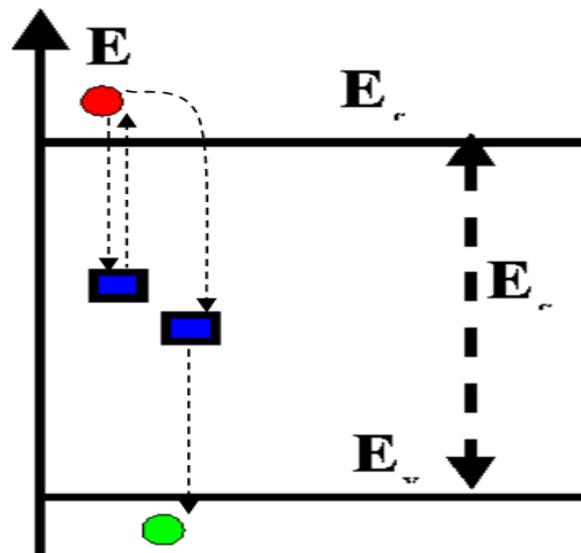


Figure 3.7 : Recombinaison indirecte.

6. Durée de vie :

6.1. Durée de vie en présence de la recombinaison directe

La variation temporelle de la densité des électrons de la BdC (dn/dt) dépend du taux de génération et du taux de recombinaison :

$$(dn/dt)_{GR} = G' - R' = G + G_{th} - R' \quad (3.15)$$

G : taux de génération spécifique qui découle de l'excitation du semi-conducteur par la perturbation extérieure

On regroupe dans un même terme U : taux net de recombinaison, le bilan entre la génération thermique et la recombinaison :

$$U = R' - G_{th} \quad (3.15)$$

$U > 0$ représente une diminution, $U < 0$ représente une augmentation de la densité des porteurs négatifs par unité de temps et unité de volume. L'état stationnaire correspond à $U=0$.

$$(dn/dt)_{GR} = G - U \quad (\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (3.16)$$

La recombinaison directe survient quand un électron rencontre un trou, donc $R_p' = R_n'$: taux de recombinaison des trous = taux de recombinaison des électrons. Ils sont proportionnels à la densité des trous et des électrons :

$$R' = R_p' = R_n' = k n p \quad (3.17)$$

k est une constante de proportionnalité.

Sans perturbation $n = n_0$, $p = p_0$ densité des porteurs à l'équilibre thermodynamique.

$R' = k n_0 p_0 = k n_i^2$ et on est dans un régime stationnaire donc le taux net de recombinaison $U=0$

ce qui permet de déduire que : $G_{th} = k n_i^2$.

Le taux net de recombinaison (vitesse de disparition) devient alors :

$$U = k (n p - n_i^2) \quad (\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}) \quad (3.18)$$

avec $n = n_0 + Dc$, $p = p_0 + Dc$, la neutralité électrique donne $Dn = Dp = Dc$,

la relation précédente devient :

$$U = k (n_0 + p_0 + Dc) Dc \quad (3.19)$$

On introduit la notion de durée de vie des porteurs excédentaires $\mathcal{Q}(Dc)$ telle que :

$$U = Dc/\vartheta (Dc) \text{ (cm}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}\text{)} \quad (3.20)$$

Physiquement, ϑ_p représente le temps moyen qu'un trou excédentaire existe avant de se recombiner avec un électron. ϑ_n représente le moyen moyen d'existence d'un électron de conduction.

La recombinaison directe est un processus rare, pour les semi-conducteurs à bandes interdites indirectes (Ge, Si, GaP), les durées de vie qui en découlent seraient de l'ordre de la seconde. Les durées de vie mesurées s'échelonnent entre 10^{-3} et 10^{-9} s. Ce sont les recombinaisons assistées qui expliquent les valeurs mesurées.

Dans les semi-conducteurs à bandes interdites directes, la recombinaison bande à bande est prédominante, de plus elle s'effectue avec l'émission de photons ce qui explique l'utilisation de ce type de matériau pour la réalisation de composants photo-émissoifs.

6.2. Durée de vie en présence de recombinaison assistée :

Les centres de recombinaison favorisent la mise en présence d'électrons et de trous, ils influencent fortement la durée de vie de ces porteurs [8].

Considérons un semi-conducteur ayant une densité N_t de centres de recombinaison créant N_t états permis tous à la même énergie E_t située aux environ du milieu de la BI (Modèle Shockley - Hall - Read).

La cinétique des centres de recombinaison peut être évaluée, elle mène à l'expression.

$$\theta = D_c \frac{\frac{p+p_1}{A_n} + \frac{n+n_1}{A_p}}{N_t(pn-n_i^2)} \quad (3.21)$$

où :

- densité des électrons qu'il y aurait si le niveau de FERMI $n_1 = N_c \exp \frac{E_c - E_t}{K_B T}$ était situé au niveau d'énergie des centres de recombinaison : ($E_t = E_F$).
- densité de trous qu'il y aurait si le niveau de FERMI $p_1 = N_v \exp - \frac{E_t - E_v}{K_B T}$ était situé au niveau d'énergie des centres de recombinaison : ($E_t = E_F$).

A_n : Efficacité des centres de recombinaison pour les électrons ($A_n = S_n v_{thn}$: S_n section de capture des électrons, v_{thn} : vitesse thermique des électrons).

A_p : Efficacité des centres de recombinaison pour les trous ($A_p = S_p v_{thp}$: S_p section de capture des trous, v_{thp} : vitesse thermique des trous).

Dans un semi-conducteur N (dopage N_D) en régime de faible injection :

les conditions : $n_0 = N_D \gg n_1 \cong p_1 \gg D_c \cong p_0$ introduites dans l'expression de la durée de vie donnent :

$$\mathcal{G} = 1/A_p N_t = 1/(S_p v_{thp} N_t) = \mathcal{G}_p = \text{durée de vie des porteurs minoritaires positifs.}$$

Dans un semi-conducteur P (dopage N_A) en régime de faible injection :

les conditions : $p_0 = N_A \gg n_1 \cong p_1 \gg D_c \cong n_0$ introduites dans l'expression de la durée de vie donnent :

$$\mathcal{G} = 1/A_n N_t = 1/(S_n v_{thn} N_t) = \mathcal{G}_n = \text{durée de vie des porteurs minoritaires négatifs.}$$

Dans un semi-conducteur dopé, il y a abondance de porteurs majoritaires, leur durée de vie est très grande, la durée de vie des porteurs minoritaires dépend de l'efficacité de capture et de la densité des centres de recombinaison.

6.3. Retour à l'équilibre :

Soit un échantillon semi-conducteur de type "N" soumis à un éclairage qui entraîne un taux de génération de paires électron-trou G_L uniforme dans tout l'échantillon.

La variation de la densité des porteurs minoritaires = taux de génération - taux net de recombinaison :

$$dp_n(t)/dt = G_L - U = G_L - (p_n(t) - p_{n0})/\mathcal{G}_p \quad (3.22)$$

1°) sous éclairage permanent : système est stationnaire :

$$dp_n(t)/dt = 0 \text{ donc : } D_c = (p_{n1} - p_{n0}) = G_L \mathcal{G}_p$$

2°) à partir de $t = 0$: suppression de l'éclairage : $G_L = 0$

$$\text{donc : } dp_n(t)/dt = - (p_n(t) - p_{n0})/\mathcal{G}_p$$

$$\text{avec la condition initiale : } p_n(0) = p_{n1}$$

$$(p_n(t) - p_{n0}) = (p_{n1} - p_{n0}) \exp(-t/\mathcal{G}_p)$$

$$(p_n(t) - p_{n0}) = (p_{n1} - p_{n0}) \exp(-t/\mathcal{G}_p) \quad (\text{cm}^{-3}) \quad (3.23)$$

La durée de vie = constante de temps de retour à l'équilibre.

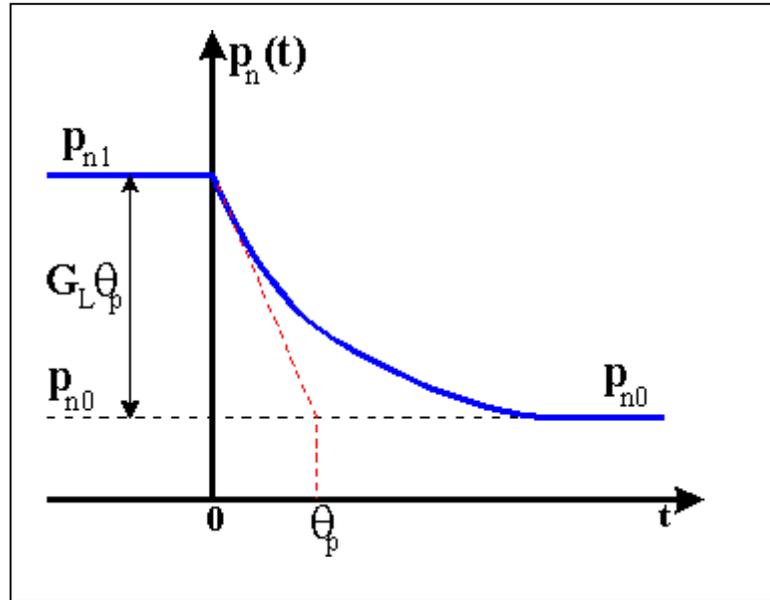


Figure 3.8: retour à l'équilibre.

La durée de vie = constante de temps de retour à l'équilibre.

6.4. Recombinaison dans une zone désertée :

Une zone désertée est une partie de semi-conducteur dépourvue de porteurs majoritaires $n_0=p_0=0$.

Considérons les centres de recombinaison les plus efficaces : ceux situés au milieu de la B.I. ($E_T = E_{Fi}$), de densité N_t et de même efficacité : $A_n = A_p = A$.

dans ces conditions :

$$pn - n_i^2 = Dc^2 - n_i^2 \text{ et } (p + p_1)/A_n = (n + n_1)/A_p = 2(Dc + n_i)/A.$$

en reportant dans l'expression SHR(2-14) $\vartheta = 1/(A N_t)$ et pour les faibles écarts $Dc \ll n_i$, on trouve :

$$U = -n_i/(2\vartheta) \text{ (cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}\text{)} \quad (3.24)$$

Taux net de recombinaison

7. Les Defaults dans les semi-conducteurs

Les défauts déterminés et classés par catégorie de semi-conducteur. Le cas simplifié est de supposer que les défauts se produisent aléatoirement au-dessus d'une tranche de silicium. Davantage d'analyse détaillée a prouvé que cette simplification n'est pas réaliste, de quelque manière que La plupart des défauts ont été montrés au mensonge au bord du matériel, en raison de l'effort thermique et mécanique. Et tandis que classiquement, des densités de défaut étaient considérées en ce qui concerne la variation radiale, davantage d'attention a été donnée à l'écart angulaire. Les deux variations ont été étudiées pour l'analyse du défaut phénomènes, y compris des faisceaux de défaut et des lignes de glissade.

7.1. Types de défaut

Les catégories des circuits défectueux sont comme suit :

- a) Défauts locaux au commencement dans le matériel.
- b) Défauts locaux créés pendant la fabrication.
- c) Larges défauts au commencement dans le matériel.
- d) Larges défauts créés pendant la fabrication.

7.2. L'effet des défauts

L'effet des défauts sont signalés l'un ou l'autre comme catastrophique, quand le circuit est complètement inopérable ; ou dégradé, où le circuit est marginalement inopérable. Cependant, tous les défauts ne causent pas les défauts opérationnels. En fait, quelques défauts sont prévus ou prévus, pendant le processus de dopage. Par exemple, le carbone avait été précédemment trouvé dans beaucoup de défauts observés en semi-conducteurs de silicium, et un matériel moderne commun de semi-conducteur est le carbure de silicium (sic). Par conséquent, le secteur de morceau est multiplié par une constante, toujours moins que l'unité, qui définit le secteur actif de morceau.

Cependant, les défauts ont à l'origine créé près de la surface peuvent être replacés ou fixés, en raison des processus de disque comme le polissage, l'oxydation, et gravure à l'eau-forte chimique.

Les défauts locaux peuvent être classés par catégorie dans : défauts ponctuels, défauts de secteur, lignes, et faisceaux. Les exemples des défauts ponctuels incluent des trous d'épingle,

des grains incorporés, et des dislocations . Particulièrement le terrain communal sont des vacances d'emploi d'un atome d'une position particulière de réseau, et des interstitiels, dans lesquels un atome est situé entre des emplacements de réseau. En outre, en traitant le dopage ou la fabrication, on peut rencontrer des impuretés. Ces atomes qui sont différents que le matériel original peut être des défauts substitutional, quand ils remplacent un atome prévu à une position de réseau, ou impuretés interstitielles. Le schéma 1 fournit des exemples pour quatre des défauts précédemment indiqués[9].

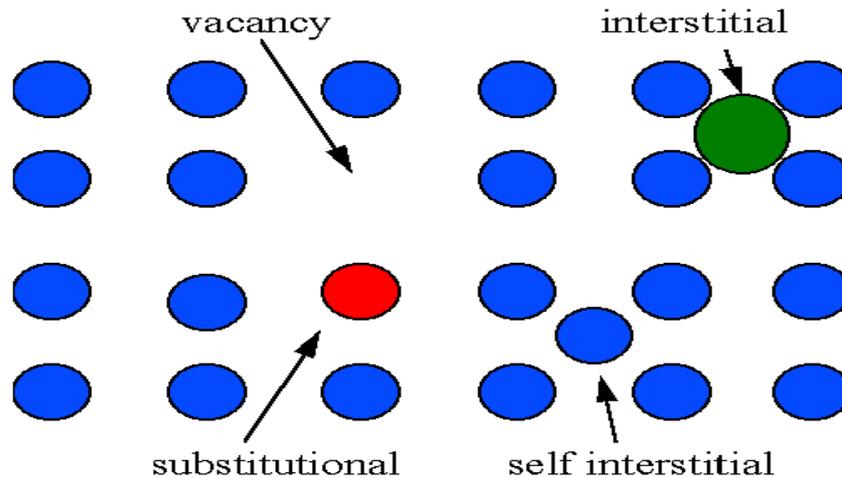


Figure 3.9 : Défauts ponctuels communs en semi-conducteurs. les défauts substitutionnel et interstitiels impliquent un ion séparé, tandis que les interstitiels d'individu sont dus à un atome original.

Des défauts de secteur sont considérés en tant que défauts ponctuels étendus, ils sont modélés avec une propriété radiale et angulaire au sujet de la tranche. La propriété angulaire vient environ habituellement pendant les phases à hautes températures d'activité. Ceci peut inclure la variation de flux de gaz, l'insertion de tranche, ou les techniques de placement.

Il y a également des impuretés qui peuvent être formées de ce qui est connu comme défaut vide octaédrique. Pendant l'oxydation, ces impuretés peuvent affecter le porte-oxyde, formant un chemin conducteur dans lui. En soi, une réduction de l'intégrité d'oxyde de porte peut se produire, y compris une panne diélectrique. Ces impuretés s'appellent élever-dans des défauts. Les vacances d'emploi sont un terrain communal élever-dans le défaut, apparaissant habituellement quand les températures atteignent 1070-1100°C. Les monticules deviennent une issue quand on observe l'imperfection sur le photomask, et propagent dans tous plusieurs des tranches de silicium. Bien qu'une solution puisse comporter des processus de non contact,

aussi un photogravure plus soigneux de gestion a mené à la réduction de ce défaut de secteur .
La ligne défauts est principalement dénotée dans les catégories suivantes :

- a) Glisser les lignes dues aux bords ébréchés de la tranche, dans une phase à hautes températures.
- b) Glisser les lignes des gradients thermiques au bord de tranche par l'intermédiaire du contact direct.
- c) Défauts de défaut d'empilement dans la couche épitaxiale.
- d) Ligne défauts d'oxydation thermique.
- e) Lignes de glissade du chauffage et de la pression inégaux.
- f) Éraflure.

8 Récapitulation :

En conclusion, un faisceau de défaut peut être attribué à une particule de poussière, ou à une éraflure sur le masque, perpétuant aux tranches multiples. Au-dessus d'une température de seuil, montre la formation des faisceaux de défaut en plus des défauts ponctuels sur le silicium.

Bibliographie du chapitre III

- [1] <http://www.goodfellow.com/csp/active/static/F/Silicium.html>
- [2] Benabdallah Nadia, Propriétés physiques des semi-conducteurs (Si monocristallin et Ge) et Simulation des cellule s solaires à base de Si et SiGe, thèse de magister, université Abou bekr belkaid tlemcen, 2006.
- [3] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Germanium>
- [4] http://www.univ-lemans.fr/enseignements/physique/02/cours_elec..2016\semicon.pdf.
- [5] I. Sari-Ali, B et all, Etude de la Jonction PN d'un semi-conducteur a l'équilibre thermodynamique, Journal of Electron Devices, Vol. 5, 2007, pp. 122-126.
- [6] <http://www.montefiore.ulg.ac.be/~vdh/supports-elen0075-1/notes-chap2.pdf>
- [7] I. Sari-Ali, B. Benyoucef, B. Chikh-Bled, Etude de la jonction pn d'un semi-conducteur a l'équilibre thermodynamique, journal of électron devices, vol. 5, 2007, pp. 122-126.,[Chapitre02.pdf](#)
- [8] Rahmani Nacer Eddini, Mise en œuvre d'un banc d'essai pour la caractérisation des pièges profonds dans un composant a semi-conducteur par la méthode de photo-voltage en circuit ouvert , Thèse magister, Université Biskra, 2004.
- [9] A Gupta, W. A. Porter, and J. W. Lathrop. (1974, June) "Defect Analysis and Yield Degradation of Integrated Circuits." *IEEE Journal of Solid-State Circuits*. [Online] 9(3). 536
- Jermell Powell, Defects and disorders in semiconductors , Electrical and computer Engineering.

Chapitre IV

Caractérisation des semi-conducteurs

- 1. Introduction.**
- 2. Caractérisation des semi-conducteurs.**
- 3. Caractérisation d'une photopile en régime transitoire. .**
 - 3.1. Techniques en régime statique.**
 - 3.2. Techniques en régime dynamique.**
 - 3.2.1. Le régimes dynamique fréquentiel .**
 - 3.2.2. Le régime dynamique transitoire. .**
- 4. Méthodes de caractérisation des cellules-solaires .**
 - 4.1. Mesure du déclin du courant de court-circuit .**
 - 4.2. Mesure de la décroissance de la tension de circuit-ouvert .**
- 5. Mesure de la décroissance de la photoconductivité .**
- 6. Spectroscopie transitoire des niveaux profonds (DLTS) .**
- 7. Récapitulation .**

1. Introduction :

Les méthodes de mesure en régime transitoire se caractérisent par la mesure d'une grandeur «physique variable avec le temps [1]. Les mesure en régime transitoire est utilisé dans tout les domaines, électrochimique, électrique, hydraulique ...).

Dans la suite on va voir quelque méthode de mesure en régime transitoire aux domaines physiques.

2. Caractérisation des semi-conducteurs :

Les propriétés électriques et photovoltaïques des jonctions n-p semi-conducteurs sont principalement régies par les porteurs minoritaires excédentaires. La détermination des grandeurs caractéristiques de ces porteurs comme la durée de vie ou la longueur de diffusion permet de contrôler la qualité du matériau utilisé.

3. Caractérisation d'une photopile en régime transitoire:

La durée de vie (τ), la longueur de diffusion (L) et les vitesses de recombinaison en surfaces (S_p , S_n) des porteurs minoritaires dans la base d'une photopile influent son rendement. Le développement des techniques et méthodes de détermination de ces paramètres s'est fait en même temps que de nouvelles approches théoriques.

Ces techniques peuvent être définies suivant le type d'excitation et de détection de la réponse de la photopile. Parmi ces techniques, on distingue deux groupes importants, techniques de mesure en régime statique et les techniques de mesure en régime dynamique [2].

3.1. Techniques en régime statique:

Elles conduisent à la mesure du photo courant I_{ph} par variation:

- de la longueur d'onde de la radiation excitatrice ($I_{ph}(\lambda)$ pare).
- du flux de photons de la radiation incidente $I_{ph}(\Phi)$.
- de la distance x séparant le lieu de génération des porteurs de charge par injection de faisceaux d'électrons, par voie optique ou pare électrode de collecte ($I_{ph}(x)$).
- de la photoconductivité.

3.2. Techniques en régime dynamique:

Nous distinguons deux types de régimes: les régimes dynamiques fréquentiels et les régimes dynamiques transitoires.

3.2.1. Le régime dynamique fréquentiel :

Ce régime est caractérisé par la modulation de fréquence et changement de phase. Lorsque l'excitation est un signal électrique périodique de pulsation ω , les réponses enregistrées sont:

- l'impédance $Z(\omega)$.
- la capacitance $C(\omega)$.
- la conductance $G(\omega)$.

Lorsque l'excitation est un signal optique périodique, les réponses de la photopile sont : la photo tension alternative $V_{ph}(\omega)$ et le photocourant $I_{ph}(\omega)$.

3.2.2. Le régime dynamique transitoire:

Ce régime est généralement observé à la suite d'une excitation périodique pulsée de la photopile. Ainsi nous distinguerons:

1) Les régimes transitoires de la mesure du courant de court-circuit, obtenues lorsque la photopile est reliée à une faible résistance de charge et soumise à une excitation qui peut être :

- Un signal photo électromagnétique .
- Un faisceau d'électrons localisés (EBIC : Electron Beam Induced Current characterisation).
- Un signal électrique pulsé (ESCCD : Electrical Short-Circuit Current Decay)
- Un signal optique pulsé et localisé (OBIC :Optical Beam Induced Current, MBIC: Monochromatic-light-beam-induced current, O-DLTS : *optical* Deep-level transient spectroscopy).
- Un signal constitué de rayons X.
- Une injection de particules alpha.

2) Les régimes transitoires de mesure de la tension en circuit ouvert, obtenus lorsque la photopile est reliée à une résistance de charge de valeur élevée et soumise à une excitation qui peut être:

- Une excitation électrique (FCVD : Forward Current induced open circuit Voltage Decay , E-DLTS : Electrical Deep-level transient spectroscopy).
- Une excitation optique pulsée (SPV Surface photovoltage).

3) Les régimes transitoires de mesure de photoconductivité obtenus suite à une excitation par ondes micrométriques de l'échantillon massif.

4) Les régimes transitoires de mesure d'impédance obtenus pour des structures déjà élaborées et mises en fonctionnement de court-circuit ou de circuit ouvert à la suite d'une excitation électrique ou optique.

5) Les régimes transitoires en photo luminescence observés dans le cas de matériaux semi-conducteurs photoémetteurs[2].

4. Méthodes de caractérisation des cellules-solaires :

Pour fabriquer les cellules solaires il faut prévoir leur rendement de conversion. Les techniques permettant de déterminer expérimentalement ces paramètres peuvent être classées en deux catégories:

- celles qui sont basées sur la réponse du dispositif fonctionnant en régime statique ou permanent (réponse spectrale, photo tension de surface, etc..).
- celles qui font intervenir des mesures de caractéristiques en régime dynamique ou transitoire (déclin du courant de court-circuit, de la tension de circuit-ouvert, de la photoconductivité, etc ..).

Dans ces types de mesures, la décroissance de la densité des porteurs minoritaires au cours du temps est analysée après que la jonction ait été soumise à une excitation pulsée lumineuse ou électrique, la cellule solaire étant dans une configuration de circuit-ouvert ou de court-circuit [3].

4.1. Mesure du déclin du courant de court-circuit :

La mesure de la décroissance du courant de court-circuit est une technique très utilisée pour déterminer la durée de vie en volume des porteurs minoritaires excédentaires et leur vitesse de recombinaison de surface (Figure 4.1). De nombreux travaux de recherches théoriques et expérimentaux basés sur des hypothèses de faible injection de porteurs dans le dispositif et des approximations permettant des interprétations correctes des résultats expérimentaux ont été menées [3].

De manière générale, la cellule à étudier est initialement excitée électriquement ou optiquement jusqu'à ce qu'un régime permanent soit atteint. Ensuite, le signal excitateur est coupé et on étudie l'évolution au cours du temps du courant traversant la jonction de la cellule fonctionnant en court-circuit. Divers types d'excitation sont utilisés pour induire les courants de déclin dans les cellules à étudier, par exemple:

- l'excitation avec la lumière pulsée d'un laser.
- l'excitation avec un flux lumineux ordinaire à coupure abrupte.
- l'excitation électrique à coupure abrupte.
- l'excitation électrique à coupure abrupte superposée a un flux lumineux constant.

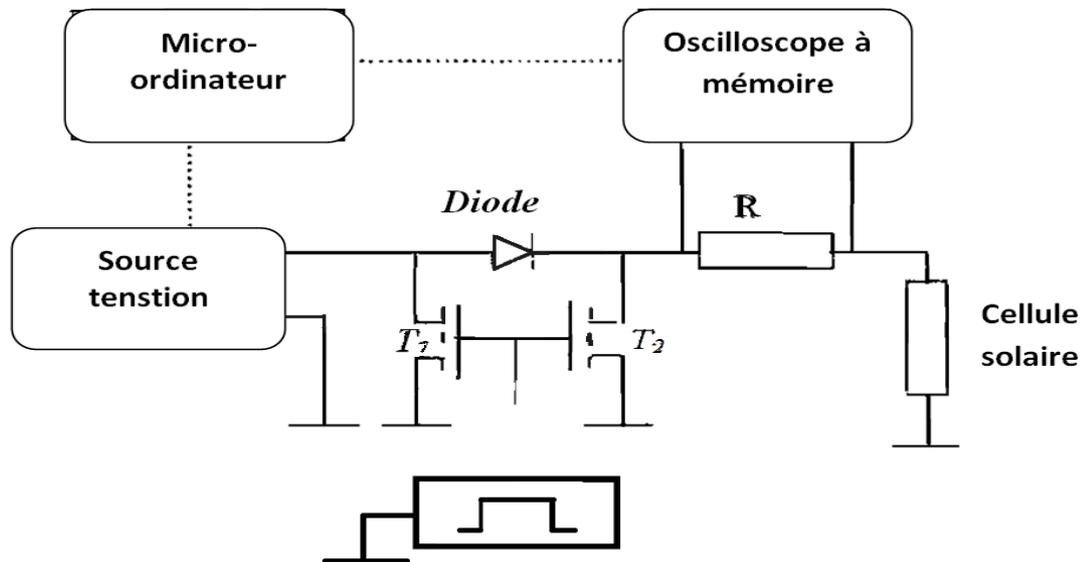


Figure 4.1 : Schéma du montage expérimental pour la mesure du déclin du courant de court-circuit induit par une polarisation électrique

4.2. Mesure de la décroissance de la tension de circuit-ouvert :

C'est une méthode qui est très amplement étudiée et utilisée pour déterminer la durée de vie des porteurs minoritaires excédentaires dans les photopiles solaires (Figure 4.2). Elle est très simple, non-destructive et permet d'observer et d'analyser la décroissance de la tension de circuit-ouvert aux bornes d'une cellule solaire initialement excitée par un flux lumineux ou une tension électrique et qui est brusquement mise en position de circuit-ouvert.

Bien qu'elle soit plus facilement réalisable expérimentalement que celle du courant de court-circuit, cette méthode est plus subjective et moins fiable à cause des difficultés liées à la délimitation de la partie linéaire du déclin. En plus l'interprétation des valeurs mesurées est compliquée par les effets de la capacité de la jonction, les recombinaisons à la jonction, les résistances shunt, l'épaisseur de la cellule, les propriétés de l'émetteur et les conditions de haute injection. Il a été montré que la capacité de la jonction tend à ralentir le déclin de la tension de circuit-ouvert, alors que les recombinaisons à la jonction sont semblables aux effets

d'une résistance shunt et accélèrent la décroissance de cette tension. Pour rendre cette technique plus fiable et améliorer ainsi la précision des mesures, divers montage sont été proposés et réalisés comme celui de la figure suivante [3].

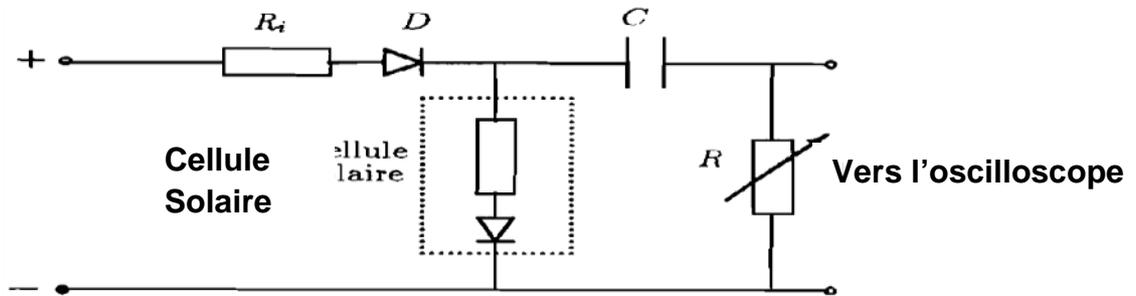


Figure 4.2 : Schéma du montage expérimental pour la mesure de la durée de vie des porteurs minoritaires à partir du déclin de la tension de circuit-ouvert induite par une polarisation électrique R_i est la résistance du circuit d'entrée et D la diode interruptrice

5. Mesure de la décroissance de la photoconductivité :

La mesure de la décroissance de la photoconductivité dans un matériau semi-conducteur à été largement utilisée tout au début des études de caractérisation du silicium et du germanium.

Aujourd'hui, cette méthode est encore très utilisée pour la détermination de la durée de vie des porteurs avec diverses variantes dans la technique expérimentale.

Le principe de la méthode est basé sur la mesure de la décroissance, dans le temps, de la densité des porteurs de charge minoritaires excédentaires générés dans un dispositif semi-conducteur par l'éclairement pulsé d'une source de lumière. Le contrôle du déclin de la conductivité correspondante sous faible injection permet de mesurer la durée de vie des porteurs minoritaires dans un matériau semi-conducteur.

La partie supérieure de l'échantillon est soumise à des pulses lumineux produits par une diode laser qui génèrent des porteurs minoritaires augmentant ainsi la conductivité du matériau. A la fin de chaque pulse les porteurs minoritaires excédentaires se recombinent dans le volume et aux surfaces limitant l'échantillon, faisant ainsi décroître la conductance à partir de sa valeur initiale. Une source de micro-ondes envoie sur la partie inférieure de l'échantillon des radiations par l'intermédiaire d'un guide d'onde. Les ondes réfléchies par la substance ont ensuite renvoyées dans un détecteur via un circulateur [3].

Le schéma de la Figure 4.3 représente un dispositif expérimental utilisé pour la mesure de la photoconductivité en régime transitoire.

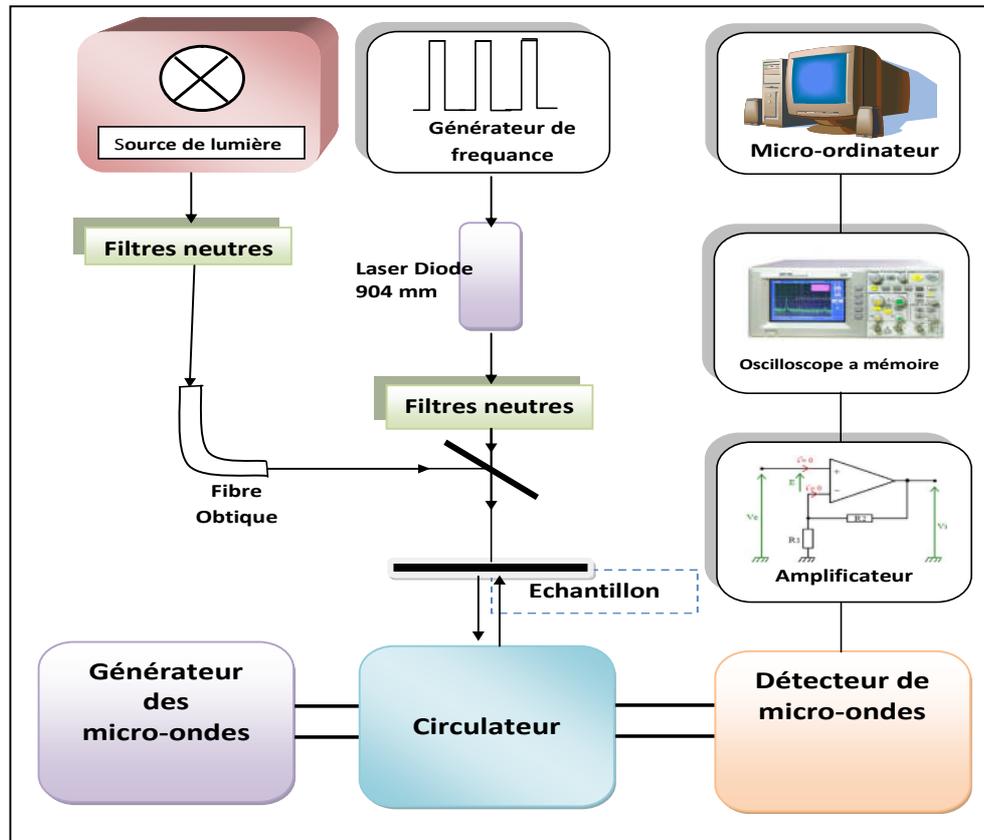


Figure 4.3 Schéma du montage expérimental pour la mesure de la photoconductivité en régime transitoire.

6. Spectroscopie transitoire des niveaux profonds (DLTS) :

La spectroscopie transitoire des niveaux profonds (DLTS) (Deep Level Transient Spectroscopy), est une technique reposant sur la mesure des taux d'émission et de capture des porteurs de charge par des défauts à une certaine température dans une jonction Schottky où p^+n . On dit d'un niveau électronique qu'il est profond lorsque celui-ci se trouve entre le milieu de la bande interdite et le niveau de Fermi (E_F). La probabilité (f) d'occupation de ce niveau profond d'énergie E_t est donnée par la statistique de Fermi-Dirac [4].

$$f = \frac{1}{1 + \exp[(E_t - E_F)/kT]} \quad (3.1)$$

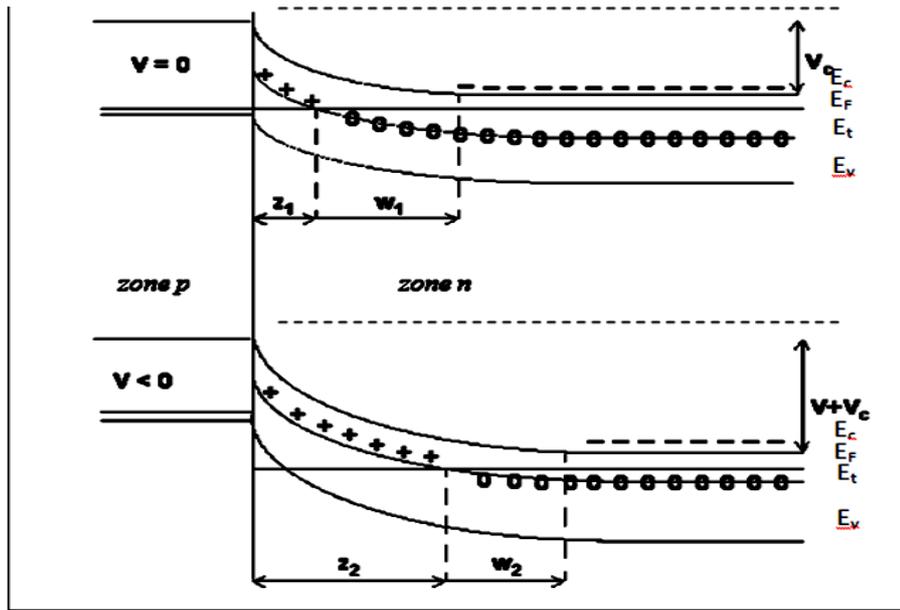


Figure 4.5 : Schéma des bandes d'énergie d'une jonction p-n avec un niveau donneur.

La probabilité d'occupation de ce niveau profond varie en fonction de la position du niveau de Fermi. Lorsqu'un potentiel inverse est appliqué à une jonction Schottky (Figure 4.4), la courbure des bandes dans le semi-conducteur est augmentée, ce qui a pour effet de faire varier la zone de charge d'espace et d'ioniser les niveaux profonds.

La zone de charge d'espace (W) ainsi que l'ionisation des donneurs profonds (z) dépend du voltage inverse appliqué à la jonction. La présence de la zone de charge à la jonction engendre une certaine capacité donnée par :

$$C = \frac{dQ}{dV} \tag{3.2}$$

Q étant la charge totale;

$$Q = eA \left[\int_0^w N_a(x) dx + \int_0^z N_t(x) dx \right] \tag{3.3}$$

où $N_a(x)$ est la densité de charge due aux donneurs superficiels dans la zone de charge d'espace, $N_t(x)$ la densité de donneurs profonds ionisés, e la charge de l'électron et A la surface de la jonction. Les niveaux profonds réagissent d'une manière beaucoup plus lente aux variations de potentiel que les niveaux superficiels, ce qui fait que si la mesure est effectuée à une fréquence suffisamment élevée (quelques dizaines de Hz), les niveaux profonds ne peuvent changer leur état de charge et l'expression pour la capacitance devient simplement:

$$C = eAN_a(W) \frac{dW}{dV} \quad (3.4)$$

Où la variation de largeur de la zone de charge (W) en fonction de la variation de potentiel se trouve en résolvant l'équation de Poisson:

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{eN(x)}{\epsilon} \quad (3.5)$$

en considérant la densité de charge N(x) suivante:

$$\begin{aligned} N_a(x) + N_t(x) & \quad 0 < x < z \\ N_a(x) & \quad z < x < W \\ 0 & \quad \text{ailleurs} \end{aligned} \quad (3.6)$$

Si la variation de tension est assez rapide, les niveaux profonds ne peuvent changer leur état de charge et on a simplement:

$$\frac{dW}{dV} = \frac{\epsilon}{eWN_a(W)} \quad (3.7)$$

ce qui donne en remplaçant dans l'équation (3.9) :

$$C = \frac{\epsilon A}{W} \quad (3.8)$$

Cependant, à tension constante les états profonds ont le temps de s'ioniser ce qui a pour effet de faire varier la largeur de la zone de charge:

$$dV = N_t(z)zdz - N_a(W)WdW = 0 \quad (3.9)$$

Ce qui s'écrit en terme de la capacitance comme:

$$\frac{dC}{C} = \frac{-N_t(z')z'dz'}{N_a(W)W^2} \quad (3.10)$$

En supposant que dC/C et que la distribution de défauts varie peu dans les régions considérés, la relation suivante qui relie la distribution de niveaux profonds à une quantité mesurable, la capacitance est obtenue en intégrant l'équation (3.10) de z₁ à z₂:

$$N_t(z) = -2N_a(W)W^2 \frac{\Delta C}{C} [z_2^2 - z_1^2]^{-1} \quad (3.11).$$

La dépendance temporelle du signal capacitif dépend de la probabilité d'émission électronique des niveaux profonds par unité de temps:

$$C(t) = C_0 + \Delta C(0) \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right] \tag{3.12}$$

τ est proportionnel à $\exp(-E_a / kT)$; où E_a est l'énergie d'activation du piège.

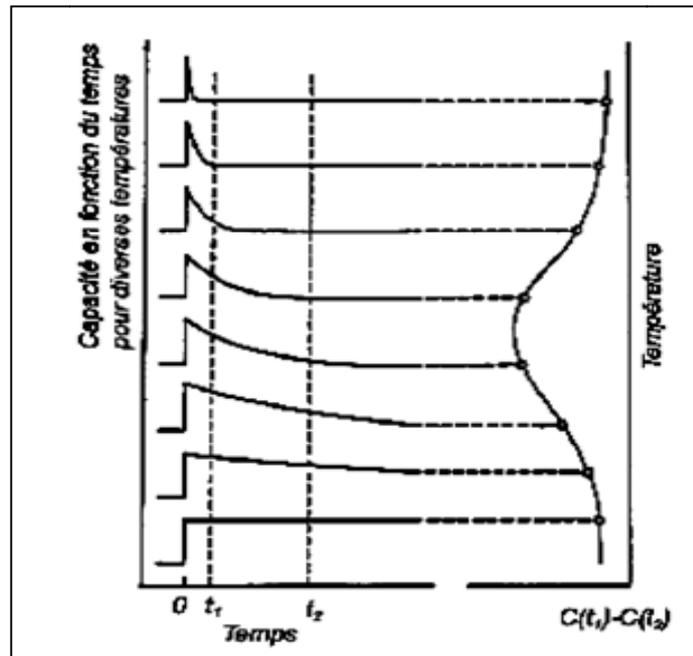


Figure 4.6 : Illustration schématique de la construction d'un spectre DLTS dans la technique de fenêtre de temps [5].

La technique de fenêtre de temps est la technique la plus usité de mesure DLTS; elle consiste à prendre quelques points seulement (deux suffisent généralement) de $C(t)$ lors d'un balayage en température pour construire le spectre DLTS (Figure 4.7).

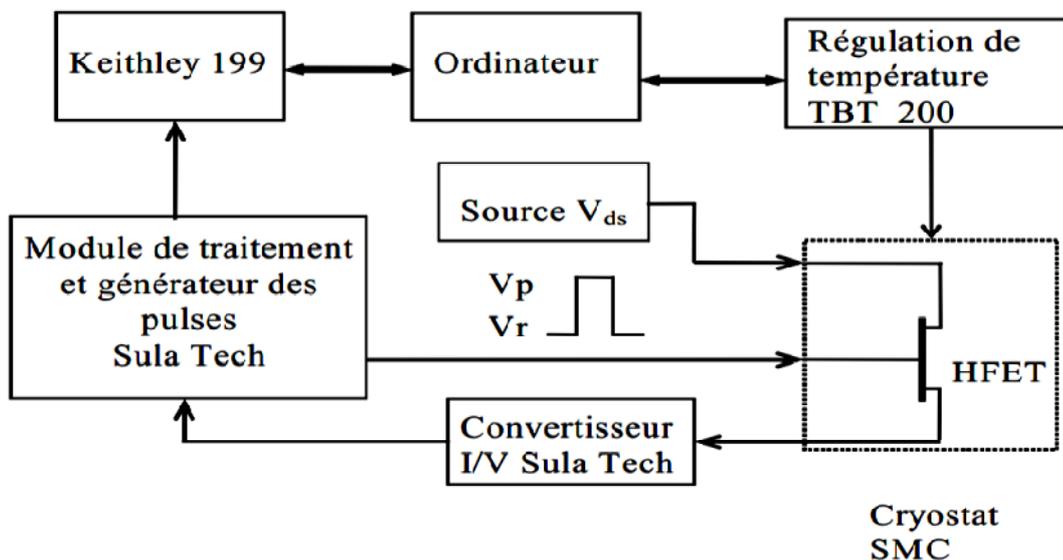


Figure 4.7 : Schéma bloc de système de mesure DLTS[6]

7. Récapitulation :

Dans ce chapitre, nous avons présenté différentes méthodes de mesure en régime transitoire. La mesure en régime transitoire est une étape très essentielle pour compléter les mesures en régime permanent. Elles sont généralement utilisées pour connaître la qualité d'un matériau ou un dispositif

Bibliographique du chapitre IV:

-
- [1] Alain Degiovanni. (1994). Conductivite et diffusivite thermique des solides : methodes de mesure en regime transitoire. Techniques de l'ingenieur. En ligne <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/mesures-analyses-th1/mesure-des-grandeurs-thermophysiques-42544210/conductivite-et-diffusivite-thermique-des-solides-r2850/methodes-de-mesure-en-regime-transitoire-r2850niv10007.html>
- [2] Mamadou Lamine, Phénomènes de recombinaison dans La Photopile En régimes statique et transitoire, Thèse Doctorat, Université cheikh Anta diop de Dakar, 1995, P2.
- [3] Bassirou Ba, Contribution à l'étude des phénomènes de recombinaison dans une cellule solaire au silicium polycristallin par un modèle a trois dimensions, Université cheikh Anta Diop de Dakar. Thèse doctorat.1998, pp 5-6.
- [4] Rahmani Nacer Eddini, Mise en œuvre d'un banc d'essai pour la caractérisation des pièges profonds dans un composant a semi-conducteur par la méthode de photo-voltage en circuit ouvert , Thèse magister, Université Biskra, 2004.
- [5] CREDLY Rejeb, contribution à la caractérisation des effets d'une irradiation aux électrons sur les propriétés optiques et de transport électrique du GaAs, maître ès sciences, Université Sherbrooke, Canada, 1993.
- [6] Gassoumi Malek, Etude des défauts électriquement actifs dans les composants hyperfréquences de puissance dans les filières SiC et GaN, Thèse INSA de Lyon ; 2006.

Chapitre V

Réalisation pratique

- 1. Introduction.**
- 2. Matériel utilisé.**
- 3. Résultat.**
- 4. Excitation électrique.**
 - 4.1. Mesure de courant de Photodiode Bpw21r Excite Par Impulsion Positif .**
 - 4.2. Mesure de courant de Photodiode Bpw21r Excité Par Impulsion négatif .**
 - 4.3. Mesure la capacité de Photodiode .**
 - 4.3.1. Résultat de la mesure de Bonc .**
- 5. Excitation optique (par impulsion laser) .**
- 6. 7. Récapitulation.**

1. Introduction :

La caractérisation d'un composant à semi-conducteur est une étape importante avant toute phase de conception de système. Cette étape permet de déterminer le comportement des ces composants des conditions proches du fonctionnement réel.

Dans le travail de ce mémoire, le but est la conception des bancs de mesures pour l'acquisition d'un signal transitoire avec les moyens disponibles. L'importance de l'acquisition des signaux transitoires a été discutée dans le chapitre 2. Il faut mentionner que l'acquisition du signal transitoire (présent dans un grand nombre de phénomènes comme discuté dans le chapitre 1) est une étape obligatoire dans plusieurs caractérisations des matériaux. Donc l'importance n'est pas le signal lui-même mais son post utilisation (traitement) pour l'acquisition des paramètres voulues Par exemple dans la méthode de caractérisation des défauts (DLTS : voir chapitre 3), l'atténuation de la réponse transitoire d'une structure diode à une impulsion électrique ou lumineuse, doit être traitée afin d'extraire les propriétés des défauts.

La réponse de deux dispositifs (la photodiode BPW21R Annexe A et la diode Schottky NU777 Annexe B) à des impulsions électriques et/ou optiques a été utiliser comme test des bancs réalisés.

2 Réalisation pratique :

La réalisation pratique est composée de trois parties :

1- un banc d'acquisition du courant transitoire en obscurité à différentes températures. Un schéma bloc de ce banc est montré dans la figure 5.12.

2- un banc d'acquisition de la capacité transitoire en obscurité à différentes températures. Un schéma bloc de ce banc est montré dans la figure 5.21.

3- un système d'acquisition du signale transitoire pour l'étude du déclin du photo-voltage en circuit ouvert Un schéma bloc de ce banc est montré dans la figure 5.32.

3. Matériel utilisé :

Pour la réalisation de ces bancs, plusieurs appareils ont été utilisés dont les caractéristiques sont présentées dans les sous sections suivantes.

3.1 Oscilloscope TDS 3052 :

L'oscilloscope est de type TDS 3052 de Tektronix. Il est caractérisé par un mémoire numérique, ayant 2 canaux et une largeur de bande de 500 MHz. Il fournit une combinaison imbattable d'exécution supérieure, de facilité d'utilisation importante et d'accessibilité dans un paquet ultra léger et portable. Une vue de cet appareil est présentée dans la figure 4.4. Ces caractéristiques générales sont résumées dans les points suivants :

- Bande passante de 500 MHz.
- Taux d'échantillonnage de 5 G-échantillons/s et longueur d'enregistrement de 2500 points pour chaque voie.
- Curseurs avec indicateurs
- Cinq mesures automatisées.
- Affichage à cristaux liquides à haute résolution et fort contraste avec compensation de température et éclairage arrière remplaçable.
- Stockage de configuration et de signaux
- Fonction automatique pour configuration rapide
- Moyennage de signaux et détection de crêtes
- Oscilloscope numérique en temps réel
- Base de temps double
- Fonction de déclenchement vidéo
- Ports de communication RS-232, GPIB
- Affichage à persistance variable
- Interface utilisateur disponible en dix langues sélectionnables

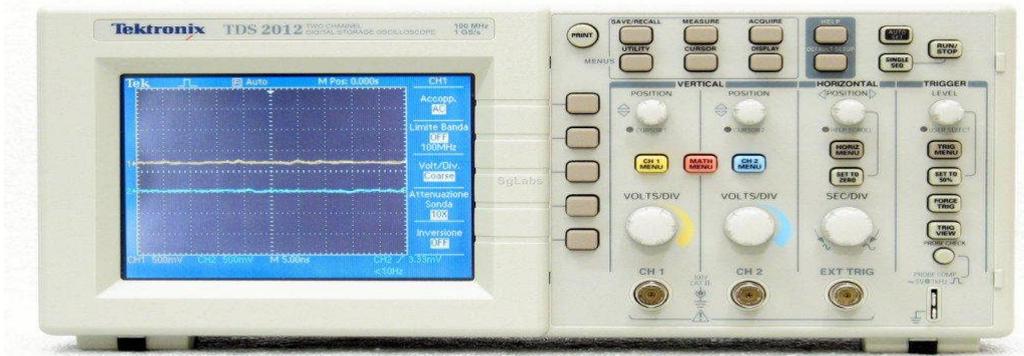


Figure 5.1 : La face avant de l'oscilloscope tectronix TDS 3052.

3.2. Le cryostat :

Comme nous l'avons précédemment dit, tous nos tests se font en fonction de la température ; c'est pour cela que notre composant est plongé dans un dispositif appelé cryostat (Instrument d'Oxford modèle DN704), ce dispositif fonctionne avec l'Azote liquide, il dispose d'un régulateur numérique de température, nous permettant de travailler avec une plage de température allant de 77 à 500K.

Cet instrument, nous offre entre autre un blindage magnétique thermique et optique pour notre composant.

Dans notre expérimentation, nous allons travailler avec une plage de température de 300 à 450K

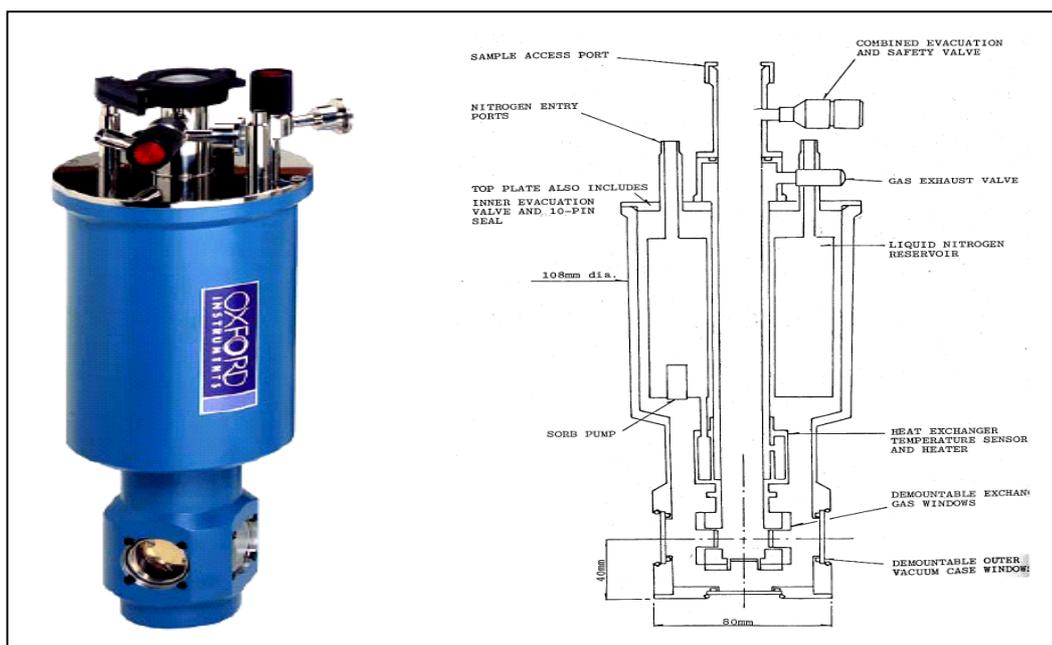


Figure 5.2: Apparence et Schéma interne du cryostat

3.3. Contrôleur De La Température ITC 502 S :

Le ITC502 est un contrôleur général de la température du laboratoire de but, avec un certain nombre de caractéristiques spécifiquement destinés à être utilisés dans des applications cryogéniques. Dans son application la plus courante de la ITC502 sera utilisé pour contrôler la température de certains «échantillon», les prospérités de qui sont étudiés en fonction de la température. L'échantillon aura un capteur surveillant la température, L'ensemble sera normalement entouré par une certaine forme d'isolation thermique pour isoler l'échantillon de son environnement.



Figure 5.3 : Contrôleur De La Température ITC 502 S

3.4 Générateur de fonctions 15 MHz, mode arbitraire Hameg HM8131-2:

- - Gamme de fréquence de 100 μ Hz à 15MHz
- - Tension de sortie 20mVpp- 20Vpp(circuit ouvert)
- - Synthèse numérique directe (DDS)
- - Entrée pour base de temps externe (10MHz)
- - Signal sinusoïdal, carré, triangle, dent de scie, bruit blanc etrose, signaux arbitraires
- - Générateur de signaux arbitraires 40MSa/s, 12 bits
- - Modulation : AM, FSK, PSK, Phase
- - Possibilité de brancher jusqu'à 3 générateurs en fonctionnement maître-esclave
- - Logiciel pour la commande à distance et la création de signaux arbitraires
- - Carte mémoire SRAM pour la sauvegarde des données (option H0831)
- - Interface RS-232, en option : USB, IEEE-488

Entrées :

- Gate/Déclenchement Impédance :5 k Ω || 100 pF (protégée jusqu'à 30V)
- Modulation d'amplitude Impédance :1 k Ω (protégée jusqu'à \pm 30V)
- Référence externe Fréquence :10 MHz \pm 2 ppm
- Tension d'entrée :1 V_{eff}

Sorties :

- Sortie de signal :Prise BNC; protection contre les courts-circuits

Tension externe \pm 15V max. jusqu'à 20 sec.

- Impédance :50 Ω ?
- Tension de sortie :
- calibre 1 : 2,1 - 20V_{cc} (circuit ouvert)
- calibre 2 : 0,21 - 2,0V_{cc} (circuit ouvert)
- calibre 3 : 20 - 200mV_{cc} (circuit ouvert)

Divers

- Option carte mémoire :format PCMCIA II jusqu'à 1Mo possibilité de sauvegarder jusqu'à 16 signaux arbitraires
- Mémoire :10 pour les paramètres1 pour la sauvegarde des signaux arbitraires
- Interface:RS-232 (en série), IEEE-488, USB (en option)
- Protection :Classe I (EN 61010-1)
- Consommation :env. 30VA
- Température de fonctionnement :+10°C... +40°C Humidité :10% - 90% sans condensation
- Dimensions (L x H x P) :285 x 75 x 365mm
- Poids :env. 5kg



Figure 5.4 : Générateur de fonctions 15 MHz, HAMEG HM8131-2

3.5. BOOTON 7200 Capacitance Mètre :

Le modèle 7200 offre une caractérisation rapide et précise des composants actifs et passifs à 1 MHz. Les temps de montée <50 ms des sorties analogiques rend cet appareil idéal pour les mesures de DLTS .

Caractéristiques rapides

- Ultra mesures stables et reproductibles .
- Programmable, source interne 60V DC .
- résolution en picofarad = 0,01.
- Sorties analogiques haute vitesse, haute résolution .
- Niveaux de test sélectionnables .
- GPIB et HPGL.



Figure 5.5 : BOOTON 7200 Capacitance Mètre

3.6. Générateur d'impulsion laser VSL-337i:

VSL-337i Une appareil que génère des impulsions lumineuse en laser avec la longueur d'onde égal a 337.



Figure 5.6: VSL-337i_OEM_Nitrogen_Laser_99alone_LaserInnovations

3.7. Adaptateur IEEE-USB :

Pour la communication et la commande et transfère les données entre l'ordinateur et l'instrument. Le contrôleur compact NI GPIB-USB-HS transforme n'importe quel ordinateur doté d'un port USB en contrôleur IEEE 488.2 Plug-and-Play



Figure 5.7 :L' Adaptateur IEEE-USB

3.8. OpenChoice Desktop :

Pour l'acquisition des données à un ordinateur Microsoft Windows à partir de l'oscilloscope, l'application OpenChoice Desktop nous permet de capturer des images de l'écran d'oscilloscope, des données de la forme de signal mesuré, et aussi les paramètres de mesure.

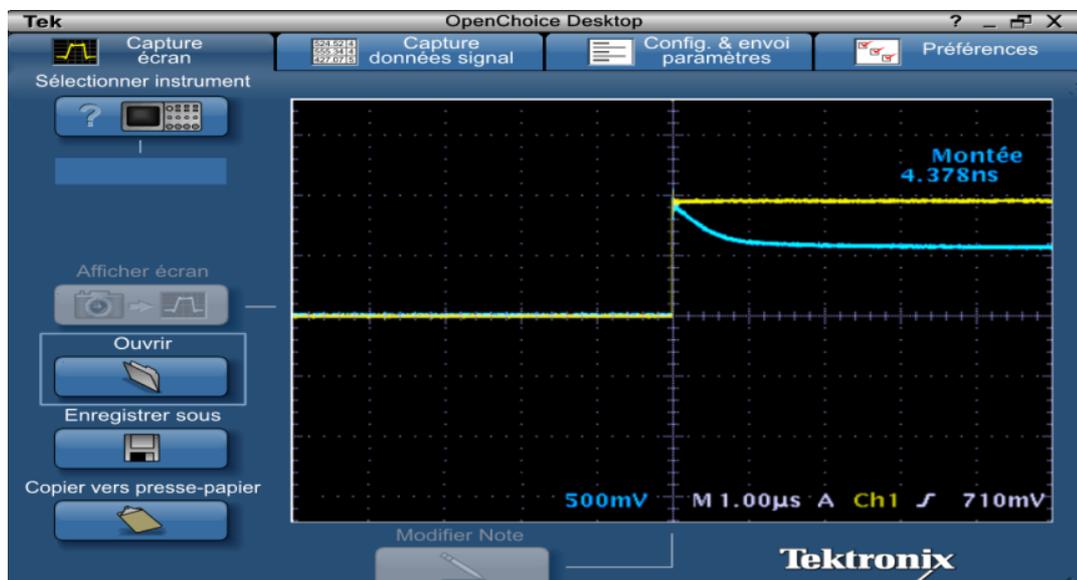


Figure 5.8 : Interface de logiciel OpenChoice Desktop.

4. Résultat :

Pour capturé des signaux transitoire, on va excité le dispositif a semi-conducteurs par deux type d'excitation : électrique et optique.

5. Excitation électrique :

La méthode est basée sur la relation existant entre le courant passant à travers le semi-conducteur et la tension de la résistance installée en série avec le composent.

Pour une température donnée, nous appliquons une impulsion au semi-conducteur et mesurons l'intensité résultante du courant dans le circuit. Nous avons employé un cryostat car le comportement de la jonction est fortement influencé par la température. Le GBF applique un signale carré de 0V à 1V comme représenté dans la figure 5.10.

L'oscilloscope que interfacé à un ordinateur, mesure le courant transitoire avec l'option **Single acquisition**, a laide de logiciel Open chois l'acquisition des donnée se fait.

La relation entre le courant et la différence de potentiel est :

$\ln(I) = e V / (n k T) + \ln(I_s)$ où I_s est le courant de saturation,

T , la température en K,

k , la constante de Boltzmann ($k=1.3806 \cdot 10^{-23}$ J / K),

e , la charge de l'électron ($e=1.60219 \cdot 10^{-19}$ C)

et n est le facteur d'idéalité (généralement compris entre 1 et 2).

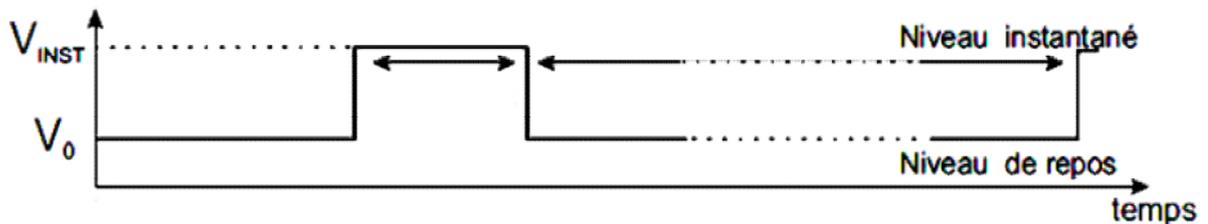


Figure 5.10 : Le signale de sortie de la GBF excité le circuit.

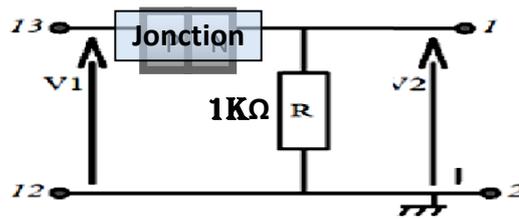


Figure 5.11 : le montage de mesure le courant

5.1. Mesure de courant de Photodiode Bpw21r Excite Par Impulsion Positif :

5.1.1. Montage expérimentale :

Le montage expérimental est donné dans le Figure 5.12. Un signal carré généré par le GBF d’amplitude de 1v et duré de 100µs. Un oscilloscope numérique a mémoire capturé le signale transitoire, et a laide de logiciel Openchooice, l’acquisition se fais par le transfère des données sauvegardé dans le mémoire de l’oscilloscope vère l’ordinateur et enregistré ses donnée sou forme d’un document (*.txt) ou (*.cvs).

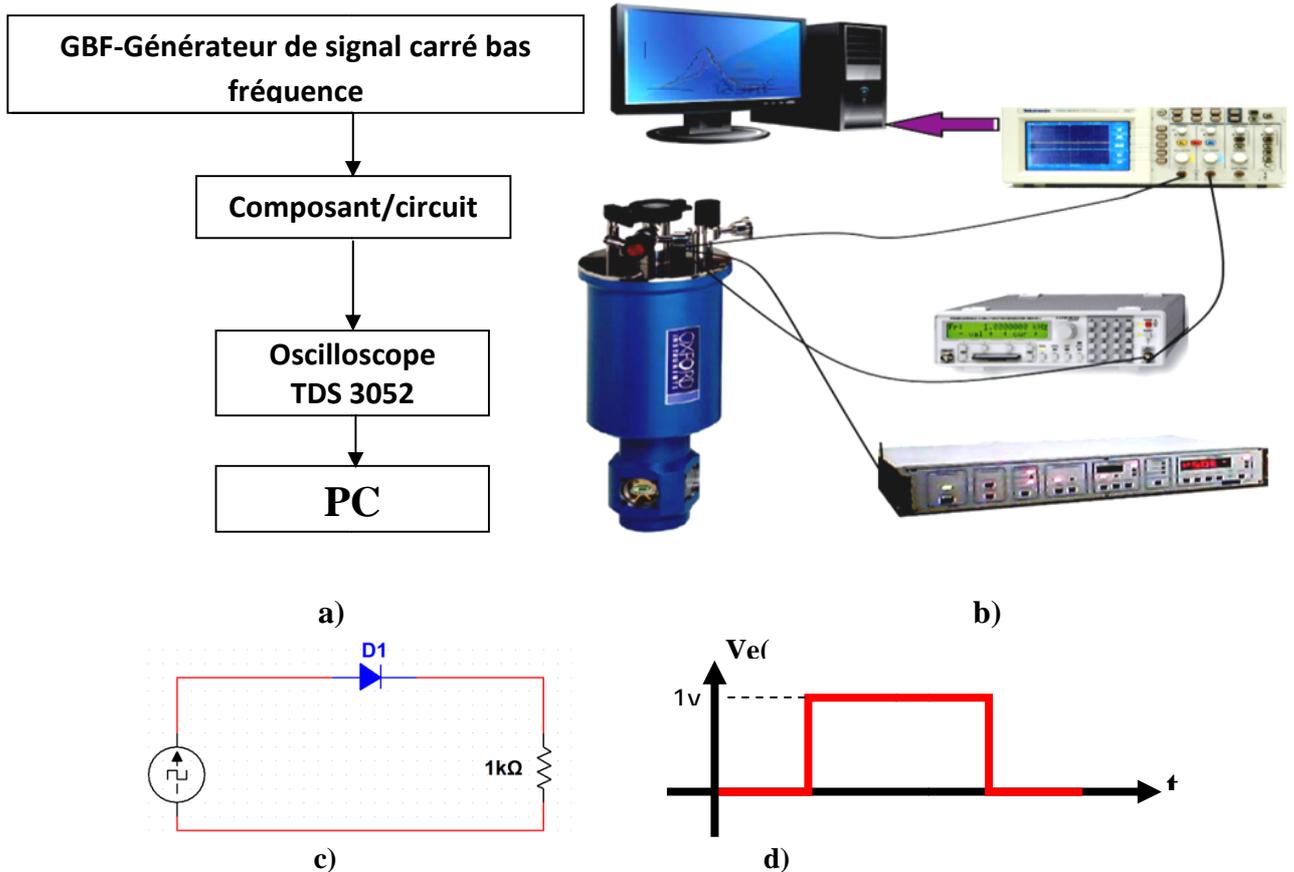


Figure 5.12 : a- Schéma synoptique pour la mesure de courant transitoire.
 b- montage de mesure le courant transitoire.
 c- circuit utilisé.
 d- signal appliqué au circuit .

5.1.2 Résultat de banc de mesure :

Les donnée acquérons de signal de courant se représenté sure la figure 5.13.

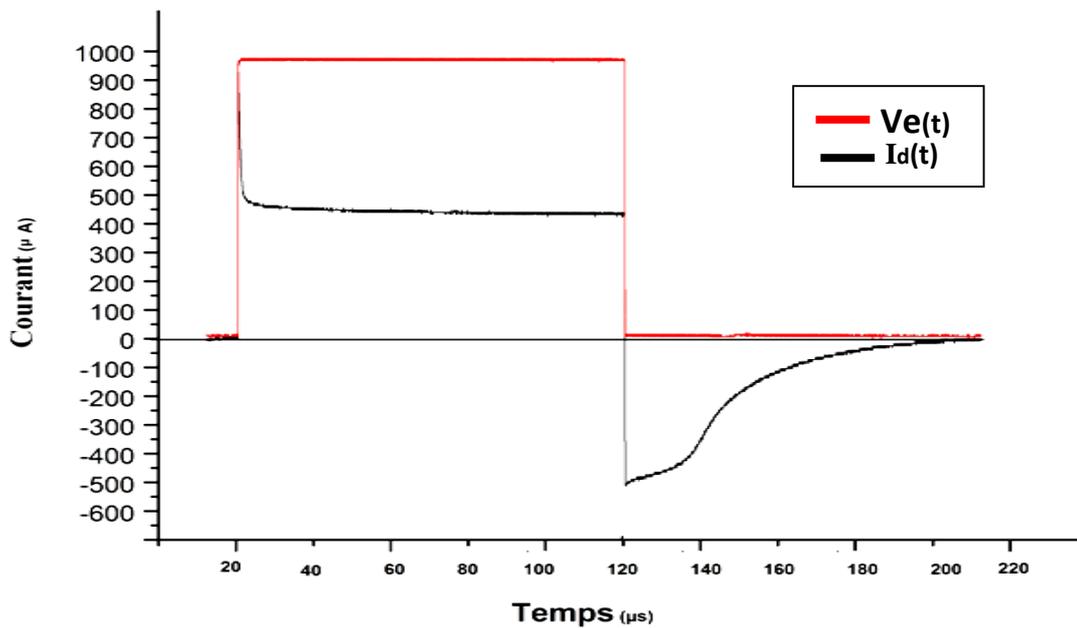


Figure 5.13: Représentation du courant de la photodiode PBW 21R301 en régime de commutation. $T=30^{\circ}\text{C}$, et numérisés à l'aide de l'oscilloscope TDS3052.

- A l'instant $t_0=20\mu\text{s}$ la diode est mise en conduction par un échelon de la tension de commande $V_e(t)$, Pour $t < t_0$, la diode était bloquée et se comporte comme un condensateur de capacité C_T .

Au moment où la valeur de la tension $V_e(t)$ passe de 0v à 1v la tension au borne de la jonction ne pouvant subir de discontinuité on observe un pic de courant, il peut être important selon la valeur de R , Tant que la tension aux bornes de la diode reste négative, la capacité de la jonction C_j intervient alors que la capacité dynamique C_d n'existe pas encore. Le pic de courant dans le circuit décroît avec une constante de temps $\tau = R C_j$.

Dès que la tension aux bornes de la diode devient positive, la capacité de la jonction C_j intervient de moins en moins alors que la capacité dynamique C_d se charge avec une constante de temps θ_n .

- A l'instant $t_1=120\mu\text{s}$ Le courant s'inverse brusquement. Il possède une valeur importante uniquement limitée par la valeur de la résistance R .

Se compose cette variation du courant de deux étapes :

- Tant que la densité des porteurs négatifs à la sortie de la ZCE reste supérieure à la densité n_p , la tension aux bornes de la jonction reste positive et faible et le courant sa change faiblement.
- La densité des porteurs négatifs à la sortie de la ZCE est égale à la densité n_p , la tension aux bornes de la jonction $v_d(t) = 0$, Le courant revient à zéro avec une pente, qui dépend du type de diode utilisée.

5.1.3 Effet de température sur le courant la diode :

La température modifie de façon notable les caractéristiques suivant deux processus distincts:

- a) L'agitation thermique du réseau cristallin diminue la mobilité des porteurs. C'est le phénomène prépondérant dans les conducteurs: leur résistance augmente avec la température.
- b) L'agitation thermique augmente l'énergie des électrons, ce qui leur permet de passer de la bande de valence à la bande de conduction, ou plus facilement sur un niveau accepteur d'impureté. C'est le phénomène le plus important dans un semi-conducteur : lorsque la température augmente, la concentration des porteurs augmente et la résistance diminue. Ces phénomènes sont utilisés dans les applications thermométriques telles que les sondes de température à base de diode semiconductrice à l'arséniure de gallium ou les thermistances.

Peur voire expérimentalement l'effet de température sure le courant dans notre échantillon (Photodiode BPW21R) , on a changé la température ambient de photodiode et on a acquérons les signaux et les résultat représenté sure la figure 5.14 et figure 5.15 .

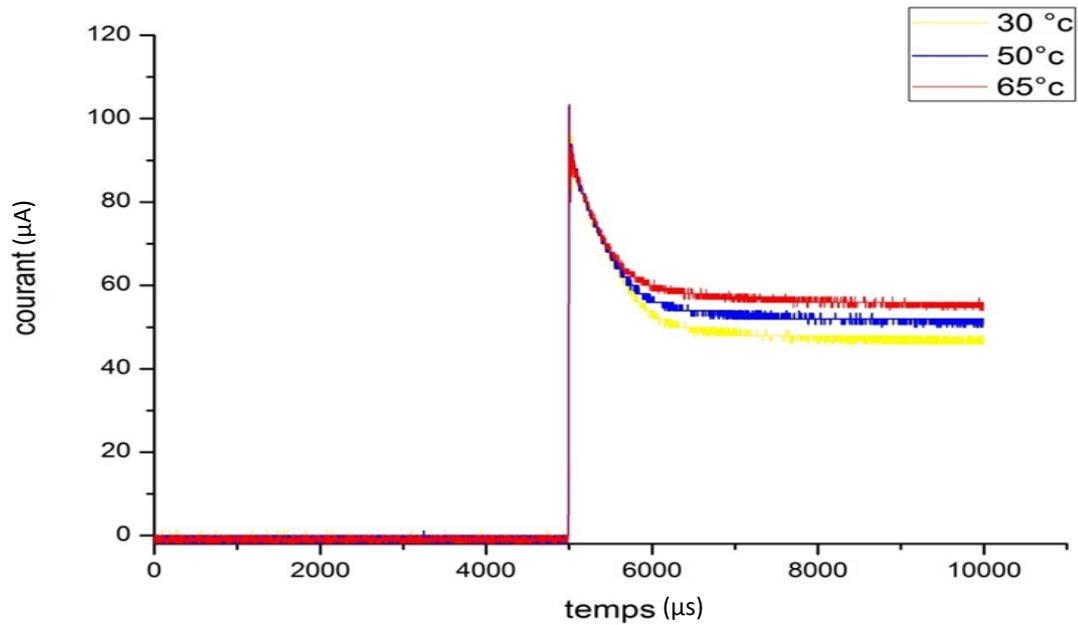


Figure 5.14: Le courant de photodiode PBW 21R301 a différentes températures pour un front de montée (0 V ; 1 V).

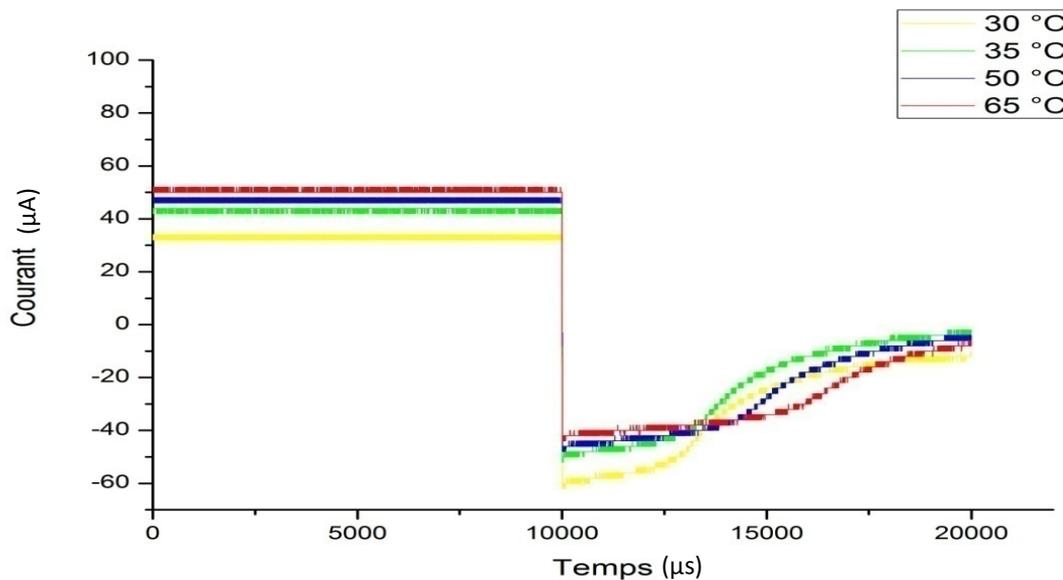


Figure 5.15: Le courant de photodiode PBW 21R301 a différentes températures pour un front descendant (1 V ; 0 V).

La courbe ci-dessus montre une influence non négligeable de la température sur le courant ; nous constatons que le courant augmente avec la température.

5.2 Mesure de courant de photodiode Bpw21r excité par impulsion négatif :

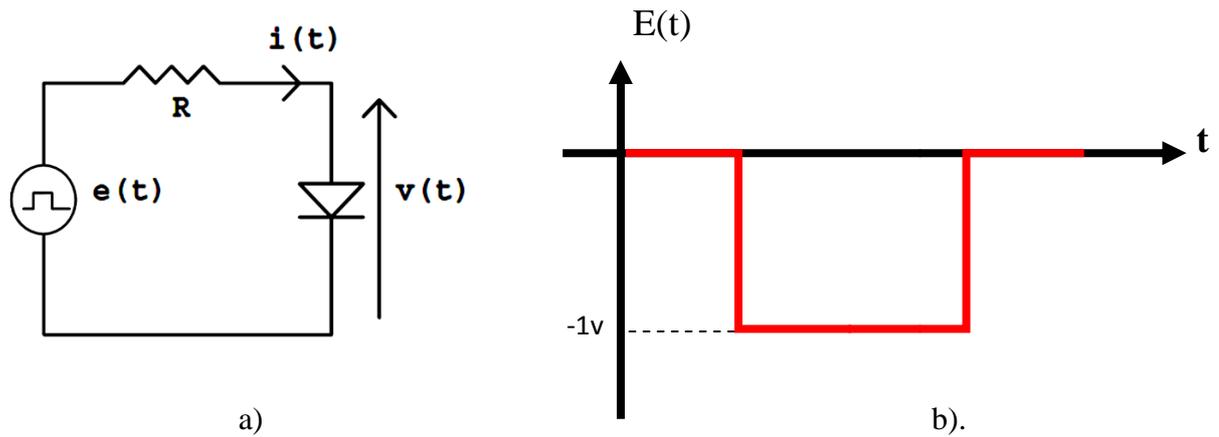


Figure 5.16: a) Circuit utilisé pour la commutation b) Le signal appliqué au circuit.

5.2.1. Montage expérimentale :

Avec Le même montage Comme dans le cas précédent, mais le signal d'excitation est inversé (négatif) -1V a 0V.

5.2.2 Résultat de mesure :

Le signale numérisé a laide de oscilloscope numérique se représenté sure la figure 5.11.

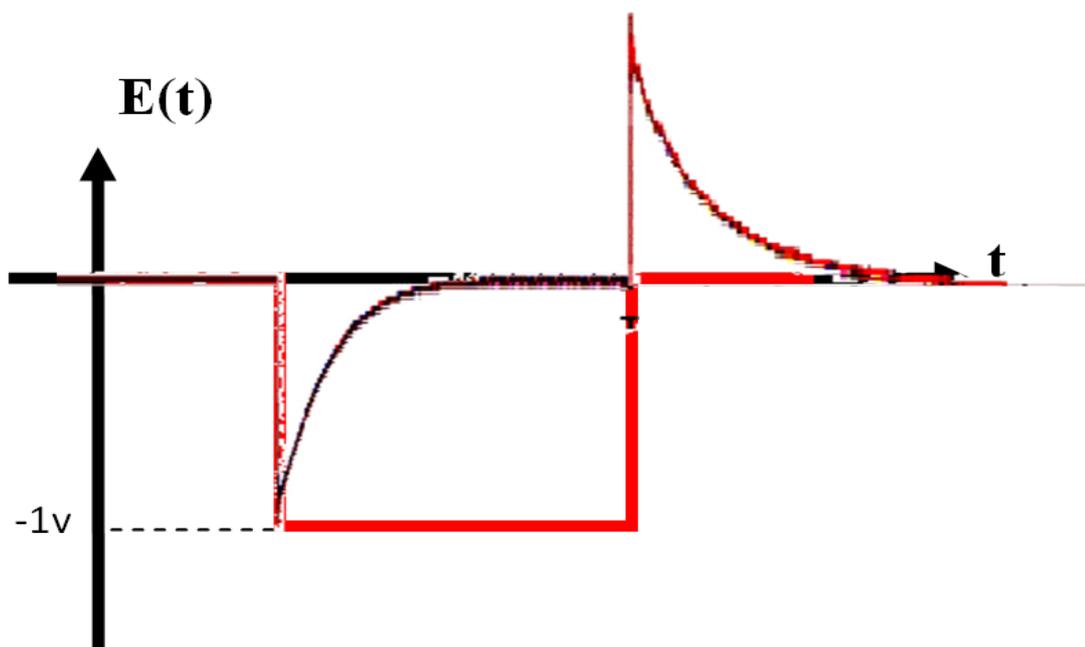


Figure 5.17: L'allure de courant de réponse de circuit a une impulsion négative.

5.2.3. Effet de température sur le courant :

On varierions la température de 30 a 65°C et on acquisition chaque foie le signal de curant.

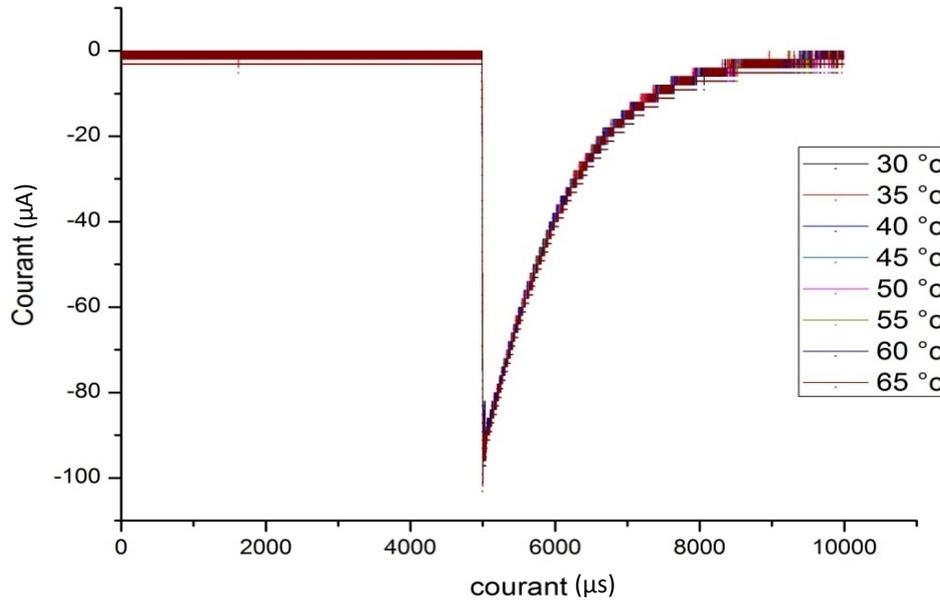


Figure 5.18: Le courant de photodiode PBW 21R301 a défèrent températures pour un front de montée (0 V ; -1 V).

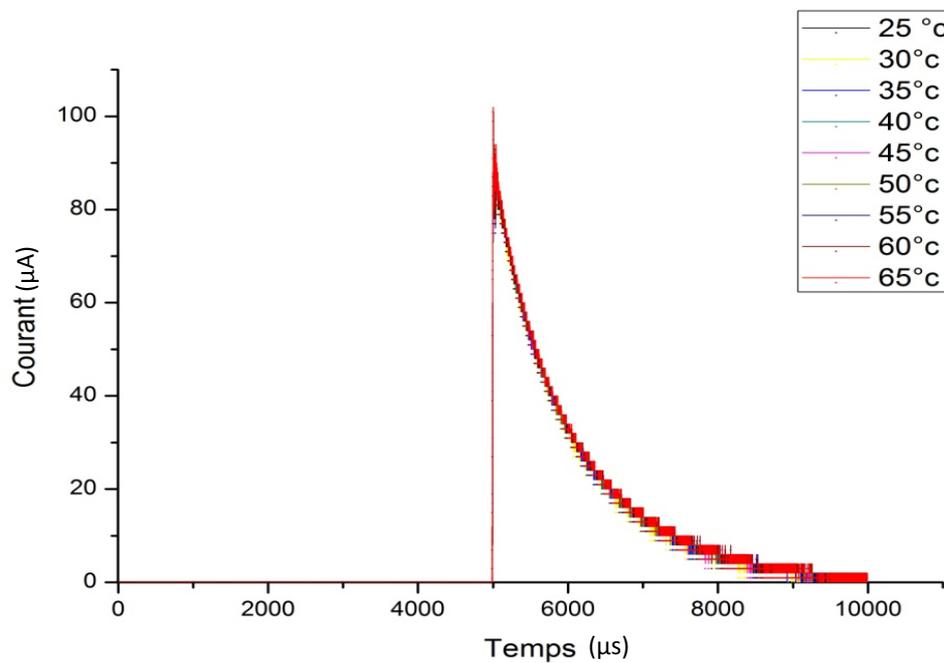


Figure 5.19: Le courant de photodiode PBW 21R301 a défèrent températures pour un front de montée (-1V, 0V).

La mesure du courant transitoire semble une bonne solution (CDLTS ; Conductance Deep Level Transient Spectroscopy).

Par la nature unipolaire de ce type des dispositifs, il est évident qu'il est possible de détecter uniquement des pièges pour les porteurs majoritaires.

Avec les données acquirées à l'aide de l'oscilloscope, on peut tracer la courbe ΔI -T comme il est représenté sur la figure 5.20.

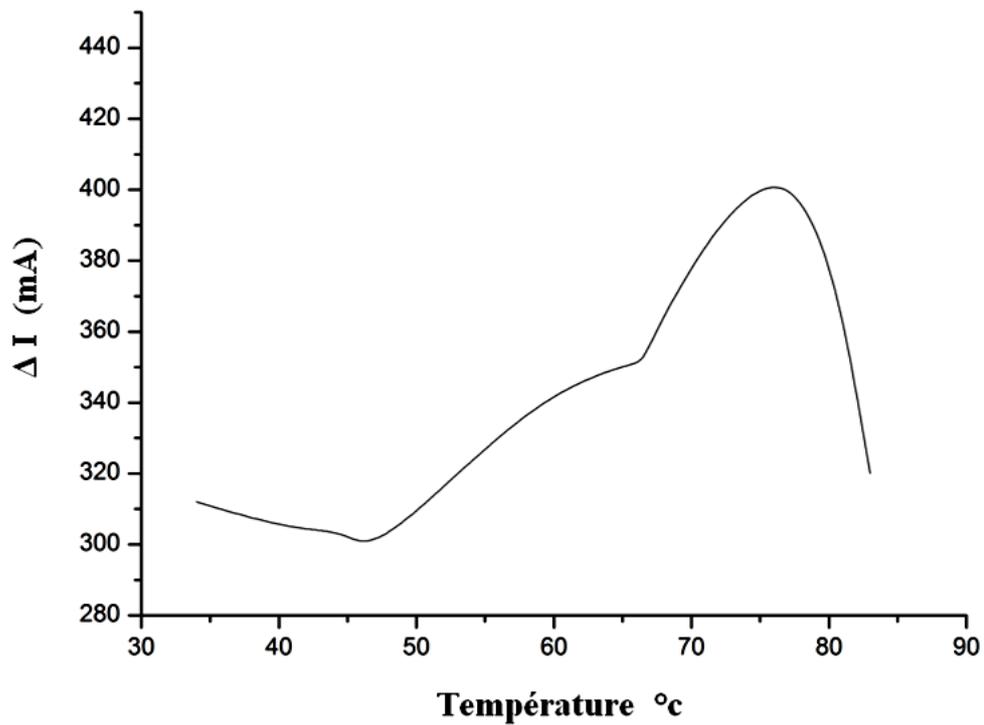


Figure 5.20 : Spectre CDLTS pour une Photodiode PN BPW 21R301 mesuré à une impulsion de 1V d'amplitude.

5.3. Mesure la capacité de Photodiode :



Figure 5.21: Banc de mesure de Capacité d'un dispositif à semi-conducteurs

Remarque : dans la suit les résultats obtenu avec la photodiode en noir.

5.3.1. Montage expérimentale

Le montage expérimental est donné en Figure 5.22. Un signal généré par le GBF avec une amplitude de 1v, offset de 500mv, et une fréquence de 100hz relié a la l'entré de la capacité mètre Bonnton7200, ou la diode et connecté en inverse et se placé en noir dans un cryostat pour la contrôle de Température ambiant.

Un oscilloscope numérique a mémoire capturé le signale de sorti analogique de la capacité mètre que donne un signale analogique proportionnelle au changement de capacité de l'échantillon, et a laide de logiciel Openchooice l'acquisition se fais par le transfère des donnée sauvegardé dans le mémoire de l'oscilloscope.

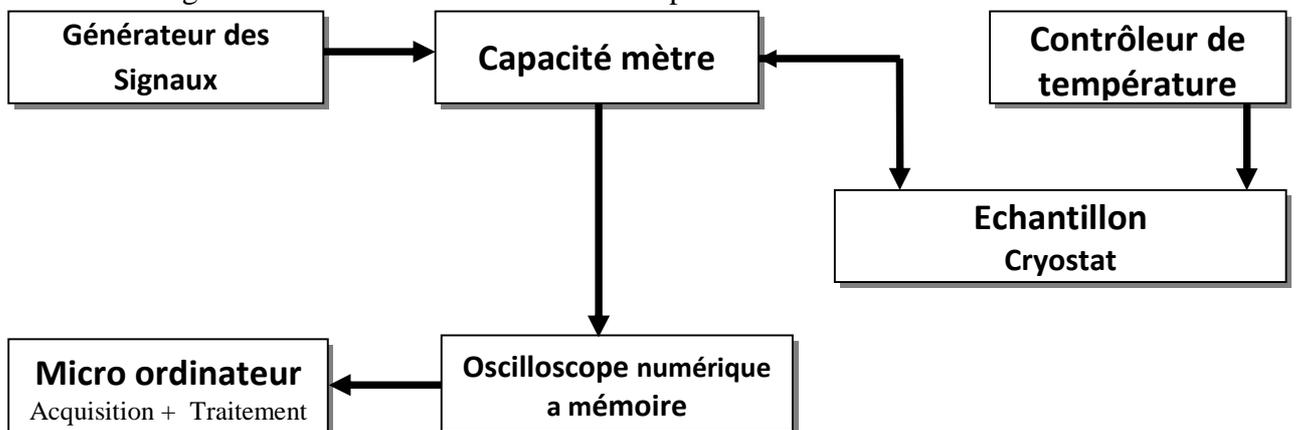


Figure 5.22 : Schéma synoptique pour la mesure de la capacité.

5.3.2. Résultat des mesure de Bonc :

Au départ, la tension aux bornes de la diode est de 0 V ; La capacité prend alors une valeur $C(V=0)$ très grande ; On applique ensuite une polarisation inverse -1v, les résultat obtenu sont représenté sur la figure 5.23.

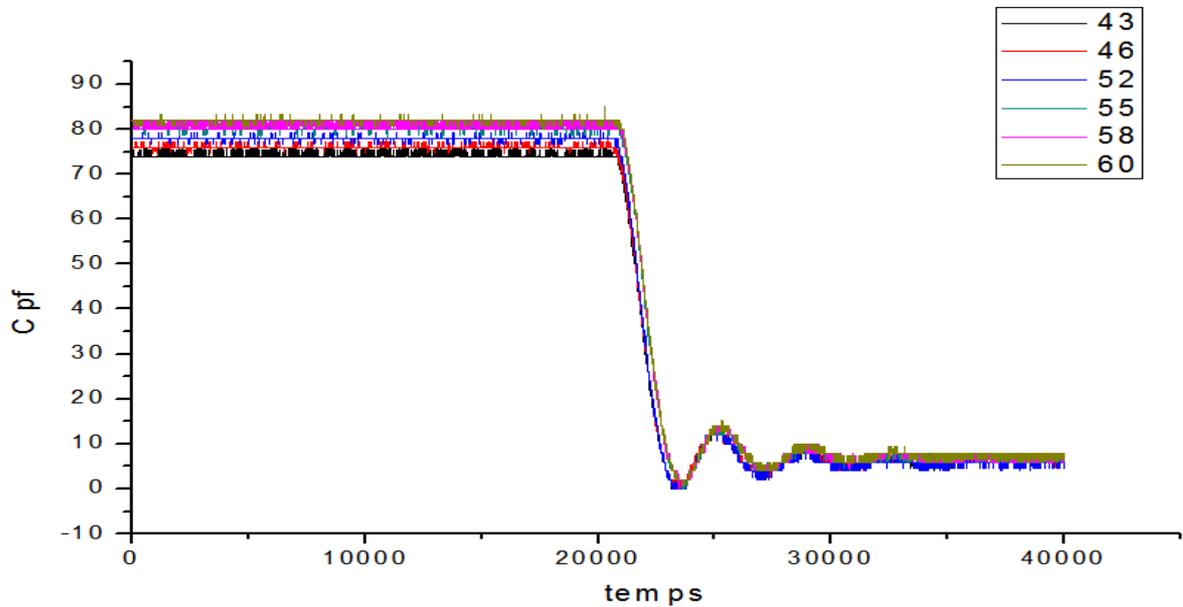


Figure 5.23: Le changement de capacité en temps dans déférant température

D'après les donnée acquiré dans l'ordinateur on pue effectué la méthode DLTS sure notre composent, le spectre DLTS présenté sure la figure 5.24.

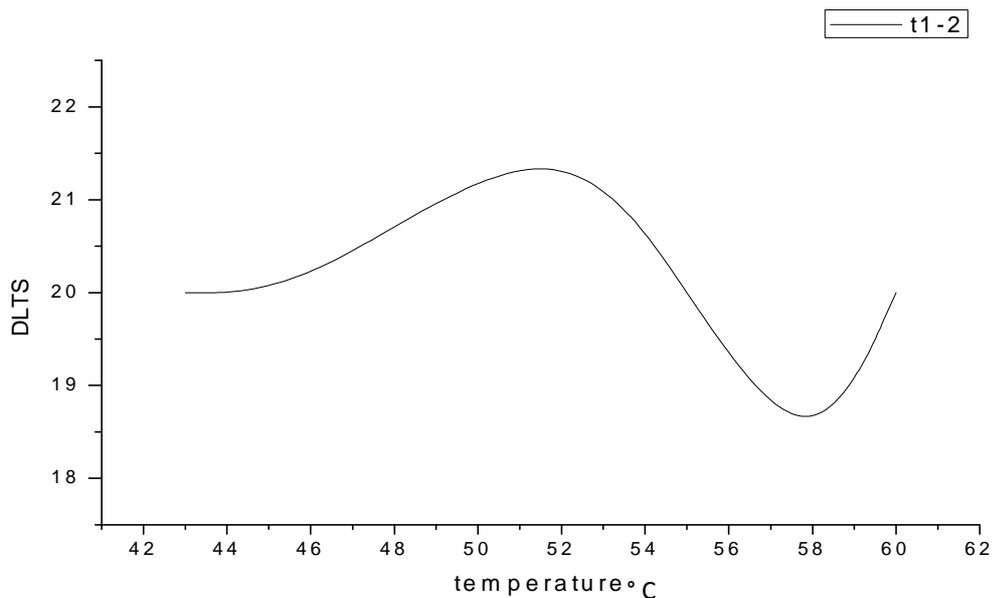


Figure 5.24 : Spectre DLTS d'une photodiode PN Silicon BPW 21R 301 .

5.4. La Diode N777 :

5.4.1. Excitation positif :

Soit l'excitation de circuit avec l'échelon d'amplitude (0v ; 1v).

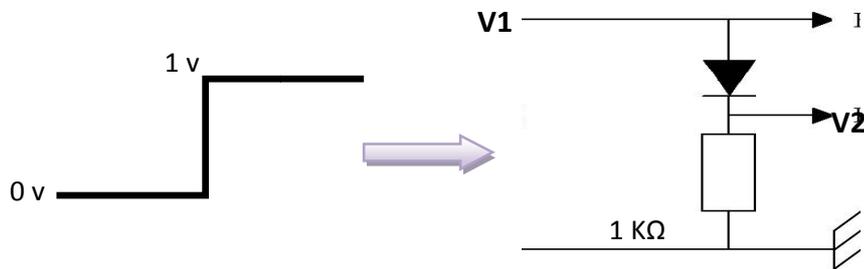


Figure 5.25: Le Circuit de mesure le courant .

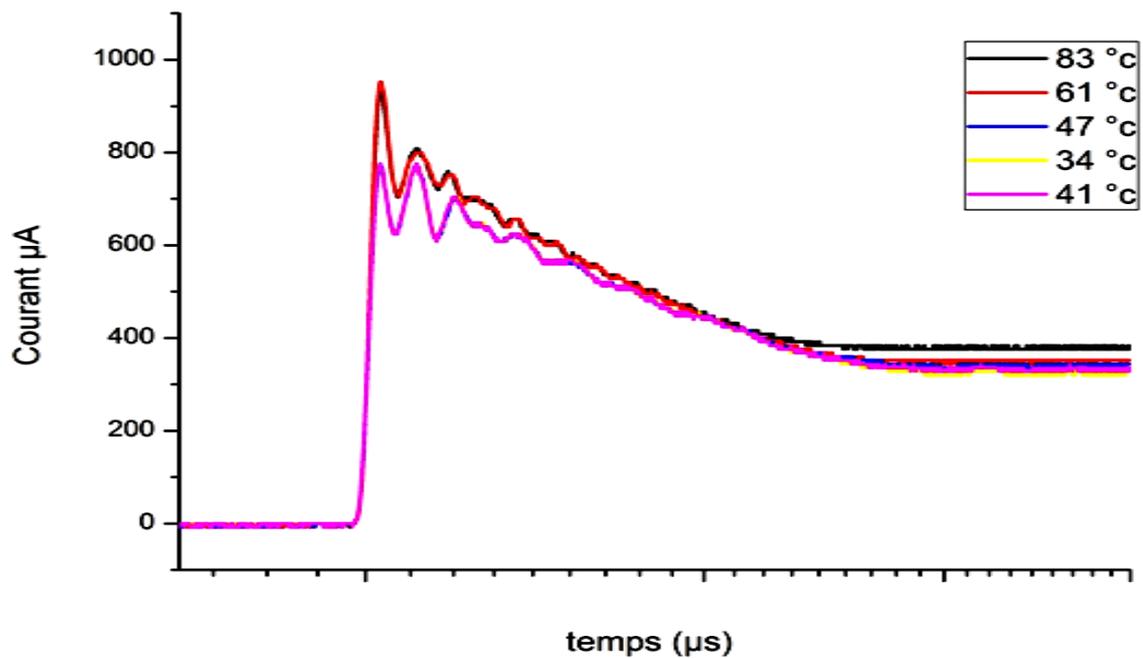


Figure 5.26: La réponse de diode N777 a la front monté (0V ;1V), les signaux nemurisé a laid d'oscilloscope TDS3052 dans le même banc de mesure representé sur la figure 5.9.

5.4.2. Excitation négatif (-1V, 0 V) :

Soit l'excitation de circuit avec l'échelon d'amplitude (-1V ; 0V).

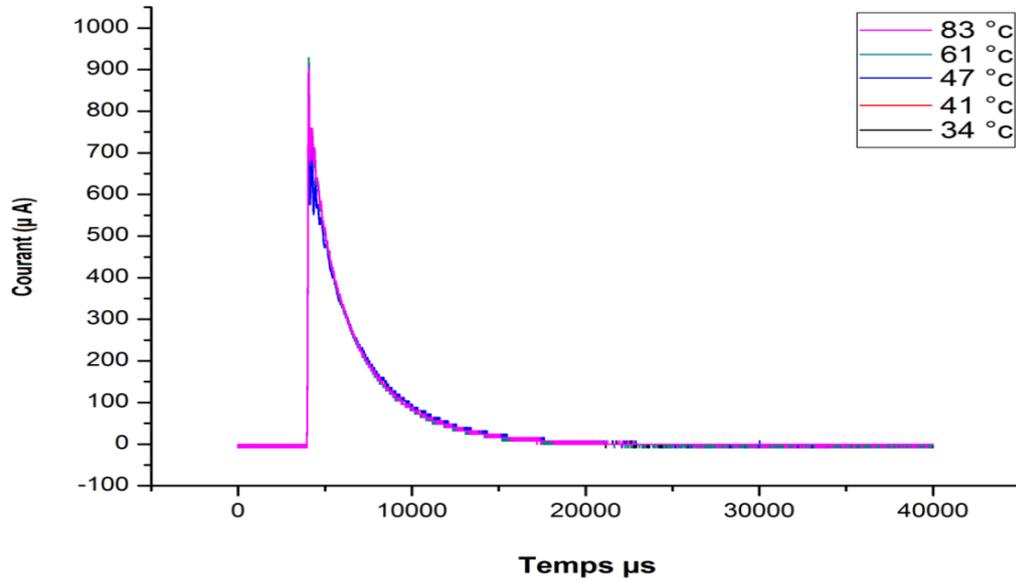


Figure 5.27: La réponse de diode N777 a la front monté (-1V ;0V).

Avec le Bonce de mesure de capacité , Ona Mesurée la capacité de diode N777 dans déférent température (27°C - 62°C) , le resultat représenté sur la figeur suivent.

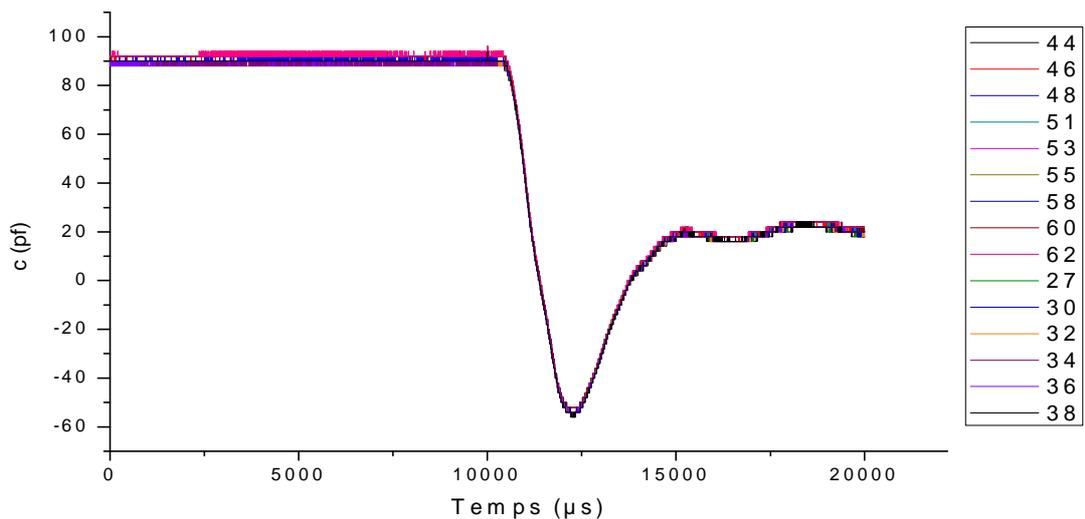


Figure 5.28: Signal de changement de capacité en fonction de temps de diode N777 sous des déférentes températures.

On déduira aussi la courbe de signal **DLTS**.

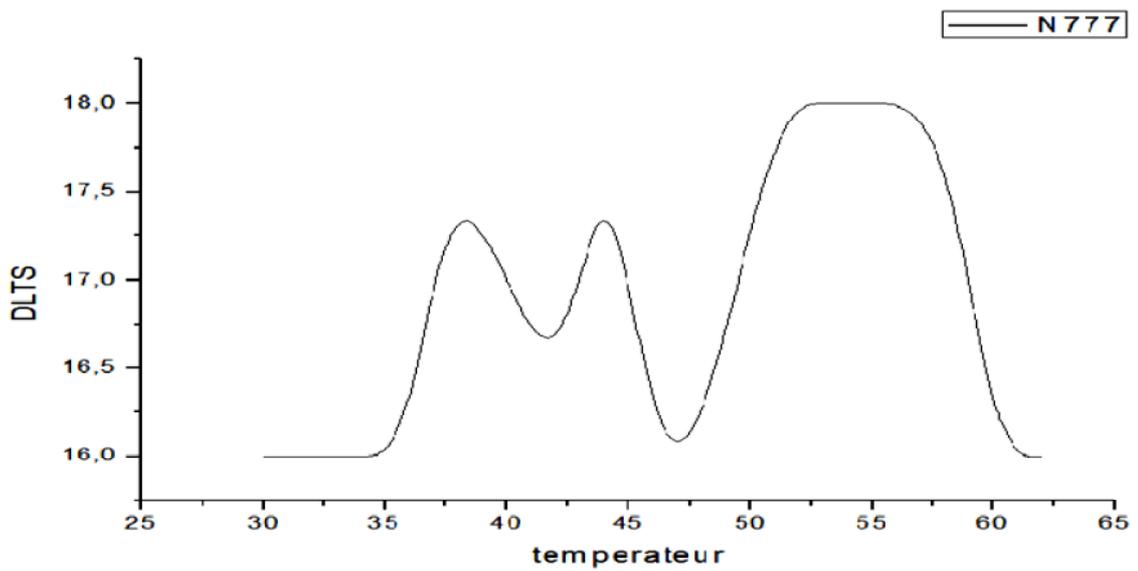


Figure 5.29:Le spectre DLTS pour la Diode N777.

6. . Excitation optique (par impulsion laser) :

On excite la photodiode BPW21R qu'est fixé à 50 cm loin de la source d'impulsion laser, avec une Longueur d'onde 337, à la température ambiante 33°C.

La réponse de la Photodiode est capturé par l'oscilloscope et transféré à l'ordinateur.

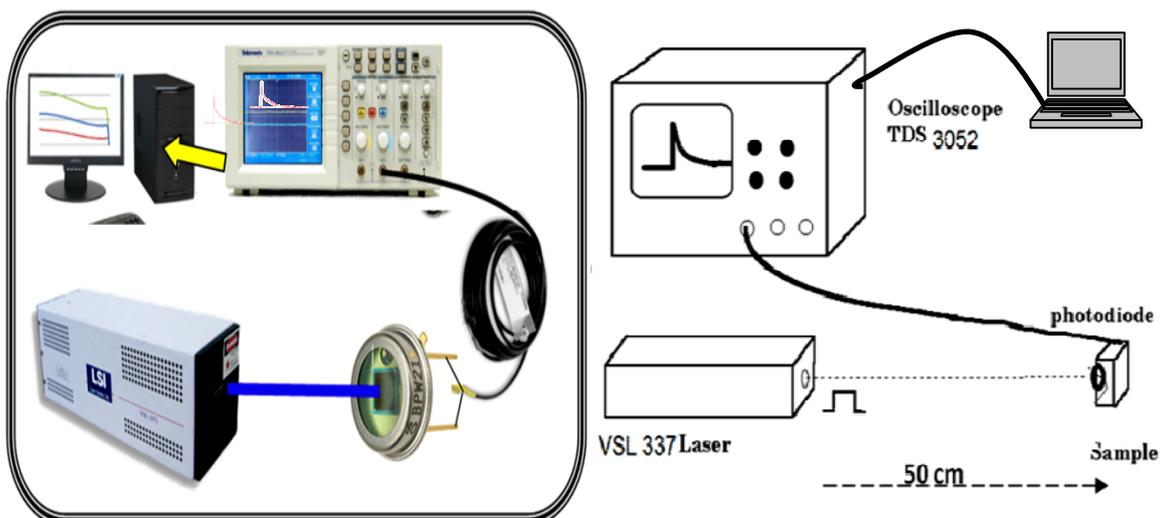


Figure 5.30: Banc d'acquisition de réponse de photodiode a une impulsion laser.

La réponse de la Photodiode et une tension Montée brutale du signal suivie d'un déclin mono-exponentiel.

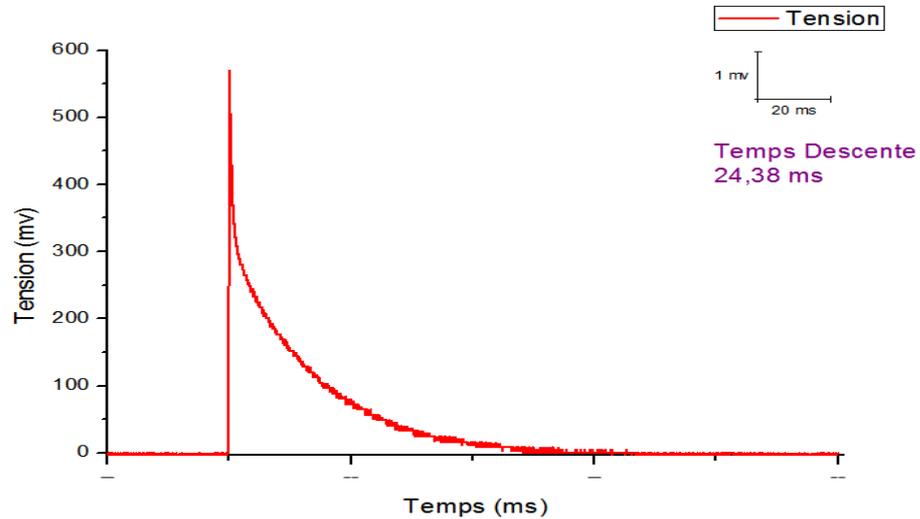


Figure 5.31 : La Réponse de photodiode a une impulsion lumineuse laser avec longueur d'onde 337, à la température 33°C, et numérisés à l'aide de l'oscilloscope TDS3052.

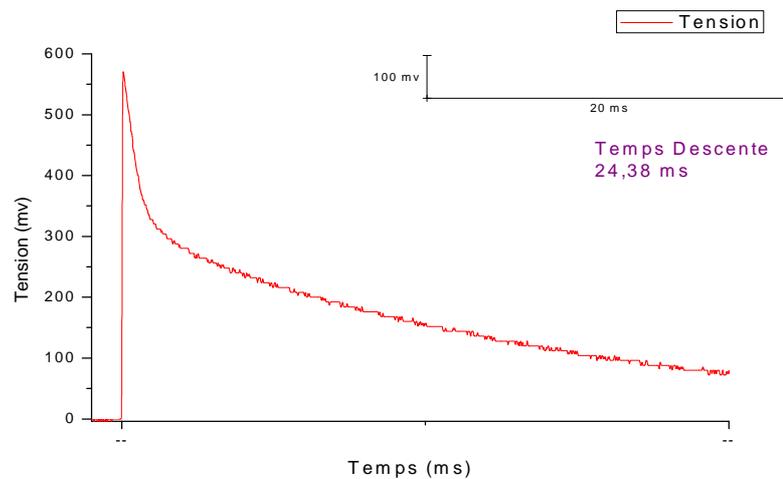


Figure 5.32 : Zoom dans le signal de la réponse de photodiode en fonction du temps numérisés à l'aide de l'oscilloscope TDS3052.

7. Récapitulation :

On conclue que avec les moyenne trouvé dans notre labo LMSM Biskra, on peu faire beaucoup de travaille surtout dans le cadre de caractérisation des semi-conducteurs comme les méthodes OFCD, FVD, DLTS,

On pue faire l'acquisition des signaux avec des carte d'acquisition, carte d'acquisition USB de notionnel instrument, Instrument des mesure numérique comme le PXI, l'oscilloscope numidique comme le TDS 3052.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Le but de notre expérimentation été formulé pour l'acquisition de signaux transitoire du à la réponse des dispositifs à semi-conducteurs à une tension alternative.

La mis en ouvre des appareille de mesures et les commandé par ordinateur avec logiciel LabVIEW, NI SignalExpress, Openchoice, Measurement & Automation, Tekvisa... .

Des déférents systèmes d'acquisition sont réalisés avec les moyennes disponibles au labo LMSM- Université de Biskra :

- Systèmes d'acquisition à base d'une carte d'acquisition PCI NI 6036E de NATIONAL INSTRUMENT.
- Systèmes d'acquisition à base d'une carte d'acquisition USB NI 6012 de NATIONAL INSTRUMENT.
- Systèmes d'acquisition à base d'une Oscilloscope numérique TDS 3052 et TDS 2012 de TEKTRONIX.

On a favoriser l'oscilloscope comme numériseur, pour leur puissance de capturer les signaux transitoire car il a une bande passante de 500MHz, et un taux d'échantillonnage de 5Géch/s, il donne 10.000 points de signal capturé.

Comme application et validation de système d'acquisitions réalisé, une photo-diode PIN et diode N777 choisie comme échantillons de test, par les mesures de capacité transitoire, le courant transitoire, leur réponse transitoire à des impulsions laser, avec les données acquise à l'ordinateur et à laide des logiciel de calcule et de traitement comme **Origine**, facilement on peu retenir les caractéristiques **I-V** et **C-V**, aussi même en fonction de la température..., et encore le spectre DLTS....

Notre système est fonctionnel et asseye performant, et si l'azote liquide été disponible, on pue dire que le système réalisé est un banc de DLTS.

Abréviations

e.g	état générale
S.A.D	Le système d'acquisition des données
PC	computer personnelle
NI	National Instruments
NI PCI	National Instruments Peripheral Component Interconnect
DAQ	Data acquisition
PXI	(PCI extensions for Instrumentation)
I / O	(in/out)
DAQ	USB Data acquisition communication série USB.
USB	universal sérielle bus.
CH	chenal.
REF	référence
PN	une jonction
ZCE.	La zone de charge d'espace.
BdV	la bande de valence
BdC	la bande de conduction
i – v	La caractéristique courant tension
EBIC	Electron Beam Induced Current characterisation
ESCCD	Electrical Short-Circuit Current Decay
OBIC	Optical Beam Induced Current
MBIC	Monochromatic-light- <i>beam-induced current</i>
O-DLTS	<i>optical Deep-level transient spectroscopy</i>
FCVD	Forward Current induced open circuit Voltage Decay
E-DLTS	Electrical Deep-level transient spectroscopy
DLTS	Deep Level Transient Spectroscopy

Symbole

K	entier qui obéisse nt à une loi de répétition cyclique régulière, de période T.
t	Tempe.
π	pie 3,14.
$\Phi_x(f)$	distribution
f	fréquence
ΔF	La largeur de bande
u_C	la tension d'une capacité
τ	constante de temps
q_e	Débit de remplissage.
q_v	Débit de vidage.
h	hauteur d eau
P	puissance.
V	Volume
T_0	température initiale
R_{th}	résistance thermique
T_{ext}	température ambiante
ΔH	l'enthalpie totale de la réaction.
α	l'avancement de la réaction chimique qui évolue.
V	Volte
ev	électrovolte
g	gramme
E	un champ électrique
V_T	tension de seuil (V)
i_{diff}	le courant de diffusion
I_s	courant de saturation
h	Constante de Planck ($6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)
k	Boltzmann ($8.617 \times 10^{-5} \text{ eV/K}$)
m	la mass d'électron ($9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$)
p_0	La densité des trous
n_0	La densité des électrons
Dc	écart par rapport à l'équilibre
G'	taux de génération ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)
G_{th}	taux de génération thermique
G	taux de génération spécifique qui découle de l'excitation du semiconducteur par la perturbation extérieure.

$h\nu$	L'énergie du photon
BI	la bande interdite
E_g	la hauteur de la bande interdite.
α	LE coefficient d'ionisation (cm^{-1})
R'	taux de recombinaison ($\text{cm}^{-3} \cdot \text{s}^{-1}$)
(dn/dt)	la densité des électrons de la BdC
U	taux net de recombinaison
k	une constante de proportionnalité
$\vartheta(\text{Dc})$	durée de vie des porteurs excédentaires
ϑ_p	temps moyen q'un trou excédentaire existe avant de se recombiner avec un électron
ϑ_n	le moyen d'existence d'un électron de conduction.
n_1	densité des électrons qu'il y aurait si le niveau de fermi
P_1	densité de trous qu'il y aurait si le niveau de fermi
A_n	Efficacité des centres de recombinaison pour les électrons
A_p	Efficacité des centres de recombinaison pour les trous
S_n	section de capture des électrons
v_{thn}	vitesse thermique des électrons
S_p	section de capture des trous
v_{thp}	vitesse thermique des trous
ϑ_p	durée de vie des porteurs minoritaires positifs
ϑ_n	durée de vie des porteurs minoritaires négatifs.
G_L	taux de génération de paires électron-trou
A	efficacité.
τ	La durée de vie
I_{ph}	la photo courant
$Z(\omega)$	l'impédance.
$C(\omega)$.la capacitance
$G(\omega)$	la conductance
$V_{\text{ph}}(\omega)$	la photo tension alternative
E_F	le niveau de Fermi
f	La probabilité
E_t	énergie de niveau profond
W	La zone de charge d'espace
z	l'ionisation des donneurs profonds
Q	étant la charge totale
ε	permittivity