N^o d'ordre: 4051

THÈSE

Présentée devant

devant l'Université des Sciences et Technologies de Lille

pour obtenir

le grade de : DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE LILLE Mention : MICROÉLECTRONIQUE

 par

Christophe NOVEMBRE

Équipes d'accueil :	Laboratoire Calculs Embarqués CEA-LIST
	Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie CNRS
	Laboratoire d'Intégration Mémoires et Nanodispositifs CEA-LETI
École Doctorale :	Sciences Pour l'Ingénieur

Architectures

des systèmes de l'information adaptées aux technologies nanométriques et/ou moléculaires : Développement d'un composant moléculaire neuromorphique.

soutenue le 12 décembre 2007 devant la commission d'examen

M. :	G.	DAMBRINE	Président
MM. :	Ο.	SENTIEYS	Rapporteurs
	JP.	TRAVERS	
MM. :	R.	BAPTIST	Examinateurs
	Ε.	Belhaire	
	С.	GAMRAT	
	D.	VUILLAUME	

Résumé

Avec le développement des objets nanométriques (nanotube de carbone,...), se pose la question de leur utilisation dans des structures de calcul. Ce travail de thèse a consisté à rechercher l'architecture de calcul qui serait la plus adaptée pour les dispositifs issus des nanotechnologies.

Dans un premier temps une étude critique des architectures de calcul envisageables a été réalisée. Celle-ci s'est basée sur une évaluation des propriétés de chaque architecture en fonction des particularités des objets nanométriques. De notre étude, il est ressorti que les réseaux de neurones constituent l'architecture la plus adaptée.

Nous nous sommes alors focalisé sur la réalisation expérimentale d'une fonction particulière du réseau de neurones : la synapse. Une telle réalisation expérimentale réclame la fabrication d'un dispositif combinant des propriétés de transistor et de mémoire. Pour cela nous avons élaboré un transistor à pentacène contenant des nanoparticules insérées dans le composé organique.

Les propriétés de transistor et de mémoire ont été démontrées par des caractérisations électriques. La fonctionnalité synaptique du dispositif a également été mise en évidence. En particulier le rôle des nanoparticules dans ces propriétés a été prouvé.

Mots clé : nanotechnologies, architecture de calcul, électronique moléculaire, électronique organique, pentacène, nanoparticules, réseau de neurones impulsionnels, synapse, plasticité synatique. ii

Abstract

With increasing development of nano objects (carbon nanotubes,...), it is worth investigating their use in computational circuits.

Firstly this thesis consisted in realizing a study on different conceivable architectures for nano devices. It was based on an assessment of properties of architectures in regard with main characteristics of nano devices. We concluded that neural networks could fit well to them.

Then we particularly focused on realizing an implementation of the synaptic functionality. Technological implementation of such functionality needed both transistor and memory properties. To this aim we fabricated a pentacene transistor containing nanoparticles embedded in the organic conductive layer.

Transistor and memory properties, then synaptic functionalities as well, have been demonstrated. It has been proved that nanoparticles are responsible for these properties.

Key words : nanotechnology, computational architecture, molecular electronics, organic electronics, pentacene, nanoparticles, spiking neural networks, synapse, synaptic plasticity iv

Remerciements

Cette thèse a été réalisée au Laboratoire Calculs Embarqués (LCE), anciennement Laboratoire Calculateurs Embarqués et Image (LCEI) du département DRT/LIST du Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) à Saclay. Aussi je tiens à remercier Monsieur Thierry Collette (alors chef du LCEI) et Monsieur Laurent Letellier, chef du LCE, de m'avoir accueilli dans leur équipe. Je remercie également Monsieur Olivier Redon chef du Laboratoire d'Intégration Mémoires et Nanodispositifs (LIMN) du département DRT/LETI du CEA à Grenoble d'avoir bien voulu que je sois rattaché à son laboratoire.

Ces travaux de recherche ont été rendus possible grâce aux financements du programme Recherche Technologique de Base "Post-CMOS moléculaire" du CEA dirigé par Monsieur Robert Baptist, directeur de recherche CEA. Je le remercie de sa confiance et d'avoir cru en la pertinence de ce sujet de thèse.

Je remercie Monsieur Christian Gamrat, chercheur CEA, pour avoir encadré mes travaux de recherche et ses propositions scientifiques. Je remercie également Monsieur Dominique Vuillaume, directeur de recherche CNRS, pour avoir accepté d'être mon directeur de thèse, ses critiques constructives, et m'avoir permis de réaliser une part importante de mes travaux au sein de son groupe "Dispositifs et nanostructures moléculaires" de l'Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN).

Je remercie Monsieur Gilles Dambrine, Professeur des universités à l'USTL, qui me fait l'honneur de présider le jury de cette thèse.

J'adresse mes remerciements à Messieurs Olivier Sentieys, Professeur des universités à l'ENSSAT et Jean-Pierre Travers, directeur de recherche CNRS pour avoir accepté de juger mon travail en tant que rapporteurs.

Je remercie enfin Messieurs Robert Baptist, directeur de recherche CEA, et Eric Belhaire, chercheur CNRS pour leur participation au sein du jury de thèse.

Ces travaux n'auraient pu aboutir sans une étroite collaboration avec l'équipe "Dispositifs et nanostructures moléculaires", je remercie donc David Guérin, Stéphane Lenfant, Claude Dufour, Kamal Lmimouni, Denis Tondellier pour leurs contributions. Un grand merci également à toute l'équipe du LCE, en particulier à Stéphane Chevobbe et Yves Lhuillier pour leur curiosité scientifique et leur écoute, et également à Raphaël David pour ses conseils lors de la rédaction de cette thèse. Un grand merci également à Annie Straboni, Monique Drevon pour leur gentillesse et leur célérité à traiter mes diverses formalités administratives. Je ne saurais oublier la convivialité de l'association des doctorants MAIOT, qu'ils en soient également remerciés.

Tous mes sentiments à Cédric, Nino, Catherine et Germain pour m'avoir supporté et aidé dans les moments de difficultés morales et d'incertitudes. Merci à mes parents. Et enfin toute ma reconnaissance à Mme P.

vi

vii

viii

Table des matières

Introduction

1 Etat de l'art sur les nanotechnologies et les propositions architectural					5		
	1.1	Les ob	ojets nanométriques				
		1.1.1	Introduction		6		
		1.1.2	Les nanotubes de carbone		6		
			1.1.2.1 Définition		6		
			1.1.2.2 Procédés de Synthèse et propriétés électriques		8		
			1.1.2.3 Dispositifs à base de nanotubes		10		
		1.1.3	Les nanofils		14		
			1.1.3.1 Procédés de synthèse et propriétés électriques		14		
			1.1.3.2 Dispositifs à base de nanofils		16		
		1.1.4	Les objets moléculaires		19		
			1.1.4.1 Les modes d'utilisation des molécules		19		
			1.1.4.2 Les dispositifs moléculaires		21		
		1.1.5	Conclusion		26		
	1.2	Archit	ctures pour les nanotechnologies		26		
		1.2.1	Introduction		26		
		1.2.2	Le crossbar : un réseau à deux dimensions d'objets nanométr	iques .	27		
			1.2.2.1 Des fonctions logiques avec un crossbar de nanofils		27		
			1.2.2.2 Propositions architecturales		28		
		1.2.3	L'adressage micro-nano		31		
			1.2.3.1 Un décodeur d'adresse expérimental		31		
			1.2.3.2 Propositions architecturales		32		
		1.2.4	Gérer la tolérance aux fautes dans un crossbar de nanofils .		34		
			1.2.4.1 Une méthode de test pour localiser les défauts		34		
			1.2.4.2 Des réseaux de neurones moléculaires		35		
		1.2.5	Les automates cellulaires quantiques		36		
			1.2.5.1 Qu'est ce qu'une cellule QCA ?		36		
			1.2.5.2 Réalisation expérimentale de QCAs		37		
		1.2.6	Une structure particulière : la Nanocell		40		
			1.2.6.1 Structure d'une Nanocell		40		
			1.2.6.2 Réalisation expérimentale		40		

1

		1.2.7 Conclusion	42
2	Inve	estigation d'une architecture adaptée aux nanotechnologies	45
	2.1	Introduction	46
	2.2	Quelle architecture de calcul pour les objets de taille nanométrique?	46
		2.2.1 L'architecture de Von Neumann	46
		2.2.2 Les automates cellulaires	48
		2.2.3 Les réseaux de neurones	49
		2.2.4 Les structures reconfigurables	50
		2.2.5 Discussion	52
	2.3	Les réseaux de neurones impulsionnels	54
		2.3.1 Structure et fonctionnement d'un réseau de neurones impulsionnels .	55
		2.3.1.1 Le réseau de neurones biologiques	55
		2.3.1.2 Les modèles de réseaux de neurones impulsionnels	56
		2.3.2 La synapse : une fonction critique de l'architecture neuronale impul-	
		sionnelle	57
		2.3.2.1 La synapse biologique	57
		2.3.2.2 La plasticité synaptique : une synapse opérationnelle dyna-	•••
		mique	58
	2.4	Notre approche : l'implantation d'une synapse dynamique nanométrique	63
		2.4.1 Les implantations de synapse dynamique sur silicium	63
		2.4.2 Le transistor organique+nanoparticules : notre proposition d'implan-	00
		tation de synapse dynamique	63
	2.5	Conclusion	64
			0 1
3	Imp	plantation technologique	67
	3.1	Introduction	68
	3.2	Les nanoparticules encapsulées	69
	3.3	Etat de l'art des modes de dépôt des nanoparticules encapsulées	70
	3.4	Protocole expérimental des échantillons réalisés	74
		3.4.1 Dépôts réalisés par fonctionnalisation des surfaces par des molécules	
		thiolées	76
		3.4.2 Dépôts réalisés par fonctionnalisation des surfaces par des molécules	
		aminées	78
	3.5	Caractérisation des échantillons	81
		3.5.1 Echantillons avant subi une thiolation : échantillons 1, 2, 3, 4, 5A, 5B	81
		3.5.2 Echantillons avant subi une amination : échantillons 6, 7, 8	83
		3.5.3 Discussion sur ces procédés de dépôt	86
	3.6	Réalisation du dispositif transistor pentacène + nanoparticules	86
	3.7	Conclusion	88
	J. 1		50
4	Car	cactéristiques électriques : transistor et mémoire	91
	4.1	Introduction	92
	4.2	Propriétés transistor du dispositif	92

х

		4.2.1	Protocole expérimental	92 02
		4.4.4	4 2 2 1 Résultats statistiques	92 92
4 '			4.2.2.2 Caractéristiques I_{de} - V_{de} (V_{ae} =0V5V10V15V20V)	94
			4.2.2.3 Caractéristiques $\sqrt{I_{ds}}$ -V _{as} pour V _{ds} =-20V	96
			4.2.2.4 Caractéristiques $\log I_{ds} - V_{as}$ pour $V_{ds} = -20V$	97
			4.2.2.5 Caractéristiques $I_{ds}(t)$ pour $V_{qs} = V_{ds} = -20V$	100
		4.2.3	Discussion	100
	4.3	Aspect	t mémoire du dispositif	102
	4.3.1 Protocole expérimental			102
		4.3.2	Résultats	103
			4.3.2.1 Effet de l'application d'une tension de $-50V$, $+50V$ ou $+100V$	
			sur la caractéristique I_{ds} - $V_{ds}(V_{gs}=-20V)$	103
			4.3.2.2 Effet de l'application d'une tension de $-50V$ puis $+50V$ sur	105
			la caractéristique $\sqrt{I_{ds}}$ - V_{gs} (V_{ds} =-20V)	105
			4.3.2.3 Notre dispositif memoire	107
		122	4.3.2.4 Dynamiques de relaxation	108
	1.1	4.5.5 Conclu		1109
	1.1	Concie	191011	110
5	Le f	onctio	nnement impulsionnel	113
	5.1	Introd	uction	114
	5.2 Protocole expérimental			114
	5.3 Résultats			117
		5.3.1	La plasticité synaptique à court terme	117
		5.3.2	Comportement synaptique facilitateur ou dépressif	119
		5.3.3	Plasticité synaptique à modulation temporelle relative : Réponse du	101
			système suivant son historique	124
			5.3.3.1 Reponse du dispositif suivant le temps écoule depuis l'ap-	194
			5.3.3.2 Bénonse du système suivant le nombre d'applications de	124
			5.5.5.2 Reponse du systeme survant le nombre d'appreations de tension de $-50V$	126
	54	Discus	sion	128
	5.5	Conclu	ision	131
	Conclusion			125
	Conclusion			
			n	100
	Glos	ssaire	11	139
Bi	Glos bliog	ssaire raphie		139 141

Introduction

Les principales machines à calculer électroniques de notre époque, les ordinateurs, connaissent une diffusion dans de plus en plus de domaines de la vie courante. On les retrouve par exemple entre autres, dans la téléphonie mobile, l'automobile et les appareils électroménagers. Leur structure se base en générale sur l'architecture de calcul dite de Von Neumann. Cette popularisation a été possible car depuis son élaboration l'architecture de Von Neumann a subi d'importantes améliorations jusqu'aux microprocesseurs actuels : composée à l'origine de circuits à composants discrets de faible densité, elle est maintenant constituée de circuits intégrés de densité très élevée. Ceci est lié en particulier à la réduction des dimensions des circuits CMOS (Complementary Metal Oxyde Semiconductor) qui composent principalement les ordinateurs. Ces circuits résultent de plusieurs combinaisons d'un composant de base, le transistor MOS ou MOSFET (Metal Oxyde Semiconductor Field Effect Transistor). Sa propriété principale est l'effet de champ, c'est-à-dire la modulation d'un canal de conduction entre deux électrodes, appelées le drain et la source, grâce à la tension appliquée sur une troisième électrode, l'électrode de grille.



FIG. 1 – Schéma de la géométrie d'un transistor MOS. Les électrodes de source et de drain sont des poches de silicium dopé N dans le cas d'un transistor de type N, ou dopé P dans le cas d'un transistor de type P. Sous l'effet d'une tension appliquée sur l'électrode de grille, un canal de conduction se forme sous l'isolant de grille. Il est constitué des porteurs de charges disponibles dans les réservoirs que sont la source et le drain. En bas sont représentés les symboles des transistors NMOS et PMOS.

Le canal drain-source est un interrupteur commandé par la tension appliquée sur l'électrode de grille. Ainsi le transistor NMOS est fermé quand l'électrode de grille est en tension haute (e.g. 3 V), et ouvert quand l'électrode de grille est en tension basse (e.g. 0 V). Tandis que le transistor PMOS est fermé quand l'électrode de grille est en tension basse (e.g. -3 V), et est ouvert quand l'électrode de grille est en tension haute (e.g. 0 V). Des fonctions logiques sont implémentées en associant ces deux types de transistor.

La conception des circuits CMOS suit une approche "top-down" : un plan présentant le positionnement physique précis de chaque dispositif est obtenu à partir des spécifications de l'application recherchée, par l'intermédiaire d'un flot de conception bien établi. Ensuite les transistors MOS sont fabriqués par des étapes successives de dépôt de matériaux, de lithographie, et de gravure. En améliorant ces étapes, il a été possible de réduire les dimensions des transistors fabriqués. L'accroissement en densité de dispositifs intégrables dans un circuit qui en résulte est décrit phénoménologiquement par la loi de Moore. Proposée en 1975 par Moore un des fondateurs de la compagnie Intel, cette loi expérimentale stipule que le nombre de transistors des microprocesseurs double tous les deux ans environ. Jusqu'à nos jours cette loi s'est trouvée confirmée par les avancées réalisées par les industriels de la communauté des fabricants de microprocesseurs. Ainsi actuellement les transistors MOS ont une dimension de canal de grille de 48 nm. Et selon l'ITRS 2005 (International Technology Roadmap for Semiconductors) [1], en adaptant la géométrie du transistor et en utilisant des matériaux plus performants, une largeur de canal de grille de 11 nm pourra être atteinte en 2019 tout en conservant le phénomène d'effet de champ (figure 2). Ce dernier s'est montré très robuste par rapport à cette diminution des dimensions, cependant il se heurtera aux limitations théoriques prévues par la physique. En effet au dessous d'une telle dimension de grille l'effet de champ sera perdu dans une structure MOS. Avec ces limitations, la loi de Moore se trouvera t'elle alors prise en défaut?



FIG. 2 – Graphe représentant les longueurs L de l'électrode de grille pour chaque année, obtenu à partir des valeurs déjà atteintes et des projections de l'ITRS [1].

Introduction

En 1959 Richard Feynman, lors de la conférence de l'American Physical Society, a cette phrase souvent citée : « there is plenty of room at the bottom »[2]. Par cette expression visionnaire, il affirmait que les lois de la physique ne s'opposent pas à la réalisation de circuits électroniques, ou bien de machines, à l'échelle des molécules. En 1974, Aviram et Ratner proposent un modèle théorique de diode moléculaire [3]. Avec le développement des microscopes à effet tunnel (STM : Scanning Tunneling Microscope) et des microscopes à force atomique (AFM : Atomic Force Microscope) au début des années 80, la manipulation et la mesure des caractéristiques de la matière à l'échelle atomique est devenue possible. Ces avancées technologiques sont désignées sous le terme de nanotechnologies. Conjuguées à l'apparition de nouvelles structures telles les nanotubes de carbone, elles permettent d'envisager la réalisation de circuits à l'échelle moléculaire ou nanométrique.

Ainsi, les nanotechnologies font office de bons candidats pour la relève des transistors MOS. Plusieurs technologies sont proposées, dont certaines sont plus avancées que d'autres. En particulier des structures comme les nanotubes de carbone ou les nanofils font l'objet d'études approfondies. Il est également envisagé d'utiliser des molécules pour réaliser du calcul. La réduction progressive des dimensions des dispositifs CMOS a nécessité des innovations graduelles tant dans le domaine de la fabrication technologique que dans celui des moyens de conception de circuit. De même l'utilisation des nanotechnologies nécessitera des innovations sur ces deux plans. Cependant celles-ci risquent d'être moins graduelles que celles appliquées pour les dispositifs CMOS. En effet les nanotechnologies présentent des techniques de fabrication et des propriétés, électriques entre autres, qui sont différentes des dispositifs actuels. Il est nécessaire de spécifier ces caractéristiques afin d'élaborer des techniques de conception architecturale adaptées aux nanotechnologies.

Il l'est tout autant de considérer les architectures envisageables sans à priori. Ceci de façon à choisir celle qui, de l'architecture de Von Neumann, mais aussi des architectures alternatives comme les réseaux de neurones, les automates cellulaires, et les architectures reconfigurables, sera la plus adaptée aux caractéristiques des nanotechnologies. D'autant plus que, bien que des phénomènes tels que l'effet de champ sont principalement recherchés au niveau dispositif, de nouvelles fonctionnalités émergeront. Car les propriétés de transport sont différentes de celles présentées par les dispositifs CMOS. Ces nouvelles fonctionnalités pourraient être utiles au développement d'architectures mises dans l'ombre par le succès de l'architecture de Von Neumann. Une telle opportunité permettrait d'élargir le champ applicatif des architectures de calcul, par la prise en charge de traitements non couverts par les architectures actuelles.

En définitive, il s'agit de se demander comment prendre en compte les particularités des nanotechnologies afin d'obtenir une architecture de calcul qui leur est adaptée. Et qui de plus présente un intérêt applicatif. Ce mémoire présente les travaux menés afin de répondre à la problématique développée ci-dessus. Il s'organise de la façon suivante :

 Dans le chapitre 1, nous présentons une étude bibliographique sur les objets nanométriques. Ce terme désigne l'ensemble des molécules, des nanofils, des nanotubes de carbone envisagés pour une utilisation en électronique. Nous allons faire une revue sur ces objets en présentant leurs modes de fabrication respectifs, leurs propriétés électriques et les dispositifs électroniques dans lesquels ils sont utilisés. Nous dégagerons alors des caractéristiques particulières à ces objets nanométriques qui auront des conséquences sur la façon de concevoir des circuits les utilisant. Nous présenterons ensuite les principaux travaux proposant l'utilisation des objets nanométriques dans des architectures de calcul. Nous nous positionnerons alors par rapport à ces précédentes propositions, et nous justifierons notre approche qui se base sur une comparaison critique des différentes architectures envisageables.

- Dans le chapitre 2, et à l'issue d'une étude comparative des principales architectures possibles, nous verrons que les réseaux de neurones sont très bien adaptés aux dispositifs nanométriques. En particulier, nous nous fixerons sur une classe de réseaux de neurones, les réseaux de neurones impulsionnels. Au sein d'un tel réseau notre attention se portera sur les propriétés de plasticité du poids synaptique pour une synapse dynamique. Dès lors, nous nous poserons pour objectif la réalisation expérimentale d'une synapse électronique dynamique. Pour cette mise en œuvre nous choisirons et justifierons une structure de transistor organique ayant des nanoparticules enterrées dans le canal de conduction.
- Nous décrirons au chapitre 3 la fabrication de notre dispositif. Après avoir répertorié les techniques possibles, nous présenterons les différentes étapes permettant d'obtenir un dépôt de nanoparticules sur une structure isolante surmontée d'électrodes d'or. Nous décrirons ensuite le dépôt d'une couche de semiconducteur organique pentacène afin de compléter la formation du dispositif.
- Dans le chapitre 4, nous décrirons les caractérisations électriques des dispositifs fabriqués. Nous étudierons leurs propriétés de transistor. Nous mettrons également en évidence un comportement mémoire du aux nanoparticules.
- Enfin dans le chapitre 5, nous décrirons les propriétés synaptiques de notre dispositif, lesquelles seront déterminées à partir d'une série de mesures impulsionnelles. Nous comparerons ces résultats avec les comportements de synapses dynamiques décrits dans le deuxième chapitre.

Chapitre 1

Etat de l'art sur les nanotechnologies et les propositions architecturales

1.1 Les objets nanométriques

1.1.1 Introduction

Contrairement à l'approche actuelle "top-down", les dispositifs nanométriques ne seront vraisemblablement pas définis par lithographie électronique, mais seront assemblés. Nous aurons à notre disposition une "boite à outil" constituée de nanofils, de nanotubes, de molécules, et la réalisation d'un circuit consistera à organiser et connecter ces blocs de base. Nous faisons une présentation de ces blocs de base, en donnant un aperçu de leurs méthodes de fabrication, des techniques d'assemblage et des dispositifs électroniques réalisés à partir de ces objets.

1.1.2 Les nanotubes de carbone

Les nanotubes de carbone (NT ou CNT : Carbon Nanotube) sont découverts par S. Iijima (NEC, Japon) en 1991. Un nanotube de carbone est un long cylindre d'une ou plusieurs feuilles de graphite enroulées, chacune d'épaisseur mono moléculaire. Leurs remarquables propriétés mécaniques ou électriques suscitent un grand intérêt. Parmi les applications envisagées on compte l'affichage pour écran, le refroidissement de circuits (ceci grâce à leur conductivité thermique), le stockage de l'hydrogène, et surtout leur utilisation dans des transistors à effet de champ. Cependant des étapes sont à franchir, notamment dans la maîtrise et la compréhension de leur synthèse et de leurs propriétés électriques.

1.1.2.1 Définition

Le matériau graphite est composé d'une superposition de feuilles d'atomes de carbone organisés en réseau hexagonal plan. Chaque feuille est faiblement liée à celle du dessus et celle du dessous. Ceci explique le fait que l'on peut tracer une ligne avec un crayon à papier : les feuilles de graphite se déposent facilement sur la surface. On peut considérer un nanotube de carbone comme une feuille de graphite, qui s'est enroulée sur elle même pour former un tube éventuellement fermé à ses deux extrémités. La direction d'enroulement de vecteur (m,n) (figure 1.1) est très importante, car elle détermine les caractéristiques du nanotube : son diamètre et sa chiralité.



FIG. 1.1 – Schéma d'une structure de graphite [4]. a_1 et a_2 sont les vecteurs de base du réseau. En enroulant la feuille pour former un cylindre de façon à ce que les deux extrémités d'un vecteur (m,n) du réseau se joignent, on obtient un nanotube (m,n). Les indices m et n déterminent le diamètre du nanotube et sa chiralité. Ce terme désigne le motif d'arrangement formé par les atomes de carbone constituant le CNT.

La chiralité est le motif formé par le réseau hexagonal d'atomes de carbone dans la direction d'enroulement. Si l'enroulement s'effectue suivant un vecteur (m,m) on aura un motif dit "arm-chair". Si l'enroulement est suivant un vecteur (m,0) on aura un motif dit "zigzag" (figure 1.2).



FIG. 1.2 - (a) Il existe une multitude de motifs possibles, les deux motifs principaux sont dénommés armchair (m, m) et zigzag (m, 0). Les autres structures présentant des colonnes d'hexagone en spirale autour de l'axe du nanotube sont dites chirales. (b) Sur le NT Zigzag le motif est horizontal, sur le NT Armchair le motif est vertical.

Les nanotubes définis par une seule feuille de graphite sont appelés monoparois ou (SWNT : single walled nanotube). Tandis que l'on désigne par le terme multiparoi (MWNT : multi walled nanotube) un nanotube composé de plusieurs SWNT coaxiaux, chacun pouvant être de chiralités différentes (figures 1.2, 1.3). Les longueurs observées expérimentalement peuvent aller jusqu'à quelques centaines de microns. Le tableau 1.1 donne un aperçu des valeurs caractéristiques.



FIG. 1.3 – (a) Modélisation d'un nanotube monoparoi [5]. Ils sont souples, ils peuvent être tordus, aplatis, s'allonger sans craquer. (b) Modélisation d'un nanotube multiparoi [5]. Distance inter couche d'environ 3.4 Å; Il est constaté jusqu'à cinquante couches. Les NTs multi parois contiennent plus de défauts que les mono parois, ce qui diminue leurs propriétés. Ils ont une variété d'arrangements possibles qui sont répertoriés. Les MWNT sont plus faciles à produire.

Propriétés	Caractéristiques	Données		
	Couches	Monoparoi (single walled nanotube SWNT) ou multiparoi (Multiwalled nanotube MWNT)		
géométriques	Ratio diamètre-longueur	10 - 1000		
	diamètre	~0,4nm – plus de 3nm (SWNT) ~1,4nm- plus de 100nm (MWNT)		
	Longueur	Plusieurs µm		
	Module de Young	1TPa (acier : 0,2TPa)		
Mécaniques	Résistance à la traction	45GPa (acier : 2GPa)		
	Densité	1,33 ~ 1,4 g/cm ³ (AI : 2,7g/cm ³)		
á la atria nimu a a	Conductivité	Métallique/ semi-conductivité		
electroniques	Transport du courant	10ºA/cm ² (Cu : 10 ⁶ A/cm ²)		
thermiques	Transmission de chaleur	>3kW/mK (diamant : 2kW/mK)		

TAB. 1.1 – Performance des CNT [6].

1.1.2.2 Procédés de Synthèse et propriétés électriques

Procédés de synthèse Les principales techniques de synthèse des nanotubes mono et multiparois sont la synthèse par arc [7], l'ablation laser [8] et le dépôt chimique en phase vapeur (CVD : Chemical Vapor Deposition) [9]. Comparativement aux nanotubes multiparois, la synthèse des monoparois s'effectue sous des conditions plus drastiques, ce qui rend leur obtention beaucoup plus difficile.

La synthèse par arc est une méthode rapide (2 mn) et moins chère que l'ablation laser. Lors de ce procédé de fabrication, un arc électrique est généré entre deux électrodes en graphite sous atmosphère de gaz neutre (hélium, argon). L'anode présente un trou rempli d'un mélange de catalyseur métallique (Fer, nitrate) et de poudre de graphite. Les nanotubes sont produits à partir de ce mélange. Dans la fabrication par ablation laser le dispositif utilisé pour évaporer le carbone est un laser. Avec ces deux méthodes on obtient des nanotubes mélangés à des impuretés et entremêlés, ce qui complique les étapes de purification. De plus ces méthodes mettent en jeu des températures supérieures à 3000 °C; mais elles ont l'avantage d'avoir un grand rendement par rapport à la quantité de graphite introduite (70%).

La synthèse par CVD consiste en la décomposition par catalyse d'un hydrocarbure dans un four à 500-1200 °C. La croissance des nanotubes s'effectue sur les catalyseurs (généralement des nanoparticules de fer, nitrate ou cobalt) lors du refroidissement du système. Cette technique se déroule sur une surface d'oxyde d'aluminium généralement poreux, ce qui permet d'obtenir des NTs alignés (figure 1.4).

Les objets nanométriques



FIG. 1.4 – Image au MEB d'un réseau de MWNT [4]. Chaque "tour" est un paquet de MWNT orientés perpendiculairement à la surface.

Généralement l'intégration de NTs dans des circuits (de caractérisation par exemple) s'effectue post synthèse : le NT est d'abord fabriqué, puis il est amené à l'endroit désiré. Entre ces deux étapes un tri est souvent nécessaire. En effet on ne maîtrise pas la chiralité des nanotubes lors de leur synthèse, ce qui implique qu'on ne peut choisir leurs propriétés électriques lors de la croissance. Pour sélectionner les NTs semiconducteurs ou métalliques on utilise généralement la pointe d'un microscope à force atomique. Mais il existe d'autres méthodes de tri, telle que la "destruction constructive" [10] qui permet de détruire les nanotubes métalliques dans un bouquet de SWNT et de ne garder que ceux aux propriétés semiconductrices.

Bien que plusieurs scénarios crédibles soient avancés, une compréhension du processus de croissance est encore à atteindre. Cependant la synthèse in situ de nanotubes dans un circuit MOS a été réalisé [11], laissant entrevoir la possibilité de les synthétiser et de les intégrer en un seul procédé. Pour des précisions sur la synthèse et les mécanismes de croissance des nanotubes, le lecteur est invité à consulter les références [6], [12], [13].

Propriétés électriques Une caractéristique des nanotubes de carbone est l'extrême sensibilité de leurs propriétés électroniques à leur chiralité. Un SWNT peut être métallique, semiconducteur à grand ou petit gap suivant les valeurs des paramètres structuraux (m,n). Ainsi un nanotube arm-chair est métallique, et les nanotubes dont les paramètres (m,n) respectent la condition $m-n\neq 3p$ où p est un entier, sont de type semiconducteur.

Les nanotubes sont considérés comme des systèmes à une dimension où les effets quantiques ne sont plus négligeables. Cependant les comportements électriques obtenus dépendent fortement de la qualité des contacts utilisés [14], [15], [16], [17]. Ceci est en particulier vrai pour les nanotubes métalliques. Dans le cas d'une grande résistance de contact, c'est à dire plus importante que la résistance quantique ($R_C \gg R_Q = h/2e^2$), le nanotube forme une barrière tunnel avec les électrodes. A basse température on observe les phénomènes de blocage de coulomb, le transport électronique s'effectue électron par électron (voir la partie 1.1.4.2). A haute température, le nanotube présente un comportement de liquide de Luttinger : sa conductance varie comme une fonction puissance avec la température ou la tension appliquée. Dans le cas de contacts électriques parfaits c'est à dire une résistance de contact faible, un nanotube sans défauts présente un comportement balistique. Soit en théorie une résistance de 6.45 k Ω valant la moitié du quantum de résistance. Dans un tel régime le nanotube ne dissipe pas de chaleur, les électrons n'interagissent pas avec le milieu traversé. Cette caractéristique en fait de bons candidats pour les fonctions d'interconnexion dans un circuit. Dans les nanotubes multiparois, il semble que la conduction soit majoritairement assurée par le nanotube externe.

Les défauts dans le réseau structurel d'un nanotube modifient fortement ses propriétés électriques. Quelles sont la nature et la position exactes de ces défauts? Quelles sont leurs relations avec les propriétés de transport. Ce sont des questions auxquelles s'intéresse la communauté scientifique.

1.1.2.3 Dispositifs à base de nanotubes

Les interconnexions La croissance de nanotubes in situ dans le circuit permettrait de les utiliser en tant qu'interconnexions. A de grandes densités de courant (>10⁶ A/cm²) le cuivre, utilisé actuellement dans les interconnexions, diffuse par électromigration. De plus selon les prédictions de l'ITRS [18], la réduction des dimensions provoque une augmentation de sa résistivité. Face à de tels problèmes, les nanotubes font office de bons candidats. Leur densité de courant importante $(10^9 \text{ A/cm}^2 \text{ soit une valeur } 100$ fois plus importante que celle du cuivre) et la possibilité d'un transport balistique sont en effet autant d'atouts. Leur utilisation dans des vias entre deux couches métalliques a été investiguée. Plusieurs méthodes ont été proposées. Ainsi Li et al. [19] font d'abord croître des nanotubes sur la surface à partir de particules catalytiques, puis ils recouvrent le substrat avec du SiO_2 et la couche de métal 2. Kreupl et al. [20] déposent d'abord une couche de SiO_2 et gravent des puits dans cet isolant. Les particules catalytiques y sont déposées puis les nanotubes peuvent croitre. Une autre méthode, proposée par Chen et al. [21], consiste à faire croître verticalement des nanotubes entre deux couches métalliques sur une surface de silicium (figure 1.5). Cependant, l'application principale envisagée pour les nanotubes reste leur utilisation dans des transistors à effet de champ.



FIG. 1.5 – Image MEB de nanotubes synthétisés directement entre deux couches métalliques [21].

10

Les objets nanométriques

Les transistors FET à base de nanotubes Les nanotubes utilisés comme canal de transistors sont surtout des monoparois. Les nanotubes monoparois semiconducteurs présentent un comportement transistor à température ambiante : leur conductance peut en effet varier de plusieurs ordres de grandeur sous l'effet d'une tension de grille.



FIG. 1.6 - Transistor CNT, image au MEB (gauche), à l'AFM (droite) [22].

La fabrication des premiers transistors à nanotube s'effectuait de la façon suivante : Les électrodes étaient d'abord gravées sur le substrat, puis les nanotubes solubilisés en solution dispersées sur la surface. Ensuite à l'aide généralement d'une pointe AFM, ils étaient correctement choisis et positionnés [23], [24]. Une des dernières géométries proposée est une structure transistor double grille [25]. Les nanotubes croissent entre des plots de palladium sur un substrat dopé p+ surmonté d'une couche d'oxyde qui servira de back gate. Les plots de palladium seront les électrodes de source et de drain. Après dépôt d'un isolant de grille une top gate est déposée sur le nanotube. Des fonctions logiques à base de nanotubes de carbone ont été implémentées telles que des portes NOR, OR, NAND, des mémoires RAM [24], [26], des portes inverseuses [23]. Ces réalisations sont cependant limitées par les problèmes suivants :

Les transistors utilisant un nanotube comme canal sont toujours de type p par défaut. L'explication la plus probable de ce problème met en jeu une réaction de l'oxygène de l'air avec les contacts métal-nanotube, ces molécules contrôlant ainsi l'injection des porteurs de charge dans le dispositif [10]. Pour obtenir des transistors de type n on peut doper chimiquement le nanotube ou procéder à un recuit du transistor dans un environnement vidé d'air (figure 1.7) [23]. Il est également possible d'utiliser un champ de grille [24]. Cependant quelque soit la méthode utilisée cette transformation n'est pas définitive, une fois exposé à l'air le transistor redevient rapidement de type n (quelques minutes). En encapsulant le transistor avec un film isolant il serait toutefois possible de conserver cette propriété [23].



FIG. 1.7 - (a) Image AFM d'une porte logique intramoléculaire, un même CNT ayant une partie p et une partie n sert de canal pour deux transistors, la partie non recouverte par du PMMA a été dopée au potassium. (b) Caractéristique obtenue. [10]

Un autre problème majeur est le positionnement des nanotubes à un emplacement précis. Braun et al. proposent de placer les nanotubes par auto assemblage en utilisant des brins d'ADN [27]. L'opération s'effectue sur un wafer de silicium couvert d'oxyde. Un brin d'ADN positionné sur la surface du substrat fournit l'adresse précise. Le nanotube, une fois convenablement fonctionnalisé en solution, s'apparie à ce brin d'ADN. Puis ses extrémités sont contactées par de l'or. Une autre méthode de placement des nanotubes utilise une monocouche d'APTS déposée sur la surface. Un motif est gravé dans la monocouche par lithographie électronique [28], [29] puis le wafer est plongé dans une solution organique de nanotubes de carbone. Ces derniers iront se placer sur les zones d'APTS par interaction électrostatique. Ces méthodes ne sont pas envisageables pour une intégration dans un circuit complexe. Cependant cette intégration ne semble pas impossible. En effet en plaçant directement les particules catalytiques dans le circuit, Javey et al parviennent à faire croître les nanotubes par CVD aux sites désirés [25]. Ils réalisent ainsi un décodeur mixte transistor à nanotube/MOS (figure 1.8).



FIG. 1.8 - (a) Schéma d'un décodeur CNT fabriqué par Javey et al. Les nanotubes croissent dans le circuit. (b) Image au MEB d'un CNT entre deux électrodes. [25]

Afin d'obtenir de meilleures caractéristiques électroniques dans les transistors, les contacts électrodes/nanotubes doivent être améliorés. Les caractéristiques électroniques des transistors à nanotube sont dominées par les barrières schottky aux interfaces électrode métallique/nanotube [30]. En déposant des molécules de TFA sur l'interface électrode/nanotube Auvrey et al. améliorent les propriétés électroniques de leur dispositif. Ainsi d'une pente sous seuil d'environ 1600 mV/dec, ils passent à une valeur d'environ 360 mV/dec [31]. Mais l'obtention d'un comportement balistique au sein d'un transistor à nanotube nécessite de meilleurs contacts. Pour réduire cette barrière Javey et al. proposent l'utilisation d'électrodes en palladium (figure 1.6) [22]. Leur dispositif présente un comportement balistique avec une résistance à l'état ouvert de 13 k Ω et un ratio ${\rm I}_{on}/{\rm I}_{off} >$ 10⁶ pour ${\rm V}_{ds}{=}0{,}3$ V. La pente sous seuil est de 170 mV/decade [22]. Cependant la conduction est bipolaire ce qui entraine un fort courant sous le seuil. En utilisant une back gate [11] ou en dopant chimiquement les extrémités du nanotube de carbone [31] une conduction unipolaire est obtenue. Ils obtiennent une pente sous seuil d'environ 80 mV/decade proche de la limite théorique de 60 mV/decade. Cependant les autres caractéristiques sont moins bonnes : un ratio I_{on}/I_{off} de 10⁴ et une résistance à l'état ouvert de $64.5 \text{ k}\Omega$.

On peut noter que la structure en nanotube n'est pas spécifique au carbone. On peut réaliser des nanotubes avec des dichalcogenides MX_2 (M = W, Mo; X = S, Se) [32], ou des molécules de Nitrure de Bore BN [33]. Cependant, du fait de leurs propriétés inhabituelles, les nanotubes de carbone promettent de grandes possibilités en termes d'applications (tableau 1.2).

	Vdd (volt)	Courant d'attaque (µA/µm)	Transconductance (μS/μm)	Pente sous seuil (mV/dec)	Temps de commutation (ps)	Courant de fuite (µA/µm)	Épaisseur d'oxyde équivalente Tox (nm)
ITRS année 2016	0,4	1 500	1 000	70	0,15	10	0,4-0,5
CNT-FET	0,4	2 500	15 000	65	0,08	2,5	1

TAB. 1.2 – A géométrie équivalente les transistors à base de nanotubes présentent de meilleures caractéristiques que les transistors MOSFET prévus en 2016 par l'ITRS, Source INFINEON [34], [35].

Ce potentiel ne pourra cependant être exploité que si des réponses sont trouvées aux nombreux problèmes évoqués dans cette section. Comment faire croître des nanotubes sans défauts avec un meilleur rendement ? Comment contrôler leur chiralité et leur diamètre pendant la croissance ? Comment intégrer des nanotubes individuels dans des structures adressables pour l'étude de leurs propriétés électriques ? Du point de vue de leur comportement électrique : sous quelles conditions un nanotube a-t'il un comportement balistique ? Quels sont les conséquences des défauts structurels ? La compréhension des propriétés des nanotubes et des procédés de synthèse sont encore des challenges.

1.1.3 Les nanofils

Les nanofils sont une alternative aux nanotubes de carbone. En effet leurs procédés de synthèse, ainsi que leurs propriétés électroniques sont mieux maîtrisés. La possibilité de réaliser des nanofils dans des matériaux semiconducteurs largement utilisés dans la microélectronique est également un avantage non négligeable.

1.1.3.1 Procédés de synthèse et propriétés électriques

Procédés de synthèse La principale technique de fabrication des nanofils est la croissance Vapor-Liquid-Solid (VLS). Elle s'effectue à partir d'une particule germe généralement métallique (or ou fer). Ces particules sont soit déposées sur la surface en utilisant un microscope à force atomique, ou créées in situ par lithographie électronique, de façon à faire croître les fils à des sites spécifiques. Lors de la croissance VLS, le matériau source en phase vapeur arrive sur l'échantillon, il est absorbé par la particule métallique (qui est à l'état liquide) et déposé sous forme solide à l'interface liquide-solide. Typiquement, la particule métallique est poussée vers le haut par la croissance des nanofils (figure 1.9(a)). On obtient finalement un nanofil avec une balle métallique à son extrémité, dont le diamètre est contrôlé par la taille de la particule (figure 1.9(b)) [36].



FIG. 1.9 - (a) 1-La particule métallique est sous forme liquide, le silicium sous forme gazeuse se dissout dans cette goutte. 2-La croissance commence quand le liquide est saturé en silicium. Sous condition de la présence de silicium gazeux la croissance continue tant que la particule est à l'état liquide [37]. (b) Image de nanofils de phosphure d'indium InP prise au MEB [36].

Les nanofils peuvent également croître par électrodéposition dans les pores d'un oxyde d'aluminium anodique (AAO : Anodic Aluminium Oxyde) servant de gabarit (figure 1.10(a)) [38], [39]. Cet oxyde appelé aussi "membrane template" est préparé par un procédé d'anodisation d'un plan d'oxyde d'aluminium. Ce qui permet d'obtenir des pores de diamètre 20 à 50 nm. Puis un fin film d'or (120-140 nm) est évaporé sous l'AAO pour servir d'électrode de travail. La synthèse s'effectue en solution sous courant électrique. Une fois les nanofils synthétisés la membrane peut être enlevée (figure 1.10(b)).



FIG. 1.10 - (a) Images au MEB. Vues du dessus de la surface poreuse [38]. (b) Image au microscope électronique à balayage de nanofils après la dissolution de la membrane AAO [39].

Parmi les méthodes répertoriées on compte celle par épitaxie par jets chimiques (CBE : Chemical Beam Epitaxy) élaborée par Poole et son équipe [40]. Elle permet de faire croître des nanofils à des sites déterminés et dans des directions voulues. Dans leur expérience un wafer de phosphure d'indium InP est recouvert de SiO₂, des fenêtres de largeur 40-100nm sont ensuite ouvertes par lithographie électronique. Puis, dans un environnement adéquat, la croissance des fils s'opère à ces sites. Les fils croissent dans des directions privilégiées hors du plan du substrat (figure 1.11). Ils sont de diamètre 40 nm et de longueur environ 600 nm.



FIG. 1.11 – Image MEB d'un nanofil croissant à travers un masque de SiO₂ [40].

Propriétés électriques Du point de vue théorique, le transport dans les nanofils les plus larges semble susceptible d'être décrit par la même physique que les matériaux macroscopiques. Bien que les effets de la réduction de taille sur les propriétés de transport ne sont pas encore bien évalués, il a déjà été observé que des molécules greffées à la surface du nanofil modifient les propriétés de transport de celui-ci [41], [42]. Des nanofils possédant des propriétés électroniques similaires à celles du matériau macroscopique sont prometteurs pour la réalisation de nano dispositifs basée sur la bonne connaissance de leurs équivalents macroscopiques.

Cependant, en dessous d'un diamètre critique les nanofils peuvent présenter des comportements quantiques. Pour les nanofils en silicium ces effets deviendraient significatifs à température ambiante pour un diamètre inférieur à environ 1 nm. En utilisant des matériaux ayant une masse effective des porteurs plus faible, ce diamètre critique est augmenté, facilitant ainsi l'étude des effets quantiques qui apparaissent à cette échelle. Pour les nanofils de bismuth, par exemple, les effets quantiques apparaissent pour des diamètres inférieurs à 50 nm [43]. Il a été montré qu'à cette échelle la variation de la résistance avec la température est complètement différente de celle observée dans le matériau macroscopique [44]. Un autre phénomène quantique étudié peut être le transport balistique. Ces comportements électriques inédits par rapport aux matériaux macroscopiques pourraient se révéler intéressants dans des dispositifs électroniques.

1.1.3.2 Dispositifs à base de nanofils

Une fois les nanofils synthétisés, la réalisation de dispositifs électroniques nécessite des méthodes d'assemblage. On peut utiliser la méthode Langmuir-Blodgett [45] (voir partie 1.1.4.1), ou des canaux microfluidiques [46] (voir partie 1.2.2.1). Le nanofil peutêtre utilisé en tant que canal conducteur dans des transistors. Wang et al. réalisent un transistor à nanofil à base de germanium [47]. Le dispositif a pour performances un ratio du courant I_{on} / I_{off} de 10³, une résistance de 500 k Ω à l'état ouvert et une pente sous seuil de 300 mV/decade. La transconductance dI_{ds} /dV_{gs} vaut 0,21 μ S. La valeur normalisée est d'environ 10,5 μ S/ μ m pour un dispositif utilisant le substrat pour grille.

Une fonctionnalisation du nanofil par des molécules permet de modifier ses propriétés électroniques [41], [42]. Ceci apporte une fonctionnalité supplémentaire par rapport aux dispositifs plus "macroscopiques". Ainsi Cui et al. fabriquent un transistor à nanofil en silicium et améliorent les performances du dispositif en utilisant des molécules pour passiver les défauts de l'oxyde qui recouvre le nanofil (figure 1.12) [42]. Le tableau 1.3 compare les caractéristiques obtenues sur ces transistors avec celles des MOSFET actuels .



FIG. 1.12 – (a) Schéma d'un transistor à nanofils. En haut image au microscope électronique à transmission d'un nanofil de 5 nm de diamètre. (b) Schéma montrant la passivation des défauts de l'oxyde de silicium [42].

16

Les objets nanométriques

	Trans			
		Valeurs		
	Valeurs	ramenées aux	en silicium	
	mesurées	dimensions de	planaire	
		l'état de l'art		
Longueur du canal (nm)	800-2000	50	50	
lon (μΑ/μm)	50 - 200	2000-5600	650	
loff (nA/μm)	2 – 50	4 – 45	9	
Pente sous seuil (mV/decade)	174-609	60	70	
Transconductance (µS/µm)	17 – 100	2700 – 7500	650	

TAB. 1.3 – Comparaison entre des performances des dispositifs à nanofil de silicium fonctionnalisés par des molécules et des dispositifs MOSFET [42].

Au cours de la synthèse d'un nanofil, il est possible de le doper ou de varier les matériaux dont il est composé. Cette particularité permet l'intégration d'un dispositif électronique dans un seul nanofil. Le nanofil peut être composé de plusieurs tranches de matériaux différents : des jonctions pn dans un seul nanofil ont par exemple été réalisées avec un tel procédé [48]. Le nanofil peut également être composé de plusieurs couches coaxiales. Avec une telle structure Lauhon et al. réalisent un transistor dans un seul nanofil. L'axe du nanofil est du silicium dopé p, puis se succèdent une couche concentrique de germanium intrinsèque, une couche d'isolant SiO₂, et enfin une couche de germanium dopé p (figure 1.13(a)) [49]. Le germanium intrinsèque est la couche active de ce transistor. L'électrode de grille est déposée sur la couche de germanium dopé p externe et les électrodes de source et drain sont déposées sur la couche de germanium intrinsèque après gravure du nanofil à ses deux extrémités (figure 1.13(b)). Ce dispositif présente une transconductance de 1500 nS.



FIG. 1.13 - (a) Les valeurs sont en nanomètre. Le nanofil est composé d'un axe en silicium dopé p, d'une couche de germanium non dopé, une couche d'oxyde de silicium, et une couche de germanium dopé. (b) Vue d'ensemble du transistor. Les électrodes de drain et source sont contactées à la couche de germanium intrinsèque. L'électrode de grille est évaporée sur la couche de germanium dopé p. [49]

Cependant, la géométrie la plus prometteuse consiste en des croisements de nanofils dopés p et n. Une jonction pn peut être réalisée en croisant un nanofil de type n et un nanofil de type p [50]. Ces jonctions présentent une tension de seuil de 1V. Des transistors à effet de champ ont également été réalisés en utilisant une géométrie identique (figure 1.14). Le nanofil servant d'électrode de grille est alors recouvert d'une couche d'oxyde d'épaisseur plus importante. Les dispositifs réalisés présentent une transconductance typique de 280 nS. Les performances sont moindres que celles des dispositifs présentés précédemment, mais nous verrons dans le paragraphe 1.2.2.1 que ces croisement de nanofils de type p et n permettent la réalisation de fonctions logiques (OR, AND, ...).



FIG. 1.14 – Caractéristiques I_{ds} - V_{ds} pour des tensions de grille de 0, 1, 2 et 3V. En insert en haut à gauche : les courbes représentent le courant I_{ds} en fonction de la tension V_{gs} pour $V_{ds} = 1V$. La courbe rouge labellisée par des triangles est acquise quand l'électrode de grille est assurée par le substrat. La transconductance pour ce dispositif est alors de 80 nS. La courbe bleue labellisée par des points est acquise quand l'électrode de grille est assurée est de 280 nS. En insert en bas à droite : schéma du transistor à nanofil [50].

Par rapport aux nanotubes, les nanofils ont l'avantage d'être compatibles avec les dispositifs actuels en ce qu'ils peuvent être fabriqués dans des matériaux semiconducteurs largement utilisés dans l'industrie. En ce qui concerne la conduction électronique, les contacts métal/nanofil ne sont pas aussi contraignants que dans les dispositifs à base de nanotubes de carbone. Toutefois le comportement balistique qui est très intéressant en termes d'application n'a lieu qu'à très basse température [43]. Ce qui est un désavantage par rapport aux nanotubes de carbone où ce comportement est observé à température ambiante.

En général les transistors à nanotubes présentent des performances supérieures à celles des dispositifs à nanofils. Cependant la possibilité de moduler la composition du nanofil permet de réaliser un dispositif dans un seul nanofil, voir pourquoi pas une fonction logique. Une telle fonctionnalité est plus difficile à obtenir dans un nanotube. Les effets quantiques dus à la taille peuvent générer de nouveaux phénomènes absents des matériaux macroscopiques qui pourraient améliorer les performances ou amener de nouvelles

18

fonctionnalités. Ces effets sont principalement étudiés dans des nanofils de bismuth. Pour une revue complète sur les nanofils on peut consulter le document rédigé par Dresselhaus [44].

1.1.4 Les objets moléculaires

En descendant l'échelle des dimensions on arrive à l'utilisation de molécules pour réaliser du calcul. Le gain en densité ultime apporté par les molécules est un argument pour l'investigation de dispositifs réalisés avec des molécules. On distingue deux approches d'investigation. D'une part on cherche à synthétiser des molécules dont il a été prouvé théoriquement leur capacité à implémenter une fonction électronique. D'autre part on cherche à transférer à l'état solide des molécules dont les propriétés sont bien connues en solution. En termes de structure, les propositions évoquées dans la littérature envisagent soit l'utilisation de la molécule unique, soit l'utilisation d'une ou plusieurs monocouches de molécules.

1.1.4.1 Les modes d'utilisation des molécules

Le bloc moléculaire Les propriétés électroniques d'une molécule peuvent être investiguées dans des jonctions cassées [51], [52]. Une jonction cassée est réalisée à partir d'une barre métallique affinée en son milieu. Celle-ci subit une force jusqu'à ce qu'elle se casse formant alors deux électrodes espacées généralement de quelques nanomètres (figure 1.15). La jonction est alors plongée dans une solution de molécules en suspension permettant le dépôt d'une molécule dans l'espace inter électrode.

La conductivité d'une molécule peut également être étudiée en utilisant la pointe d'un microscope à effet tunnel (STM : Scanning Tunneling Microscope). La molécule est déposée sur une surface au sein d'une monocouche de molécules isolantes puis la pointe du microscope est amenée sur la molécule [53], [54], [55].



FIG. 1.15 – (a) Image MEB d'une jonction cassée [52]. (b) Schéma d'une mesure par microscopie à effet tunnel. Les molécules sont insérées dans une monocouche isolante et adressées par la pointe du STM [53].

Les couches monomoléculaires Les molécules organiques en solution peuvent se déposer sur une surface formant alors une couche de l'épaisseur d'une molécule. Ce dépôt s'effectue en solution sur une durée qui varie de quelques minutes à quelques jours. Il existe deux types de couches monomoléculaires : les monocouches auto-assemblées et les films Langmuir-Blodgett.

Pour former une monocouche auto-assemblée (SAM : Self-Assembled Monolayer), les molécules organiques doivent avoir une structure en trois parties (figure 1.16). D'abord la tête réactive assure la réaction chimique de la molécule avec le substrat (chimisorption), elle est choisie en fonction de ce dernier. Les deux familles principales de groupement moléculaire utilisées sont les organosilanes pour les surfaces hydroxylées (c'est à dire riches en groupement OH) telles que les oxydes, SiO₂ par exemple, et les organothiols pour les métaux nobles comme l'or. Ensuite le corps, ou backbone, détermine la fonction électronique de la molécule. Ses interactions avec les molécules voisines sont faibles. Elles mettent en jeu la force de Van der Waals dans le cas des chaînes alkyles ou l'interaction électrostatique dans le cas des groupes polaires. Enfin le groupe terminal peut avoir une fonctionnalité chimique en vue de futures réactions sur ces monocouches.



FIG. 1.16 – Schéma d'une monocouche auto-assemblée

On distingue les monocouches suivant la tête réactive et le substrat sur lequel est déposé la SAM. Les dépôts de SAM sur de l'or effectués à l'aide de groupements thiol ont été largement étudiés et sont bien maîtrisés [56], [57], [58], tandis que les SAM sur silicium ou oxyde de silicium sont plus difficiles à contrôler. En conséquence pour ce dernier type de monocouche, les résultats varient d'un laboratoire à l'autre [59], [60], [61], [62]. Mise à part une application purement électronique, l'utilisation de monocouche est aussi envisagée en tant que moyen pour obtenir des motifs sur un substrat [63]. Grace à ceux-ci des nanotubes ou des nanofils peuvent se déposer sur une surface à des zones prédéterminées.

La méthode Langmuir-Blodgett est un autre procédé pour la formation de couches monomoléculaires [64], [65], [66]. Elle se déroule à l'aide d'une cuve remplie d'eau pure (figure 1.17). Le substrat sur lequel sera effectué le dépôt est d'abord plongé dans la cuve. Les molécules solubilisées dans un solvant sont ensuite versées sur l'eau. Ce sont des molécules amphiphiles c'est-à-dire possédant un groupement hydrophile et un groupement hydrophobe. Une fois le solvant évaporé, les molécules sont uniformément réparties à l'interface air/eau, y formant une couche d'épaisseur monomoléculaire. La

20

Les objets nanométriques

densité de la monocouche dépendra de la compression exercée par une barre mobile posée à la surface de l'eau se déplaçant latéralement. En retirant le substrat la monocouche de molécules se dépose progressivement.



FIG. 1.17 - Schéma d'un dépôt par un procédé Langmuir-Blodgett. Le substrat est progressivement retiré de l'eau afin que la monocouche se dépose à sa surface. La barre mobile permet de contrôler la densité du film.

1.1.4.2 Les dispositifs moléculaires

Des molécules réalisant différentes fonctions calculatoires laissent entrevoir l'opportunité de réaliser un circuit intégralement en molécules.

Les fils moléculaires Les oligomères de molécules π conjuguées sont envisagées pour la réalisation de fils moléculaires [51]. Leur conductivité est étudiée dans des jonctions cassées. Ainsi Kergueris et al. obtiennent les caractéristiques courant-tension indiquées en figure 1.18. La caractéristique de conduction présente des pas et une évolution croissante. Elle n'est pas stable au cours du temps. Les deux courbes les plus fréquemment observées sont représentées sur la figure. La conductivité mesurée peut être améliorée si la molécule active est attachée à l'électrode avec un atome d'or ou de sélénium [67].



FIG. 1.18 – Caractéristiques courant-tension d'une molécule conjuguée dans une jonction cassée. Typiquement la caractéristique est instable. Mais deux allures sont le plus souvent observées : une caractéristique asymétrique (a) ou symétrique (b). Sur les deux courbes la conduction augmente par pas, à partir d'une certaine valeur elle est croissante et à peu près linéaire [68]. Les diodes moléculaires En 1974 Aviram et Ratner proposent un modèle théorique de diode moléculaire [3]. Ils démontrent qu'en théorie une molécule composée d'un groupement donneur d'électrons et d'un groupement accepteur d'électrons reliés entre eux par un pont σ se comporte en diode rectificatrice.

Expérimentalement, le meilleur comportement rectificateur a été obtenu avec une molécule de γ -(n-hexadecyl) quinolinium tricyanoquinodimethanide C₁₆H₃₃Q-3CNQ (figure 1.19(a)) [64], [65], [66], [69]. Cette molécule utilise un groupement π à la place du groupement σ du modèle théorique. Le comportement rectificateur est étudié dans une configuration métal/monocouche(s)/métal. Un schéma du dispositif est présenté en figure 1.19(b).



FIG. 1.19 – (a) Molécule de γ - (n-hexadecyl) quinolinium tricyanoquinodimethanide, C₁₆H₃₃Q-3CNQ [69]. (b) Schéma d'une diode moléculaire réalisée avec une multicouche Langmuir-Blodgett sur un substrat en verre, quartz ou silicium. Le dispositif peut être constitué d'une seule monocouche [69]. Les pointes sont en alliage de gallium et d'indium.

La monocouche est d'abord déposée sur une électrode d'aluminium par une méthode Langmuir-Blodgett, puis des pads d'aluminium sont déposés sur la structure par évaporation. Le dispositif peut être réalisé avec une ou plusieurs monocouches. Avec une telle structure Metzger et al. obtiennent des dispositifs présentant un ratio de rectification maximum (défini par le rapport (courant à V_0)/(courant à - V_0)) de 27,5 pour une tension de seuil de 2,2 V (figure 1.20).



FIG. 1.20 – Caractéristique courant-tension d'un dispositif électrode d'or/monocouche de $C_{16}H_{33}Q$ -3CNQ/électrode d'or. Le pad d'électrode a une surface de 0,283 mm^2 . Le ratio de rectification défini par le rapport (courant à V_0)/(courant à - V_0) vaut 27,5. L'effet rectificateur est perdu au bout de cinq cycles [69].
Les objets nanométriques

Plus proche d'une intégration dans des circuits classiques, Lenfant et al. réalisent un dispositif sur du silicium dégénéré. Ils obtiennent un ratio de rectification du courant de 37 pour une tension de seuil comprise entre -0,3 V et -0,9 V. Cette molécule est cependant difficile à synthétiser (rendement 59%) et l'effet rectificateur se perd au bout de quelques cycles de mesures [70].

Des SAM de molécules à centre redox peuvent implémenter des diodes à résistance différentielle négative (NDR : Negative Differential Resistance) [56], [57]. Ce comportement est principalement obtenu dans un type de jonction cassée appelée structure à nanopore (figure 1.21) [56]. Chen et ses collègues obtiennent un comportement NDR avec un ratio on/off d'environ 10^3 à une température de 60 K (figure 1.22) [56]. Contrairement aux diodes rectificatrices moléculaires cet effet de résistance différentielle négative s'observe à basse température, il est perdu ou amoindri à température ambiante. Cependant il est reproductible d'un cycle à l'autre.



FIG. 1.21 - (a) Coupe d'une structure à nanopore. Elle est constituée d'un évidement formé dans une membrane de nitrure de silicium [56]. (b) Schéma de la partie active de la structure à nanopore avec des molécules 2'-amino-4-ethynylphenyl-4'- ethynylphenyl-5'-nitro-1-benzenethiolate entre les deux électrodes d'or [56].



FIG. 1.22 – Caractéristique I(V) d'une monocouche de molécules contenant des centres redox nitro-amine sur de l'or à une température de 60 K [57].

Les mémoires moléculaires Sous l'effet d'une excitation électrique, certaines molécules comme la caténane ou la rotaxane peuvent changer de conformation. Si chaque conformation de la molécule est associée à un niveau de conductivité différent, cet effet est utilisable dans des mémoires ou des interrupteurs moléculaires. La caténane et la rotaxane sont constituées de deux parties, l'une pouvant se déplacer autour ou le long de l'autre partie. Par exemple la molécule de rotaxane peut être représentée schématiquement par une barre insérée dans un anneau. Ce dernier peut coulisser le long de la barre. Sa position à chaque extrémité définit un état de conductivité (figure 1.23).



FIG. 1.23 – schéma représentant les deux états de la molécule de rotaxane.

Les propriétés de ces molécules sont bien connues en solution mais la grande difficulté consiste à préserver celles-ci lors du passage à l'état solide [71]. Cependant Mendes et al. ont observé ce comportement bistable [72]. Ils réalisent des dispositifs composés d'une monocouche de rotaxane ou de caténane prise en sandwich entre du silicium dégénéré et une électrode titane/aluminium (figure 1.24(a)). Leurs acquisitions électriques mettent en évidence le comportement bistable de la molécule de rotaxane (figure 1.24(b)). Le dispositif passe d'un état de basse conductivité à un état de haute conductivité pour une tension appliquée de 2 V. Il revient à son état initial en appliquant une tension de -2 V. Cet effet bistable est sauvegardé sur au moins trente-cinq cycles.



FIG. 1.24 - (a) Le dispositif mémoire à base de rotaxane est composé d'une couche de molécules de rotaxane sur du silicium dégénéré déposée par la méthode Langmuir-Blodgett. Une électrode Aluminium/titane est évaporée sur la monocouche [72]. (b) En trait plein nous avons la courbe d'un dispositif de rotaxane. On observe le passage d'un état de basse conductivité à un état de haute conductivité pour une tension de 2 V. L'état de basse conductivité est retrouvé pour une tension de -2 V. En pointillé nous avons la courbe obtenue pour un dispositif réalisé avec uniquement la partie fixe de la molécule de rotaxane. L'effet bistable est bien du à l'anneau de la molécule de rotaxane.

les dispositifs SET L'étude électrique d'une molécule permet surtout d'investiguer des effets mésoscopiques comme le blocage de coulomb [52], [54] ou l'effet Kondo [73], [74], [75]. Le terme mésoscopique désigne le régime intermédiaire entre le monde microscopique (les atomes et les molécules) et le macroscopique.

Les objets nanométriques

Généralement la résistance électrique des matériaux diminue avec une baisse de la température. Cependant, pour des matériaux de taille mésoscopique, en dessous d'une température appelée température Kondo, cette résistance augmente. C'est ce phénomène que l'on désigne par le terme "effet Kondo".

Les dispositifs SET (Single Electron Tunneling) exploitent le phénomène de blocage de Coulomb qui apparait dans les structures de taille approchant la dizaine de nanomètres. Dans un tel phénomène l'état de charge d'une particule peut être contrôlé électron par électron. Un électron est rajouté à la particule chaque fois que la tension appliquée est incrémentée d'une valeur fixe $U = e^2/2C$ où C est la capacité induite sur la particule métallique. Le transistor SET est un dispositif conçu à partir de cet effet. Il est modélisé par deux barrières tunnel délimitant une particule métallique appelée île de Coulomb (figure 1.25). Dans ce dispositif, tant que la tension drain-source V_{ds} est inférieure à une tension de seuil V_T , le courant est nul. C'est le phénomène de blocage de Coulomb. Au delà de ce seuil le courant du dispositif a une allure quasi ohmique (figure 1.26(a)), ou présente une allure en escalier de Coulomb si on est à suffisamment basse température. Cette tension de seuil V_T est une fonction périodique de la charge induite par l'électrode de grille sur l'île de Coulomb (figure 1.26(b)). La particularité des transistors SET et d'ailleurs de tous ces effets mésoscopiques réside dans le fait qu'ils peuvent avoir une variété d'implantation matérielle. Ainsi ces effets ont été observés dans des nanotubes [16], [15], et des nanofils [76], [77], [78].



FIG. 1.26 – (a) Caractéristique I_{ds} - V_{ds} d'un transistor SET. L'allure de la caractéristique dépend de l'état de charge de l'île de coulomb. (b) Variation périodique de la tension de seuil V_T en fonction de l'état de charge de l'île de Coulomb.

Des effets de résistance différentielle négative, de diode rectificatrice sont observés, mais l'application la plus prometteuse pour les molécules est leur utilisation en monocouche pour la réalisation de dispositifs mémoires. Cependant même avec une opération à température ambiante se pose la question de l'intégration d'un tel dispositif. Comment intégrer cette fonctionnalité moléculaire à un environnement de dimensions macroscopiques ? Pour résoudre en partie ce problème, une solution serait de réaliser l'intégralité du circuit dans une molécule. C'est ce que proposent Stadler et al.[79]. Ils réalisent l'étude théorique de l'implantation d'un demi-additionneur dans une seule molécule. Sur ces dispositifs moléculaires on peut consulter la revue rédigée par Vuillaume [80].

1.1.5 Conclusion

Nous avons vu un aperçu des différents blocs de base relevant des nanotechnologies. Leurs procédés de fabrication et les différents dispositifs dans lesquels ils peuvent être utilisés ont été présentés.

D'abord les nanotubes de carbone sont susceptibles d'avoir un comportement balistique à température ambiante. Ils montrent alors une dissipation de puissance très faible. Ceci incite à les envisager en tant qu'interconnexions ou dans des transistors à faible consommation.

Ensuite la réalisation de dispositifs à partir de croisements de nanofils est simple à mettre en œuvre, et permet d'obtenir des dispositifs présentant des performances compétitives par rapport aux dispositifs MOS.

Finalement les monocouches de molécules sont de bons candidats pour la mise en œuvre de dispositifs mémoires.

Ces blocs de base permettent d'envisager une densité d'intégration importante. Mais parvenir à les positionner sur un site prédéterminé est un challenge. Les assemblages de nanofils par exemple ne permettent pas de placement avec une précision fine. Des perspectives d'amélioration des méthodes d'assemblage sont plausibles, toutefois la précision de placement atteinte sera vraisemblablement plus faible que celle obtenue par lithographie dans l'approche "top-down" actuelle. De plus le rendement de fabrication des objets nanométriques est faible. On peut également s'attendre à ce que cette propriété perdure. Enfin toutes les caractéristiques obtenues sur ces dispositifs présentent une composante de bruit non négligeable comme constaté sur le dispositif fil moléculaire présenté précédemment. La prise en compte de ces considérations entraine des méthodologies de conception d'architecture de calcul différentes des approches classiques.

1.2 Architectures pour les nanotechnologies

1.2.1 Introduction

Nous abordons les principales propositions architecturales pour une utilisation des nanotechnologies dans une structure de calcul. Nous remarquerons d'une part que dans leur

26

grande majorité ces propositions ont en commun d'être basées sur la structure crossbar. D'autre part elles sont principalement des adaptations d'architectures de calcul usuelles en traitant des problématiques spécifiques aux nanotechnologies. Elles prennent notamment en compte la tolérance aux défauts de fabrication dus à l'incertitude de placement, mais également la problématique de l'adressage de ces dispositifs. Nous insisterons ensuite sur deux propositions architecturales originales.

1.2.2 Le crossbar : un réseau à deux dimensions d'objets nanométriques

Le réseau croisé de nanofils ou crossbar est le principal mode d'organisation proposé pour l'utilisation des objets nanométriques. Des portes logiques expérimentales sont réalisées avec une telle structure. La reconfigurabilité est une des caractéristiques essentielles de ces propositions architecturales.

1.2.2.1 Des fonctions logiques avec un crossbar de nanofils

Des crossbars de nanofils sont réalisés sur une surface par Huang et al. en utilisant un procédé microfluidique [46]. Un matériau PDMS est d'abord déposé sur le substrat (figure 1.27). Après la gravure d'un canal dans ce matériau, un flux à débit constant d'une solution de nanofils en suspension est réalisé dans celui-ci pendant une durée donnée. Les nanofils s'organisent alors parallèlement à la direction du flux. En répétant ce procédé de dépôt dans un canal gravé dans une autre direction, il est possible de superposer deux réseaux parallèles de nanofils. Les intersections de ce crossbar ainsi formé, peuvent alors être les composants actifs d'une fonction logique.



FIG. 1.27 – Schéma d'un assemblage de nanofils par un procédé microfluidique. A - Un moule PDMS (composé organique) déposé à la surface forme un canal dans lequel un flux d'une solution de nanofils va être réalisé. Les nanofils vont s'organiser parallèlement à la direction du canal. B - En procédant par itération de ce procédé des réseaux croisés ou crossbars de nanofils peuvent être formés [46].

Ainsi Huang et al. réalisent expérimentalement des portes logiques à base de tels réseaux de nanofils [81]. En superposant un réseau parallèle de nanofils de type n à un réseau parallèle de type p, une matrice de dispositifs électroniques est obtenue. Suivant l'épaisseur d'oxyde recouvrant des nanofils perpendiculaires, leur intersection peut réaliser une diode p-n ou un transistor FET de type p appelé "crossed semiconductor nanowire Field-Effect Transistor" (cNW-FET). Avec un tel procédé des portes logiques Or et Nor sont fabriquées (figure 1.28).



FIG. 1.28 – (a) Image MEB (échelle 1 μ m), et schémas d'une porte logique Or réalisée avec deux diodes p-n à nanofils. (b) Tension de sortie en fonction des quatre niveaux logiques possibles : (0,0) ; (0,1) ; (1,0) ; (1,1), où l'entrée logique 0 est 0 V et l'entrée logique 1 est 5 V.

1.2.2.2 Propositions architecturales

La faisabilité expérimentale d'une structure en crossbar incite à des propositions architecturales utilisant des structures de ce type. Ces propositions se basent surtout sur une logique à diode réalisée avec des diodes moléculaires auto assemblées aux intersections des nanofils. La bistabilité de ces dispositifs moléculaires permet d'obtenir des propriétés de reconfigurabilité au niveau architectural. Les circuits proposés fonctionnent en collaboration avec un circuit CMOS qui fournit notamment le gain en tension indispensable et des fonctionnalités supplémentaires.

Ainsi Dehon propose un circuit reconfigurable et s'intéresse en particulier à la restauration du signal et à l'adressage des dispositifs moléculaires [82], [83]. La matrice se compose d'un bloc qui réalise une logique à diode, et de deux blocs qui restaurent les signaux de sortie de la matrice logique (figure 1.29). Ils obtiennent ainsi une sortie inversée et une sortie non inversée restaurées, en utilisant des cNW-FET. Ceux-ci sont adressés par les sorties du bloc logique à l'aide d'un codage stochastique décrit dans la partie 1.2.3.2. De cette façon ils réalisent en même temps une fonction logique et sa fonction complémentaire.

28



FIG. 1.29 - Crossbar Or programmable [83]. Les sorties de la fonction logique Or sont restaurées parles deux crossbars situés à droite de la figure. Le premier d'entre eux envoie un signal inversé au crossbarOr suivant, le second restaure le signal mais ne l'inverse pas. Les électrodes Vpd et Vpu permettentd'isoler le crossbar durant le calcul de la fonction logique.

Goldstein et al. proposent également un circuit reconfigurable moléculaire : la Nanofabric [84]. Ces travaux adressent en particulier la gestion de la tolérance aux fautes dans une telle structure. La Nanofabric est construite sur la répétition d'une structure régulière appelée Nanoblock (figure 1.30).



FIG. 1.30 - (a) Layout de la Nanofabric avec grossissement d'un cluster. (b) Schéma d'un Nanobloc.
La figure 1.30(a) présente le layout de la Nanofabric. Les carrés jaunes et rouges

représentent des Nanoblocks, ils diffèrent entre eux de par la direction de leurs entréessorties. Soit ceux-ci font face sud-est (carrés jaunes), soit ils font face nord-ouest (carrés rouges). Le Nanoblock est constitué de trois composants (figure 1.30(b)). Il comprend d'abord un réseau logique moléculaire (MLA : Molecular Logic Array). Celui-ci est un crossbar de nanofils, aux intersections desquels des diodes moléculaires reconfigurables sont auto assemblées. Des latchs moléculaires, composés de dispositifs RDN (Résistance Différentielle Négative), placés en périphérie du MLA assurent la restauration du signal et l'acheminement du signal d'horloge. Enfin des blocs d'entrées-sorties permettent les connections avec les Nanoblocks voisins. Le circuit est configuré après le processus de fabrication pour réaliser les fonctions logiques voulues.

Likharev et al. proposent également une architecture hybride moléculaire/CMOS, la structure CMOL (CMOS/nanowires/Molecular) [85] qui est envisagée pour l'implantation matérielle d'un réseau de neurones, le crossnet (Distributed Crosspoint Networks) [86]. Dans cette architecture les fonctions neuronales sont réalisées par la couche CMOS, et les synapses par les dispositifs moléculaires SET auto assemblés aux intersections des nanofils (figure 1.31). Les dispositifs SET forment des synapses à trois valeurs $\{-1, 0, 1\}$. Ils ont une approche particulière de la tolérance aux fautes et de l'adressage des dispositifs.



FIG. 1.31 - (a) Structure d'un réseau Crossnet. Les fonctions sommatrices du réseau de neurones sont implantées avec les cellules CMOS (rectangles gris). Les fonctions synaptiques sont réalisées par des dispositifs moléculaires auto assemblés aux intersections des nanofils (points verts). Les lignes rouges et bleues représentent respectivement des axones et des dendrites. Les deux synapses labellisées sont celles qui relient les somas j et k. Les signes sur les sommas désignent les polarités des entrées-sorties [86]. (b) Vue latérale d'un circuit CMOL [87].

Ces architectures servent de cadre à l'étude de problématiques telles que l'adressage micro-nano et la tolérance aux fautes.

1.2.3 L'adressage micro-nano

L'adressage des nanodispositifs à partir de fils micrométriques est une des problématiques majeures des nanotechnologies. Nous pouvons citer une réalisation expérimentale et quelques propositions architecturales qui tentent d'apporter une réponse adaptée.

1.2.3.1 Un décodeur d'adresse expérimental

Lieber et al. proposent une solution de décodeur d'adresse pour l'adressage de matrices de nanofils [88]. Cette solution consiste à traiter chimiquement et localement (à l'aide d'un masque) des intersections de nanofils, permettant ainsi de définir un code d'adressage. Une couche de resist est d'abord déposée sur le crossbar, puis des fenêtres sont ouvertes aux emplacements désirés par lithographie électronique. Les intersections sont ensuite traitées avec une solution aqueuse de tetra-ethylammonium chloride (TEA). Le traitement entraîne une modification des caractéristiques de conductance bien mise en évidence en figure 1.32.



FIG. 1.32 – Caractéristique des cNW-FET après modification chimique [88]. (a) Conductance en fonction de V_g avant (bleu) et après (rouge) traitement avec du TEA. (b) Histogramme de la tension de seuil pour trente cNW-FET avant (bleu) et après (rouge) traitement avec du TEA.

La figure 1.33 présente un décodeur d'adresse 4x4 élaboré avec cette technique [88]. Les intersections situées sur la diagonale ont été chimiquement traitées. Les signaux d'entrées-sorties du décodeur d'adresse démontrent les fonctionnalités d'adressage obtenues avec ce circuit.

Dans ces travaux le code d'adressage est défini par lithographie électronique. Celleci n'est pas applicable aux grandes surfaces pour des raisons de coût. Cependant La lithographie par nanoimprint [89] permettrait de pallier à cela, tout en augmentant considérablement la densité. D'autre part, selon Lieber et al., la passivation de ces structures pourrait améliorer leurs caractéristiques.



FIG. 1.33 - (a) Image MEB d'un décodeur 4x4 cNW-FET réalisé [88]. (b) Monitoring en temps réel des signaux en entrée (bleu) et des sorties correspondantes (rouge) du décodeur. La tension d'alimentation est de 3,5 V et la résistance de charge de 40 M Ω [88].

1.2.3.2 **Propositions architecturales**

DeHon et al. proposent une méthode d'adressage du monde micrométrique vers le monde nanométrique en utilisant des nanofils présentant un codage stochastique [90] (figure 1.34). En modulant le dopage du nanofil le long de son axe, un code d'adressage de celui-ci est défini. A chaque taux de dopage correspond un bit, 0 ou 1. Le nombre de bits positionnés sur le nanofil définit la taille de ce code. Le codage est stochastique car son élaboration ne s'effectue pas de façon "top-down". En effet il est obtenu en choisissant au hasard les nanofils au sein d'un ensemble plus important. Un grand nombre de nanofils sont initialement dispersés en solution. Si le nombre de codes représentés est lui aussi suffisamment grand, en choisissant un groupe de nanofils au hasard l'obtention d'un codage adressant individuellement chaque dispositif est assuré. Ainsi avec un code de taille 1000 la probabilité de choisir dix nanofils présentant chacun un code différent est de 0,9. Les nanofils sont ensuite assemblés par des techniques fluidiques ou par la méthode Langmuir-Blodgett. Le code d'adressage est découvert post-fabrication.



FIG. 1.34 - (a) Décodeur construit avec des nanofils adressables [90]. (b) Nanofil avec son code d'adressage [90].

Si DeHon et al. proposent l'adressage d'une matrice de nanodispositifs à partir de sa périphérie, Likharev, Türel et al. proposent une topologie où les contacts de la couche CMOS avec la matrice de nanofils a lieu au sein de la matrice [85]. En effet l'adressage des croisements de nanofils est réalisé par des pins régulièrement disposés sur la surface. Ces pins sont de deux types : les premiers sont en contact avec les nanofils supérieurs, les seconds avec les nanofils inférieurs. Chaque type de pin est disposé suivant un réseau carré de période $2aF_{CMOS}$. Pour pallier aux incertitudes de placement, Türel et al. proposent de décaler le crossbar de nanofils d'un faible angle α par rapport à ces réseaux de pins (figure 1.35) [87]. Cet angle α a pour valeur $\arctan(F_{nano}/aF_{CMOS}) << 1$, le paramètre *a* étant défini par l'aire de la cellule CMOS $2a^2F_{micro}^2$ desservant chaque pin. Avec cette technique un adressage individuel de chaque dispositif est assuré.



FIG. 1.35 – Schéma représentant le positionnement des nanofils par rapport aux pins de la couche CMOS. Le crossbar de nanofils fait un faible angle α avec le réseau CMOS. Ceci permet de pallier aux incertitudes de placement et d'adresser individuellement chaque nanofil [87].

1.2.4 Gérer la tolérance aux fautes dans un crossbar de nanofils

Les propositions présentées ici pour la gestion de la tolérance aux fautes consistent d'une part en une méthode de test pour une architecture reconfigurable, d'autre part une architecture neuronale dans laquelle la tolérance aux fautes est intrinsèque.

1.2.4.1 Une méthode de test pour localiser les défauts

Dans leurs travaux Mishra et al. proposent une méthode de test pour repérer les défauts au sein de l'architecture reconfigurable Nanofabric [91]. Il s'agit de démontrer une technique permettant d'obtenir une carte fidèle des défauts dans un temps de traitement raisonnable, tout en limitant la surface supplémentaire requise par le circuit de test. Ceci est obtenu en utilisant pour la phase de détection des défauts, les ressources de la Nanofabric qui seront plus tard utilisées comme fonction de calcul. Un circuit CMOS sera initialement utilisé pour tester, puis configurer en circuit testeur une première zone de la Nanofabric. Une fois qu'une région est testée et une carte de ses défauts obtenue, elle peut être configurée en circuit testeur pour les parties voisines. Ainsi la cellule de test se propage sur le circuit par vague. Chaque circuit est un circuit testeur pendant t secondes, il configure et teste le circuit voisin et ainsi de suite (figure 1.36).

FIG. 1.36 – Représentation schématique de la propagation en vague des circuits testeurs. La région noire est testée et configurée en circuit testeur par un testeur extérieur. Puis chaque région teste et configure un voisin ayant une valeur de gris plus faible [91].

La méthode de test se déroule en deux étapes afin de pouvoir gérer la densité de défauts importante liée aux nano dispositifs. Dans la première étape, chaque circuit de test retourne le nombre de composants défectueux dont il est constitué. A chaque composant du circuit testé est alors affectée une valeur numérique liée à la probabilité qu'il soit défectueux. A l'issue de cette première étape tous les composants présentant une forte probabilité ont été labellisés comme suspects, et ne participeront pas à l'étape de détection suivante.

Dans la deuxième étape, les composants labellisés comme non défectueux sont configurés en un second type de circuit testeur. Chaque circuit testeur retourne alors une

Architectures pour les nanotechnologies

réponse positive s'il ne possède pas de défauts ou une réponse négative dans le cas contraire (figure 1.37(a)). Tous les composants des circuits renvoyant une réponse positive sont notés comme non défectueux. En procédant itérativement Goldstein et al. obtiennent un bon repérage des défauts de la Nanofabric (figure 1.37(b)).



FIG. 1.37 - (a) Exemple montrant comment un dispositif défectueux est localisé en utilisant deux configurations de circuit testeur différents au cours de l'étape 2 [91]. (b) Graphiques représentant le taux de recouvrement de composants sans défaut. Les labels indiquent le nombre maximum de défauts que le circuit testeur peut comptabiliser au cours de l'étape 1 [91].

1.2.4.2 Des réseaux de neurones moléculaires

Türel et al. estiment que les architectures neuronales sont les plus adaptées pour tolérer le taux de défauts important présenté par les dispositifs moléculaires. Ils proposent l'architecture de réseau de neurones Crossnet [86], implantée sur la structure CMOL [85] décrite précédemment. Une telle architecture peut-être configurée en un réseau de Hopfield, ou en perceptron et permet une tolérance aux fautes intrinsèque.

Ainsi Türel et al. démontrent qu'un Crossnet configuré en réseau de Hopfield est robuste aux fautes [87]. Ils étudient la tolérance aux fautes d'un crossnet de 3744 neurones. Pourvu que le nombre P de motifs stockés dans le réseau n'est pas trop proche du nombre maximal de motifs mémorisables (Pmax qui dans ce cas est proche de 8), l'architecture présente une bonne tolérance aux fautes. En effet pour P=4, le réseau présente un recouvrement des motifs stockés de 99%, ceci bien que 85% des dispositifs moléculaires soient défectueux (figure 1.38).

Cependant le circuit configuré en perceptron multicouche présente de moins bonnes propriétés de tolérance aux fautes.



FIG. 1.38 – Graphique représentant la fraction de pixels stabilisés dans le mauvais état en fonction de la fraction de dispositifs défectueux du Crossnet. Le réseau implanté est un réseau de Hopfield. Chaque courbe est labéllisée suivant le nombre de motifs stockés dans le réseau correspondant [87]. Les courbes en trait plein sont obtenues avec une théorie analytique, les points proviennent d'une simulation numérique.

1.2.5 Les automates cellulaires quantiques

Les automates cellulaires quantiques (QCA : Quantum Cellular Automata) tiennent une place à part dans l'ensemble de ces propositions architecturales. Ils se posent en alternative à la technologie VLSI CMOS ultime pour la mise en œuvre de portes logiques dans une architecture de type Von Neumann [92], [93], [94]. L'information binaire n'est plus représentée par l'état on/off d'interrupteurs de courant, mais par la configuration des charges dans une cellule.

1.2.5.1 Qu'est ce qu'une cellule QCA?

Proposées en 1993 par Lent et al. [95], les QCA se basent sur une cellule composée de 4 points quantiques. Ces quatre points quantiques sont diamétralement opposés deux à deux. Un point quantique est une structure de taille nanométrique suffisamment petite pour que les phénomènes quantiques y soient prépondérants. Une de ses caractéristiques intéressantes est que la charge qui y est stockée est discrète : le site peut être chargé électron par électron. La cellule contient deux électrons excédentaires qui vont se positionner dans les points quantiques diamétralement opposés de la cellule à cause de la répulsion de Coulomb. Comme le montre la figure 1.39(a), deux configurations sont possibles, chacune pouvant alors correspondre à une valeur 0 ou 1. Les dispositifs QCA sont construits en disposant les cellules les unes à côté des autres en un layout approprié. Le traitement de l'information s'effectue pourvu qu'une cellule ait la capacité de forcer l'état de la cellule qui la suit. Par exemple la figure 1.39(b) présente le schéma

d'un fil QCA où l'information se propage de proche en proche, de cellule en cellule. Si l'état 0 est imposé à la première cellule, la nouvelle valeur du bit va se propager jusqu'à la dernière cellule.



FIG. 1.39 - (a) Schéma de cellules à quatre points quantiques, la répulsion de coulomb impose aux électrons d'occuper les coins opposés de la cellule. (b) Fil QCA

Les fonctions QCA nécessaires à l'utilisation en logique sont le fil (figure 1.39), la porte majorité (figure 1.40(a)), l'inverseur (figure 1.40(b)), le fan-out (où une même information incidente est répartie vers plusieurs fils), le crossover (figure 1.40(d)) (le croisement entre deux fils). Avec une porte à majorité, une porte And peut être obtenue en fixant la valeur d'une des entrées à 0; de même une porte Or est obtenue en fixant une entrée à 1. Des fonctions logiques sont conçues à partir de ces éléments de base. Par exemple un full-adder (figure 1.41).



FIG. 1.40 - (a) Porte majorité : la sortie prend la valeur majoritaire présente aux entrées. (b) Crossover QCA : l'information qui se propage sur la ligne verticale n'interagit pas avec le fil horizontal. (c) Inverseur QCA : les cellules positionnées à 45 degrés les unes par rapport aux autres interagissent inversement, leur polarisation est toujours inverse.

Dans ces dispositifs un signal d'horloge défini le sens de propagation de l'information. Lors de sa propagation le signal se dégrade, le signal d'horloge peut amener un gain en puissance pour contrer cette dissipation [96], [97].

1.2.5.2 Réalisation expérimentale de QCAs

La cellule QCA [98], un fil QCA [99], et la porte à majorité [94] ont été réalisés expérimentalement en utilisant des points métalliques. Ces expériences ont démontré la propagation de l'état de charge d'une cellule à une autre, et la faisabilité de fonctions de calcul en utilisant des QCA.

En particulier, un registre à décalage QCA a été réalisé [92] (figure 1.42(a)).



FIG. 1.41 – Full adder QCA [93] : (a) fil, (b) inverseur, (c) porte majorité, (d) fan-out, (e) crossover.

Le fonctionnement de ces dispositifs expérimentaux se déroule à basse température, la température d'opération la plus élevée constatée dans ces travaux est de 70mK. Dans le fonctionnement du latch le bit est sauvegardé tant que le signal d'horloge est présent, quand il a disparu l'information est perdue. D'où la différence de phase entre les signaux d'horloge clock 1 et clock 2 (figure 1.42(b)).

Une cause principale d'erreur dans ces dispositifs QCA est liée aux variations aléatoires dans la distribution des charges de fond. On désigne par ce terme les charges parasites qui avoisinent le dispositif. Ces variations impliquent un repositionnement des tensions de fonctionnement du dispositif, sur une échelle de temps allant d'une dizaine de minutes à quelques heures. Les auteurs estiment qu'une réduction en taille de ces dispositifs permettrait de minimiser ces types d'erreur, et d'obtenir un fonctionnement à plus haute température.

Dans un QCA moléculaire, les points quantiques sont les centres redox de la molécule. Des composés à valence mixte - ce sont des molécules possédant au moins deux centres redox entre lesquels un électron peut se déplacer- ont été simulés [97]. Les résultats indiquent que ces molécules sont de bons candidats pour un fonctionnement QCA. Un de ces composés la molécule FeIII- RuII a été caractérisée par des techniques électrochimiques et spectroscopiques [96], montrant des propriétés qui vont dans le sens d'une implantation moléculaire des QCA.

Les implantations que nous avons présentées utilisent des charges électriques, mais



des QCA magnétiques à base de nano aimant sont aussi envisagés [93], [100].

FIG. 1.42 – (a) Schéma d'un registre à décalage QCA et image au MEB du registre à décalage fabriqué. (b) Fonctionnement d'un registre à décalage : (a) entrée V_{IN} appliquée au latch1; (b) horloge V_{C1} du latch1; (c) sortie du latch1 mesurée par la tension du dot D1; (d) horloge V_{C2} décalée en phase appliquée au latch2; (e) sortie du latch2 donnée par le potentiel du dot D4.

1.2.6 Une structure particulière : la Nanocell

La Nanocell est une structure à deux dimensions composée de nanoparticules reliées entre elles par des molécules bistables. Dans sa proposition Tour contourne les difficultés de placement des blocs moléculaires ou nanométriques. La Nanocell fonctionne comme une boîte noire : l'utilisateur ne connait pas l'organisation des objets nanométriques à l'intérieur de la structure. Une fonction logique peut être implantée sur la Nanocell à partir d'électrodes situées en périphérie en appliquant des signaux de configuration.

1.2.6.1 Structure d'une Nanocell

En configurant les molécules bistables, des chemins de conduction se forment réalisant ainsi la fonction logique. En première approximation Tour suppose que chaque molécule est adressable, et démontre qu'une fonction logique est réalisable en choisissant les états des molécules bistables [101]. Dans leur modèle la Nanocell est représentée par une suite de 0 et de 1 désignant respectivement un état ouvert ou fermé de la molécule. A partir d'une population d'individus représentant chacun un état de configuration des molécules, ils obtiennent par un algorithme génétique les chemins de conduction qui réalisent la fonction logique désirée. Avec cette méthode, en contrôlant l'état de chaque molécule, Tour montre que des fonctions logiques telles des Nand ou des portes inverseuses sont réalisables (figure 1.43).



FIG. 1.43 – Porte logique NAnd réalisée avec une Nanocell.

1.2.6.2 Réalisation expérimentale

Une Nanocell expérimentale est fabriquée [102]. Elle est constituée d'un film d'or discontinu et de nanofils revêtus de molécules d'OPE dithiol notées 1 (figure 1.44).



FIG. 1.44 – Image MEB de la réalisation expérimentale d'une Nanocell. L'image du haut présente cinq paires d'électrodes juxtaposées. Le rectangle central est le film discontinu d'or recouvert de nanofils à certains endroits. L'image du bas est un agrandissement de la portion centrale. On observe le film d'or discontinu avec un nanofil d'or fixé par des molécules d'OPE-dithiol.

La caractéristique I(V) acquise entre 2 paires d'électrodes adjacentes est présentée en figure 1.45. Après l'application de trois impulsions de tension de -8 V (de largeur 100 ms et de période 104 ms) sur deux électrodes adjacentes, deux effets mémoire sont observés sur la structure. D'une part un effet mémoire dit "switch-type memory" observable sur un balayage de tension allant de -4 V à 0 V; d'autre part un effet mémoire dit "conductivity-type memory" visible sur un balayage de tension allant de -2 V à 0 V. Dans le cas du premier effet mémoire, avant l'application des trois impulsions de tension le dispositif présente une allure pseudo linéaire. Après leurs applications la caractéristique présente un pic qui disparait dans les balayages successifs (figure 1.46(a)). Il s'agit d'un effet mémoire à lecture destructive. Dans le second cas, avant l'application des trois impulsions de tension, le dispositif passe à un état de haute conductivité. Après l'application de ces impulsions le dispositif passe à un état de faible conductivité (figure 1.46(b)). Ici la lecture de l'état du dispositif n'est pas destructive. Ces résultats démontrent la faisabilité d'une fonction mémoire en utilisant une structure Nanocell.



FIG. 1.45 – Caractéristiques I(V) acquises sur une paire d'électrodes adjacentes. Les courbes a, b et c sont successivement acquises. La flèche noir indique le sens de balayage.



FIG. 1.46 - (a) Caractéristiques I(V) de la Nanocell avant (a) et après (b-d) trois impulsions de tension de -8 V acquises à une température de 297 K. Les courbes b, c et d sont respectivement le premier, le second, et le troisième balayage acquis après l'application des trois impulsions de tension. Les auteurs observent un effet mémoire à lecture destructive sur la gamme de fréquence [-4 V, 0 V]. (b) Caractéristiques I(V) de la Nanocell avant (balayages a-c) et après (balayages d-f) trois impulsions de tension de -8 V acquises à une température de 297 K. L'état de haute conductivité initial (état 0) est représenté par les courbes a, b, et c qui sont respectivement le premier, le second et le troisième balayage avant l'application des impulsions. L'état de basse conductivité (état 1) est représenté par les courbes d, e, et f qui sont respectivement le premier, le second, et le troisième balayage acquis après l'application des trois impulsions de tension. Les auteurs observent un effet mémoire à lecture non destructive sur la gamme de tension [-2 V, 0 V].

Devant les incertitudes de placement des dispositifs nanotechnologiques, Tour propose dans ses travaux d'utiliser une structure désordonnée. Celle-ci est une "boîte noire" composée d'un réseau de nanoparticules et de molécules. La fonction logique est implantée en appliquant des tensions sur les électrodes en périphérie. Cette approche "bottom-up" permet de contourner les problèmes de placement à l'échelle nanométrique.

1.2.7 Conclusion

La régularité est une caractéristique principale de la majorité des propositions architecturales pour les dispositifs nanométriques. En cela elles tiennent compte de la démonstration expérimentale de l'assemblage de nanofils en des structures de crossbar par des techniques fluidiques. Au sein d'une telle structure les fonctions de calcul sont réalisées avec une logique à diode. En effet des diodes moléculaires ont également été démontrées expérimentalement, celles-ci peuvent s'auto-assembler aux intersections de ces nanofils.

Le passage du monde micrométrique au monde nanométrique constitue un problème crucial pour l'utilisation des nanodispositifs. Par leurs études de dimensionnement, Dehon et al. et Likharev et al. y apportent des éléments de réponse.

Certaines molécules sont à la fois des dispositifs mémoires, elles peuvent alors être configurées bloquées ou passantes. Ces propriétés de bistabilité des dispositifs et de régularité des architectures permettent de réaliser des circuits reconfigurables (décrits plus avant dans la partie 2.2.4 du chapitre suivant). Goldstein envisage la reconfigurabilité pour la détection et la mise à l'écart des dispositifs défectueux. Likharev propose de la mettre en œuvre dans une architecture de réseau de neurones.

Ces propositions n'envisagent pas des architectures intégralement composées de dispositifs nanométriques. Mais plutôt une association de ces structures à une couche CMOS sous-jacente. Une telle architecture hybride moléculaire/CMOS permet de pallier aux lacunes des dispositifs nanométriques, la couche CMOS fournissant un signal d'horloge ou la restauration du signal.

Deux propositions architecturales se démarquent des premières propositions. L'architecture d'automate cellulaire quantique utilise les propriétés de répulsion électrostatique pour mettre en œuvre le procédé de calcul. Cependant la réalisation de fonctions logiques réclame un placement particulier des dispositifs.

A cet égard la structure Nanocell a également une place à part. La propriété de reconfigurabilité est toujours présente : une fonction logique va être implantée par les propriétés de bistabilité des molécules à partir de signaux de configuration amenés par des électrodes périphériques. Mais contrairement aux propositions précédentes, le positionnement des objets nanométriques à des emplacements déterminés n'est pas requis. De cette façon les incertitudes de placement sont contournées : le dispositif est d'abord assemblé, puis la fonction réalisée est découverte post-fabrication ou mise en œuvre par des techniques de reconfigurabilité. Il s'agit d'une approche de conception "bottom-up" par opposition à l'approche "top-down" utilisée dans la conception de circuits CMOS.

Dans ces deux dernières démarches les propriétés des nanotechnologies sont à la base des architectures proposées. Que ce soit principalement du point de vue du fonctionnement physique pour les QCA, ou du point de vue de l'assemblage des dispositifs pour la Nanocell. En effet est-il pertinent de chercher à remplacer les dispositifs CMOS par des dispositifs nanométriques ou moléculaire? les nanotechnologies sont aussi l'occasion de penser le calcul, ou d'organiser les dispositifs, de manière différente. Nous voulons nous en inspirer. En prenant en compte les propriétés des nanotechnologies mises en évidence dans la partie 1.1, il serait intéressant de considérer les architectures envisageables. Ceci en privilégiant la possibilité de mettre en œuvre avec les nanotechnologies des circuits ou des fonctionnalités difficilement réalisables en CMOS.

Chapitre 2

Investigation d'une architecture adaptée aux nanotechnologies

2.1 Introduction

Des dispositifs électroniques peuvent être formés en utilisant des objets nanométriques. Ainsi nous avons vu dans le chapitre précédent que des transistors sont réalisables avec des nanotubes de carbone, des nanofils, ou des molécules. Mais comment ces dispositifs nanométriques peuvent-ils être utilisés pour réaliser du calcul? De par leurs caractéristiques, les dispositifs nanométriques réclament des approches différentes de celles des principaux dispositifs électroniques actuels, les transistors CMOS.

En effet, les dispositifs électroniques à base d'objets nanométriques ne sont plus en général gravés dans un substrat, mais assemblés à partir de blocs élémentaires. Des objets, des blocs de base (nanotubes, nanofils, molécules) sont dans un premier temps produits par réaction chimique ou par croissance, puis assemblés entre eux.

D'autre part, ces blocs peuvent principalement être organisés en structures régulières comme les réseaux croisés de nanofils. Avec ces procédés d'assemblage (autoorganisation, reconnaissance moléculaire,...) un grand nombre de dispositifs identiques sont formés simultanément sur le substrat.

De plus, du fait des incertitudes d'élaboration, les caractéristiques des dispositifs présentent entre eux une forte dispersion. A ces défauts de fabrication s'ajoute la dérive temporelle des caractéristiques des dispositifs. Un autre point important à prendre en compte réside dans le fait qu'à l'échelle nanométrique le bruit n'est plus négligeable par rapport au signal utile car les dispositifs travaillent à des niveaux d'énergie très faibles.

En prenant en compte ces propriétés, comment organiser ces objets nanométriques dans une visée calculatoire? Nous pouvons déjà nous demander si l'architecture de calcul la plus utilisée, l'architecture de Von Neumann, est adaptée à ces nanotechnologies? D'autres architectures éclipsées par son succès ne seraient-elles pas plus en phase avec leurs caractéristiques? Ainsi les architectures reconfigurables, les automates cellulaires, les réseaux de neurones sont des candidats potentiels. Nous allons donc mettre en regard les principales caractéristiques de chacune de ces architectures avec celles des objets nanométriques. De plus, dans notre démarche la capacité à pouvoir utiliser l'architecture, c'est-à-dire l'existence d'un paradigme de calcul qui lui est adapté, est un critère essentiel. Nous évaluerons donc les avantages et inconvénients respectifs de chacune de ces architectures, et dégagerons alors une piste pour notre investigation.

2.2 Quelle architecture de calcul pour les objets de taille nanométrique ?

2.2.1 L'architecture de Von Neumann

L'architecture de Von Neumann est la structure de base de la majorité des machines à calculer de notre époque. Celle-ci, élaborée par John Von Neumann en 1947 à partir des travaux de Turing, est composée de quatre blocs principaux : une unité de mémoire, une unité de contrôle, une unité de calcul appelée unité arithmétique et logique (U.A.L.), et un ensemble d'éléments d'entrées-sorties (figure 2.1). Le principe de fonctionnement de cette machine à calculer repose sur une suite d'opérations arithmétiques et logiques élémentaires (addition, porte ET, porte inverseuse,...) réalisées par l'U.A.L. Cette suite d'opérations est ordonnancée par l'unité de contrôle. L'ordre des opérations (le programme) ainsi que les données sur lesquelles elles sont réalisées sont stockés dans la mémoire. Le bloc d'entrée-sortie assure l'acquisition des données, et la diffusion des résultats vers le monde extérieur.



FIG. 2.1 - Schéma d'une architecture de Von Neumann. L'unité de contrôle et l'unité arithmétique et logique (U.A.L) font partie du module appelé processeur. Les instructions de contrôle qui ordonnancent les opérations réalisées par l'U.A.L. sont acquises à un emplacement en mémoire par l'unité de contrôle. Les données sont échangées entre l'U.A.L. et l'espace mémoire qui leur est réservé. Les blocs d'entréessorties permettent à un opérateur extérieur d'entrer des données à l'aide du clavier, et d'afficher des résultats de calcul sur l'écran.

L'architecture de Von Neumann a l'avantage d'être efficace dans la réalisation d'un grand nombre d'applications à l'aide d'outils de programmation. De plus, l'opportunité d'intégrer les composants nanométriques dans une architecture largement utilisée permettrait de conserver une homogénéité dans les paradigmes de calcul utilisés par les circuits. Cependant les contraintes liées aux dispositifs nanométriques pèsent sur cette architecture.

Ainsi, nous savons que les procédés d'assemblage des objets nanométriques ne garantissent pas une précision de placement similaire à celle obtenue avec les dispositifs CMOS. Or les opérations logiques et arithmétiques réalisées par la machine de Von Neumann réclament des informations précises, car une variabilité sur les données ou les fonctions implantées entraîne des résultats entachés de fautes. Ces défauts de placement se répercutent sur les fonctionnalités obtenues par des fautes permanentes. De plus, l'importance du bruit par rapport au signal utile à l'échelle nanométrique entraine également des fautes transitoires. Des techniques architecturales permettent d'intégrer la tolérance aux fautes dans les circuits, comme la redondance triple modulaire (TMR Triple Modular Redundancy), ou le contrôle de redondance cyclique (CRC Cyclic Redundancy Check) [103], [104], [105]. Cependant ces techniques entrainent une augmentation de la surface du circuit. Nous pouvons également remarquer que l'implantation physique d'une architecture de Von Neumann présente généralement un schéma d'interconnexion complexe. Alors que les objets nanométriques sont organisables préférentiellement en structure régulière du type crossbar. Cela est du en partie à la complexité de la structure de contrôle et à la centralisation des éléments de mémoire.

Cette architecture présente de plus une non localité des accès mémoire due à la séparation des opérateurs et des données : les interconnexions doivent parcourir de longs chemins sur la puce. Or l'utilisation des objets nanométriques réclame un schéma d'interconnexion local, car les signaux mis en jeu étant très faibles, il n'est pas envisageable de les transporter sur de longues distances.

2.2.2 Les automates cellulaires

Un automate cellulaire est constitué d'un ensemble de cellules obéissant chacune à une même règle simple. Ces cellules sont organisées en un réseau à une ou plusieurs dimensions. L'état de chaque cellule est calculé à chaque pas de temps t_p , en fonction de son état et de ceux de ses voisins proches au pas de temps précédent. Ces règles simples au niveau de la cellule, permettent d'obtenir des comportements complexes à l'échelle du réseau. La propriété remarquable de ces automates cellulaires réside dans le fait que ces motifs permettent de réaliser des calculs. Prenons l'exemple d'un automate cellulaire à une dimension (figure 2.2). A chaque pas de temps, une cellule a deux états accessibles. Son état au pas de temps suivant est déterminé à partir du sien propre et de ceux de ses deux cellules voisines au pas de temps précédent ; ce qui permet 256 règles possibles. Chacune d'elles est représentée par une table qui à chaque configuration de cellules appelée motif, associe l'état que prendra la cellule centrale au pas de temps suivant. Selon une norme définie par Wolfram [106], chaque règle est identifiée par un numéro d'ordre. Dans le cas de la règle 30 dont l'évolution est présentée en figure 2.2, Wolfram a montré que l'état de la cellule centrale a une allure stochastique permettant de réaliser un générateur de nombres pseudo aléatoires [107].

Dans les automates cellulaires, les cellules sont organisées en structures régulières et obéissent toutes à des règles identiques. En conséquence la fabrication du réseau consiste à placer des dispositifs similaires sur un réseau périodique.

De plus les interactions sont locales : les cellules n'interagissent qu'avec leurs plus proches voisins.

La nécessité d'un signal d'horloge peut-être un inconvénient en ce qu'il peut amener à des temps de traitement relativement longs. Cependant le synchronisme n'est pas indispensable. Il existe en effet une classe d'automates cellulaires asynchrones pour lesquels de plus, des techniques de tolérance aux fautes peuvent être mises en œuvre [108], [109], [110].

Cependant l'inconvénient majeur de ces architectures réside dans la difficulté à obtenir des fonctions de calcul à partir de leur comportement complexe. Il n'existe pas en effet d'algorithme ou d'heuristique connus permettant de déduire une règle d'évolution locale à partir d'une fonction que l'on souhaite implanter [111], [112], [113]. Cela limite



FIG. 2.2 – Ce schéma représente l'évolution de la règle 30 à chaque pas de temps. Chaque ligne est un état de l'automate cellulaire à une dimension. Les états successifs sont présentés dans leur ordre d'apparition suivant le sens de la flèche verticale. On observe qu'un motif triangulaire se répète régulièrement.

grandement les applications des Automates cellulaires.

2.2.3 Les réseaux de neurones

Le modèle de neurone le plus simple est celui de McCulloch et Pitt [114]. Dans celuici, le neurone est formalisé par un sommateur qui fait la somme pondérée de ses entrées, appelée variable d'état a_i (figure 2.3). Chaque neurone N_j en amont envoie au neurone N_i un signal S_j qui va être pondéré par un poids synaptique W_{ij} . La variable d'état a_i constitue l'entrée d'une fonction d'activation non linéaire f qui va déterminer l'état du neurone N_i . Dans le cas d'un neurone binaire cette fonction d'activation est la fonction de Heaviside. Tant que la variable d'état a_i est sous un certain seuil θ_i la sortie S_i vaut 0, si elle dépasse ce seuil la sortie passe à une valeur de 1.

(2.1)
$$S_i = f(a_i) \text{ avec } a_i = \sum_j W_{ij} S_j$$

La fonction réalisée par le réseau de neurones est déterminée par les valeurs des poids synaptiques W_{ij} et l'allure de la fonction d'activation non linéaire f. Cependant les poids synaptiques sont principalement utilisés pour implanter une application. A cet effet, il existe une grande variété de méthodes. Les poids peuvent être déterminés analytiquement et stockés dans des mémoires; ou bien déterminés par apprentissage de manière supervisée ou non supervisée [115], [116], globale ou locale [117], [118].

(2.2)
$$W_{ij} = W_{ij} + \Delta_{ij} \text{ avec } \Delta_{ij} = g(S_i, S_j, a_i, \epsilon, ...)$$
où ϵ est l'erreur par rapport à un résultat attendu



FIG. 2.3 – Graphe représentant le fonctionnement d'un neurone de McCulloch et Pitt. Les sorties des neurones S_j sont pondérées par des poids synaptiques W_{ij} . Les flèches indiquent que les poids sont variables. Ces sorties pondérées sont additionnées dans le sommateur ou soma formant ce qui est appelé la variable d'état. Cette variable d'état constitue l'entrée de la fonction d'activation. Celle-ci est une fonction non linéaire. Typiquement dans le cas de neurones binaires, il s'agit de la fonction de Heaviside. Quand la variable d'état a_i atteint un seuil θ_i le neurone N_i envoie un signal S_i en sortie.

Les réseaux de neurones présentent plusieurs points communs avec les Automates Cellulaires. Comme ces derniers, ils sont composés d'unités identiques disposées régulièrement.

Ensuite la localité des accès est envisageable avec une telle architecture. En effet suivant sa topologie, le réseau de neurone peut présenter un schéma d'interconnexion local; et concernant l'implantation des poids synaptiques, il existe des règles d'apprentissage locales, non supervisées, mettant en jeu dans le calcul du poids W_{ij} les états des neurones N_i et N_j .

De plus les réseaux de neurones ayant une dynamique asynchrone, il n'est pas nécessaire d'acheminer un signal d'horloge à chaque unité de traitement.

Enfin dans les réseaux de neurones la dynamique est collective, et les variables sont distribuées sur plusieurs unités. De ce fait elles sont potentiellement tolérantes aux fautes en utilisant des techniques de redondance et d'apprentissage adaptés [119], [120], [121].

Cependant, contrairement aux Automates Cellulaires, il existe de nombreux algorithmes d'apprentissage qui permettent d'approximer avec plus ou moins de précision une fonction à implanter [122], [123], [124].

2.2.4 Les structures reconfigurables

Les architectures reconfigurables ont connu un important essor à la fin des années 80 avec l'apparition des FPGAs (Field Programmable Gate Architectures) [125]. Leur principe de fonctionnement repose sur l'utilisation d'un réseau matriciel de blocs logiques simples, qui reliés entre eux, vont pouvoir réaliser une fonction plus complexe. L'originalité réside d'une part dans le fait que les fonctions logiques de base utilisées sont implantées par des blocs logiques reconfigurables (CLB : Configurable Logic Bloc); d'autre part les connexions entre ces blocs sont configurables par l'utilisateur (figure 2.4). Les CLB sont généralement réalisés à l'aide de LUTs ou Look Up Table qui implantent une fonction combinatoire en stockant sa table de vérité dans une mémoire (figure 2.5). Les réseaux d'interconnexion sont constitués de blocs de routage (xbar) composés d'interrupteurs programmables (figure 2.6). Pratiquement une architecture reconfigurable est donc essentiellement constituée de cellules mémoire et de commutateurs.



FIG. 2.4 – Structure d'une architecture reconfigurable [126], [127].



FIG. 2.5 – Exemple de l'implantation d'une logique combinatoire sous forme de LUTs : la table de vérité de la fonction à réaliser est mémorisée dans la LUT. Chaque configuration des entrées constitue donc l'adresse d'une valeur de la fonction. Cette valeur est ensuite envoyée en sortie [126].

Or nous avons vu dans le chapitre précédent que de nombreux travaux proposent des mémoires ou des interrupteurs moléculaires. Donc les architectures reconfigurables devraient être intéressantes pour l'utilisation de dispositifs nanométriques.

D'autre part, une architecture reconfigurable le TERAMAC (HP), a été réalisée en utilisant un grand nombre de composants défaillants [128]. Heath et al. ont montré que cette machine pouvait tout à fait être opérationnelle. En effet après une étape de test, les dispositifs repérés comme défectueux sont isolés. Grâce à leur propriété de reconfigurabilité, ces architectures peuvent donc pallier aux défauts de fabrication, et cela



FIG. 2.6 -Schéma d'un interrupteur programmable.

même si le rendement de fabrication est faible. Or nous savons que c'est le cas pour les dispositifs nanométriques. D'autres propositions vont dans le sens de la faisabilité de la tolérance aux fautes dans les architectures reconfigurables [129], [130], [131].

De plus l'organisation des architectures reconfigurables en un réseau matriciel satisfait au critère de régularité pour une structure employant des objets nanométriques.

Enfin les architectures reconfigurables, elles-mêmes, tireraient avantage à une implantation nanométrique. En effet dans ces architectures, l'état d'un dispositif est stocké dans une mémoire associée. Ceci affaiblit la densité et augmente la surface du circuit. Certains dispositifs moléculaires (molécules bistables par exemple) stockent intrinsèquement leurs états et ne nécessitent donc pas l'association à un dispositif mémoire supplémentaire. De plus, de par leurs tailles, la densité atteignable est améliorée.

Il faut noter que l'architecture reconfigurable est essentiellement un modèle d'implantation physique. Il est en effet possible d'implanter n'importe quelle architecture de calcul sur une structure reconfigurable. Cependant le coût en matériel d'une telle implantation est très important comparé à une implantation directe.

2.2.5 Discussion

L'investigation d'une architecture pour les nanotechnologies nécessite de prendre en compte plusieurs paramètres. Avec la réalisation matérielle il faut également considérer le modèle logique. Si nous réalisons une architecture il faut pouvoir l'utiliser. Pour cela l'architecture de calcul doit disposer d'un paradigme de calcul. Ce dernier est composé de trois couches :

- 1. le modèle de programmation permet, pour une application donnée, d'exprimer le problème à résoudre en une suite d'actions simples à réaliser pour y apporter une solution.
- 2. le modèle d'exécution permet de transformer ces suites d'actions du programme en une série de signaux physiques à envoyer au système matériel.
- 3. le modèle d'implantation (architecture) désigne l'organisation physique des composants matériels. Les couches 1 et 2 constituent une boîte d'outils : c'est le modèle d'implantation qui exécute réellement le programme produit par les étapes précédentes.



La figure 2.7 présente le paradigme associé à chacune des architectures étudiées.

FIG. 2.7 - Paradigmes de calcul pour les architectures étudiées. Un paradigme de calcul est divisé en trois niveaux : un modèle de programmation, un modèle d'exécution, et une implantation matérielle. L'étendue de chaque flèche indique les niveaux pour lesquels des solutions existent pour une architecture donnée. Les traits pleins désignent les niveaux qui sont les mieux contrôlés. Les traits en pointillés signifient que des solutions sont proposées mais que le niveau n'est pas maîtrisé.

L'architecture de Von Neumann possède l'avantage essentiel d'être maitrisée sur l'ensemble des trois couches. Cependant la non localité des accès mémoire et les problèmes liés aux interconnexions constituent des limitations importantes. De plus, les circuits nécessaires à la mise en œuvre de la tolérance aux fautes, de par la surface supplémentaire induite, amoindrissent le gain en surface que permet une implantation nanotechnologique.

Les automates cellulaires ont une structure régulière et présentent des interconnexions locales. Des implantations matérielles sont envisagées par exemple avec des transistors MOS, des mémoires magnétiques (MRAM). Mais ces circuits sont complexes et peu performants. Suivant leur règle d'utilisation elles sont tolérantes aux fautes et aux défauts. Mais il leur manque un modèle de programmation bien défini qui permettrait pour une application donnée, d'obtenir la règle à utiliser.

Les réseaux de neurones sont des architectures distribuées, intrinsèquement tolérantes aux fautes. Les deux premiers niveaux du paradigme de calcul, leur modèle de programmation et leur modèle d'exécution, sont bien connus. Par contre l'implantation de ces réseaux en électronique digitale nécessite des circuits complexes [132].

L'investigation d'une structure reconfigurable à base d'objets nanométriques est une piste intéressante. En effet les architectures reconfigurables sont potentiellement tolérantes aux fautes, celles-ci ont de plus la propriété de pouvoir supporter une variété d'implantations architecturales. Cependant ces implantations sont moins performantes que des circuits dédiés.

Le tableau 2.1 synthétise les caractéristiques de chacune de ces architectures par rapport aux objets nanométriques.

Architectures	Von Neumann	Réseaux de neurones	Automates cellulaires	Structure reconfigurable
Structure	Complexe	Régulière	Régulière	Régulière
Tolérance aux fautes	Techniques de tolérance aux défauts	Adaptabilité des poids synaptiques et dynamique collective	Tolérance suivant la règle utilisée et dynamique collective	Reconfigurabilité
Interconnexions	Non locales	Locales	Locales	Dépend de l'architecture implantée

TAB. 2.1 – Tableau récapitulatif sur les caractéristiques des architectures envisagées pour l'utilisation des nanotechnologies.

Chacune des architectures envisagées pour une utilisation des objets nanométriques a ses avantages et inconvénients propres. Cependant les architectures neuronales font de bons candidats pour l'utilisation des nanotechnologies. D'une part l'implantation des architectures neuronales tirera avantage de la densité d'intégration et des nouvelles fonctionnalités apportées par les dispositifs nanotechnologiques. D'autre part les propriétés des réseaux de neurones assurent que les dispositifs nanométriques seront organisés en une architecture utilisable qui prend en compte leurs caractéristiques. Nous investiguerons donc la faisabilité des fonctions neuronales en utilisant des dispositifs à base d'objets nanométriques.

En particulier nous nous intéressons aux réseaux de neurones impulsionnels. Dans cette classe de réseau de neurones la communication entre les unités est assurée par des signaux impulsionnels [133]. Notre approche se base sur l'observation que les dispositifs nanométriques présentent un niveau de bruit qui est non négligeable par rapport au signal utile. Nous avons donc intérêt à utiliser un codage utilisant les caractéristiques temporelles des signaux (différences de phase par exemple).

2.3 Les réseaux de neurones impulsionnels

Habituellement un réseau de neurones artificiel utilise des signaux continus pour communiquer entre les différentes unités dont il est composé. Cependant les données physiologiques indiquent que les réseaux de neurones biologiques utilisent des signaux impulsionnels. Le cerveau réalise des opérations complexes telles que la reconnaissance de formes dans un temps de traitement très rapide, alors que ses composants sont très lents. En copiant l'organisation et le mode de communication des neurones, on peut espérer retrouver les propriétés des réseaux de neurones biologiques. Cette hypothèse est à l'origine des travaux sur les réseaux de neurones impulsionnels. De tels réseaux de neurones se sont révélés viables du point de vue calculatoire (Spikenet) [134], [135].

2.3.1 Structure et fonctionnement d'un réseau de neurones impulsionnels

2.3.1.1 Le réseau de neurones biologiques

Dans le cerveau, le neurone se divise en quatre parties principales (figure 2.8) : les dendrites qui transmettent les signaux incidents, les synapses qui pondèrent les signaux provenant d'autres neurones, le soma qui fait la somme de ces entrées pondérées, et l'axone qui transmet le signal du neurone vers les neurones en aval.



FIG. 2.8 – Schéma d'un neurone biologique [136].

Chaque potentiel d'action incident δ induit un potentiel post-synaptique (figure 2.9). Ces potentiels post-synaptiques vont s'additionner dans le soma formant ce qui est appelé le potentiel de membrane. Quand ce potentiel de membrane atteint un seuil spécifique au neurone, on observe la production d'un potentiel d'action en sortie. Il s'ensuit une période réfractaire où le neurone est insensible à ses entrées.



FIG. 2.9 - Schéma du fonctionnement d'un neurone impulsionnel. Dès que la somme des potentiels post-synaptiques atteint un seuil prédéfini, le neurone envoie un potentiel d'action sur sa sortie. Il est ensuite dans une zone réfractaire où il est insensible à ses entrées.

Le potentiel post-synaptique est excitateur (EPSP : excitatory postsynaptic potential) ou inhibiteur (IPSP : inhibitory postsynaptic potential) suivant la nature de la relation synaptique (figure 2.10). L'amplitude du potentiel synaptique dépend du poids synaptique.



FIG. 2.10 – Le potentiel d'action émis peut-être excitateur ou inhibiteur suivant la nature de la synapse. Le poids synaptique se traduit par l'amplitude de la réponse post-synaptique.

2.3.1.2 Les modèles de réseaux de neurones impulsionnels

Plusieurs modèles ont pour objectif la description de ce fonctionnement neuronal [133], [135], [137], [138], [139]. Ceux-ci diffèrent entre eux suivant le degré de précision pris en compte dans les signaux inter neuronaux (figure 2.11). D'abord les modèles comportementaux décrivent chaque segment du neurone par des équations ioniques. A un niveau d'abstraction plus élevé, les modèles à conductance utilisent les équations de Hodgkin-Huxley pour décrire l'état du système. A un niveau supérieur, les modèles "Integrate-and-Fire" vont calculer l'état du système à partir des temps d'arrivée de chaque impulsion incidente. Puis les modèles dits à seuil vont utiliser les fréquences des signaux incidents.

Le modèle "Integrate-and-Fire" est régulièrement utilisé pour décrire le fonctionnement du neurone biologique car il permet de simuler un comportement réaliste biologiquement, tout en étant facile à prendre en main [140], [141] (figure 2.12).

L'implantation matérielle de réseaux de neurones impulsionnels nécessite la réalisation de deux fonctions principales : la sommation, réalisée dans le neurone, et la multiplication réalisée par la synapse. De ces deux fonctions l'implantation de la fonction multiplicatrice est la plus complexe. De plus certains réseaux utilisent des milliers d'unités en parallèle. Si pour les neurones la complexité augmente linéairement avec le nombre d'unités, pour les synapses elle a une évolution quadratique [123]. Donc effectuer une étude de l'implantation de la fonction synaptique est pertinent du point de vue architectural. De nouvelles fonctionnalités à l'échelle nanométrique permettraient de mettre



FIG. 2.11 – Schéma récapitulatif sur les modèles de neurone impulsionnel



FIG. 2.12 – Schéma d'un neurone formel "Integrate & Fire". Chaque groupement fonctionnel est entouré en pointillés.

en œuvre la fonction synaptique dans des circuits moins complexes. De plus, l'utilisation de ces dispositifs nanométriques apporterait un gain en densité non négligeable pour les réseaux de neurones. Dans ce qui suit nous nous limitons au cas des synapses excitatrices. Le comportement inhibiteur est similaire.

2.3.2 La synapse : une fonction critique de l'architecture neuronale impulsionnelle

2.3.2.1 La synapse biologique

La synapse biologique se compose de deux terminaux synaptiques séparés par un espace appelé fente synaptique. Sa dynamique obéit à des processus chimiques et électriques (figure 2.13). L'influx nerveux qui se propageait sous forme électrique par le potentiel d'action se transforme en un signal chimique au niveau de la synapse. En effet à l'arrivée d'un potentiel d'action, grâce à la présence d'ions calcium dans le bouton synaptique, les vésicules présentes dans le terminal pré-synaptique fusionnent avec la membrane, libérant alors des neurotransmetteurs dans la fente synaptique. Un potentiel d'action incident provoque ainsi la libération de neurotransmetteurs. Ceux-ci vont s'appareiller à des récepteurs spécifiques présents sur la membrane du terminal post synaptique. On compte plus d'une soixantaine de neurotransmetteurs et des centaines de sous-types de récepteurs. Une terminaison pré-synaptique peut relâcher plusieurs types de neurotransmetteurs différents à la fois. Le mélange de molécules et d'ions présents dans la fente synaptique ne peut donc être décodé que par une affinité très spécifique des neurotransmetteurs avec leurs récepteurs positionnés sur la terminaison post-synaptique. L'appariement des neurotransmetteurs déclenche dans le neurone post synaptique une série de réactions chimiques qui vont provoquer un potentiel post-synaptique excitateur ou inhibiteur.



FIG. 2.13 – Schéma simplifié d'une synapse. L'arrivée d'un potentiel d'action entraine la libération de neurotransmetteurs. Ceux-ci vont s'appareiller aux récepteurs adéquats.

2.3.2.2 La plasticité synaptique : une synapse opérationnelle dynamique

Dans un modèle de réseau de neurones impulsonnels tel que décrit précédemment, le poids synaptique se manifeste par l'amplitude du signal post-synaptique obtenu en réponse à un potentiel d'action incident. Il est fixé lors de la phase d'apprentissage : une fois cette dernière terminée, sa valeur ne varie plus au cours du fonctionnement du réseau de neurones. Cependant dans le cadre d'une mise en œuvre matérielle, les mémoires permettant de stocker les valeurs de ces poids synaptiques ne sont pas fixes. Elles relaxent progressivement au cours du temps. De plus, les données physiologiques indiquent que le poids présenté par une synapse corticale varie suivant son historique ou les caractéristiques du signal incident. Les synapses biologiques présentent une plasticité qui dépend de l'activité du réseau sur une échelle de temps variant de la milliseconde à quelques secondes : on parle de plasticité synaptique ou de synapse dynamique. Une telle plasticité enrichit les propriétés du réseau de neurones. En effet, du point de vue fonctionnel, cette plasticité synaptique permet par exemple de sélectionner quelles caractéristiques du signal incident, issu du neurone pré-synaptique, seront transmises au
neurone post-synaptique. Suivant sa localisation dans le cerveau, la synapse présente une variété de comportement dynamique.

La plasticité synaptique à court terme A l'arrivée d'une impulsion incidente, le poids synaptique dépend de la distribution temporelle des impulsions précédentes. On parle de plasticité à court terme (STP : Short Term Plasticity) [142], [143]. Un tel phénomène est décrit par le modèle de Varela et al. [144]. Dans celui-ci, l'amplitude de la réponse post-synaptique $A(t_i)$ à un instant t_i obéit à la dynamique suivante :

(2.3)
$$A(t_i) = A_0.F.D1.D2$$

où A_0 est une constante désignant l'amplitude du signal post-synaptique après une longue période sans excitation incidente; F est le terme de facilitation, D1 et D2 sont deux termes de dépression. A chaque impulsion incidente le terme de facilitation est augmenté d'une valeur f>1, puis décroit exponentiellement vers 1 avec une constante de temps τ_F . A chaque impulsion incidente les termes de dépression sont respectivement multipliés par une valeur d1<1 et d2<1, puis relaxent exponentiellement vers 1 avec respectivement une constante de temps τ_{D1} et τ_{D2} . d1 étant inférieur à d2 et τ_{D1} étant inférieur à τ_{D2} .

Le modèle proposé peut comporter plus ou moins de termes de dépression ou aucun terme de facilitation. Cependant Varela et al. montrent que l'équation 2.3 décrit sensiblement le comportement d'une synapse biologique. Ainsi le signal post-synaptique acquis sur une synapse biologique en réponse à un train d'impulsions distribuées suivant la loi de Poisson, et les résultats issus du modèle présenté ci-dessus sont superposables (figure 2.14).



FIG. 2.14 – Potentiel post-synaptique d'une synapse en réponse à un train d'impulsions réparties selon la loi de Poisson ayant pour fréquence moyenne 4 Hz. Les traits pleins sont issus des mesures expérimentales, les points sont les valeurs obtenues par le modèle de Varela et al. Nous constatons que quand l'intervalle Δt est grand, le signal post-synaptique augmente. Par contre quand l'intervalle Δt est faible, le signal post-synaptique diminue [144].

Dans les expérimentations sur les synapses biologiques ou modélisées, les trains d'impulsions distribuées suivant la loi de Poisson sont régulièrement utilisés car ils sont les plus proches des signaux impulsionnels observés dans les réseaux de neurones des organismes vivants, contrairement aux signaux de fréquence constante. La probabilité d'observer k impulsions dans une unité de temps est donnée par la relation suivante $P(k)=e^{-M}.M^k/k!$ où M est la fréquence moyenne du signal. La loi de Poisson détermine la répartition des impulsions dans le signal incident de manière à ce que la fréquence moyenne soit de M Hz.

Cependant, notons que dans le cas d'un train d'impulsions incident de fréquence constante, l'amplitude de la réponse post-synaptique atteint une valeur stabilisée (figure 2.15).



FIG. 2.15 - Réponse d'une synapse à un signal incident de fréquence 10 Hz. Les traits pleins sont issus des mesures expérimentales, les points sont les valeurs obtenues par le modèle de Varela et al. Pour une fréquence élevée la synapse présente une dépression. L'amplitude du potentiel post-synaptique converge vers une valeur stabilisée [144].

D'autre part, après un signal ayant induit une forte dépression, la réponse postsynaptique recouvre sa valeur initiale suivant une allure décrite par une exponentielle double (figure 2.16).



FIG. 2.16 – Recouvrement du signal post-synaptique après une dépression induite par un train d'impulsions incident d'une fréquence constante de 20 Hz. L'amplitude de la réponse est normalisée par la réponse initiale. Une approximation des données par une exponentielle double est plus proche des données expérimentales qu'une approximation par une exponentielle simple [144].

Comportement synaptique dépressif ou facilitateur Suivant sa localisation dans le cerveau, la synapse peut présenter une plasticité de type facilitateur ou dépressif [145]. Dans un cas la réponse à un signal de fréquence donnée est croissante, dans l'autre elle est décroissante.

Le modèle proposé par Markram et Tsodyks recouvre ces deux comportements [146]. Celui-ci considère que la synapse est constituée de ressources excitables ou pas par une impulsion pré-synaptique. A l'instant t les ressources se divisent en trois groupes : les ressources actives qui ont été précédemment excitées par un potentiel d'action, les ressources inactives qui sont inhibées, et les ressources à l'état recouvré qui sont disponibles pour une excitation par un potentiel d'action ultérieur. La dynamique de ces paramètres obéit au système d'équations suivant :

(2.4)
$$\frac{dR}{dt} = \frac{I}{\tau_{rec}} - U_{SE} \cdot R \cdot \delta(t - t_{AP})$$

(2.5)
$$\frac{dE}{dt} = -\frac{E}{\tau_{inact}} + U_{SE} \cdot R \cdot \delta(t - t_{AP})$$

$$(2.6) I = 1 - R - E$$

où R, E et I sont respectivement les quantités de ressources à l'état recouvré, à l'état actif et à l'état inactif. τ_{rec} est la constante de temps de recouvrement, τ_{inact} la constante de temps de l'inactivité, t_{AP} est l'instant d'arrivée du potentiel d'action pré-synaptique et U_{SE} est le taux de dépréciation de la synapse qui détermine la fraction de ressources recouvrées que chaque impulsion va exciter.

Le courant post-synaptique est donné par la relation $I_{syn} = A_{SE}.U_{SE}.E$ où A_{SE} est le poids synaptique initial. Ainsi le courant post-synaptique a la dynamique suivante : à chaque impulsion incidente arrivée à l'instant t_{AP} le courant est augmenté de $A_{SE}.U_{SE}$. $R(t_{AP})$. Entre les impulsions, il subit une décroissance exponentielle de constante de temps τ_{inact} .

Dans ce modèle, le comportement de synapse facilitatrice est décrit pour des valeurs de U_{SE} comprises entre 0,01 et 0,05 ; le comportement dépressif est décrit pour des valeurs élevées de U_{SE} [146]. A l'aide de ce modèle Tsodyks et al. étudient les propriétés de plasticité à court terme de ces synapses dépressives et facilitatrices (figure 2.17) [147].



FIG. 2.17 - Résultats de simulation d'un comportement synaptique. (A) Potentiel post-synaptique généré par un train d'impulsion incident de fréquence 20 Hz transmis à travers une synapse dépressive.
(B) Même signal que précédemment mais transmis à travers une synapse facilitatrice [146].

La plasticité synaptique à modulation temporelle relative Le poids synaptique peut également varier suivant le décalage temporel entre les impulsions pré-synaptique et post-synaptique [148], [149], [150] (figure 2.18). Cette plasticité est appelée plasticité synaptique à modulation temporelle relative (STDP : Spike Timing Dependent Plasticity).



FIG. 2.18 - Quand le neurone post-synaptique émet un signal sur sa sortie, celui-ci est également rétro propagé vers la synapse. L'amplitude du potentiel post-synaptique est fonction de la durée écoulée entre l'instant où le neurone post-synaptique envoie son signal et celui où le neurone pré-synaptique envoie un signal à la synapse.

Deux exemples sont présentés en figure 2.19. Sur le premier schéma le poids synaptique entre deux neurones est augmenté si le neurone post-synaptique émet une impulsion après le neurone pré-synaptique, c'est la potentialisation à long terme (LTP : Long Term Potentiation); et inversement le poids est diminué si le neurone post-synaptique émet un signal avant le neurone pré-synaptique, on parle de dépression à long terme (LTD : Long Term Depression).



FIG. 2.19 – Exemples de deux règles de plasticités synaptiques présentant des potentiation et dépression à long terme [151]. En abscisse sont représentées les variations du poids synaptique. L'axe des ordonnées représente les valeurs t_{pre} - t_{post} .

Les principaux types de plasticité mis en évidence dans les synapses biologiques ont

été présentés. Mais la plasticité synaptique ne se limite pas aux propriétés présentées cidessus. Le poids synaptique montre une variété de comportements dynamiques au cours de son fonctionnement [151], [152]. Ne pourrait-on pas utiliser des phénomènes de relaxation présents à l'échelle nanométrique pour implanter ces phénomènes de plasticité synaptique ? La problématique de notre sujet consistera donc en l'étude des phénomènes qui permettent d'implanter ces mécanismes synaptiques.

2.4 Notre approche : l'implantation d'une synapse dynamique nanométrique

2.4.1 Les implantations de synapse dynamique sur silicium

Les synapses matérielles présentent des phénomènes de relaxation. Cependant ceux-ci ne ressemblent pas forcément aux phénomènes de relaxation mis en jeu dans les réseaux biologiques.

Des synapses ont été réalisées avec des capacités, mais ces circuits sont très complexes [153]. Des implantations de synapse sur silicium utilisant des transistors à grille flottante ont été proposées. Nous pouvons citer notamment le circuit ETANN élaboré en technologie EEPROM, proposé par Holler et al. [154]. Cependant dans cette proposition les poids ne sont pas mis à jour sur le chip. L'entrainement et l'ajustement des poids synaptiques s'effectuent sur un processeur complémentaire, puis ils sont transférés au circuit.

D'autres propositions cherchent à reproduire finement les plasticités observées dans les synapses biologiques (STDP, STP,...). Nous pouvons citer plus particulièrement Fusi et al. [155] qui réalisent une synapse en technologie CMOS 1.2 μ m. La synapse occupe une surface de 90 $\mu \times 70 \mu$. Chicca et al. réalisent une synapse adaptative en silicium avec une technologie CMOS 1.5 μ m [156]. Le circuit présente une adaptation à court terme. Comme dans une synapse biologique le niveau stabilisé du courant post synaptique est une fonction de la fréquence du signal d'entrée (figure 2.20).

Dans ces différentes propositions l'implantation matérielle de la plasticité synaptique en technologie CMOS réclame de nombreux dispositifs.

2.4.2 Le transistor organique+nanoparticules : notre proposition d'implantation de synapse dynamique

Les propositions précédentes se caractérisent par des circuits occupant une surface importante. Dans ce travail nous cherchons à obtenir un comportement identique avec un seul dispositif de dimensions plus réduites, et nécessitant un effort de conception moindre.

Lors de mesures expérimentales sur un dispositif de notre choix, nous rechercherons des comportements similaires à ceux présentés dans la partie 2.3.2. De plus une caractéristique importante des synapses est le phénomène de relaxation du poids synaptique. A



FIG. 2.20 – Schéma du circuit de la synapse adaptive proposée par Chicca et al.[156]. Les transistors M3-M6 et la capacité C_f constituent le bloc facilitateur du circuit synaptique. Les transistors M11-M14 et la capacité C_d implantent le bloc dépressif.

l'échelle nanométrique les phénomènes de relaxation pourraient réaliser cette propriété. Des mémoires organiques composées de nanoparticules enserrées dans un composé organique on été démontrées [157], [158], [159]. Dans de tels dispositifs les nanoparticules agissent comme des centres de rétention de charges. Nous chercherons à réaliser notre synapse en nous inspirant d'une telle structure, les charges stockées dans les nanoparticules réalisant le poids synaptique. Comme dans la Nanocell de Tour et al. [101],

[102] présentée en chapitre 1, les nanoparticules sont dispersées sur une surface sans une

2.5 Conclusion

contrainte d'organisation interne.

De la comparaison des architectures envisageables (Von Neumann, reconfigurable, automates cellulaires, réseau de neurones) nous avons déduit que l'architecture neuronale serait très bien adaptée aux nanotechnologies. Les réseaux de neurones séduisent de par leur tolérance intrinsèque aux fautes, leur régularité topologique, et leur potentiel d'application. Nous nous sommes fixés sur les réseaux de type impulsionnel. Ces réseaux, proches de leur modèle biologique utilisent des impulsions de courant ou de tension pour la communication inter neuronale. En effet à l'échelle nanométrique si les niveaux des signaux sont sujets au bruit, par contre les caractéristiques temporelles sont bien déterminées. Dans un tel réseau la fonction synaptique gagnerait le plus d'une implantation nanométrique. Premièrement les tailles nanométriques permettraient d'obtenir la densité importante requise par les synapses, ensuite l'implantation

Conclusion

de la fonctionnalité pourrait bénéficier de nouvelles caractéristiques présentes dans les dispositifs nanométriques.

Dans les réseaux de neurones biologiques la synapse est dynamique. Le poids synaptique se caractérise par sa plasticité : sa valeur varie au cours de l'opération du réseau suivant l'activité des neurones pré et/ou post synaptiques. De manière analogue nous chercherons à implanter expérimentalement une fonction synapse dynamique caractérisée par la programmabilité en ligne de la valeur de son poids.

Nous allons rechercher expérimentalement la fonctionnalité d'une synapse dynamique. Deux principes dirigeront notre investigation :

- D'une part à l'échelle nanométrique les dispositifs mémoires se caractérisent par des temps de rétention courts. Or cette propriété de relaxation de la synapse améliore les propriétés computationnelles du réseau de neurones. Contrairement à la démarche habituelle nous voulons obtenir une mémoire avec un faible temps de rétention et espérons profiter des effets de relaxation présents à l'échelle nanométrique.
- D'autre part le dispositif envisagé doit présenter des propriétés de transistor. En effet il doit pouvoir amener un gain au signal post-synaptique afin de faciliter les interconnections vers les neurones.

Chapitre 3

Implantation technologique

3.1 Introduction

Dans cette étude nous voulons réaliser un dispositif couplant le comportement d'une mémoire et le gain d'un transistor. L'effet mémoire recherché ne nécessite pas un temps de rétention élevé, n'oublions pas qu'une propriété importante de la synapse est sa capacité à "oublier". Nous nous inspirons des travaux de Yang et son équipe. Celuici a réalisé un dispositif mémoire composé d'une couche de polymère contenant des nanoparticules d'or encapsulées par des molécules de dodécanethiol [157], [160] (figure 3.1(a)). Il a observé un comportement bistable sur ce dispositif : à partir d'un seuil en tension d'une valeur de 6V le dispositif passe d'un état de basse conductivité à un état de haute conductivité. Ce processus est réversible si le dispositif est polarisé en inverse (figure 3.1(b)).



FIG. 3.1 - (a) Schéma du dispositif mémoire réalisé par Yang et al. [160]. Une couche de matériau polymère (polystyrène+DMA) contenant des nanoparticules encapsulées par des molécules de dodécanethiol est insérée entre des électrodes en aluminium. (b) Caractéristique I-V du dispositif AL/Au-DT NP+DMA+PS/Al. Lors du premier balayage en tension on est dans un état de basse conductivité (1). A partir d'une tension de 6V on passe à un état de haute conductivité (2). On revient à l'état de basse conductivité par un balayage en tension inverse (3)[160].

Notre dispositif aura une géométrie légèrement différente. Il s'agira d'un transistor en pentacène avec des nanoparticules encapsulées dans le canal conducteur (figure 3.2). Alors que l'étude de Yang porte sur la stabilité du dispositif et son temps de rétention, nous allons observer le temps de relaxation du dispositif pour évaluer sa capacité à implémenter une synapse dynamique. En effet d'une part on peut s'attendre à ce qu'en contrôlant l'état de charge des nanoparticules présentes dans le canal, on pourra moduler la conductivité du système. D'autre part on peut compter sur la relaxation des charges pour implémenter le caractère dynamique du poids synaptique. L'objectif est de réaliser un démonstrateur de principe pas forcément nanométrique. Pour réaliser le dispositif nous allons d'abord effectuer un dépôt de nanoparticules encapsulées par des molécules (encore appelées Molecular Protected Clusters MPCs) sur une surface d'isolant SiO₂ comprise entre deux électrodes d'or, puis nous allons recouvrir ce dépôt d'une couche de pentacène. Les nanoparticules encapsulées



 ${
m FIG.}$ 3.2 – Schéma du transistor pentacène avec des nanoparticules enterrées dans le canal conducteur.

3.2 Les nanoparticules encapsulées

Les colloïdes de particules d'or sont bien connus depuis les travaux de Faraday sur la synthèse d'hydrosols d'or en 1857. Ce sont des particules d'or stabilisées en solution aqueuse.

Les nanoparticules ont tendance à s'agréger sous l'action des forces de Van der Waals, pour éviter cela des molécules ioniques telles que des ions citrate ou des ions chloroaurate $\operatorname{AuCl}_{4}^{-}$ sont adsorbées sur les surfaces des nanoparticules.

Une grande avancée pour leur utilisation dans des dispositifs à l'état solide a été réalisée en 1993 quand Giersig et ses collègues ont déposé sur une surface une monocouche ordonnée de nanoparticules d'or encapsulées par des ions citrate ou des alcanedithiols (chaînes carbonées possédant deux groupements -SH)[161].

Mais en 1994 Brust et ses collègues élaborent un procédé de synthèse de nanoparticules qui facilite l'obtention d'un réseau ordonné sur une surface [162]. L'originalité de leur procédé réside dans le fait que la synthèse des nanoparticules et leur encapsulation par des molécules thiolées s'opèrent simultanément. Ils obtiennent ainsi des particules d'or de taille nanométrique sur la surface desquels des monocouches de molécules alcanethiol ont été déposées.

Ces nanoparticules encapsulées appelées Molecular Protected Clusters (MPCs) peuvent être séchées sous forme de poudre et resolubilisées dans un solvant organique sans modification de leur structure et sans qu'elles ne s'agrègent entre elles.

Les molécules servant à encapsuler les nanoparticules sont désignées par le terme de molécules ligands. Les plus utilisées sont les molécules d'alcanethiol car elles forment des monocouches bien ordonnées sur l'or. Par un échange de ligands on peut obtenir des nanoparticules possédant des fonctionnalités chimiques spécifiques [163] (figure 3.3).

La propriété importante des MPCs est leur capacité à former des réseaux compacts sur des surfaces. Outre le dispositif mémoire réalisé par Yang, des transistors SET ont été réalisés en utilisant ces composés [164], [165] (figure 3.4). Pour plus de renseignements sur la synthèse et les propriétés des MPCs on peut consulter la revue rédigée par Daniel et Astruc [166].



FIG. 3.3 – On peut modifier la fonctionnalité chimique de la nanoparticule encapsulée par échange de ligand. R désigne un groupement chimique.



FIG. 3.4 – Les électrodes sont définies par lithographie électronique. Les pointes des électrodes de source et drain font une cinquantaine de nanomètres. L'électrode de grille une centaine de nanomètres. Le gap inter électrodes est de 30 nm. Sato et al. ont déposé trois nanoparticules encapsulées par des molécules d'alcanedithiol. Sur ce dispositif ils observent des comportements de blocage de coulomb.

3.3 Etat de l'art des modes de dépôt des nanoparticules encapsulées

Une goutte de solution de MPCs encapsulés par des molécules d'alcanethiol déposée sur une surface, permet d'obtenir un réseau organisé de MPCs après évaporation du solvant. Ce réseau peut être stabilisé en remplaçant les molécules d'alcanethiols par des molécules d'alcanedithiols (c'est à dire portant deux groupements -SH). Chaque groupement -SH se lie alors à une nanoparticule [167], [168]. Le film de MPCs peut d'abord être formé sur un subphase liquide tel que l'eau, ensuite à l'aide d'un tampon PDMS par exemple il peut être transféré sur un substrat solide [169], [170], [167].

Le film peut également être formé directement sur une surface solide. Andrès et son équipe obtiennent ainsi un film compact de nanoparticules encapsulées par des molécules de dodecanethiol $C_{12}H_{25}SH$ sur une surface SiO_2 de largeur 450 nm entre deux électrodes d'or d'épaisseur 30-40 nm chacune [171]. Une goutte de la solution de nanoparticules encapsulées est d'abord déposée sur la surface. Une fois le solvant évaporé, ils obtiennent une monocouche compacte de MPCs. Ils procèdent ensuite à la stabilisation de leur réseau en remplaçant les molécules ligands par des molécules d'aryldithiol. Ceci s'effectue en plongeant le substrat dans une solution de ces molécules.

Cependant pour améliorer la stabilité de la monocouche sur le substrat il peut être nécessaire de fonctionnaliser la surface par des molécules d'accrochage. Pour cela on utilise des molécules possédant deux extrémités réactives, l'une vis à vis du substrat, l'autre vis à vis des nanoparticules. Des groupements -SH ou -NH₂ sont utilisés pour accrocher les nanoparticules (figure 3.5). Pour greffer la molécule sur le substrat on utilisera un groupement trimethoxysilane -Si(OMe)₃ si la surface est un oxyde de silicium, ou un groupement -SH si on a une surface d'or (figure 3.6).



FIG. 3.5 – Les nanoparticules en phase aqueuse sont fixées par des groupements amine -NH₂. La liaison s'effectue sous forme ionique NH₃⁺. Les nanoparticules en phase organique sont fixées par un groupement thiol -SH. Ce groupement perd un atome d'hydrogène pour réaliser une liaison covalente avec la nanoparticule.



FIG. 3.6 – (a) Les molécules utilisées pour les surfaces d'or sont des molécules à groupement -SH. La molécule perd un atome d'hydrogène quand elle s'accroche à la surface. R désigne un groupement chimique -SH ou -NH₂. (b) Les molécules d'accrochage pour les surfaces d'oxyde de silicium sont des molécules à groupement triméthoxysilane -Si(OCH₃)₃. Les atomes d'oxygène assurent la liaison avec la surface d'oxyde. R désigne un groupement chimique -SH ou NH₂.

Snow et son équipe [172] procèdent à un dépôt de nanoparticules d'or encapsulées par des molécules de hexanethiol $CH_3(CH_2)_5SH$ sur un réseau de microélectrodes d'or. Ils utilisent une molécule d'accrochage thiolée pour les électrodes d'or et une molécule à groupement silane pour la surface de SiO₂. Cette méthode de dépôt consiste en quatre étapes de 15 mn chacune. Trois étapes de fonctionnalisation de la surface par des molécules et une étape de dépôt des nanoparticules. Entre chaque étape l'échantillon est nettoyé. La première étape consiste à fonctionnaliser les électrodes d'or. Pour cela l'échantillon est plongé dans une solution à 1% d'alcanedithiol dans du chloroforme. Il est ensuite nettoyé au chloroforme. Puis l'échantillon est immergé dans une solution à 5% de (3-mercaptopropyl)trimethoxysilane $SH(CH_2)_3Si(OMe)_3$ dans de l'heptane afin de fonctionnaliser le gap inter électrode. Il subit ensuite un nettoyage par de l'heptane. La troisième étape est une ré immersion dans la solution 1% d'alcanedithiol dans du chloroforme. Ce bain enlève les molécules de (3-mercaptopropyl)trimethoxysilane qui auraient éventuellement pu se lier aux électrodes en déplaçant les molécules dithiol déposées durant la première étape. L'échantillon est ensuite nettoyé au chloroforme. Puis il est immergé dans une solution 0.50% de nanoparticules d'or dans du chloroforme. Cette étape est terminée par un nettoyage dans du chloroforme propre. Pour obtenir plusieurs couches l'échantillon subit des bains alternés dans la solution d'alcanedithiol et dans la solution de nanoparticules d'or (figure 3.7).



FIG. 3.7 - La surface est recouverte d'une couche d'accrochage puis une monocouche peut-être déposée. On obtient des multicouches en procédant de façon itérative.

Les méthodes de dépôt précédentes présupposent des nanoparticules encapsulées par des molécules d'alcanethiol en milieu organique. Si on dispose de nanoparticules solubilisées en milieu aqueux, il est possible de les transférer dans un solvant organique non miscible dans l'eau (tel le chloroforme ou le toluène). Pour cela on utilise une technique de transfert de phase. Typiquement il s'agit de mettre en présence dans une éprouvette la solution d'or colloïdale et la solution de molécules thiolées avec lesquelles on veut encapsuler les nanoparticules. Ce milieu est agité en présence d'un catalyseur de phase. Ce dernier est une alkylamine ou un sel d'alkylammonium dont la particularité est d'être soluble dans les deux phases. Au cours de l'agitation les catalyseurs passent dans la phase aqueuse se lient aux nanoparticules et les transfèrent dans la phase organique. Dans la phase organique les ligands thiol dépouillent les nanoparticules de leurs catalyseurs de transfert en formant une liaison plus forte Au-S. Une revue complète de ces méthodes d'encapsulation par transfert de phase a été réalisée par Rao et ses collègues [173]. Une autre méthode consiste à mettre en présence les nanoparticules et les molécules thiolées dans un solvant commun comme l'éthanol. Ainsi Andres et ses collègues procèdent au remplacement des ions citrate par des molécules thiolées de la façon suivante [169] : 5 ml d'une solution d'or colloïdale à 5×10^{-3} particules/ml est lentement mélangée à 100 μ l d'une solution à 20 mM de n-dodecanethiol dans l'éthanol pendant 20mn. Puis 30 ml d'éthanol est rajouté à cette solution. Le mélange est laissé au repos pendant 2h puis centrifugé à 3400 tours/mn pendant 1h. La solution surnageante est décantée et le précipité séché à l'air pendant une nuit. Les nanoparticules encapsulées sont ensuite solubilisées dans du n-hexane et peuvent être déposées sur une surface.

Un autre procédé consiste à les déposer en phase aqueuse sur la surface puis à procéder à leur encapsulation. La molécule d'accrochage utilisée est alors une molécule à groupement amine -NH₂ (ou ammonium -NH₃⁺) qui établit une liaison ionique avec les ions citrate adsorbés sur la nanoparticule d'or. A cause de la répulsion électrostatique entre les ions qui encapsulent les nanoparticules, on n'obtient pas un réseau compact mais un réseau de nanoparticules régulièrement espacées. Cependant la densité du réseau peut être améliorée par des dépôts successifs de nanoparticules. Les ions citrate qui revêtissent les nanoparticules déposées sur la surface sont d'abord remplacés par des molécules dithiol. Ces dernières serviront de couche d'accrochage lors de dépôts ultérieurs. Quand l'échantillon subit un bain supplémentaire de nanoparticules, deux phénomènes contribuent à l'amélioration de la densité du réseau. D'une part les nanoparticules du deuxième bain vont pouvoir se greffer sur la surface car les nanoparticules précédemment déposées ne sont plus chargées négativement. D'autre part elles vont s'accrocher aux molécules thiolées qui recouvrent les nanoparticules précédemment déposées.

Suivant cette procédure Sato et son équipe déposent un réseau de nanoparticules d'or sur une surface de SiO_2 [164]. Ils utilisent l'APTMS (CH₃O)₃Si(CH₂)₃NH₂ comme molécule à groupement amine pour greffer les nanoparticules. Le wafer est d'abord nettoyé par un bref plasma O₂. Puis il est plongé dans une solution aqueuse de 2,3 mM d'APTMS pendant 5mn pour fonctionnaliser le SiO₂. Il est rincé deux fois à l'eau distillée et séché par flux de N₂. Cette étape se termine par un passage au four pendant 30mn à une température de 120 ° C pour activer la réaction de greffage sur la surface. Ils procèdent ensuite au dépôt des nanoparticules. Pour cela l'échantillon est immergé dans une solution d'or colloïdale de taille 10 nm en phase aqueuse pendant 8 à 12 h. Il est rincé par deux bains d'éthanol et séché sous flux de N₂. Puis l'échantillon est immergé dans une solution à 5 mM de 1,6-hexanedithiol dans l'éthanol pendant 24 h afin de déposer une monocouche de molécules dithiol sur les nanoparticules. Il est ensuite rincé par deux bains d'éthanol et séché sous un flux de N_2 . L'échantillon peut alors subir un autre dépôt de nanoparticules dans les mêmes conditions que le précédent. En figure 3.8 on remarque que ce procédé de dépôt permet d'obtenir un réseau relativement compact. En procédant de façon itérative on peut améliorer le recouvrement de la surface par des nanoparticules.



FIG. 3.8 - Après un dépôt de nanoparticules en phase aqueuse sur une surface aminée, Sato obtient un réseau non compact(gauche). Cependant une monocouche de molécules alcanedithiol sur la surface des nanoparticules peut servir de couche d'accrochage pour d'autres nanoparticules. Après un autre dépôt de nanoparticules, on obtient alors un réseau plus compact (droite).

Siquiera-Petri et ses collègues proposent une fonctionnalisation du SiO_2 par une autre molécule à terminaison NH_2 , le (3-aminopropyl)trimethoxysilane

 $NH_2(CH_2)_3Si(OMe)_3$ sans un passage contraignant dans un four de recuit [174]. Ils obtiennent ce dépôt sur un wafer silicium couvert d'une couche de SiO₂ de 1,5 nm d'épaisseur. Pour procédure de nettoyage le wafer est d'abord laissé 15mn dans un bain de dichloromethane puis plongé dans une solution d'ammoniaque $(NH_4OH)(25\%$ en volume), d'eau oxygénée H_2O_2 (30% en volume) et d'eau distillée dans un rapport volumique 1 :1 :5 à une température de 70 ° C pendant 20mn. Cette étape de nettoyage se termine par un lavage à l'eau distillée et un séchage sous flux de N₂. Le dépôt des molécules s'effectue dans une solution à 1% de molécules (3-aminopropyl)trimethoxysilane dans du toluène pendant 4mn à une température de 60 ± 1 ° C. Enfin les wafers sont nettoyés 5 fois au toluène puis séchés sous flux de N₂. Les électrodes d'or pourront subir une amination en utilisant des molécules de 2-aminoethanethiol (chlorhydrate). Ces molécules forment des monocouches stables sur les surfaces d'or [175].

3.4 Protocole expérimental des échantillons réalisés

Les premiers dépôts ont été réalisés sur une surface de silicium non dopé surmonté d'une couche de 250 nm d'oxyde. Les dépôts suivants sont réalisés sur un substrat silicium dopé p+ surmonté d'une couche d'oxyde de 200 nm. Les wafers sont nettoyés par un piranha (mélange de 20 ml d'eau oxygénée et 40 ml d'acide sulfurique; attention mélange fortement exothermique; le mélange avec des solvants organiques - acétone, alcool d'isopropyle, etc. - causera une explosion) puis un plasma O₂. Après ces traitements l'angle de contact de l'eau avec le silicium est de 30°, ce qui est élevé. Cette valeur pourrait peut-être s'expliquer par la rugosité du substrat. Mais celle-ci n'a pas été mesurée. Des plots d'or sont ensuite déposés sur le substrat par évaporation sous vide UHV. Nous utilisons une grille de microscope à transmission pour masque (figure 3.9(a)). Une couche de titane d'épaisseur 200 Å est d'abord déposée, elle sert de couche d'accrochage. Ensuite un dépôt d'or d'épaisseur 2000 Å est réalisé. Les plots d'or ont des côtés de 113 µm. La largeur du gap inter électrodes est de 12 µm (figure 3.9(b)).



FIG. 3.9 – (a) Schéma de la grille de microscope utilisée de référence G200HS Fine Square Mesh. (b) Schéma d'un plot d'or sur un échantillon. H=113 μ m, B=12 μ m, P=125 μ m.

Nous utiliserons des nanoparticules synthétisées par la société SIGMA ref(G 1652) de diamètre 20 nm en solution aqueuse. Elles sont stabilisées par des ions citrate et solubilisées dans un solvant polaire H_2O pour éviter leur agrégation. Ces solutions sont précisément composées de 0,01%HAuCl₄ en suspension dans 0,01% d'acide tanique avec 0,04% de citrate de trisodium, 0,26mM de carbonate de potassium et 0,02% d'azoture de sodium.

Les molécules ligands utilisées seront des molécules 1,8-octanedithiols et 1-4 benzènedithiols (figures 3.10 et 3.11). Ces molécules serviront aussi de molécules d'accrochage sur les électrodes avec également la molécule de 2-aminoethanethiol (chlorhydrate) (figure 3.12). Les molécules utilisées pour la fonctionnalisation du gap isolant entre les électrodes seront le (3-Mercaptopropyl) trimethoxysilane $C_6H_{16}O_3SSi$ et le (3aminopropyl)trimethoxysilane $NH_2(CH_2)_3Si(OMe)_3$ (figures 3.13 et 3.14). Les solvants seront l'acétone, l'éthanol, et le chloroforme. Pour l'ensemble des dépôts nous utiliserons des flacons de capacité 10 ml. Les expériences sont réalisées sous atmosphère N_2 .





FIG. 3.14 – Molécule de 3-aminopropyl trimethoxysilane, $NH_2(CH_2)_3Si(OCH_3)$, M=179.29g/mol.

3.4.1 Dépôts réalisés par fonctionnalisation des surfaces par des molécules thiolées

Nous avons d'abord réalisé des dépôts en utilisant des molécules à groupement thiol pour fonctionnaliser les surfaces. Nous utilisons le wafer au substrat de silicium non dopé avec un oxyde de 250 nm. Six échantillons ont été réalisés. Sur quatre échantillons seules les électrodes sont tapissées de molécules d'accrochage : sur les échantillons 1 et 2 les molécules d'accrochage sont des 1,8-octanedithiols, sur les échantillons 3 et 4 ce sont des 1,4-benzènedithiols. Nous supposons alors que les nanoparticules encapsulées vont former un film entre les électrodes en croissant à partir de celles-ci. Les nanoparticules déposées sur les échantillons 1 et 2 sont encapsulées par des molécules de 1,8-octanedithiol. Celles déposées sur les échantillons 3 et 4 sont encapsulées par des molécules de 1,4-benzènedithiols. Nous disposons de nanoparticules en phase aqueuse. Leur encapsulation par les molécules ligands peut s'effectuer soit avant le dépôt sur la surface (échantillon 1 et 3) soit au cours du dépôt(échantillon 2 et 4). Sur les échantillons 5A et 5B les électrodes et le gap sont fonctionnalisés par des molécules thiolées. Le gap est tapissé par des molécules de (3-mercaptopropyl)triméthoxysilane SH(CH₂)₃Si(OMe)₃ et les électrodes par des molécules d'octanedithiol. Sur ces derniers échantillons les nanoparticules utilisées sont encapsulées par des molécules de 1,8-octanedithiol. Un schéma récapitulatif des manipulations effectuées est disponible en figure 3.15.

L'échantillon 1 Cet échantillon est plongé dans une solution $10^{-2} - 10^{-3}$ M de 1,8octanedithiol dilué dans 5 ml d'éthanol pendant 48h afin de fonctionnaliser les électrodes. Ensuite 500 μ l d'or colloïdal 20 nm est ajoutée à cette solution. Pour permettre l'encapsulation des nanoparticules et leur dépôt sur le substrat l'échantillon est laissé une nuit dans ce mélange sous atmosphère N₂.

L'échantillon 2 Cet échantillon subit une étape de thiolation des électrodes identique à celle de l'échantillon 1. Ensuite nous procédons à l'encapsulation des nanoparticules par les molécules d'octanedithiol. 500 μ l de solution aqueuse d'or colloïdale 20 nm est diluée dans 5 ml d'acétone. Puis cette solution est traitée par 100 μ l de dodecanethiol. L'échantillon 2 est plongé dans cette solution de nanoparticules encapsulées pendant une nuit sous atmosphère N₂ pour permettre le dépôt des nanoparticules sur le substrat.



FIG. 3.15 – Schéma récapitulatif des protocoles des échantillons ayant subi un dépôt de molécules thiolées.

Les échantillons 3 et 4 Sur ces échantillons les électrodes vont subir une thiolation par des molécules de 1,4-benzènedithiol. Pour cela les échantillons baignent chacun dans une solution $10^{-2} - 10^{-3}$ M de 1,4-benzenedithiol diluée dans 5 ml d'éthanol pendant 48 h. L'étape de dépôt des nanoparticules est différente pour chaque échantillon. 500 μ l d'or colloïdal 20 nm est ajouté au bain de l'échantillon 3. Ce dernier est laissé dans cette solution pendant une nuit sous atmosphère N₂. Pour l'échantillon 4, les nanoparticules sont d'abord encapsulées par le 1,4-benzènedithiol. 10 mg de 1,4-benzenedithiol sont solubilisés dans 4 ml d'éthanol puis 500 μ l d'or colloïdal 20 nm est ajouté à cette solution. L'échantillon 4 est plongé dans ce bain de nanoparticules encapsulées et laissé 48 h sous atmosphère N₂. A l'issue de ces étapes chaque échantillon subit un lavage au chloroforme, à l'acétone et à l'eau déionisée pour enlever les excès de colloïdes, de dithiol et de sels. Les échantillons sont ensuite séchés sous flux de N₂.

Les échantillons 5A et 5B Ces échantillons vont subir une fonctionnalisation du gap inter électrodes. Ils sont d'abord plongés dans une solution de 100 μ l de 1,8-octanedithiol dilué dans 10 ml de chloroforme pendant 15 mn afin d'obtenir une thiolation des électrodes. Ensuite vient l'étape de thiolation du gap isolant. Les molécules de mercaptopropyl SH(CH₂)₃Si(OMe)₃ sont évaporées sous vide à 0.2 torr sur l'échantillon 5A pendant 15 mn. L'échantillon 5B subit ce dépôt de molécules en phase liquide dans une solution de 250 μ l de silane dilué dans 10 ml d'hexane pendant une durée de 15 mn également. Puis les échantillons 5A et 5B sont chacun plongés dans une solution de 100 μ l de 1,8-octanedithiol dilué dans 10 ml de chloroforme pendant une nuit. Ce deuxième bain permet de reconstituer la couche d'octanedithiol déposée sur les électrodes. Celle-ci peut avoir été abîmée par le dépôt des molécules de mercaptopropyl. Les échantillons sont rincés au chloroforme, puis ils subissent le dépôt de nanoparticules. Ils sont plongés pendant 5 mn dans une solution composée de 500 μ l d'or colloïdal 20 nm diluée dans 5 ml d'acétone sous atmosphère N₂. Les échantillons sont finalement rincés au chloroforme.

3.4.2 Dépôts réalisés par fonctionnalisation des surfaces par des molécules aminées

Nous réalisons trois autres échantillons en utilisant des molécules à groupement amine pour fonctionnaliser le gap inter électrodes. Nous utilisons le wafer au substrat de silicium dopé p+ pour pouvoir étudier l'influence d'une tension de grille sur le film formé. Les électrodes de l'échantillon 6 seront fonctionnalisées par des molécules thiolées, sur les deux autres échantillons les électrodes porteront des groupements amine. Les dépôts se déroulent de la façon suivante : les électrodes sont fonctionnalisées ; puis le gap est aminé par des molécules de (3-aminopropyl)trimethoxysilane ; les nanoparticules en phase aqueuse sont ensuite déposées sur la surface. Nous procédons alors à leur encapsulation par des molécules ligands. La figure 3.16 montre un schéma récapitulatif des manipulations effectuées.



FIG. $3.16\,-$ Schéma récapitulatif des protocoles des échantillons ayant subi un dépôt de molécules aminées.

L'échantillon 6 Cet échantillon subit une thiolation des électrodes et une amination du gap. Pour fonctionnaliser les électrodes, le wafer métallisé est plongé pendant 5h dans une solution dégazée de 100 μ l de 1,8-octanedithiol diluée dans 10 ml d'éthanol. Puis l'échantillon est lavé trois fois à l'alcool et séché sous flux de N₂. Nous mesurons un angle de contact avec l'eau de 70 \pm 2 ° sur l'or ayant subi une thiolation. Ce qui est cohérent avec la littérature [176]. Ensuite nous procédons à la fonctionnalisation des gaps inter électrode. Le gap est aminé par réaction avec une solution de 100 μ l de (3-aminopropyl)trimethoxysilane $NH_2(CH_2)_3Si(OMe)_3$ diluée dans 40 ml de toluène portée à une température de 70 ° C pendant 10 mn. Il est lavé au toluène puis à l'alcool, et séché sous flux de N_2 . On observe un film visible en surface de notre échantillon. Les molécules ont surement polymérisé, ceci sera confirmé par les images MEB. L'angle de contact de l'eau sur le silicium est de 37° . Puis l'échantillon est plongé dans 5 ml de la solution aqueuse d'or colloïdal 20 nm durant une nuit sous atmosphère N₂. L'échantillon est lavé à l'eau déionisée puis à l'alcool pour enlever les traces de colloïdes en excès. Il est ensuite séché sous flux de N_2 . On procède alors à l'encapsulation des nanoparticules par traitement avec le 1,8-octanedithiol. L'échantillon est plongé pendant 5 h dans une solution dégazée de 100 μ l de 1,8-octanedithiol dans 10 ml d'éthanol. L'échantillon est lavé trois fois à l'alcool puis séché sous atmosphère N_2 . Ces étapes de dépôt et d'encapsulation des nanoparticules seront identiques pour tous les échantillons suivants.

L'échantillon 7 Cet échantillon subit un dépôt de molécules à groupement amine sur les électrodes et dans le gap. La première étape est la fonctionnalisation des électrodes par des molécules de 2-aminoethanethiol (chlorhydrate). L'échantillon est plongé pendant 5 h dans une solution dégazée de 2-aminoethanethiol (chlorhydrate) dans l'éthanol (100 mg dans 10 ml). Il est ensuite lavé trois fois à l'alcool, puis séché sous flux de N₂. Le gap inter électrodes est ensuite aminé par réaction avec une solution de 100 μ l de (3-aminopropyl)trimethoxysilane NH₂(CH₂)₃Si(OMe)₃ dilué dans 40 ml de toluène portée à une température de 70 ° C pendant 10 mn. L'échantillon est lavé au toluène puis à l'alcool. Il est ensuite séché sous flux de N₂. On observe la présence d'un film de polymère visible en surface. La mesure de l'angle de contact avec l'eau sur un bout de silicium de notre wafer donne une valeur de 37 °. On procède ensuite au dépôt des nanoparticules sur le substrat et à leur encapsulation par des molécules de 1,8-octanedithiol, selon le procédé décrit pour l'échantillon 6.

L'échantillon 8 Cet échantillon subit des étapes identiques à l'échantillon 7, si ce n'est que l'amination du gap inter électrodes s'effectue dans des conditions parfaitement anhydres, c'est à dire en absence totale d'eau, pour éviter la polymérisation [174]. Pour cela le toluène est séché par agitation sur tamis moléculaire. Le gap est aminé par réaction avec une solution de 50 μ l de (3-aminopropyl)trimethoxysilane dilué dans 40 ml de toluène portée à une température de 60 ° C pendant 4 mn. L'échantillon est lavé au toluène puis à l'alcool sous ultrasons. Il est ensuite séché sous flux de N₂. On n'observe pas de polymère visible en surface. L'angle de contact avec l'eau est de 19° sur le silicium, ce qui est en accord les résultats de Siquiera-Pétri.

3.5 Caractérisation des échantillons

Nos échantillons seront imagés par microcopie électronique à balayage avec une tension d'accélération de 15 kV. Les mesures électriques seront réalisées aves un agilent HP 4155C avec un prober sous pointe dans une boîte à gant à 1ppm de O et H_2O .

3.5.1 Echantillons ayant subi une thiolation : échantillons 1, 2, 3, 4, 5A, 5B

Les images MEB ne montrent pas de dépôt de nanoparticules sur l'ensemble de l'échantillon 1. Sur l'échantillon 2 on observe un dépôt très localisé des nanoparticules. Celles-ci forment un film d'épaisseur irrégulière (figures 3.17(a) et (b)). Les caractéristiques électriques obtenues sur trois paires d'électrodes différentes confirment ces observations (figure 3.18). En effet les conductivités du système électrodes + film mesurées sur ces trois dispositifs sont de $1,41 \times 10^{-9}$ S.cm⁻¹, $2,9 \times 10^{-10}$ S.cm⁻¹, et $1,14 \times 10^{-10}$ S.cm⁻¹



FIG. 3.17 - (a) Image MEB de l'échantillon 2. On observe un dépôt très localisé. (b) Grossissement d'une zone de dépôt sur l'échantillon 2. Bien que le film soit irrégulier on observe un réseau 2D de nanoparticules sur des aires d'un peu plus de 200 nm². On observe que les nanoparticules peuvent également s'agréger entre elles.

Sur l'échantillon 3 le dépôt s'est localisé sur les électrodes d'or (figures 3.19(a) et (b)). Les nanoparticules y forment des agrégats. Les mesures électriques ne montrent pas de caractère conducteur entre les électrodes.



FIG. 3.18 – Caractéristiques I_{ds} - V_{ds} acquises sur trois dispositifs de l'échantillon 2. Les conductivités mesurées sont de $1,41 \times 10^{-9}$ S.cm⁻¹, $2,9 \times 10^{-10}$ S.cm⁻¹, et $1,14 \times 10^{-10}$ S.cm⁻¹.



FIG. 3.19 - (a) Image MEB de l'échantillon 3. Les points blancs sur les plots d'or sont des amas de nanoparticules. (b) Un grossissement d'un plot d'or de l'échantillon 3 montre que les nanoparticules forment des agrégats de forme irrégulière. A l'image les nanoparticules déposées se détachent bien de la surface d'or qui est plus sombre.

Sur l'échantillon 4 il y a également très peu de dépôt. Cependant à de rares endroits, des paires d'électrodes ont pu être reliées par un film (figure 3.20). Ce que confirme la caractéristique électrique en figure 3.21. La conductivité est de $7,01\times10^{-7}$ S.cm⁻¹. Elle est plus importante de trois ordres de grandeur que celles mesurées sur les dispositifs de l'échantillon 2. Le dispositif sur lequel porte cette conductivité n'a pas été imagé. Cependant on peut supposer que cette valeur est liée à un film de nanoparticules d'épaisseur plus importante que ceux déposés sur les dispositifs de l'échantillon 2. Les images MEB des échantillons 5A et 5B ne montrent respectivement aucun dépôt de nanoparticules.



FIG. 3.20 – Image MEB prise sur l'échantillon 4. Sur cet échantillon il y a eu très peu de dépôt de nanoparticules. Cependant à de rares endroits un tapis de nanoparticules a pu relier deux électrodes.



FIG. 3.21 – Caractéristique I_{ds} - V_{ds} acquise sur un dispositif présentant un dépôt similaire à celui montré en figure précédente. La conductance est de 7.01×10^{-7} S.cm⁻¹. Elle est plus élevée que sur l'échantillon 2 en effet l'épaisseur du film nanoparticules + molécules déposé est plus importante.

Ces résultats indiquent que les nanoparticules d'or ont bien été déposées sur les échantillons 2, 3 et 4. Cependant on obtient un dépôt très localisé. Le meilleur recouvrement entre les électrodes a été obtenu quand le dépôt a été précédé d'une encapsulation des nanoparticules par des molécules d'octanedithiol dans de l'acétone (échantillons 2 et 4). Le dépôt d'une monocouche au préalable dans le gap devrait améliorer le greffage des nanoparticules entre les électrodes, mais notre tentative avec une monocouche de molécules de mercaptopropyl n'a pas été concluante. Pour obtenir un dépôt de ces molécules dans le gap il aurait sans doute fallu que cette étape dure plus de 15 mn. On a obtenu de meilleurs résultats sur les dispositifs où des molécules aminées ont été utilisées.

3.5.2 Echantillons ayant subi une amination : échantillons 6, 7, 8

Sur tous ces échantillons nous avons obtenu un bon recouvrement de notre surface. Les images de l'échantillon 6 montrent un dépôt important de nanoparticules (figures 3.22(a) et (b)). Les taches blanches indiquent que des molécules ont polymérisé sur la surface. Il s'agit d'un dépôt non homogène : les nanoparticules forment un réseau compact à certains endroits, mais elles s'organisent préférentiellement en structures linéaires. L'échantillon 6 a subi une thiolation des électrodes et une amination du gap. Son taux de recouvrement important est sans doute du au fait que la liaison Au-S est une liaison covalente et la liaison Au-NH₂ est une liaison ionique plus faible. Des nanoparticules d'or déposées sur les molécules thiolées ont pu être arrachées de la surface des électrodes par des mouvements du fluide. Elles se seraient agrégées à d'autres nanoparticules de la solution d'or colloïdale, augmentant ainsi le taux de recouvrement du substrat. Les mesures menées sur les dispositifs appartenant à l'échantillon 6 indiquent un faible effet de la tension de grille sur la caractéristique $I_{ds} - V_{ds}$ (figure 3.23).



FIG. 3.22 - (a) Image MEB prise sur l'échantillon 6. Des deux côtés du cadre on a les électrodes d'or. Les tâches blanches sont des amas de polymères.(b) Grossissement du canal inter-électrode. Les nanoparticules forment un réseau d'une seule épaisseur, compact par endroits, avec une organisation préférentiellement linéaire.



FIG. 3.23 – Caractéristiques I_{ds} - V_{ds} pour V_{gs} = 0 V, 10 V, 20 V et 30 V acquises sur une paire d'électrodes de l'échantillon 6. L'effet de la tension de grille sur la caractéristique sature à V_{gs} =30 V. Les conductivités mesurées sont respectivement de $6,03 \times 10^{-11}$ S.cm⁻¹, $5,6 \times 10^{-11}$ S.cm⁻¹, $5,7 \times 10^{-11}$ S.cm⁻¹ et $5,6 \times 10^{-11}$ S.cm⁻¹.

Caractérisation des échantillons

Les images des échantillons 7 et 8 montrent un recouvrement moins important des surfaces. Les nanoparticules ne s'organisent pas en réseau contrairement à ce qui a été observé sur l'échantillon 6. Elles sont plutôt espacées entre elles ou alors elles forment des agrégats dans le gap ou sur les électrodes. Les images de l'échantillon 7 indiquent qu'il y a eu polymérisation des molécules de (3-aminopropyl)trimethoxysilane (figures 3.24). Ce qui n'a pas été observé sur l'échantillon 8 (figure 3.25) : le respect des conditions parfaitement anhydres permet d'éviter ce phénomène. Sur les échantillons 7 et 8 nous n'avons pas observé de films reliant les électrodes entre elles. Les mesures électriques ne montrent pas de caractère conducteur.



FIG. 3.24 - (a) Image MEB prise sur l'échantillon 7. Des deux côtés du cadre on a les électrodes d'or. Il semble y avoir un dépôt compact de nanoparticules. (b) Grossissement de la marche surface isolante-plot d'or. On observe que les nanoparticules sont très espacées sur la surface. Cependant à certains endroits ils peuvent former des agrégats. On remarque également des molécules polymérisées.



FIG. 3.25 – (a) Image MEB de l'échantillon 8. On observe des amas de nanoparticules sur toute la surface. Cependant le film n'est pas assez compact pour obtenir un courant électrique. (b) Grossissement du canal inter-gap montrant un réseau non compact de nanoparticules.

3.5.3 Discussion sur ces procédés de dépôt

Les dépôts utilisant des molécules aminées dans le gap inter-électrode ont un meilleur recouvrement que les dépôts utilisant des molécules thiolées. Nos procédés de dépôt ont permis l'obtention de films nanoparticules + molécules discontinus sur des gaps inter électrodes de 12 μ m. Cependant certains films peuvent présenter une organisation 2D sur une surface de 200-300 nm² (échantillons 2 et 6). On peut penser qu'en réduisant la dimension du gap on obtiendrait un film 2D reliant les électrodes. Cependant une organisation compacte des nanoparticules n'est pas recherchée dans cette étude car celles-ci servent avant tout à stocker des charges. Nous ne souhaitons pas un courant de conduction entre elles. Les mesures électriques réalisées sur les dispositifs de l'échantillon 2, présentent une conductivité très faible. D'une part les agrégats de nanoparticules ne sont pas de taille suffisamment importante pour relier les électrodes. D'autre part les molécules ligands ont un caractère isolant qui limite la conduction. Ensuite nous procédons à la réalisation finale du dispositif transistor pentacène+nanoparticules.

3.6 Réalisation du dispositif transistor pentacène + nanoparticules

Parmi toute la gamme de semi-conducteurs organiques disponibles nous avons choisi le pentacène car c'est celui qui est le mieux maîtrisé. En effet son évaporation est bien contrôlée. De plus les transistors à base de pentacène sont parmi les meilleurs transistors organiques en termes de performance [177]. Nous allons réaliser trois échantillons : un échantillon recouvert d'une SAM, de nanoparticules encapsulées et de pentacène, et deux échantillons témoins. Afin d'évaluer l'effet des nanoparticules sur les propriétés électriques du dispositif, nous aurons un échantillon A qui ne subira qu'un dépôt de pentacène. Nous choisirons un échantillon parmi ceux décrits dans la partie 3.4.2 et nous le recouvrerons de pentacène. Il sera renommé échantillon B. Enfin nous réaliserons également un échantillon C sur lequel nous ferons un dépôt de nanoparticules sans le dépôt préalable d'une couche d'accrochage sur le wafer et sans encapsulation des nanoparticules. Ceci pour évaluer l'influence des molécules ligands et de la couche d'accrochage sur la répartition des nanoparticules et la conduction du dispositif.

l'échantillon A Pour cet échantillon ainsi que pour l'échantillon B Nous utilisons un wafer identique à ceux utilisés pour les échantillons 6, 7, 8. C'est à dire un substrat dopé p+ surmonté d'une couche d'oxyde de 200 nm. Le procédé de fabrication du wafer suit le protocole décrit dans la partie 3.4. Cet échantillon ne va subir qu'un dépôt de pentacène sur sa surface.

L'échantillon B L'objectif de l'étude n'est pas d'obtenir un réseau compact de nanoparticules on n'utilisera donc pas l'échantillon 6. L'échantillon 7 présentant une quantité importante de molécules polymérisées, notre choix se tourne vers l'échantillon 8. Celui-ci va subir un dépôt de pentacène en compagnie de deux échantillons témoins A et B.

L'échantillon C Le dépôt se déroule de la façon suivante : une goutte de solution colloïdale d'or 20 nm est déposée sur le substrat. Puis l'échantillon est laissé au contact de l'air une nuit à température ambiante. Les nanoparticules se déposent progressivement au cours de l'évaporation du solvant. L'échantillon est ensuite plongé délicatement (et sans ultrasons) dans un bain d'isopropanol puis d'eau déionisée pour enlever les traces des stabilisateurs (citrate et sels). Il est ensuite séché sous flux de N₂. Les images par microscopie électronique indiquent que les nanoparticules forment des agrégats sur toute la surface (figures 3.26(a) et (b)).



FIG. 3.26 – (a) Image MEB de l'échantillon C après le dépôt de nanoparticules et avant le dépôt de pentacène. Les nanoparticules forment des agrégats sur toute la surface. (b) On observe des amas de nanoparticules sur la surface d'oxyde et sur l'électrode d'or.

La couche de pentacène est déposée sur les échantillons par évaporation dans un bâti. Le dépôt s'effectue dans une enceinte placée sous vide (figure 3.27). Le matériau à déposer en couche mince est disposé dans un creuset. Celui-ci est alors placé dans une nacelle métallique. Par l'intermédiaire d'une pompe primaire (pompe à palettes ou pompe sèche) et d'une pompe secondaire (pompe turbo moléculaire), l'enceinte est ensuite amenée à un vide secondaire de l'ordre de $10^{-6} - 9.5 \times 10^{-7}$ Torr. Une fois ce vide atteint, la nacelle est parcourue par un courant électrique de l'ordre de 16 A (cette opération peut être contrôlée manuellement ou pilotée par ordinateur). Le passage du courant électrique va provoquer un échauffement du creuset et par conséquent la sublimation du matériau organique. Ce dernier se condense sur le substrat placé à une vingtaine de centimètres au dessus du creuset. Lors de notre dépôt la vitesse d'évaporation est de 0,1 nm/sec. La couche de pentacène déposée fait une trentaine de nanomètres d'épaisseur. Elle est mesurée à l'aide d'une balance à quartz intégrée au bâti. Celle-ci est composée d'une tige de quartz au sommet de laquelle se trouve une petite cellule où se déposent les particules en suspension dans le bâti. Lorsque la cellule est vide, le système

oscille selon une fréquence propre mesurable. Après avoir recueilli, dans la cellule, les particules déposées sur un filtre, la masse du système augmente et provoque donc une légère décroissance de la fréquence naturelle d'oscillation. Cette valeur est confirmée par une mesure par profilométrie.



FIG. 3.27 – schéma de principe d'un bâti d'évaporation par effet joule

3.7 Conclusion

Nous avons réalisé un dispositif transistor dont le canal de conduction est constitué d'une couche de nanoparticules enterrée dans du pentacène. Nous avons d'abord tenté un greffage des nanoparticules sur la surface de l'oxyde de grille SiO_2 par des molécules thiolées sans obtenir un recouvrement significatif de la surface. Par contre en fonctionnalisant la surface d'isolant par des molécules aminées nous avons obtenu une répartition régulière de nanoparticules dans le gap inter électrodes. Excepté sur l'un de nos échantillons, ce réseau n'est pas suffisamment compact pour observer un courant de conduction entre les nanoparticules. Ceci n'est pas gênant car ces nanoparticules jouent le rôle de centre de rétention de charge, la conduction étant assurée par la couche de pentacène qui sera ensuite déposée.

Une fois le dépôt de nanoparticules obtenu nous avons procédé au dépôt de la couche de pentacène. Nous avons sélectionné un des échantillons précédemment fabriqué puis lui avons fait subir une évaporation de ce matériau organique, c'est l'échantillon B. Nous avons aussi réalisé deux échantillons témoins : un échantillon A qui a subi uniquement un dépôt de pentacène, et un échantillon C qui a subi un dépôt de nanoparticules (mais sans fonctionnalisation de l'oxyde de grille) et de pentacène. Le tableau 3.1 présente un

Conclusion

récapitulatif des échantillons fabriqués.

	Dépôts			
Echantillons	SAMs	Pentacène	Nano	Commentaires
			particules	<u> </u>
А	Non	Oui	Non	Echantillon
				témoin
В	Oui	Oui	Oui	Réseau non
				compact de
				nanoparticules.
				Amas localisés
				de
				nanoparticules
С	Non	Oui	Oui	Agrégats de nanoparticules sur toute la surface

TAB. 3.1 – Tableau récapitulatif sur les échantillons fabriqués.

Chapitre 4

Caractéristiques électriques : transistor et mémoire

4.1 Introduction

Dans ce chapitre nous montrons que notre dispositif est à la fois un transistor et une mémoire. Ces deux aspects sont étudiés. Nous caractérisons d'abord les propriétés de transistor des dispositifs appartenant aux échantillons A, B, C décrits au chapitre précédent. Nous étudions ensuite leurs caractéristiques de fonctionnement en mode mémoire. Ainsi les cinétiques de retour à l'équilibre après une "écriture" de la mémoire sont mesurées.

4.2 Propriétés transistor du dispositif

4.2.1 Protocole expérimental

Les tests préliminaires à cette campagne de mesures ont montré que, sur les échantillons B et C, des acquisitions expérimentales sur un dispositif induisent des piégeages de charge sur celui-ci mais également sur ses voisins. En effet les dispositifs ne sont pas isolés entre eux. Par conséquent les électrodes de chaque dispositif étudié sur ces échantillons sont mises à la masse pendant 300s avant d'effectuer nos acquisitions. Ceci pour évacuer les charges piégées, et avoir le même état initial avant les mesures. Ces tests ont également montré que les effets capacitifs sont négligeables sur l'échantillon A. Les mesures sur cet échantillon ne sont donc pas précédées d'une mise à la masse des électrodes.

Ensuite sur chaque dispositif, avant toute acquisition de caractéristiques électriques, nous réalisons d'abord un point de mesure des courants I_{ds} et I_{gs} d'une durée de 4ms pour la configuration de tension $V_{ds}=V_{gs}=-20V$. Cette valeur sert de référence pour revenir à un même état initial. La durée de la mesure est réduite afin de s'affranchir des effets capacitifs dans le dispositif. Les caractéristiques suivantes sont alors acquises :

- l'allure du courant drain-source I_{ds} en fonction de la tension drain-source V_{ds} appliquée, avec une tension de grille V_{gs} fixée à -20V,
- puis l'allure du courant drain-source I_{ds} en fonction de la tension de grille V_{gs} appliquée, avec une tension drain-source V_{ds} fixée à -20V,
- et enfin une courbe de charge $I_{ds}(t)$ pour V_{gs} et V_{ds} fixés à -20V.

Des caractéristiques montrant l'évolution du courant drain-source I_{ds} en fonction de la tension drain-source V_{ds} appliquée pour des tensions de grille variables ont également été acquises sur des dispositifs de chaque échantillon.

4.2.2 Résultats

4.2.2.1 Résultats statistiques

Nos résultats concernent une trentaine de transistors sur chaque échantillon. Sur l'échantillon A (pentacène), les courants $I_{ds}(V_{gs}=V_{ds}=-20V)$ mesurés varient entre -0,27nA et -32,2nA (figure 4.1(a)). Nous supposons que le dépôt de pentacène n'est pas uniforme sur le wafer. La répartition spatiale des courants mesurés va dans ce sens (figure 4.1(b)). En effet lors de l'évaporation du pentacène les échantillons n'étaient pas placés sous le même angle par rapport au creuset. Le courant de fuite $I_{gs}(V_{gs}=V_{ds}=-$ 20V) varie entre -2,72nA et -12,38nA.

Sur l'échantillon B (SAM+NPs+pentacène), le courant $I_{ds}(V_{ds}=V_{gs}=-20V)$ varie de -2,8nA à -678,14nA (figure 4.2(a)). Le courant de fuite $I_{gs}(V_{gs}=V_{ds}=-20V)$ varie de -2,87nA à -21,03nA.

Sur l'échantillon C (NPs+pentacène), le courant $I_{ds}(V_{ds}=V_{gs}=-20V)$ varie de -13,2nA à -104,59nA (figure 4.2(a)). Le courant de fuite $I_{gs}(V_{gs}=V_{ds}=-20V)$ varie entre -6,49nA et -20,42nA sur cet échantillon.

Les répartitions spatiales des courants mesurés sur les échantillons B et C (figures 4.2(b), et 4.3(b)) ne montrent pas d'homogénéité des valeurs sur une zone du wafer. L'inhomogénéité dû au dépôt de pentacène serait écranté par celui du dépôt des nano-particules.

Nous remarquons qu'en présence des nanoparticules le courant I_{ds} est plus important. De plus, avec ou sans dépôt de SAMs, nous observons la même répartition statistique : la majorité des transistors sur les échantillons B et C présentent un courant I_{ds} compris entre -20nA et -60nA.

Sur chaque échantillon, les valeurs de courant de fuite mesurées sont élevées. En effet, dans de bonnes conditions de dépôt, un wafer composé d'une épaisseur d'oxyde d'environ 200nm surmonté d'un plot d'aluminium d'épaisseur 200nm présente une densité de courant inférieure à 10^{-10} A/cm² pour une tension appliquée de 100V. Tandis que sur nos échantillons nous mesurons une densité de courant valant jusqu'à $7,69 \times 10^{-5}$ A/cm². Des imperfections dans les procédés de dépôt pourraient être à l'origine de la mauvaise qualité de notre oxyde.



FIG. 4.1 – Présentation des résultats des mesures du courant $I_{ds}(V_{ds}=V_{gs}=-20V)$ acquises sur les dispositifs de l'échantillon A (a) Répartition statistique des courants mesurés. (b) Répartition spatiale des courants mesurés. Sur cet échantillon comme sur tous les autres, il manque la partie inférieure gauche. C'est à cette zone que les wafers ont été fixés sur le socle lors des procédés de dépôt.



FIG. 4.2 – Présentation des résultats des mesures du courant $I_{ds}(V_{ds}=V_{gs}=-20V)$ acquises sur les dispositifs de l'échantillon B (a) Répartition statistique des courants mesurés. (b) Répartition spatiale des courants mesurés.



FIG. 4.3 – Présentation des résultats des mesures du courant $I_{ds}(V_{ds}=V_{gs}=-20V)$ acquises sur les dispositifs de l'échantillon C (a) Répartition statistique des courants mesurés. (b) Répartition spatiale des courants mesurés.

4.2.2.2 Caractéristiques I_{ds} - V_{ds} (V_{gs} =0V,-5V,-10V, -15V,-20V)

Les figures 4.4, 4.5 et 4.6 montrent des caractéristiques I_{ds} - V_{ds} pour différentes tensions de grille, acquises sur des dispositifs appartenant respectivement aux échantillons A, B, et C. Sur les deux derniers graphiques les courbes acquises pour $V_{gs}=0V$ et -5V ne sont pas représentées pour des questions de lisibilité. Ces caractéristiques indiquent clairement que le mélange pentacène+nanoparticules entraine de meilleures propriétés transistor avec une augmentation du courant et une meilleure saturation de celui-ci.


FIG. 4.4 – Caractéristiques I_{ds}-V_{ds} pour V_{gs}=0V, -5V, -10V, -15V, -20V acquises sur un dispositif appartenant à l'échantillon A.



FIG. 4.5 – Caractéristiques I_{ds} - V_{ds} pour V_{gs} =-10V, -15V, -20V acquises sur un dispositif appartenant à l'échantillon B.



FIG. 4.6 – Caractéristiques I_{ds}-V_{ds} pour V_{gs}=-10V, -15V, -20V acquises sur un dispositif appartenant à l'échantillon C.

4.2.2.3 Caractéristiques $\sqrt{I_{ds}}$ -V_{qs} pour V_{ds}=-20V

La mobilité des porteurs de charge représente la facilité avec laquelle ceux-ci peuvent se déplacer dans un matériau en fonction du champ électrique appliqué. A partir des courbes $\sqrt{I_{ds}}$ -V_{gs} en régime de saturation (V_{ds} \approx V_{gs}) nous pouvons remonter à la mobilité des porteurs de charge (figures 4.7(a), 4.8(a), 4.9(a)). En effet le courant I_{ds} est donné par la relation

(4.1)
$$I_{ds} = \frac{\mu CW}{2L} \times (V_{gs} - V_t)^2$$

où W et L sont respectivement la largeur des plots d'or $(113\mu m)$ et la distance inter électrode $(12\mu m)$. C est la capacité de l'oxyde de grille par unité de surface, et vaut $\epsilon_0 \times \epsilon_r/t_{ox}$ où ϵ_0 , ϵ_r et l'épaisseur de l'oxyde de grille t_{ox} valent respectivement $8.85 \times 10^{-14} \text{F/cm}$, 3.9 et $2 \times 10^{-5} \text{cm}$. μ est la mobilité des porteurs de charge. Cette méthode de calcul de la mobilité n'est pas unique, la caractéristique I_{ds} - V_{gs} acquise en régime linéaire, c'est-à-dire pour $V_{ds} \ll V_{gs}$, peut également être utilisée. En général la mobilité en régime de saturation est plus élevée que celle mesurée en régime linéaire.

Les mobilités calculées pour les dispositifs appartenant à l'échantillon A varient entre 1.4×10^{-5} et 10^{-3} cm².V⁻¹.s⁻¹ (figure 4.7(b)); pour l'échantillon B, elles varient entre 6×10^{-4} et 8.4×10^{-3} cm².V⁻¹.s⁻¹ (figure 4.8(b)); pour l'échantillon C, les mobilités varient entre 1.2×10^{-3} et 8.1×10^{-3} cm².V⁻¹.s⁻¹ (figure 4.9(b)).

Par extrapolation de la partie linéaire de la caractéristique, nous pouvons également déduire la tension de seuil V_T du dispositif. Celle-ci marque le seuil entre la conduction et la non-conduction. Les valeurs de V_T sont comprises entre -3,58V et -5,46V sur les dispositifs de l'échantillon A ; entre -7,15V et -13,4V sur les dispositifs de l'échantillon B ; et entre -8,4V et -11,6V sur les dispositifs de l'échantillon C.

Les nanoparticules améliorent donc la mobilité des porteurs de charge. Par contre elles augmentent en valeur absolue les tensions de seuil des dispositifs.



FIG. 4.7 – (a) Racine carrée du courant drain-source $\sqrt{I_{ds}}$ en fonction de la tension de grille V_{gs} . Caractéristique acquise dans la zone de saturation (V_{ds} =-20V) d'un dispositif de la majorité statistique de l'échantillon A. L'axe des abscisses est décalé pour tenir compte du courant de fuite. La mobilité est de 1,4×10⁻⁴ cm².V⁻¹.s⁻¹ et la tension de seuil de -4,28V (b) Répartition statistique des mobilités calculées sur les dispositifs de l'échantillon A.



FIG. 4.8 – (a) Racine carrée du courant drain-source $\sqrt{I_{ds}}$ en fonction de la tension de grille V_{gs}. Caractéristique acquise dans la zone de saturation (V_{ds}=-20V) d'un dispositif appartenant à la majorité statistique de l'échantillon B. La mobilité calculée est de $2.8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{.V}^{-1} \text{.s}^{-1}$ et la tension de seuil de -11,7V (b) Répartition statistique des mobilités calculées sur les dispositifs de l'échantillon B.



FIG. 4.9 – (a)Racine carrée du courant drain-source $\sqrt{I_{ds}}$ en fonction de la tension de grille V_{gs}. Caractéristique acquise dans la zone de saturation (V_{ds}=-20V) d'un dispositif appartenant à la majorité statistique de l'échantillon C. La mobilité calculée est de 3.4×10^{-3} cm².V⁻¹.s⁻¹ et la tension de seuil est de -10,5V. (b) Répartition statistique des mobilités calculées sur les dispositifs de l'échantillon C.

4.2.2.4 Caractéristiques $\log |I_{ds}| - V_{gs}$ pour $V_{ds} = -20V$

A partir des caractéristiques I_{ds} - V_{ds} tracées en échelle logarithmique nous pouvons obtenir la pente sous le seuil et le turn-on voltage des dispositifs. La pente sous le seuil est la variation de la tension V_{gs} à appliquer pour que le courant I_{ds} du dispositif augmente d'une décade. Elle indique l'efficacité de la tension de grille dans le passage de l'état off à l'état on. Pour les dispositifs de l'échantillon A, les valeurs de pente sous le seuil calculées varient entre 7,8 et 10,85V/décade (figure 4.10). Tandis que les valeurs sont comprises entre 2,11 et 4,27V/décade sur les dispositifs de l'échantillon B (figure 4.11), et entre 2,21 et 3,09V/décade sur les dispositifs de l'échantillon C (figure 4.12).

Le turn-on voltage V_0 est la tension à partir de laquelle le dispositif commence à

passer de l'état off à l'état on. Pour la majorité des dispositifs de l'échantillon A, il est compris entre 0 et -2V, avec une valeur maximale de -9V. Sur l'échantillon B la majorité des dispositifs présente un turn-on voltage compris entre -4 et -8V, avec une valeur maximale de -11,5V. Sur l'échantillon C la majorité des dispositifs ont un turn-on voltage compris entre -3 et -6V, la valeur maximale mesurée est de -8V.



FIG. 4.10 – Courant drain-source tracé en échelle logarithmique en fonction de la tension de grille appliquée. Caractéristique acquise sur un dispositif de l'échantillon A.



FIG. 4.11 – Courant drain-source tracé en échelle logarithmique en fonction de la tension de grille appliquée. Caractéristique acquise sur un dispositif de l'échantillon B.



FIG. 4.12 – Courant drain-source tracé en échelle logarithmique en fonction de la tension de grille appliquée. Caractéristique acquise sur un dispositif de l'échantillon C.

Sur les dispositifs de l'échantillon A, les ratios I_{on}/I_{off} varient de 20 à 60 (figure 4.13). Le courant I_{off} est de l'ordre de 10^{-10} . Sur les dispositifs de l'échantillon B les ratios I_{on}/I_{off} sont compris entre 270 et 12900 (figure 4.14); le courant I_{off} est de l'ordre de 10^{-11} . Sur les dispositifs de l'échantillon C, les ratios I_{on}/I_{off} sont compris entre 1257,1 et 9085,6 (figure 4.15); le courant I_{off} est de l'ordre de 10^{-11} .



FIG. 4.13 – Ratios I_{on}/I_{off} mesurés sur les dispositifs appartenant à l'échantillon A.



FIG. $4.14 - \text{Ratios } I_{on}/I_{off}$ mesurés sur les dispositifs appartenant à l'échantillon B.



FIG. 4.15 – Ratios I_{on}/I_{off} mesurés sur les dispositifs appartenant à l'échantillon C.

4.2.2.5 Caractéristiques $I_{ds}(t)$ pour $V_{gs}=V_{ds}=-20V$

La comparaison des caractéristiques $I_{ds}(t)$ pour $V_{ds}=V_{gs}=-20V$ acquises sur les différents échantillons montre que les nanoparticules induisent un effet de dérive du courant qui n'apparaît pas dans le dispositif uniquement à base de pentacène (figure 4.16).



FIG. 4.16 – Caractéristiques de charge $I_{ds}(t)$ pour $V_{ds}=V_{gs}=-20V$ acquises sur des dispositifs appartenant à la majorité statistique de chaque échantillon. Chaque courbe est labélisée selon l'échantillon auquel appartient le dispositif. Nous remarquons que les nanoparticules induisent un effet capacitif marqué. En particulier le dispositif appartenant à l'échantillon B présente une caractéristique de charge plus accentuée.

4.2.3 Discussion

Nous observons que les nanoparticules améliorent certaines caractéristiques du transistor à pentacène (tableau 4.1). En effet les niveaux de courant et les ratios I_{on}/I_{off} sont élevés d'un facteur de 10^2 environ, tandis que les mobilités sont améliorées d'un facteur 40. Cet effet est similaire à celui constaté dans les transistors à pentacène contenant un réseau de nanotubes de carbone dans le canal semiconducteur. Dans leur dispositif Bo et al. recouvrent un réseau non percolatif de nanotubes de carbone par du pentacène [178]. Ces nanotubes ne sont pas en contact entre eux. Ils ont observé que la présence du réseau de nanotubes permet une meilleure conductivité par rapport au transistor à pentacène simple. Cet effet serait du à une diminution de la longueur "effective" du canal de conduction du pentacène de par la présence des nanotubes de carbone. Le canal de conduction ne s'étendrait plus sur toute la distance inter électrode mais serait réduit aux liens semiconducteurs entre les nanotubes de carbone. Une autre explication serait dans la diminution de la résistance de contact pentacène-électrodes de par la présence des nanoparticules [179].

Nous remarquons aussi que les valeurs de pente sous le seuil sont plus faibles sur les dispositifs B et C. La diminution de la pente sous le seuil est observée quand on traite la surface SiO_2 avec une SAM. Ceci s'explique généralement par une analogie avec le transistor MOSFET. Dans celui-ci

(4.2)
$$S = \frac{kT}{q} ln 10(1 + \frac{C_D}{C_I})$$

		A pentacène	B SAMs+NPs +pentacène	C NPs+pentacène	
	μ (cm².V ⁻¹ .s ⁻¹)	0,1-6 x 10 ⁻⁴	2 - 7 x 10 ^{- 3}	2 - 6 x 10 ⁻³	
	V ₀ (V)	0 à -2	-4 à -8	-3 à -6	
	V _T (V)	-3,5 à -5,5	-7,15 à -13,4	-8,4 à -11,6	
	S (V/dec)	7,8 - 10,9	2 - 4,3	2 ,2 - 3	
	I _{on} /I _{off}	30-50	1-4 x 10 ³	2-5 x 10 ³	
	I _{off} (A)	~10 ⁻¹⁰	~10 ⁻¹¹	~10 ⁻¹¹	

TAB. 4.1 – Tableau récapitulatif sur les caractéristiques des transistors organiques fabriqués.

où C_I est la capacité de l'isolant de grille, k est la constante de Boltzmann, T est la température absolue, et C_D est proportionnel au nombre de défauts sur le diélectrique. La valeur de pente sous le seuil est liée à la densité des états d'interface de l'oxyde. En passivant l'oxyde, la SAM passive ces états d'interface, et améliore ainsi la pente sous le seuil. Nous observons donc une amélioration des caractéristiques du transistor à pentacène avec l'adjonction de nanoparticules.

Cependant nous constatons également que les caractéristiques I_{ds} - V_{ds} sont décalées vers les tensions négatives : les valeurs des tensions de seuil V_T et des turn-on voltage V_0 des transistors appartenant aux échantillons B et C sont plus importants en valeur absolue que celles obtenues sur l'échantillon témoin A. Cette augmentation n'est pas souhaitable car dans le cadre de l'utilisation du dispositif, elle entraîne une élévation de la tension d'alimentation. La variation de la tension de seuil pour les échantillons B et C par rapport à l'échantillon témoin A est $\overline{\Delta V_T} \approx 6$ V. Ce qui équivaut à une densité de charge à l'interface oxyde/pentacène de $\overline{Q}^+ = \overline{\Delta V_T} \times C_{ox}/e \approx 6 \times 10^{11} \mathrm{charges/cm}^2$. Avec C_{ox} la capacité de l'oxyde de grille par unité de surface valant $1.72 \times 10^{-8} \text{F/cm}^2$. Dans le cas des dispositifs de l'échantillon B ceci s'expliquerait bien par la présence à l'interface diélectrique/composé organique de charges positives NH₃⁺ issues des molécules d'organosilanes [180]. L'encombrement stérique d'une molécule étant de 20 $Å^2$ [181], nous obtenons alors un recouvrement de la surface de 5×10^{14} molécules/cm². Soit environ 0,001 charge par molécule. Mais l'échantillon C ne comporte pas de monocouche à la surface du diélectrique, pourtant nous observons un effet similaire. Nous pensons que les charges positives présentes sur cet échantillon proviendraient de la solution de colloïdes d'or. En effet dans celle-ci les nanoparticules sont revêtues de citrate de trisodium qui constitue un système ionique $3Na^+$, $C_3H_5O(COO)_3^{3-}$ (figure 4.17). La solution contient également un stabilisant l'azoture de sodium NaN_3 . Or les ions sodium Na^+ diffusent très facilement dans l'oxyde de silicium [182]. Notre échantillon C a été laissé une nuit dans le bain de colloïdes, suffisamment longtemps pour que les ions sodium aient pu diffuser dans les couches supérieures du diélectrique. L'étape de rinçage qui a suivi le bain de colloïdes n'aurait pas suffit à enlever ces cations. Un tel phénomène est moins envisageable sur l'échantillon B car l'oxyde est protégé par la monocouche d'organosilanes.



FIG. 4.17 – Molécule de citrate de trisodium.

Enfin nous observons que les nanoparticules induisent une dérive temporelle du courant I_{ds} . Le courant de conduction dans le pentacène étant assuré par des trous, ceux-ci s'agglomèrent peut-être dans les nanoparticules entrainant une diminution du courant I_{ds} au cours du temps [183]. Nous remarquons également que cet effet est plus important sur les dispositifs avec un dépôt de nanoparticules et de SAMs. Dans la partie 3.5.2, les images MEB ont montré que l'échantillon B présente une densité de nanoparticules plus importante que l'échantillon C. Ceci expliquerait ces effets plus marqués sur les dispositifs appartenant à celui-ci.

4.3 Aspect mémoire du dispositif

Nous avons précédemment vu que la présence de nanoparticules dans le canal en pentacène du transistor induit des effets de charge. Nous étudions maintenant ce phénomène en détail, et proposons l'utilisation de ce dispositif comme une mémoire.

4.3.1 Protocole expérimental

Afin de contrôler les charges induites dans le dispositif, nous mettons les électrodes de source et de drain à la masse, et appliquons une tension de -50V sur l'électrode de grille pendant 20s (injection uniforme dans tout le canal).

Chaque application de tension sur l'électrode de grille charge également tous les dispositifs appartenant à l'échantillon (il s'agit d'une grille commune). Donc en abordant un nouveau dispositif, avant toute mesure et application de tension négative sur la grille, les électrodes sont mises à la masse afin que le dispositif relaxe. Une caractéristique I_{ds} - V_{ds} est régulièrement acquise jusqu'à ce que la courbe obtenue soit identique à la précédente, ceci indiquant alors que le dispositif a atteint son état initial. Typiquement les durées de mise à la masse varient entre 10 mn et 60 mn environ suivant le dispositif et l'échantillon auquel il appartient. Trois séries de mesures sont réalisées :

- D'abord des caractéristiques électriques du courant drain-source I_{ds} en fonction de la tension drain-source V_{ds} appliquée (à V_{gs} =-20V) sont acquises avant et après l'application d'une tension de -50V sur l'électrode de grille.
- Dans un deuxième temps, nous étudions les possibilités de retour à l'état initial. Pour cela nous appliquons des tensions de +50V, et de +100V sur l'électrode de grille pendant 20s.
- Puis des caractéristiques électriques du courant drain-source I_{ds} en fonction de la tension de grille V_{gs} appliquée (à V_{ds} =-20V) sont acquises avant et après l'application d'une tension de -50V puis d'une tension de +50V. Ceci afin de déterminer la nature de l'effet mémoire constaté.
- Enfin nous voulons également obtenir l'allure de la relaxation des charges et les constantes de temps associées. Pour cela après l'application d'une tension de -50V sur l'électrode de grille, nous mesurons le courant drain-source I_{ds} à plusieurs pas de temps avec $V_{ds}=V_{gs}=-20V$. Chaque mesure dure 2ms et entre chacune d'elles les électrodes du dispositif sont mises à la masse pendant 20s. Auparavant nous réalisons cette acquisition sur le dispositif pris dans son état initial. Ceci afin de nous assurer que ce procédé de mesure n'induit qu'une charge limitée dans le dispositif.

4.3.2 Résultats

4.3.2.1 Effet de l'application d'une tension de -50V, +50V ou +100V sur la caractéristique I_{ds} - $V_{ds}(V_{qs}$ =-20V)

Les figures 4.18, 4.19 et 4.20 présentent les caractéristiques I_{ds} - $V_{ds}(V_{gs}=-20V)$ acquises avant et après l'application d'une tension de -50V pendant 20s sur l'électrode de grille sur des dispositifs appartenant respectivement aux échantillons A, B et C. La figure 4.20 présente de plus l'effet de l'application d'une tension de +50V sur la caractéristique I_{ds} - $V_{ds}(V_{gs}=-20V)$.



FIG. 4.18 – Effet de l'application d'une tension de -50V pendant 20s sur la caractéristique I_{ds} - $V_{ds}(V_{gs}=-20V)$ d'un dispositif appartenant à l'échantillon A.



FIG. 4.19 – Effet de l'application d'une tension de -50V pendant 20s sur la caractéristique I_{ds}-V_{ds}(V_{gs}=-20V) d'un dispositif appartenant à l'échantillon B. L'application d'une tension de +50V pendant une durée similaire ne ramène pas le dispositif à son état initial.



FIG. 4.20 – Effet de l'application d'une tension de -50V pendant 20s sur la caractéristique I_{ds} - $V_{ds}(V_{gs}=-20V)$ d'un dispositif appartenant à l'échantillon C.

Nous remarquons que l'application d'une tension de -50V sur l'électrode de grille entraîne une diminution du niveau de courant de la caractéristique I_{ds} - V_{ds} . Si cet effet est faible sur le transistor à pentacène, il est par contre fortement amplifié en présence des nanoparticules.

Quelque soit l'échantillon, l'application d'une tension de +50V pendant 20s sur l'électrode de grille ne ramène pas la caractéristique à son état initial (figure 4.19). Cependant après l'application d'une tension de +100V pendant 20s sur l'électrode de grille, la caractéristique se retrouve sous la courbe initiale. La figure 4.21 illustre ce résultat. Le retour à l'état initial par l'application d'une tension sur l'électrode de grille est difficile à contrôler.

Aspect mémoire du dispositif



FIG. 4.21 – Caractéristiques I_{ds} - V_{ds} (V_{gs} =-20V) acquises sur un dispositif de l'échantillon C : 1caractéristique initiale, 2-après application d'une tension de -50V sur l'électrode de grille pendant 20s. 3-après application successive d'une tension de +100V pendant 20s.

4.3.2.2 Effet de l'application d'une tension de -50V puis +50V sur la caractéristique $\sqrt{I_{ds}}$ -V_{gs} (V_{ds}=-20V)

Les caractéristiques $\sqrt{I_{ds}}$ - V_{gs} (V_{ds} =-20V) acquises avant et après des applications de tension de -50V et +50V sur l'électrode de grille vont nous renseigner sur la nature du phénomène mis en jeu (figures 4.22, 4.23, 4.24). La diminution du courant est-elle due à une variation de la tension de seuil V_T ou de la mobilité μ ?



FIG. 4.22 – Caractéristiques $\sqrt{I_{ds}}$ -V_{gs} (V_{ds}=-20V) acquises sur un dispositif de l'échantillon A avant et après applications successives d'une tension de -50V puis +50V sur l'électrode de grille.



FIG. 4.23 – Caractéristiques $\sqrt{I_{ds}}$ -V_{gs} (V_{ds}=-20V) acquises sur un dispositif de l'échantillon B avant et après applications successives d'une tension de -50V puis +50V sur l'électrode de grille.



FIG. 4.24 – Caractéristiques $\sqrt{I_{ds}}$ -V_{gs} (V_{ds}=-20V) acquises sur un dispositif de l'échantillon C avant et après applications successives d'une tension de -50V puis +50V sur l'électrode de grille.

Le tableau 4.2 présente les valeurs de mobilité μ et de tension de seuil V_T obtenues sur des dispositifs des échantillons A, B et C. Nous observons que l'application d'une tension de -50V sur l'électrode de grille a d'abord un effet sur la tension de seuil. Ceci est évident sur le dispositif appartenant à l'échantillon B. Sur celui-ci après l'application d'une tension de -50V sur l'électrode de grille, nous obtenons $\overline{\Delta V_T}=21,72V$. Ceci correspond à une densité de porteurs de charges induite $\overline{Q}^+ = \overline{\Delta V_T} \times C_{ox}=21,72\times1,72\times10^{-8} \div e\approx2,34\times10^{12}$ charges/cm². Ce résultat va dans le sens d'un effet capacitif dans les nanoparticules. Celles-ci se chargent de trous sous l'effet d'une tension de -50V appliquée à l'électrode de grille. Cet effet de charge n'est pas symétrique. Sous l'application d'une tension de +50V, la caractéristique initiale n'est pas retrouvée. De plus l'allure de la courbe $\sqrt{I_{ds}}$ -V_{gs} est également déformée.

Si la mobilité est peu affectée par l'application d'une tension de -50V sur l'électrode de grille, elle subit par contre une modification plus importante après l'application d'une tension de +50V. Cependant la mobilité reste globalement du même ordre de grandeur.

		Tension de seuil V _T (V)	Mobilité µ (cm ² .V ⁻¹ .s ⁻¹)	ΔV _T (V)	Δμ (cm ² .V ⁻¹ .s ⁻¹)
	Etat initial	-3,87	5,5 x 10 ⁻⁴		
Échantillon A V _{ds} =-20V	Après application -50V	-5,13	5,03 x 10 ⁻⁴	1,26	0,47 x 10 ⁻⁴
	Après application +50V	-1,1	5,33 x 10 ⁻⁴	-2,77	-0,17 x 10 ⁻⁴
	Etat initial	-16,18	4,12 x 10 ⁻³		
Échantillon B V _{ds} =-20V	Après application -50V	-37,9	4,68 x 10 ⁻³	21,72	-0,56 x 10 ⁻³
	Après application +50V	-23,7	2,45 x 10 ⁻³	7,52	1,67 x 10⁻³
	Etat initial	-13,08	3,6 x 10 ⁻³		
Échantillon C V _{ds} =-20V	Après application -50V	-16,46	1,98 x 10 ⁻³	3,38	1,62 x 10 ⁻³
	Après application	-8,03	1,63 x 10 ⁻³	-5,05	1,97 x 10 ⁻³

TAB. 4.2 – Tableau des valeurs caractéristiques mesurées sur des dispositifs appartenant aux échantillons A, B et C, avant et après l'application d'une tension de -50V puis l'application d'une tension de +50V sur l'électrode de grille.

4.3.2.3 Notre dispositif mémoire

Cet effet capacitif observé sur les dispositifs nanoparticules+pentacène permet de les envisager comme dispositifs mémoire. Si nous considérons l'état initial comme le bit "0", alors le bit "1" peut être codé de deux manières : en "écrivant" avec une tension de -50V sur l'électrode de grille, ou en "écrivant" avec une tension de +100V. L'état initial est retrouvé après une mise à la masse des électrodes pendant une heure (effacement de la mémoire). Une autre possibilité de fonctionnement consiste à coder le bit "0" et le bit "1" respectivement par l'application d'une tension de -50V et de +100V sur l'électrode de grille. Une succession d'applications de tension de -50V et de +100V a été réalisée sur un dispositif appartenant à l'échantillon C, montrant la reproductibilité des niveaux de courant (figure 4.25).



FIG. 4.25 – Courants $I_{ds}(V_{gs}=V_{ds}=-20V)$ mesurés après applications alternatives de niveaux de tension de -50V et +100V pendant 20s sur l'électrode de grille sur un dispositif de l'échantillon C. Nous retrouvons successivement les mêmes niveaux de courant.

4.3.2.4 Dynamiques de relaxation

Nous appliquons une tension de -50V pendant 20s sur les électrodes de grille de nos dispositifs. Les courbes de relaxation typiques obtenues sont présentées en figures 4.26, 4.27, 4.28. Nous définissons le temps de rétention $t_{1/2}$ comme le temps au bout duquel le courant atteint la valeur de $I_{1/2}=I_{off}+\frac{1}{2}\times[I_{ds}(\infty)-I_{off}]$ où $I_{ds}(\infty)$ désigne le courant I_{ds} avant l'application d'une tension de -50V sur l'électrode de grille. Des approximations de ces courbes par des exponentielles sont réalisées à l'aide de l'outil d'analyse du logiciel Origin 7.0. Celles-ci indiquent que la relaxation des charges met en jeu deux constantes de temps. Les constantes de temps calculées valent en moyenne :

- 22s et 361s sur l'échantillon A.
- 400s et 2670s sur l'échantillon B.
- 143s et 1947s environ sur l'échantillon C.



FIG. 4.26 – Relaxation du courant après application d'une tension de -50V sur l'électrode de grille pendant 20s sur un dispositif de l'échantillon A. Cette courbe est approximée par deux exponentielles de constantes de temps 21,4s et 353s. La courbe située dans la partie inférieure du graphe a été acquise avant l'opération d'écriture. Nous observons que le procédé de mesure n'induit pas de charges sur le dispositif.



FIG. 4.27 – Relaxation du courant après application d'une tension de -50V sur l'électrode de grille pendant 20s sur un dispositif de l'échantillon B. Cette courbe est approximée par deux exponentielles de constantes de temps 436,3s et 2889,1s. la courbe obtenue sur le dispositif à son état initial est également représentée. Le procédé de mesure induit une légère charge sur le dispositif.



FIG. 4.28 – Relaxation du courant après application d'une tension de -50V sur l'électrode de grille pendant 20s sur un dispositif de l'échantillon C. Cette courbe est approximée par deux exponentielles de constantes de temps 104,3s et 1503,8s. La courbe située dans la partie inférieure du graphe a été acquise sur le dispositif à son état initial. On observe que le procédé de mesure ne charge pas le dispositif.

Le tableau 4.3 synthétise les constantes de temps calculées sur les caractéristiques des différents échantillons. Nous observons que les nanoparticules induisent des constantes de temps et un temps de rétention plus importants par rapport aux dispositifs uniquement à base de pentacène. Nous remarquons également que les dispositifs de l'échantillon B sont ceux présentant les plus grands temps de relaxation et de rétention.

	Echantillon A (pentacène)	Echantillon B (pentacène+NPs+SAMs)	Echantillon C (pentacène+NPs)
Constantes de temps t ₁ (s)	20-30	400	100-200
Constantes de temps t ₂ (s)	350-400	1500-3000	1500-2500
Temps de rétention $t_{1/2}(s)$	143-270	1605-4537	636-1269
Meilleurs rapports I _{on} /I _{off} (V _{ds} =V _{gs} =-20V)	2,2	26 253	121

TAB. 4.3 – Tableau récapitulatif sur les caractéristiques des dispositifs appartenant aux échantillons A, B et C.

4.3.3 Discussion

Nous constatons que les dispositifs de l'échantillon A, par rapport à ceux appartenant aux échantillons B et C, présentent d'une part une amplitude moins importante entre les caractéristiques à l'état "on" et à l'état "off", et d'autre part une relaxation des charges plus rapide. Sur l'échantillon A les rapports I_{on}/I_{off} - défini par le rapport entre le courant $I_{ds}(V_{ds}=V_{gs}=-20V)$ avant et après l'opération d'écriture - valent généralement 2. Tandis que le rapport I_{on}/I_{off} est de l'ordre de 10⁴ pour les dispositifs de l'échantillon B, et 10^2 pour les dispositifs de l'échantillon C. Le meilleur rapport I_{on}/I_{off} mesuré sur l'échantillon B a une valeur de 26000, sur l'échantillon C nous obtenons une valeur de 240. Le temps de rétention varie entre 26mn et 75mn sur les dispositifs de l'échantillon B; il varie entre 10mn et 21mn sur les dispositifs de l'échantillon C. Les nanoparticules sont responsables de ces effets mémoire plus importants. Les caractéristiques $\sqrt{I_{ds}}$ - V_{gs} (V_{ds} =-20V) nous ont permis de démontrer que la diminution du courant après l'application d'une tension de -50V sur l'électrode de grille est principalement dû à un décalage de la tension de seuil V_T vers les tensions négatives. Sous l'effet de la tension de grille négative, les nanoparticules se chargent positivement par des trous, diminuant alors l'influence de l'électrode de grille sur le canal de pentacène. Leong et al. ont observé un comportement similaire dans une structure capacitive composée d'un substrat dopé n surmonté d'une couche d'oxyde et d'une SAM d'APTES, d'un composé pentacène+nanoparticules et d'une électrode d'or [183].

Nous remarquons que l'effet de l'application d'une tension de -50V pendant 20s sur l'électrode de grille est plus marqué sur les dispositifs appartenant à l'échantillon B, que sur les dispositifs appartenant à l'échantillon C. Ce résultat est à corroborer avec les caractéristiques de charge $I_{ds}(t)$ présentées dans la partie 4.2. L'échantillon B présente un meilleur recouvrement de la surface par les nanoparticules que l'échantillon C. Les centres de rétention de charges sont donc plus nombreux, ce qui expliquerait les rapports I_{on}/I_{off} plus élevés et les effets capacitifs plus marqués.

La tension d'écriture est fixée à -50V, cependant en appliquant une tension de +50V la caractéristique initiale n'est pas retrouvée : l'effet n'est pas symétrique. Sur la gamme des tensions V_{gs} positives, le transistor organique est en déplétion. Une zone de charge d'espace (ZCE) apparait au voisinage de l'oxyde de grille. En appliquant une tension de +50V une partie de la chute de potentiel est supportée par la ZCE, diminuant ainsi le potentiel vu par les nanoparticules d'or. Les charges induites par l'application de la tension de -50V ne sont que partiellement évacuées.

4.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu que la présence de nanoparticules dans le canal conducteur améliore les caractéristiques du transistor à pentacène. En effet, les résultats de caractérisation électrique indiquent que les dispositifs avec un dépôt de nanoparticules saturent à des niveaux de courant plus importants et à partir de tensions V_{ds} plus faibles ; la mobilité des trous est améliorée ; les ratios I_{on}/I_{off} et les pentes sous le seuil également. Par contre les nanoparticules induisent un déplacement de la tension de seuil et du turn-on voltage vers les tensions négatives.

Des effets capacitifs sont mis en évidence, les nanoparticules entrainant une rétention des porteurs de charge. Ainsi un effet mémoire est obtenu sur les dispositifs contenant des nanoparticules. L'application d'une tension de -50V pendant 20s sur l'électrode de grille induit une diminution du courant drain-source. En appliquant une tension de +100V pendant 20s, le dispositif devient passant. Nous pouvons donc coder le bit "0" en appliquant un créneau de tension -50V d'une durée de 20s sur l'électrode de grille et

Conclusion

le bit "1" en appliquant un créneau de tension +100V d'une durée de 20s.

Le phénomène de piégeage de charges par des nanoparticules a été démontré dans des mémoires organiques à structure verticale [183], [160]. Ouyang et al. obtiennent des ratios I_{on}/I_{off} de 10⁴ comparables à nos valeurs obtenues sur l'échantillon B. Cependant ils obtiennent un temps de rétention allant jusqu'à 50h, tandis que les temps de rétention sont environ de 1h sur nos dispositifs. Mais l'avantage de notre dispositif réside dans le fait qu'il combine un comportement de transistor à un effet mémoire.

Cependant pour prolonger l'étude de ce dispositif nous pourrions faire varier la durée du pulse de tension -50V afin d'évaluer la rapidité d'écriture de notre dispositif. Nous pourrions également utiliser d'autres molécules pour encapsuler les nanoparticules, comme des molécules aromatiques. Concernant la géométrie du dispositif il faudrait d'une part obtenir une meilleure qualité d'oxyde afin de pouvoir écarter avec certitude l'hypothèse que les charges proviennent du substrat. D'autre part des grilles individuelles permettraient d'adresser spécifiquement chaque composant lors des opérations d'écriture. Enfin en diminuant les caractéristiques géométriques telles que le gap inter électrodes des dispositifs, les tensions d'opération peuvent être abaissées.

Cette étude des caractéristiques de notre dispositif nous permet maintenant d'envisager l'opportunité de réaliser une synapse dynamique avec une telle structure.

Chapitre 5

Le fonctionnement impulsionnel

5.1 Introduction

Dans cette série de mesures, nous procédons par analogie. Il s'agit de rechercher des propriétés similaires à celles des synapses impulsionnelles telles qu'elles ont été présentées dans le chapitre 2.

A cette fin, nous acquérons la réponse de notre dispositif à un signal dynamique. Trois lignes directrices guident nos études. D'abord nous étudions la réponse du dispositif suivant la fréquence du signal d'entrée imposé. Ensuite nous cherchons à observer un comportement de synapse dépressive ou facilitatrice. En dernier lieu, la réponse du dispositif en fonction de son historique est analysée.

Ces mesures sont réalisées sur l'échantillon C (pentacène + nanoparticules). Les mesures sont réalisées à l'aide d'un Agilent 4155C et sont automatisées avec un programme GPIB.

5.2 Protocole expérimental

Dans cette étude des propriétés synaptiques du dispositif transistor nanoparticules + pentacène, nous procédons de la façon suivante (figure 5.1).

Dans le chapitre précédent, nous avons mis en évidence un effet mémoire dans nos dispositifs : la résistance est modifiée après l'application d'une tension de -50V ou d'une tension de +100V sur l'électrode de grille pendant 20s respectivement. Au niveau fonctionnel, l'application d'une tension sur l'électrode de grille pendant une durée prédéterminée s'identifie à une programmation de notre synapse impulsionnelle. Nous utilisons donc l'électrode de grille pour programmer notre dispositif. Nous lui appliquons une tension de programmation V_P valant -50V ou +100V pendant une durée de programmation t_P , tandis que les électrodes de drain et de source sont à la masse (figure 5.2).

A l'issue de l'étape de programmation, nous étudions la réponse du dispositif à un signal impulsionnel (figure 5.3). L'entrée du système est constituée par la tension V_{ds} appliquée entre les électrodes de source et de drain du dispositif. Il s'agit d'un signal créneau périodique de période T, avec une tension basse V_{D1} et une tension haute V_{D2} . La tension haute est appliquée pendant une durée t. Dans un souci de normalisation, les niveaux de tension V_{D1} et V_{D2} sont ajustés d'un dispositif à l'autre de façon à obtenir des niveaux de courant similaires. Les constantes de temps, mises en évidence dans nos dispositifs dans le chapitre précédent, valent au minimum 150s environ. Les signaux utilisés seront donc de très basse fréquence. Celles-ci seront inférieures à 1 Hz.

Le signal de sortie est le courant I_{ds} mesuré sur l'électrode de source.

Suivant les acquisitions, l'électrode de grille reçoit également le signal d'entrée : le signal créneau est alors appliqué entre les électrodes de grille et de source. Dans une configuration alternative la tension de grille reste constante, imposant ainsi une tension d'opération V_G au dispositif.



FIG. 5.1 – Chronogramme des signaux appliqués aux dispositifs étudiés. Le dispositif subit d'abord une phase de programmation. Une tension V_P est appliquée sur l'électrode de grille pendant une durée t_P . Après reconfiguration de l'appareil de mesure, un signal créneau de tension basse V_{D1} et de tension haute V_{D2} est appliqué entre les électrodes de drain et de source. L'électrode de grille peut recevoir ce signal d'entrée ou se voir imposer une tension continue V_G .



FIG. 5.2 – Configuration du dispositif pendant l'étape de programmation par l'application d'une tension V_P sur l'électrode de grille pendant une durée t_P .



FIG. 5.3 – Configuration du dispositif durant son mode opératoire. Le signal d'entrée est appliqué sur l'électrode de drain. L'électrode de grille reçoit également ce signal d'entrée ou une tension continue V_G . L'électrode de source est à la masse. Le signal de sortie est le courant I_{ds} mesuré.

Nos mesures se déroulent suivant trois axes mis en évidence dans le chapitre 2 :

1. D'abord les propriétés de plasticité à court terme sont étudiées. Nous avons vu que la variation de l'amplitude entre deux potentiels post-synaptiques successifs peut être décrite par le produit de trois termes, un terme de facilitation et deux termes de dépression (2.3.2.2 du chapitre 2). Suivant le laps de temps écoulé entre ces deux potentiels, le poids synaptique se trouve augmenté ou diminué. Autrement dit, la synapse dynamique présente une dépendance de l'amplitude du signal post-synaptique à la fréquence du signal incident. De façon similaire, nous souhaitons observer sur notre dispositif une allure croissante ou décroissante du niveau de courant mesuré, suivant la fréquence du signal qui lui est imposé.

Pour cela, le dispositif est d'abord programmé à une tension V_P =-50V pendant une durée t_P=20s. Dans cette série de mesures, nous utilisons un signal V_{ds} de tension basse V_{D1} =0V et de tension haute V_{D2} =-50V. Nous appliquons d'abord un signal de caractéristiques t=0,2s et T=50s (fréquence de 0,02Hz), puis un signal de caractéristiques t=0,2s et T=5s (fréquence de 0,2Hz), et enfin le même signal de fréquence 0,02Hz. Pour ces acquisitions, l'électrode de grille reçoit également le signal d'entrée incident.

2. Une synapse impulsionnelle peut avoir un comportement dépressif ou facilitateur. C'est-à-dire que le signal post-synaptique présente respectivement une allure décroissante ou croissante pour un même train d'impulsion incident.

Afin d'évaluer une telle propriété sur notre dispositif, nous appliquons des tensions de programmation V_P =-50V et V_P =+100V, chacune pendant une durée t_P =20s. Après chaque programmation, un signal créneau de tension basse V_{D1} =-10V et de tension haute V_{D2} =-50V avec pour caractéristiques t=10s et T=20s est appliqué en entrée du dispositif. La tension de grille V_G est fixée à -20V. Nous acquérons l'allure du courant I_{ds} pour cette configuration de tension.

3. Enfin, nous étudions les propriétés de plasticité synaptique à modulation temporelle relative. Cette propriété se traduit par le fait que le poids synaptique varie en fonction de la corrélation entre l'activité du neurone pré-synaptique et celle du neurone post-synaptique.

Ici nous considérons que l'application d'une tension de -50V sur l'électrode de grille correspond à un potentiel d'action émis par le neurone post-synaptique et rétropropagé sur la synapse. Sur notre dispositif, nous appliquons un signal incident qui a pour tension basse V_{D1} =-5V, pour tension haute V_{D2} =-30V, et des valeurs t et T de respectivement 0,3s et 2s (fréquence de 0,5 Hz). La tension V_G est fixée à -20V. La réponse du dispositif pour le signal précédent est mesurée avant et après l'application d'une tension de programmation V_P =-50V pendant une durée t_P =40s.

Sur un autre dispositif, nous appliquons un signal incident de tension basse V_{D1} =-5V, de tension haute V_{D2} =-30V, et de caractéristiques t=1s et T=1,2s (fréquence de 0,83Hz). La tension de grille V_G est fixée à -20V. La réponse du dispositif à un tel signal est acquise avant et après plusieurs programmations à V_P =-50V pendant t_P=20s.

116

Résultats

Nos mesures ont été réalisées sur l'échantillon C (pentacène + nanoparticules). Quelques mesures sur l'échantillon B (pentacène + nanoparticules +SAMs) ont été effectuées mais par manque de temps elles n'ont pas été exhaustives. Elles ne sont donc pas présentées dans ce chapitre.

5.3 Résultats

5.3.1 La plasticité synaptique à court terme

Nous étudions la réponse de notre système à des signaux incidents de fréquences différentes. Avant la première acquisition, le dispositif subit une programmation à V_P =-50V et t_P=20s. Le signal utilisé a pour caractéristiques $V_{D1}=0V$, $V_{D2}=-50V$; t et T varient. Les courbes sont présentées dans leur ordre d'acquisition en figures 5.4, 5.5 et 5.6.

Nous observons qu'en fonction de la fréquence du signal appliqué le niveau de courant I_{ds} a une allure croissante ou décroissante. Ainsi, suivant la durée entre deux impulsions de tension appliquées au dispositif, celui-ci se charge ou se décharge.



FIG. 5.4 – Evolution du courant I_{ds} pour un signal incident de tension basse $V_{D1}=0V$, de tension haute $V_{D2}=-50V$ et de caractéristiques t=0,2s et T=50s (fréquence de 0,02Hz). L'électrode de grille reçoit également ce même signal incident.



FIG. 5.5 – Evolution du courant I_{ds} pour un signal incident de tension basse $V_{D1}=0V$, de tension haute $V_{D2}=-50V$ et de caractéristiques t=0,2s, T=5s (fréquence de 0,2Hz). L'électrode de grille reçoit également ce même signal incident.



FIG. 5.6 – Evolution du courant I_{ds} pour un signal incident de tension basse $V_{D1}=0V$, de tension haute $V_{D2}=-50V$ et de caractéristiques t=0,2s et T=50s (fréquence de 0,02Hz). L'électrode de grille reçoit également ce même signal incident.

En figure 5.7, nous présentons également la relaxation du courant sur un dispositif ayant subi une programmation à V_P =-50V pour t_P =20s. Afin de pouvoir comparer cette réponse avec la courbe 2.16 du chapitre 2, le courant est normalisé avec la valeur du courant mesuré avant la programmation du dispositif pour les paramètres $V_{ds}=V_G=-20V$. Cette courbe est acquise pour les paramètres $V_{D1}=0V$, $V_{D2}=-20V$, t=2ms et

Résultats

T=20002ms, l'électrode de grille reçoit également le signal incident. L'allure du niveau haut de la courbe est approximée par une somme de deux exponentielles de constantes de temps $\tau_1 \approx 183$ s et $\tau_2 \approx 2395$ s. Dans une synapse biologique ayant subi une forte dépression, l'allure du recouvrement de l'amplitude du potentiel post-synaptique vers sa valeur initiale est approximée par une somme de deux exponentielles de constantes de temps $\tau_1=0,746$ s et $\tau_2=8,47$ s. Bien que les valeurs des constantes de temps soient différentes dans chaque cas, nous observons une analogie entre les dynamiques de notre dispositif et la synapse biologique.



FIG. 5.7 – Réponse du dispositif après programmation à une tension V_P de -50V pendant $t_P=20$ s. Le signal incident est de tension basse $V_{D1}=0V$ et de tension haute $V_{D2}=-20V$ avec t=2ms et T=20002ms. L'électrode de grille reçoit ce même signal incident. Le courant I_{ds} mesuré est normalisé par rapport au courant initial avant programmation du dispositif. La courbe enveloppe est approximée par deux exponentielles de constantes de temps 183s et 2395s.

5.3.2 Comportement synaptique facilitateur ou dépressif

Nous observons pour nos dispositifs un comportement de synapse facilitatrice ou dépressive, selon la valeur de la tension de programmation appliquée sur l'électrode de grille.

Ainsi après l'application d'une tension de programmation V_P =-50V, nous observons que le niveau moyen du courant I_{ds} présente une allure croissante en valeur absolue. Nous obtenons alors un comportement de synapse facilitatrice (figure 5.8).

Après l'application d'une tension de programmation $V_P = +100V$, le niveau de courant moyen présente une allure décroissante en valeur absolue, correspondant à un comportement dépressif (figure 5.9).

Ces comportements sont reproductibles : en appliquant alternativement des tensions de programmation V_P =-50V et V_P =+100V pour t_P=20s, nous retrouvons respectivement les comportements facilitateur et dépressif.



FIG. 5.8 – Courbe représentant la valeur absolue du courant I_{ds} mesuré pour un signal incident V_{ds} de caractéristiques V_{D1} =-10V, V_{D2} =-50V, t=10s et T=20s. La tension V_G appliquée est de -20V. Cette courbe est acquise après programmation du dispositif à V_P =-50V et t_P=20s. Le courant I_{ds} a une allure croissante évoquant le comportement d'une synapse facilitatrice.



FIG. 5.9 – Courbe représentant la valeur absolue du courant I_{ds} mesuré pour un signal incident V_{ds} de caractéristiques V_{D1} =-10V, V_{D2} =-50V, t=10s et T=20s. La tension V_G appliquée est de -20V. Cette courbe est acquise après programmation du dispositif à V_P =+100V et t_P=20s. Le courant I_{ds} a une allure décroissante évoquant le comportement d'une synapse dépressive.



La figure 5.10 présente en détail l'allure de la courbe acquise sur la synapse facilitatrice.

FIG. 5.10 – (a) Ce schéma est tracé avec les niveaux de courant mesurés dans la réponse de la synapse facilitatrice (figure 5.8) au signal incident de caractéristiques V_{D1} =-10V, V_{D2} =-50V, t=10s et T=20s, avec V_G =-20V. Les caractéristiques I_{ds} - V_{ds} sont des tracés approximatifs. (b) Agrandissement à l'origine de la courbe de la figure 5.8.

Considérons le graphe précédent : du point a au point b, on a $V_{ds}=V_{D1}=-10V$; la tension V_{ds} appliquée est constante donc le courant diminue progressivement (courbe rouge); simultanément les charges stockées à la surface de l'oxyde relaxent, la caractéristique $I_{ds}-V_{ds}$ évolue donc vers des valeurs de courant plus élevées (flèche orange); pour une configuration identique des électrodes, un phénomène similaire se déroule sur

les créneaux du point e au point f, et du point i au point j. Du point b au point c nous passons de la valeur V_{D1} à la valeur V_{D2} =-50V; nous nous positionnons donc en un point de la caractéristique I_{ds} - V_{ds} , qui a relaxé pendant le créneau a b. Ensuite du point c au point d nous avons $V_{ds}=V_{D2}=-50V$; comme lors du premier créneau a b, le courant diminue progressivement; cependant ici le courant varie peu, et la caractéristique I_{ds} - V_{ds} relaxe faiblement (flèche orange); pour une configuration identique des électrodes, un phénomène similaire se déroule sur les créneaux du point g au point h, du point k au point l.

A la suite de ce résultat, nous avons particulièrement cherché à obtenir sur d'autres dispositifs l'allure croissante présentée en figure 5.8. Cependant sur l'ensemble des dispositifs étudiés seuls 33% présentent une allure croissante. De plus, ce comportement facilitateur est obtenu après plusieurs étapes de programmation successives à V_P =-50V et t_P=20s.

Nous traçons également les courbes enveloppe des graphes précédents. La courbe "niveau haut" est obtenue en rejoignant les plus forts courants mesurés sur chacun des créneaux hauts ; la courbe "niveau bas" est obtenue en rejoignant les courants les plus faibles mesurés sur chacun des créneaux bas. Sur la synapse facilitatrice, les niveaux haut et bas sont approximés par la somme de deux exponentielles croissantes (figure 5.11). Les constantes de temps sont de 39s et 242s pour le niveau haut, et de 27s et 254s pour le niveau bas. Dans le cas de la synapse dépressive, les niveaux haut et bas sont approximés par la somme de deux exponentielles décroissantes (figure 5.12). Les constantes de temps sont de 31s et 264s pour le niveau haut, et 35s et 291s pour le niveau bas.



FIG. 5.11 - Courbes enveloppe obtenues sur la réponse de la synapse facilitatrice.

Résultats



FIG. 5.12 - Courbes enveloppe obtenues sur la réponse de la synapse dépressive.

Pour comparaison, nous mesurons également la réponse du dispositif, pris dans son état initial non chargé, à un signal incident identique (figure 5.13). Le niveau moyen du courant présente une allure décroissante. La courbe de niveau haut est approximée par la somme de deux exponentielles décroissantes de constantes de temps 93s et 1503s, celle de niveau bas est approximée par deux exponentielles décroissantes de constantes de constantes de constantes de temps 121s et 1744s (figure 5.14). Nous acquérons aussi les courbes de charge pour V_{ds} =-10V et V_{ds} =-50V (V_G =-20V) sur le dispositif non chargé (avant programmation). Elles présentent chacune également deux constantes de temps, soit respectivement 16s et 250s, et 24s et 379s.



FIG. 5.13 – Réponse du dispositif pris dans son état initial (non chargé) à un signal créneau de caractéristiques V_{D1} =-10V, V_{D2} =-50V, t=10s et T=20s.



FIG. 5.14 – Courbes enveloppe du dispositif pris dans son état initial (non chargé) à un signal créneau de caractéristiques V_{D1} =-10V, V_{D2} =-50V, t=10s et T=20s.

5.3.3 Plasticité synaptique à modulation temporelle relative : Réponse du système suivant son historique

5.3.3.1 Réponse du dispositif suivant le temps écoulé depuis l'application d'une tension de -50V

La figure 5.15 présente la réponse d'un dispositif pris dans son état initial non chargé à un signal d'entrée de caractéristiques V_{D1} =-5V, V_{D2} =-30V, t=2s et T=2s, avec V_G fixée à -20V. Ensuite celui-ci subit une programmation à V_P =-50V pendant une durée t_P =40s. Nous considérons la fin de l'étape de programmation comme l'origine de l'axe temporel. En appliquant au dispositif un signal identique, à l'instant $t_1 > 0$, nous observons que le niveau de courant a diminué (figure 5.16). Ce qui est conforme aux résultats précédents et à ceux présentés dans le chapitre 4. Sur la figure 5.16 nous reportons également la courbe obtenue à l'instant $t_2 > t_1$. Celle-ci présente un niveau de courant plus élevé par rapport à celui de la courbe acquise à l'instant $t_1 :$ le niveau moyen du courant augmente progressivement après l'application d'une tension de -50V.

Si l'occurrence d'une impulsion de -50V reflète l'activité du neurone post synaptique, alors nous obtenons une dépression à long terme qui dépend de la durée écoulée entre l'instant où le neurone post-synaptique a émis un potentiel d'action et l'instant d'arrivée du train d'impulsion pré-synaptique (figure 5.17).



FIG. 5.15 – Réponse du dispositif non sollicité à un signal d'entrée de caractéristiques V_{D1} =-5V, V_{D2} =-30V, t=2s et T=2s. La fréquence est de 0,5 Hz. La tension de grille V_G est fixée à -20V.



FIG. 5.16 – Réponses du dispositif à un signal incident identique à celui utilisé pour le graphe présenté en figure 5.15 (V_{D1} =-5V, V_{D2} =-30V, V_{G} =-20V, t=2s et T=2s) après l'application d'une tension de programmation V_P =-50V pendant t_P=20s. Les courbes sont rassemblées sur un même graphe pour bien mettre en évidence l'effet de relaxation après l'application de la tension de programmation. La courbe du bas est acquise à l'instant t₁ après l'application d'une tension de -50V, celle du haut est obtenue à l'instant t₂ >t₁.



FIG. 5.17 – La tension de programmation V_P appliquée pendant une durée t_P est assimilée à une rétro propagation de l'activité du neurone post-synaptique. La réponse du dispositif à un signal présynaptique émis à partir de l'instant t_1 est fonction du temps qui s'est écoulé depuis l'occurrence d'une impulsion sur l'électrode de grille.

5.3.3.2 Réponse du système suivant le nombre d'applications de tension de -50V

Les trois courbes suivantes sont obtenues pour un même signal incident. Les figures 5.18, 5.19, 5.20 présentent respectivement les réponses acquises sur le dispositif :

- 1. pris dans son état initial non chargé
- 2. après une première application d'une tension de programmation V_P=-50V pendant t_P=20s
- 3. après une seconde application de la tension de programmation V_P =-50V pendant une durée t_P=20s également

Nous remarquons que le niveau de courant diminue avec le nombre d'applications de tension -50V sur l'électrode de grille. En effet à chaque application les nanoparticules sont de plus en plus chargées.

Résultats



FIG. 5.18 – Réponse du dispositif non sollicité à un signal incident de tension basse V_{D1} =-5V, de tension haute V_{D2} =-30V, et de caractéristiques t=1s et T=1,2s. La tension V_G est fixée à -20V. La fréquence est de 0,83 Hz.



FIG. 5.19 – Réponse du dispositif pour un même signal incident de fréquence 0,83 Hz, V_G fixée à -20V, après une première programmation à V_P =-50V et t_P =20s.



FIG. 5.20 – Réponse du dispositif pour un même signal incident de fréquence de 0,83 Hz, V_G fixée à -20V, après une seconde programmation à V_P =-50V et t_P=20s.

5.4 Discussion

Dans nos mesures expérimentales, le poids synaptique est réalisé par les charges stockées dans les nanoparticules. Celui-ci se traduit par l'amplitude du courant postsynaptique (courant drain-source du dispositif) mesuré.

Nous avons d'abord montré que le dispositif pentacène + nanoparticules présente une allure croissante ou décroissante du courant mesuré suivant la fréquence du créneau de tension qui lui est appliqué.

Pour cela notre dispositif est initialement chargé en appliquant une tension de programmation V_P =-50V pendant t_P =20s. Dans le chapitre précédent, nous avons vu qu'après l'application d'une tension de -50V sur l'électrode de grille, les charges s'accumulent dans les nanoparticules à la surface de l'oxyde (figure 4.24). Puis elles relaxent progressivement provoquant une augmentation du courant mesuré (figure 4.28). Ce comportement est observé en figures 5.4 et 5.6.

Cependant chaque impulsion de tension incidente induit également des charges sur le dispositif. En effet, dans le chapitre précédent nous avons observé un effet capacitif : pour une configuration de tensions V_{ds} , V_{gs} appliquée en continu, le courant diminue au cours du temps (figure 4.16). Si la durée $\Delta t=T$ -t est suffisamment faible, les charges induites par une impulsion compensent complètement la relaxation des charges issues de la programmation du dispositif. Nous observons alors une diminution de l'amplitude du courant mesuré (figure 5.5).

Comme dans une synapse biologique, la courbe de recouvrement du courant normalisé, obtenue sur notre dispositif après l'application d'une tension de -50V (figure 5.7), présente une allure approximée par une somme de deux exponentielles. Ces résultats

Discussion

montrent des similitudes avec les caractéristiques de plasticité à court terme d'une synapse biologique telles que présentées dans le chapitre 2 dans le modèle proposé par Varela et al.

Deuxièmement, en utilisant une tension de programmation adéquate, notre dispositif peut réaliser une synapse dépressive ou facilitatrice.

Tout d'abord, après programmation à V_P =-50V pendant t_P =20s, le dispositif présente un comportement facilitateur, nous observons que le niveau moyen du courant augmente progressivement. Le comportement de synapse facilitatrice obtenu (figure 5.10) s'explique complètement par le déroulement simultané, d'une part de la décharge du dispositif après sa programmation, et d'autre part de la charge du dispositif sous l'application d'une configuration de tension V_{ds} , V_{qs} .

En figure 5.10, nous constatons que la relaxation des charges est plus importante pour $V_{ds}=V_{D1}=-10V$ que pour $V_{ds}=V_{D2}=-50V$. Dans la seconde configuration le dispositif est en état de saturation. Une barrière de potentiel interdit la présence des charges positives au voisinage de l'électrode de drain. Les charges stockées dans les nanoparticules situées au voisinage de l'électrode de drain ont pu y rester piégées, diminuant ainsi la quantité de charges qui peuvent relaxer pour la conduction. Tandis que quand $V_{ds}=V_{D1}=-10V$, le canal conducteur est formé sur toute la longueur de l'oxyde. En ce cas les charges stockées dans les nanoparticules au voisinage de l'électrode de drain peuvent relaxer vers le courant de conduction. La relaxation de la caractéristique I_{ds} - V_{ds} vers des valeurs de niveau de courant plus importantes est facilitée.

Ensuite, après programmation à $V_P = +100V$ pendant $t_P = 20s$, le dispositif présente un comportement dépressif. Nous savons qu'à l'état initial, les nanoparticules sont chargées (figure 4.24). Sous l'effet de l'application d'une tension de +100V, ces charges sont évacuées des nanoparticules : le niveau de courant augmente. Ensuite les nanoparticules se chargent progressivement provoquant une diminution du niveau de courant mesuré. De plus, comme dans le cas de la synapse facilitatrice, le dispositif présente une seconde dynamique de charges : pour une configuration de tension V_{ds} , V_{gs} donnée, le courant mesuré sur le dispositif diminue progressivement. Ces deux dynamiques de relaxation de charges vont toutes les deux dans le sens d'une décroissance du niveau de courant mesuré.

Nous avons noté que l'obtention du comportement facilitateur réclame un état de charge important. Sur la plupart des dispositifs, plusieurs programmations à V_P =-50V sont nécessaires avant de pouvoir observer un comportement croissant du niveau moyen du courant I_{ds}. De plus ce comportement n'est pas systématiquement obtenu sur un dispositif. L'inhomogénéité des caractéristiques sur un même échantillon, observée dans le chapitre précédent, expliquerait la difficulté à obtenir le comportement facilitateur sur tous les dispositifs.

Dans le tableau 5.1, les constantes de temps mesurées sur les courbes enveloppe des réponses des synapses facilitatrice et dépressive sont récapitulées. Ces constantes de temps sont comparées avec celles obtenues sous d'autres conditions expérimentales.

		Constante de temps τ_1 (s)	Constante de temps τ_2 (s)
Relaxation après application d'une tension de -50V (cf. chapitre 5)		100-200 +/- 4	1500-2500 +/- 60
Courbes de charge du dispositif dans	V _{ds} =-10V	16	250 +/- 2
son état initial pour V _{gs} =-20V	V _{ds} =-50V	24	379 +/- 4
Réponse du dispositif dans son état initial	Niveau haut	93 +/- 4	1503 +/- 51
	Niveau bas	121 +/- 6	1744 +/- 78
Synapse facilitatrice	Niveau haut	30 +/- 10	240 +/- 8
	Niveau bas	27 +/- 5	254 +/- 8
Synapse dépressive	Niveau haut	31 +/- 1	264 +/- 13
	Niveau bas	35 +/- 2	291 +/- 19

TAB. 5.1 - Récapitulatif sur les constantes de temps mesurées sur le dispositif chargé et non chargé sous différentes conditions expérimentales.

Les constantes de temps entre la synapse facilitatrice et la synapse dépressive sont proches. Ceci va dans le sens d'une dynamique de relaxation identique dans les deux cas. Nous pouvons faire un parallèle entre les mesures statiques présentées dans le chapitre précédent et les mesures dynamiques obtenues ici. Bien que les différentes acquisitions n'aient pas été réalisées sur les mêmes dispositifs, ni sous les mêmes conditions expérimentales, les allures obtenues sont cohérentes. En effet, dans les deux cas les dispositifs présentent deux constantes de temps : l'une de quelques dizaines de secondes, l'autre de quelques centaines voir milliers de secondes.

Une autre configuration de fonctionnement consiste à identifier l'application d'une tension de -50V sur l'électrode de grille avec l'occurrence d'une activité du neurone postsynaptique. Le potentiel d'action émis par le neurone post-synaptique est rétropropagé vers la synapse. Les résultats présentés en partie 5.3.3.1 et 5.3.3.2 sont cohérents avec la relaxation du courant après l'application d'une tension de -50V, présentée dans le chapitre précédent. En ce cas, le poids synaptique correspondant ici à l'amplitude du courant I_{ds} diminue avec l'occurrence d'une activité post-synaptique et relaxe progressivement vers sa valeur initiale.

Nous avons montré que le niveau moyen des trains d'impulsion de courant est fonction du temps écoulé entre l'occurrence d'une tension de programmation V_P =-50V sur l'électrode de grille, et l'arrivée du signal impulsionnel incident. La variation du poids synaptique pourrait avoir l'allure présenté en figure 5.21 correspondant à une dépression à long terme.
Conclusion



FIG. 5.21 – Changement du poids synaptique en fonction du temps écoulé entre l'instant où arrive le pulse pré-synaptique et celui où arrive le pulse post-synaptique.

5.5 Conclusion

Nos résultats démontrent la faisabilité d'une synapse dynamique électronique avec notre dispositif transistor à nanoparticules + pentacène. Ceci avec différentes configurations des électrodes du dispositif.

Concernant la propriété de dépression à court terme, nous avons remarqué des correspondances entre les résultats expérimentaux obtenus sur les synapses électroniques et ceux présentés par Varela et al. (chapitre 2, partie 2.3.2.2). En figure 5.5 nous observons que le niveau de courant atteint une valeur stabilisée. Afin d'approfondir l'étude de la dépression à court terme, il serait intéressant d'acquérir l'allure de cette amplitude stabilisée du signal post-synaptique en fonction de la fréquence du signal incident, de façon à la comparer avec celle présentée par la synapse biologique. D'autre part, nous pourrions également imposer un signal incident du type train de poisson pour obtenir des paramètres utilisables dans le modèle proposé par Varela et Abott.

Nous avons aussi démontré un comportement synaptique dépressif ou facilitateur, suivant la tension appliquée sur l'électrode de grille du dispositif. Cependant chacun de ces comportements se présente à des niveaux de courant qui diffèrent entre eux d'environ un ordre de grandeur. Ceci peut être corrigé en utilisant des étages successifs sensibles uniquement aux amplitudes des signaux et non pas aux niveaux de courant moyens (figure 5.22).

Concernant l'étude de la plasticité synaptique à modulation temporelle relative, nous pourrions préciser l'allure de décroissance du poids synaptique en fonction de la durée $\Delta t = t_{pre} \cdot t_{post}$ (figure 5.21), en mesurant la réponse du dispositif pour plusieurs valeurs de Δt . La réalisation d'un circuit démonstrateur composé de deux neurones Integrate&Fire reliés par notre synapse, démontrant la dépréciation du poids synaptique en fonction des signaux pré- et post-synaptiques prolongerait notre démonstration.

Les différentes propriétés synaptiques ont été démontrées en utilisant des signaux incidents de caractéristiques différentes entre eux. Il serait intéressant d'homogénéiser les trois comportements mis en évidence, en utilisant un même type de signal incident. Un



FIG. 5.22 - Schéma de principe pour une utilisation du dispositif transistor + nanoparticules en tant que synapse électronique.

signal incident de caractéristiques $V_{D1}=0V$ et $V_{D2}=-50V$ semble être le plus adapté (figure 5.23). Par exemple dans nos mesures, la démonstration des propriétés de plasticité synaptique à modulation temporelle relative, est obtenue après programmation du dispositif à une tension $V_P=-50V$ pendant une durée $t_P=20s$. Cette étude pourrait être menée sur des impulsions individuelles : établir l'allure de l'amplitude du courant mesuré en fonction du décalage temporel entre l'instant d'arrivée d'une impulsion de -50V présentée sur l'électrode de drain et l'instant d'arrivée d'une impulsion de -50V sur l'électrode de grille. La valeur des impulsions utilisées sur l'électrode de grille pourrait être plus importante, de façon à compenser la faible durée de programmation t_P inférieure à 20s.



FIG. 5.23 – Schéma de principe pour une utilisation du dispositif transistor + nanoparticules en tant que synapse électronique. La dépression post-synaptique liée à l'activité du neurone post-synaptique est mise en œuvre par l'occurrence d'un train d'impulsion émis par le neurone post-synaptique. La dépression liée à la fréquence du signal incident est mise œuvre du fait que le signal incident est acheminé sur le drain et également sur l'électrode de grille.

Conclusion

Enfin, nous pouvons ici faire la même remarque que dans le chapitre précédent : en diminuant les dimensions du dispositif les tensions de fonctionnement seraient moins grandes. Les constantes de temps mises en jeu seraient également moins importantes. Nous pourrions alors utiliser des signaux incidents de fréquences plus élevées. Cependant l'obtention de composants présentant des caractéristiques plus homogènes n'est pas indispensable. En effet les variations constatées entre les dispositifs ne sont pas un frein à leur utilisation au sein d'un réseau de neurones.

Conclusion

Dans ce travail, à partir d'une étude critique des architectures envisageables pour les nanotechnologies, nous avons démontré la faisabilité d'une synapse dynamique avec un dispositif transistor organique possédant des nanoparticules d'or insérées dans le canal de conduction.

Dans un premier temps nous avons relevé les caractéristiques propres aux objets nanométriques. Ainsi leurs techniques de fabrication ont un rendement faible ; les signaux présentés par ces nanodispositifs montrent un niveau de bruit non négligeable ; les méthodes d'assemblage permettent une précision de placement limitée ; et leurs dimensions laissent envisager une densité d'intégration élevée.

Dans la littérature nous avons vu que ces propriétés induisent comme problématiques architecturales principales l'adressage des dispositifs, la prise en compte de la tolérance aux fautes. Ces problématiques sont traitées par la reconfigurabilité, les architectures neuronales. Mais nous avons observé que chacune des architectures proposées se situe dans la continuité des architectures actuelles, en utilisant des solutions pour les adapter aux particularités des nanotechnologies. Deux exceptions cependant : d'une part les automates cellulaires quantiques (QCA) surtout développés par l'université de Notre Dame, mais ils ont pour défaut principal la nécessité d'un placement précis des dispositifs; d'autre part l'approche "Nanocell" de Tour qui est séduisante car elle combine un auto-assemblage des dispositifs peu contrôlé, avec une tolérance aux fautes et une fonctionnalité obtenues par reconfiguration.

Il nous a paru nécessaire de considérer à la base les architectures envisageables pour les nanotechnologies, et d'effectuer une comparaison critique de celles-ci en tenant compte des propriétés mises en évidence pour les dispositifs nanométriques.

Nous avons considéré que les propriétés des nanotechnologies se traduisent en termes architecturaux principalement par des exigences de régularité, de localité des accès, de tolérance aux fautes et aux défauts. En considérant ces caractéristiques, nous avons donc présenté les avantages et inconvénients de plusieurs architectures - l'architecture de Von Neumann, les automates cellulaires (dont les QCA sont une classe particulière), les architectures reconfigurables, les réseaux de neurones. A l'issue de cette comparaison critique nous avons conclu que les réseaux de neurones sont les plus adaptés à une utilisation des nanotechnologies. En effet l'architecture neuronale répond aux critères listés auparavant, et elle dispose d'un champ applicatif non négligeable. Afin de limiter les effets du bruit apparaissant sur les niveaux de signaux, nous avons choisi d'utiliser un mode de signalisation temporel entre les unités composant le réseau de neurones. Un tel mode de signalisation est utilisé dans une classe particulière d'architecture neuronale : les réseaux de neurones impulsionnels. Dans une telle architecture la fonction synaptique a été identifiée comme la fonction critique à mettre en œuvre.

Nous avons considéré une synapse dynamique, c'est-à-dire que la valeur du poids synaptique présente une variabilité qui dépend de l'activité du réseau : on parle de plasticité synaptique. Nous en avons décrit les trois phénomènes principaux : la plasticité à court terme, c'est-à-dire la modulation du poids synaptique en fonction de la fréquence du signal impulsionnel pré-synaptique; cette plasticité synaptique peut se présenter dans un mode facilitateur ou dépressif, dans le premier cas le poids synaptique a une allure croissante et dans l'autre une allure décroissante ; la plasticité synaptique à modulation temporelle relative, où le poids synaptique est une fonction de la corrélation des activités des neurones pré- et post-synaptiques, principalement liée au temps écoulé entre l'instant d'émission du train d'impulsion pré-synaptique et l'instant d'émission du train d'impulsion du neurone post-synaptique et à la fréquence de ces signaux.

Nous avons choisi de mettre en œuvre expérimentalement de telles propriétés de plasticité synaptique. Il a été fait l'hypothèse que leur réalisation pourrait bénéficier de phénomènes originaux apparaissant à l'échelle nanométrique. Pour cela nous nous sommes fixés sur un dispositif présentant une géométrie de transistor organique avec des nanoparticules d'or insérées dans le canal de conduction. Les nanoparticules en stockant les charges mettraient en œuvre le poids synaptique ; la relaxation de ces charges permettrait de réaliser les propriétés de plasticité synaptique.

Ensuite nous avons procédé à la réalisation technologique de notre dispositif. Plusieurs dispositifs ont été fabriqués sur des wafers composés d'une couche d'isolant SiO₂ surmontée de plots d'or espacés d'une distance de 12μ m.

Nous avons testé plusieurs méthodes de dépôt des nanoparticules sur la surface d'isolant comprise entre les électrodes. Le meilleur recouvrement de la surface par les nanoparticules a été obtenu en fonctionnalisant au préalable la surface d'isolant par une monocouche de molécules de (3-aminopropyl) trimethoxysilane; et les électrodes d'or par une monocouche de molécules de 1-8 octanedithiol. Nous avons observé par microscopie électronique que les nanoparticules ainsi déposées ont formé un réseau 2D dans certaines zones.

Les mesures électriques acquises sur des dispositifs appartenant à cet échantillon ont mis en évidence un courant de conduction. Pour l'étape de dépôt suivante, nous avons donc choisi un échantillon qui présentait un réseau de nanoparticules moins compact, mais aucun courant de conduction. Avant de procéder au dépôt de nanoparticules, la surface isolante inter électrodes de cet échantillon avait été recouverte de (3-aminopropyl) trimethoxysilane comme sur l'échantillon précédent. Par contre les électrodes d'or avaient été revêtues d'une monocouche de 2-aminoethanethiol. Pour terminer la fabrication de nos dispositifs, cet échantillon a subi un dépôt d'une couche de pentacène.

Puis notre dispositif a été caractérisé électriquement. Les résultats ont été comparés

Conclusion

avec ceux obtenus sur des dispositifs appartenant à des échantillons témoins : un échantillon ayant subi un dépôt de nanoparticules sans le dépôt préalable de molécules sur la surface, et un échantillon n'ayant pas subi de dépôt de nanoparticules.

D'abord les grandeurs caractéristiques du dispositif en configuration transistor ont été mesurées. Nous avons montré que les nanoparticules améliorent la mobilité des porteurs de charge, la pente sous le seuil, et le niveau de courant. Cependant l'utilisation de notre dispositif dans un circuit présenterait une consommation accrue car les valeurs de tension de seuil et de Turn-on voltage sont plus importantes par rapport à un transistor pentacène n'ayant subi aucun dépôt de nanoparticules.

Nous avons également montré que les nanoparticules peuvent stocker des charges. Ainsi un effet mémoire a été mis en évidence sur notre dispositif. En appliquant une tension adéquate sur l'électrode de grille le niveau de courant drain-source est drastiquement diminué, puis relaxe progressivement vers sa valeur initiale. Nous avons donc obtenu un dispositif combinant les propriétés d'un transistor et celles d'une mémoire.

Enfin nous avons procédé aux mesures impulsionnelles sur notre dispositif. Nous avons considéré la tension entre les électrodes de drain et de source comme signal d'entrée, et le courant drain-source comme signal de sortie, le poids synaptique étant mis en œuvre par la charge stockée dans les nanoparticules. L'électrode de grille permettait d'une part d'appliquer une tension de fonctionnement au dispositif; et d'autre part de charger les nanoparticules, c'est-à-dire initialiser le poids synaptique du dispositif.

Au cours de plusieurs séries de mesure nous avons cherché à retrouver des comportements de synapse dynamique en appliquant des signaux périodiques sur l'entrée du dispositif. Généralement nos séries de mesures consistaient à d'abord initialiser le poids synaptique en appliquant une tension sur l'électrode de grille pendant une durée prédéterminée (tension de programmation). Ensuite nous observions l'évolution de ce poids synaptique en fonction des propriétés du signal incident. Ce poids synaptique était mis en évidence par les caractéristiques du signal de sortie, c'est-à-dire l'intensité du courant drain-source mesurée.

Ainsi plusieurs des plasticités synaptiques typiques d'une synapse dynamique ont été démontrées. Nous avons montré que sous l'application d'un signal d'entrée périodique, l'intensité du courant drain-source a une allure croissante ou décroissante en fonction de la fréquence du signal incident. Cette caractéristique est une mise en œuvre de la plasticité synaptique à court terme. Nous avons également montré que la réponse du dispositif à un signal périodique incident varie suivant la valeur de la tension de programmation initiale. En effet pour un signal de fréquence donnée, si le dispositif a été programmé par une tension de -50V l'intensité du courant drain-source aura une allure croissante ; par contre si le dispositif a été initialement programmé par une tension de +100V, l'intensité du courant aura une allure décroissante. Nous pouvons donc réaliser une synapse facilitatrice ou dépressive avec le même dispositif. Enfin nous avons démontré que le niveau de courant mesuré en réponse à un signal incident périodique varie en fonction de la durée Δt écoulée depuis la programmation du dispositif et l'instant d'arrivée du signal incident. De plus nous avons montré que le niveau de courant diminue avec le nombre de programmations effectuées sur le dispositif. Si le signal de

programmation représente une impulsion post-synaptique nous obtenons une plasticité synaptique à modulation temporelle relative.

Ces différentes propriétés synaptiques démontrées prouvent la faisabilité expérimentale d'une synapse dynamique avec notre dispositif pentacène + nanoparticules.

Cependant les fréquences du signal impulsionnel d'entrée pourraient être augmentées, et les constantes de temps présentées par les phénomènes de plasticité synaptique pourraient être diminuées, en utilisant des géométries de dispositifs de dimensions plus réduites.

De plus, ce travail pourrait être prolongé par un volet davantage architectural. Notamment une perspective intéressante serait l'intégration des paramètres de la synapse électronique que nous avons fabriquée, au sein d'un modèle d'architecture de réseau de neurones impulsionnels. Il faudrait alors considérer le codage de l'information : est-il plus pertinent de coder l'information dans la fréquence du signal ou dans l'instant d'arrivée d'une impulsion?

A terme, pour toute proposition architecturale pour les nanotechnologies, se pose la question de savoir comment avec une telle densité de dispositifs, dissiper la chaleur produite. En effet si avec les nanotechnologies on peut espérer réduire la consommation unitaire d'un dispositif, la densité d'intégration atteignable risque de ne pas diminuer la puissance dissipée globale d'un circuit. D'autre part la logique utilisant l'état de charge électronique des dispositifs butera sur la limite thermodynamique fondamentale. Celle-ci définit une énergie minimale dissipée par toute opération de commutation d'un dispositif utilisant la charge électronique comme variable d'état [184].

Du point de vue architectural, les calculateurs réversibles tels que les calculateurs adiabatiques quantiques, sont envisageables pour traiter ces problématiques [185], [186]. Du point de vue du dispositif on peut également envisager d'utiliser une variable d'état autre que la charge électronique, telle que le spin d'une particule [187] ou la conformation d'une molécule [188], [189].

Glossaire

<i>AFM</i>	Atomic Force Microscope
<i>APTS</i>	Amino Propyl triethoxysilane
<i>CMOS</i>	Complementary Metal Oxide Semi-conductor
FPGA	Field Programmable Gate Array
<i>MEB</i>	
<i>MWNT</i>	
NT	\dots
<i>PDMS</i>	\dots
<i>SAM</i>	Self-Assembled Monolayer
<i>STM</i>	Scanning Tunneling Microscope
SWNT	
<i>MRAM</i>	Magnetic Random Access Memory

- [1] The international technology roadmap for semiconductors : 2005, 2005.
- [2] R. P. FEYNMAN : There's plenty of room at the bottom. *Caltech's Engineering* and Science, 5:22-36, 1960.
- [3] A. AVIRAM et M. A. RATNER : Molecular rectifiers. Chemical Physics Letters, 29(2):277-283, 1974.
- [4] H. DAI : Carbon nanotubes : opportunities and challenges. Surface science, 500:218-241, 2002.
- [5] http://www.ipt.arc.nasa.gov/gallery.html.
- [6] L. DONG, F. ARAI, M. NAKAJIMA, P. LIU et T. FUKUDA : Nanotube devices fabricated in a nano laboratory. In Proceedings of the 2003 IEEE International conference on robotics and automation, pages 3648-3653, 2003.
- [7] C. JOURNET, W. K. MASER, P. BERNIER, A. LOISEAU, M. Lamy de la CHAPELLE, S. LEFRANT, P. DENIARD, R. LEEK et J. E. FISCHER : Large-scale production of single-walled carbon nanotubes by the electric-arc technique. *Nature*, 388:756–758, 1997.
- [8] H. DAI, A. THESS, R. LEE, P. NIKOLAEV, P. PETIT, J. ROBERT, C. XU, Y. H. LEE, S. G. KIM, A.-G. RINZLER, D.-T. COLBERT, G.-E. SCUSERIA, D. TOMBNEK, J.-E. FISCHER et R.-E. SMALLEY : Crystalline ropes of metallic carbon nanotubes. *Science*, 273(5274):483–487, 1996.
- [9] H. DAI, A.-G. RINZLER, P. NIKOLAEV, A. THESS, D.-T. COLBERT et R.-E. SMAL-LEY : Single-wall nanotubes produced by metal-catalyzed disproportionation of carbon monoxide. *Chemical Physics Letters*, 260(3):471–475, 1996.
- [10] P. AVOURIS: Carbon nanotube electronics. *Chemical Physics*, 281:429–445, 2002.
- [11] A. JAVEY, J. GUO, D.B. FARMER, Q. WANG, D. WANG, R.G. GORDON, M. LUND-STROM et H. DAI : Carbon nanotube field-effect transistors with integrated ohmic contacts and high-gate dielectrics. *Nano Letters*, 4(3):447–450, 2004.
- [12] V. N. POPOV : Carbon nanotubes : properties and application. Materials Science and Engineering R 43, pages 61–102, 2004.
- [13] M. P. ANANTRAM et F. LÉONARD : Physics of carbon nanotube electronic devices. Reports on Progress in Physics, 69(3):507-561, 2006.

- [14] V. T. S. WONG et W. J. LI : Bundled carbon nanotubes as electronic circuit and sensing element. In Proceedings of the 2003 IEEE International conference on robotics and automation, pages 3648–3653, 2003.
- [15] J. NYGÅRD, D. H. COBDEN et P. E. LINDELOF : Kondo physics in carbon nanotubes. Nature, 408:342–346, 2000.
- [16] M. BOCKRATH, D. H. COBDEN, J. LU, A. G. RINZLER, R. E. SMALLEY, L. BA-LENTS et P. L. MCEUEN : Luttinger-liquid behaviour in carbon nanotubes. *Nature*, 397:598-601, 1999.
- [17] H. DAI, J. KONG, E. YENILMEZ, T. W. TOMBLER, W. TOMBLER, W. KIM, R. B. LAUGHLIN, L. LIU, C.S. JAYANTHI et S. Y. WU : Quantum interference and ballistic transmission in nanotube electron waveguides. *Physical review letters*, 87(10):106801, 2001.
- [18] SEMATECH EDITION. AUSTIN, TX, éditeur. International Technology Roadmap for Semiconductors : 2005. 2005.
- [19] J. LI, Q. YE, A. CASSELL, H. T. NG, R. STEVENS, J. HAN et M. MEYYAPPAN : Bottom-up approach for carbon nanotube interconnects. *Applied Physics Letters*, 82(15):2491-2493, 2003.
- [20] F. KREUPL, A. P. GRAHAM, G. S. DUESBERG, W. STEINHOGL, M. LIEBAU, E. UNGER et W. HONLEIN : Carbon nanotubes in interconnect applications. *Microelectronic Engineering*, 64(1-4):399-408, 2002.
- [21] Z. CHEN, G. CAO, Z. LIN, I. KOEHLER et P. K BACHMANN : A self-assembled synthesis of carbon nanotubes for interconnects. *Nanotechnology*, 17(4):1062– 1066, 2006.
- [22] A. JAVEY, J. GUO, Q. WANG, M. LUNDSTROM et H. DAI : Ballistic carbon nanotube field-effect transistors. *Nature*, 424:654–657, 2003.
- [23] V. DERYCKE, R. MARTEL, J. APPENZELLER et Ph. AVOURIS : Carbon nanotube inter- and intramolecular logic gates. *Nano Letters*, 1(1):453–456, 2001.
- [24] C. DEKKER, A. BACHTOLD, P. HADLEY et T. NAKANISHI : Logic circuits with carbon nanotube transistors. *Science*, 294:1317–1319, 2001.
- [25] A. JAVEY, Y. C. TSENG, P. XUAN, R. MALLOY, Q. WANG, J. BOKOR et H. DAI : Monolithic integration of carbon nanotube devices with silicon mos technology. *Nano Letters*, 4(1):123–127, 2004.
- [26] A. JAVEY, Q. WANG, A. URAL, Y. LI et H. DAI : Carbon nanotube transistor arrays for multistage complementary logic and ring oscillators. *Nano Letters*, 2(9):929–932, 2002.
- [27] E. BRAUN, K. KEREN, R. S. BERMAN, E. BUCHSTAB et U.SIVAN : DNAtemplated carbon nanotube field-effect transistor. *Nature*, 424:1380–1382, 2003.
- [28] E. VALENTIN, S. AUVRAY, J. GOETHALS, J. LEWENSTEIN, L. CAPES, A. FILO-RAMO, A. RIBAYROL, R. TSUI, J.-P. BOURGOIN et J.-N. PATILLON : High-density selective placement methods for carbon nanotubes. *Microelectronic Engineering*, 61-62:491-496, 2002.

- [29] S. AUVRAY, V. DERYCKE, M. GOFFMAN, A. FILORAMO, O. JOST et J.-P. BOUR-GOIN : Chemical optimization of self-assembled carbon nanotube transistors. *Nano Letters*, 5(3):451–455, 2005.
- [30] J. APPENZELLER, J. KNOCH, V. DERYCKE, R. MARTEL, S. WIND et Ph. AVOU-RIS : Field-modulated carrier transport in carbon nanotube transistors. *Physical Review Letters*, 89(12):126801, 2002.
- [31] S. AUVRAY, J. BORGHETTI, M. F. GOFFMAN, A. FILORAMO, V. DERYCKE, J. P. BOURGOIN et O. JOST : Carbon nanotube transistor optimization by chemical control of the nanotube-metal interface. *Applied Physics Letters*, 84(25):5106– 5108, 2004.
- [32] G. L. FREY, S. ELANI, M. HOMYONFER, Y. FELDMAN et R. TENNE : Opticalabsorption spectra of inorganic fullerenelike MS₂ (M=Mo, W). *Physical Review* B, 57(11):6666-6671, 1998.
- [33] O.R. LOURIE, C.R. JONES, B.M. BARTLETT, P.C. GIBBONS, R.S. RUOFF et W.E. BUHRO : CVD growth of boron nitride nanotubes. *Chemistry of Materials*, 12(7): 1808–1810, 2000.
- [34] J. GUO, M. LUNDSTROM et S. DATTA : Performance projections for ballistic carbon nanotube field-effect transistors. Applied Physics Letters, 80(17):3192– 3194, 2002.
- [35] F. KREUPL, G. S. DUESBERG, A. P. GRAHAM, M. LIEBAU, E. UNGER, R. SEIDEL, W. PAMLER et W. HOENLEIN : Carbon nanotubes in microelectronic applications. Physics, Chemistry and Applications of Nanostructures, Reviews and Short Notes to Nanomeeting 2003, V. E. Borisenko, S. V. Gaponenko, V. S. Gurin (Eds.), World Scientific, pp. 525-532, 2003.
- [36] S. BHUNIA, T. KAWAMURA, Y. WATANABE, S. FUJIKAWA et K. TOKUSHIMA : Metalorganic vapor-phase epitaxial growth and characterization of vertical InP nanowires. *Applied Physics Letters*, 83(16):3371–3373, 2003.
- [37] C. M. LIEBER et A. M. MORALES : A laser ablation method for the synthesis of crystalline semiconductor nanowires. *Science*, 279:208–211, 1998.
- [38] T. OHGAI, X. HOFFER, A. FÀBIÀN, L. GRAVIER et J-P. ANSERMET : Electrochemical synthesis and properties of Ni, Co and Co/Cu nanowires in a nanoporous anodic oxide layer on metallic aluminum. *Journal of materials chemistry*, 13:2530– 2534, 2003.
- [39] R. CHEN, D.XU, G. GUO et Y. TANG : Electrodeposition of thin films and singlecristalline nanowires of Ag₇Te₄. Chemical Physics Letters, 377:205-209, 2003.
- [40] P.J. POOLE, J. LEFEBVRE et J. FRASER : Spatially controlled, nanoparticle-free growth of InP nanowires. Applied Physics Letters, 83(10):2055-2057, 2003.
- [41] X. DUAN, Y. HUANG et C.M. LIEBER : Nonvolatile memory and programmable logic from molecule-gated nanowires. *Nano Letters*, 2(5):487–490, 2002.
- [42] Y. CUI, Z. ZHONG, D. WANG, W.U. WANG et C.M. LIEBER : High performance silicon nanowire field effect transistors. *Nano Letters*, 3(2):149–152, 2003.

- [43] M. S. DRESSELHAUS, Y. M. LINB, O. RABINC, A. JORIOA, A. G. SOUZA FILHOA, M. A. PIMENTAD, R. SAITOF, G. SAMSONIDZE et G. DRESSELHAUS : Nanowires and nanotubes. *Materials Science and Engineering* : C, 23(1-2):129–140, 2003.
- [44] M. S. DRESSELHAUS, Y.M. LIN, O. RABIN, M.R. BLACK et G. DRESSELHAUS : Nanowires. Rapport technique, MIT, CambridgeMA 02139-4307, USA, 2003.
- [45] S. JIN, D. WHANG, M. C. MCALPINE, R. S. FRIEDMAN, Y. WU et C. M. LIEBER : Scalable interconnection and integration of nanowire devices without registration. *Nano Letters*, 2004.
- [46] Y. HUANG, C.-M. LIEBER, X. DUAN et Q. WEI : Directed assembly of onedimensional nanostructures into functional networks. *Science*, 291(5504):630–633, 2001.
- [47] D. WANG, Q. WANG, A. JAVEY, R. TU, H. DAI, H. KIM, P.I C. MCINTYRE, T. KRISHNAMOHAN et K. C. SARASWAT : Germanium nanowire field-effect transistors with SiO₂ and high-HfO₂ gate dielectrics. *Applied Physics Letters*, 83(12):2432-2434, 2003.
- [48] M.S. GUDIKSEN, L.J. LAUHON, J. WANG, D. SMITH et C.M. LIEBER : Growth of nanowire superlattice structures for nanoscale photonics and electronics. *Nature*, 415:617–620, 2002.
- [49] L. J. LAUHON, M. S. GUDIKSEN, D. WANG et C. M. LIEBER : Epitaxial core-shell and core-multishell nanowire heterostructures. *Nature*, 420:57–61, 2002.
- [50] Y. HUANG et C. M. LIEBER : Integrated nanoscale electronics and optoelectronics : Exploring nanoscale science and technology through semiconductor nanowires. *Pure and Applied Chemistry*, 76(12):2051–2180, 2004.
- [51] M. A. REED, C. ZHOU, C. J. MULLER, T. P. BURGIN et J. M. TOUR : Conductance of a Molecular Junction. *Science*, 278(5336):252–254, 1997.
- [52] C. KERGUERIS : Transport électrique à travers une jonction métal-molécule-métal. Thèse de doctorat, université Paris Sud, 1998.
- [53] G. K. RAMACHANDRAN, T. J. HOPSON, A. M. RAWLETT, L. A. NAGAHARA, A. PRIMAK et S. M. LINDSAY : A bond-fluctuation mechanism for stochastic switching in wired molecules. *Science*, 300:1413–1416, 2003.
- [54] P. G. PIVA, G. A. DILABIO, J. L. PITTERS, J. ZIKOVSKY, M. REZEQ, S. DOGEL, W. A. HOFER et R. A. WOLKOW : Field regulation of single-molecule conductivity by a charged surface atom. *Nature*, 435(7042):658–661, 2005.
- [55] A. J. MAYNE, M. LASTAPIS, G. BAFFOU, L. SOUKIASSIAN, G. COMTET, L. HELL-NER et G. DUJARDIN : Chemisorbed bistable molecule : Biphenyl on Si(100)-2 x
 1. Physical Review B (Condensed Matter and Materials Physics), 69(4):045409, 2004.
- [56] J. CHEN, M.-A. REED, A.-M. RAWLETT et J.-M. TOUR : Large on-off ratios and negative differential resistance in a molecular electronic device. *Science*, 286(5444): 1550–1552, 1999.

- [57] J. CHEN et M. A REED : Electronic transport of molecular systems. Chemical Physics, 281(2-3):127-145, 2002.
- [58] Y-L. LOO, D. V. LANG, J. A. ROGERS et J. W. P. HSU: Electrical contacts to molecular layers by nanotransfer printing. *Nano Letters*, 3(7):913-917, 2003.
- [59] J.S. HOVIS et R.J. HAMERS : Structure and bonding of ordered organic monolayers of 1,3,5,7-cyclooctatetraene on the Si(001) surface : Surface cycloaddition chemistry of an antiaromatic molecule. *Journal of Physical Chemistry B*, 102(4):687–692, 1998.
- [60] J.E. BATEMAN, R.D. EAGLING, B.R. HORROCKS et A. HOULTON : A deuterium labeling, ftir, and ab initio investigation of the solution-phase thermal reactions of alcohols and alkenes with hydrogen-terminated silicon surfaces. *Journal of Physical Chemistry B*, 104(23):5557–5565, 2000.
- [61] C.J. BARRELET, D.B. ROBINSON, J. CHENG, T.P. HUNT, C.F. QUATE et C.E.D. CHIDSEY : Surface characterization and electrochemical properties of alkyl, fluorinated alkyl, and alkoxy monolayers on silicon. *Langmuir*, 17(11):3460-3465, 2001.
- [62] D. F. BOCIAN, K. M. ROTH, A. A. YASSERI, Z. LIU, R. B. DABKE, V. MALI-NOVSKII, K.-H. SCHWEIKART, L. YU, H. TIZNADO, F. ZAERA, J. S. LINDSEY et W. G. KUHR : Measurements of electron-transfer rates of charge-storage molecular monolayers on Si(100). toward hybrid molecular/semiconductor information storage devices. Journal of the American Chemical Society, 125:505–517, 2003.
- [63] R. C. TIBERIO, H. G. CRAIGHEAD, M. LERCEL, T. LAU, C. W. SHEEN et D. L. ALLARA : Self-assembled monolayer electron beam resist on GaAs. *Applied Physics Letters*, 62(5):476–478, 2003.
- [64] D. VUILLAUME, B. CHEN et R.M. METZGER : Electron transfer through a monolayer of hexadecylquinolinium tricyanoquinodimethanide. *Langmuir*, 15(11):4011– 4017, 1999.
- [65] T. XU, I. R. PETERSON, M. V. LAKSHMIKANTHAM et R. M. METZGER : Rectification by a monolayer of hexadecylquinolinium tricyanoquinodimethanide between gold electrodes. Angewandte Chemie International Edition, 40(9):1749–1752, 2001.
- [66] R.M. METZGER, T. XU et I.R. PETERSON : Electrical rectification by a monolayer of hexadecylquinolinium tricyanoquinodimethanide measured between macroscopic gold electrodes. *Journal of Physical Chemistry B*, 105(30):7280–7290, 2001.
- [67] L. PATRONE, S. PALACIN, J.P. BOURGOIN, J. LAGOUTE, T. ZAMBELLI et S. GAU-THIER : Direct comparison of the electronic coupling efficiency of sulfur and selenium anchoring groups for molecules adsorbed onto gold electrodes. *Chemical Physics*, 281:325–332, 2002.
- [68] C. KERGUERIS, J.-P. BOURGOIN, S. PALACIN, D. ESTEVE, C. URBINA, M. MA-GOGA et C. JOACHIM : Electron transport through a metal-molecule-metal junction. *Physical Review B*, 59(19):12505-12513, 1999.

- [69] R.M. METZGER, B. CHEN, U. HOPFNER, M.V. LAKSHMIKANTHAM, D. VUILLAUME, T. KAWAI, X. WU, H. TACHIBANA, T.V. HUGHES, H. SA-KURAI, J.W. BALDWIN, C. HOSCH, M.P. CAVA, L. BREHMER et G.J. ASHWELL: Unimolecular electrical rectification in hexadecylquinolinium tricyanoquinodimethanide. Journal of the American Chemical Society, 119(43):10455-10466, 1997.
- [70] S. LENFANT, C. KRZEMINSKI, C. DELERUE, G. ALLAN et D. VUILLAUME : Molecular rectifying diodes from self-assembly on silicon. *Nano Letters*, 3(6):741–746, 2003.
- [71] D.-R. STEWART, D.-A.-A. OHLBERG, P.-A. BECK, Y. CHEN, R.-S. WILLIAMS, J.-O. JEPPESEN, K.-A. NIELSEN et J.-F. STODDART : Molecule-independent electrical switching in Pt/organic monolayer/Ti devices. *Nano Letters*, 4(1):133–136, 2004.
- [72] P.M. MENDES, A.H. FLOOD et J.F. STODDART : Nanoelectronic devices from selforganized molecular switches. Applied Physics A : Materials Science & Processing, 80(6):1197-1209, 2005.
- [73] M. BOCKRATH, W. LIANG, M. P. SHORES, J. R. LONG et H. PARK : Kondo resonance in a single-molecule transistor. *Nature*, 417:725–729, 2002.
- [74] J. PARK, A.-N. PASUPATHY, J.-I. GOLDSMITH, C. CHANG, Y. YAISH, J.-R. PETTA, M. RINKOSKI, J.-P. SETHNA, H.-D. ABRUNA, P.-L. MCEUEN et D.-C. RALPH : Coulomb blockade and the kondo effect in single-atom transistors. *Nature*, 417(6890):722-725, 2002.
- [75] M. A. KASTNER, D. GOLDHABER-GORDON, H. SHTRIKMAN, D. MAHALU, D. ABUSCH-MAGDER et U. MEIRAV : Kondo effect in a single-electron transistor. *Nature*, 391:156–159, 1998.
- [76] C. THELANDER, T. MRTENSSON, M. T. BJORK, B. J. OHLSSON, M. W. LARSSON, L. R. WALLENBERG et L. SAMUELSON : Single-electron transistors in heterostructure nanowires. *Applied Physics Letters*, 83(10):2052–2054, 2003.
- [77] A. TILKE, R. H. BLICK, H. LORENZ et J. P. KOTTHAUS : Single-electron tunneling in highly doped silicon nanowires in a dual-gate configuration. *Journal of Applied Physics*, 89(12):8159–8162, 2001.
- [78] S. De FRANCESCHI, J. A. VAN DAM, E. P. A. M. BAKKERS, L. F. FEINER, L. GU-REVICH et L. P. KOUWENHOVEN : Single-electron tunneling in InP nanowires. *Applied Physics Letters*, 83(2):344–346, 2003.
- [79] R. STADLER, S. AMI, M. FORSHAW et C. JOACHIM : A tight-binding study of a 1-bit half-adder based on diode logic integrated inside a single molecule. *Nanotechnology*, 14(7):722-732, 2003.
- [80] D. VUILLAUME : Self-assembled monolayers and molecular-scale electronics. Nano et Micro Technologies, 3(1-2):35–57, 2003.
- [81] Y. HUANG, C.M. LIEBER, X. DUAN, Y. CUI, L.J. LAUHON et K.H. KIM : Logic gates and computation from assembled nanowire building blocks. *Science*, 294(5545):1313-1317, 2001.

- [82] A. DEHON : Array-based architecture for FET-based, nanoscale electronics. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2(1):23-32, 2003.
- [83] A. DEHON et M. J. WILSON : Nanowire-based sublithographic programmable logic arrays. In FPGA '04 : Proceedings of the 2004 ACM/SIGDA 12th international symposium on Field programmable gate arrays, pages 123–132, New York, NY, USA, 2004. ACM Press.
- [84] S. C. GOLDSTEIN et M. BUDIU : Nanofabrics : spatial computing using molecular electronics. In Proceedings 28th Annual International Symposium on Computer Architecture, pages 178–189, 2001.
- [85] K. K. LIKHAREV : CMOL : A new concept for nanoelectronics. In 12th Int. Symp. Nanostructures : Physics and Technology St Petersburg, Russia, pages 1–3, 2004.
- [86] Ö. TÜREL, J. H. LEE, X. MA et K. K. LIKHAREV : Architectures for nanoelectronic implementation of artificial neural networks : new results. *Neurocomputing*, 64:271–283, 2005.
- [87] Ö. TÜREL, J. H. LEE, X. MA et K. K. LIKHAREV : Neuromorphic architectures for nanoelectronic circuits : Research articles. International Journal of Circuit Theory and Applications, 32(5):277–302, 2004.
- [88] C.M. LIEBER, Z. ZHONG, D. WANG, Y. CUI et M.W. BOCKRATH : Nanowire crossbar arrays as address decoders for integrated nanosystems. *Science*, 302(5649):1377-1379, 2003.
- [89] Y. CHEN, D.A.A. OHLBERG, X. LI, D.R. STEWART, R.S. WILLIAMS, J.O. JEPPE-SEN, K.A. NIELSEN, J.F. STODDART, D.L. OLYNICK et E. ANDERSON : Nanoscale molecular-switch devices fabricated by imprint lithography. *Applied Physics Letters*, 82(10):1610–1612, 2003.
- [90] A. DEHON, P. LINCOLN et J.-E. SAVAGE : Stochastic assembly of sublithographic nanoscale interfaces. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2(3):165–174, 2003.
- [91] M. MISHRA et S.-C. GOLDSTEIN : Defect tolerance at the end of the roadmap. In Proceedings.-International-Test-Conference-2003-IEEE-Cat.-No.03CH37494. 2003, volume 1, pages 1201–1210, 2003.
- [92] R.-K. KUMMAMURU, A.-O. ORLOV, R. RAMASUBRAMANIAM, C.-S. LENT, G.-H. BERNSTEIN et G.-L. SNIDER : Operation of a quantum-dot cellular automata (QCA) shift register and analysis of errors. *IEEE Transactions on Electron De*vices, 50(9):1906-1913, 2003.
- [93] G.-H. BERNSTEIN : Quantum-dot cellular automata by electric and magnetic field coupling. In Proceedings of the IEEE 2003 Custom Integrated Circuits Conference Cat, pages 223–229, 2003.
- [94] I. AMLANI, A.-O. ORLOV, G. TOTH, G.-H. BERNSTEIN, C.-S. LENT et G.-L. SNIDER : Digital logic gate using quantum-dot cellular automata. *Science*, 284(5412):289–293, 1999.
- [95] C.-S. LENT, P.-D. TOUGAW, W. POROD et G.-H. BERNSTEIN : Quantum cellular automata. Nanotechnology, 4(1):49–57, 1993.

- [96] A. O. ORLOV, S. SHARMA, Z. LI, G. L. SNIDER, H. QI, C. S. LENT et T. P. FEHL-NER : Molecular quantum cellular automata cells. electric field driven switching of a silicon surface bound array of vertically oriented two-dot molecular quantum cellular automata. *Journal of the American chemical Society*, 125:15250–15259, 2003.
- [97] C. S. LENT et B. ISAKSEN : Clocked molecular quantum-dot cellular automata. *IEEE Transactions on electron devices*, 50(9):1890–1896, 2003.
- [98] A.-O. ORLOV, I. AMLANI, G.-H. BERNSTEIN, C.-S. LENT et G.-L. SNIDER : Realization of a functional cell for quantum-dot cellular automata. *Science*, 277(5328):928-930, 1997.
- [99] A. O. ORLOV, I. AMLANI, G. TOTH, C. S. LENT, G. H. BERNSTEIN et G. L. SNIDER : Experimental demonstration of a binary wire for quantum-dot cellular automata. *Applied Physics Letters*, .74(19):2875–2877, 1999.
- [100] R. P. COWBURN et M. E. WELLAND : Room temperature magnetic quantum cellular automata. *Science*, 287:1466–1468, 2000.
- [101] J. M. TOUR, W. L. VAN ZANDT, C. P. HUSBAND, S. M. HUSBAND, L. S. WILSON, P. D. FRANZON et D. P. NACKASHI : Nanocell logic gates for molecular computing. *IEEE Transactions on nanotechnology*, 1(2):100–109, 2002.
- [102] J.M. TOUR, L. CHENG, D.P. NACKASHI, Y. YAO, A.K. FLATT, S.K. ST.ANGELO, T.E. MALLOUK et P.D. FRANZON : Nanocell electronic memories. *Journal of the American Chemical Society*, 125(43):13279–13283, 2003.
- [103] K. NIKOLIC, A. SADEK et M. FORSHAW : Fault-tolerant techniques for nanocomputers. Nanotechnology, 13(3):357–362, 2002.
- [104] A. S. SADEK, K. NIKOLIC et M. FORSHAW : Parallel information and computation with restitution for noise-tolerant nanoscale logic networks. *Nanotechnology*, 15(1):192–210, 2004.
- [105] D. BHADURI, S. SHUKLA, P. GRAHAM et M. GOKHALE : Comparing reliabilityredundancy trade-offs for two Von Neumann multiplexing architectures. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 6(3):265–279, 2007.
- [106] S. WOLFRAM : Theory and Application of Cellular Automata. World Scientific, 1986.
- [107] S. WOLFRAM : Random sequence generation by cellular automata. Advances in Applied Mathematics, 7(2):123–169, 1986.
- [108] T. ISOKAWA, F. ABO, F. PEPER, N. KAMIURA et N. MATSUI : Defect-tolerant computing based on asynchronous cellular automata. In SICE 2003 conference, pages 1746–1749, 2003.
- [109] F. PEPER, J. LEE, F. ABO, T. ISOKAWA, S. ADACHI, N. MATSUI et S. MASHIKO : Fault-tolerance in nanocomputers : a cellular array approach. *IEEE Transactions* on Nanotechnology, 3(1):187–201, 2004.

- [110] T. ISOKAWA, F. ABO, F. PEPER, S. ADACHI, J. LEE, N. MATSUI et S. MASHIKO : Fault-tolerant nanocomputers based on asynchronous cellular automata. *Interna*tional Journal of Modern Physics C, 15:893–915, 2004.
- [111] T. TOFFOLI et N. MARGOLUS : Cellular Automata Machines : A New Environment for Modeling. MIT Press, Cambridge, MA, 1987.
- [112] M. MITCHELL, J. P. CRUTCHFIELD et P. HRABER : Evolving cellular automata to perform computations : Mechanisms and impediments. *Physica D*, 75:361–391, 1994.
- [113] M. CAPCARRÈRE : Cellular automata and other cellular systems : design and evolution. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2002.
- [114] W. S. MCCULLOCH et W. PITTS : A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity. Bulletin of Mathematical Biology, V5(4):115-133, 1943.
- [115] S. BECKER : Unsupervised learning procedures for neural networks. International Journal Of Neural Systems, 2(1-2):17–33, 1991.
- [116] G. E. HINTON et T. J. SEJNOWSKI, éditeurs. Unsupervised Learning : Foundations of Neural Computation. MIT Press, Cambridge, MA, 1999.
- [117] A. ROBINS et M. FREAN : Local learning algorithms for sequential tasks in neural networks. Advanced Computational Intelligence, 2:221–227, 1998.
- [118] L. BOTTOU et V.N. VAPNIK : Local learning algorithms. Neural Computation, 4(6):888–900, 1992.
- [119] C-T. CHIU, K. MEHROTRA, C. K. MOHAN et S. RANKA : Training techniques to obtain fault-tolerant neural networks. In FTCS-24 : 24th International Symposium on Fault Tolerant Computing, pages 360-371, Austin, Texas, 1994. IEEE Computer Society Press.
- [120] D. S. PHATAK et I. KOREN : Complete and partial fault tolerance of feedforward neural nets. *IEEE Transactions on Neural Networks*, 6(2):446–456, 1995.
- [121] D. S. PHATAK et Elko TCHERNEV : Synthesis of fault tolerant neural networks. In Proceedings of IEEE IJCNN'02, Hawaii, May 2002, pages 1475–1480, 2002.
- [122] D. E. RUMELHART, J. L. MCCLELLAND et the PDP RESEARCH GROUP : Parallel Distributed Processing - 2 Vol. Set Explorations in the Microstructure of Cognition. MIT press, 1986.
- [123] P. PERETTO : An Introduction to the Modeling of Neural Networks. Cambridge University Press, 1992.
- [124] Y. LECUN : Modèles connexionnistes de l'apprentissage (connectionist learning models). Thèse de doctorat, Université P. et M. Curie (Paris 6), 1987.
- [125] S. BROWN et J. ROSE : FPGA and CPLD architectures : a tutorial. IEEE Design & Test of Computers, 13(2):42-57, 1996.
- [126] R. DAVID : Architecture reconfigurable dynamiquement pour architectures mobiles. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure de Sciences Appliquées et de Technologies, 2003.

- [127] C. GAMRAT, M. LAHMANI, C. DUPAS et P. HOUDY : Les nanosciences Nanotechnologies et nanophysique, chapitre Architectures de calcul et nanotechnologies : vers le nano-ordinateur, pages 708-729. 2004.
- [128] J.-R. HEATH, P.-J. KUEKES, G.-S. SNIDER et R.-S. WILLIAMS : A defect-tolerant computer architecture : opportunities for nanotechnology. *Science*, 280(5370): 1716-1721, 1998.
- [129] G. TEMPESTI : A Self-Repairing Multiplexer-Based FPGA Inspired by Biological Processes. Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 1998.
- [130] D. MANGE, M. SIPPER, A. STAUFFER et G. TEMPESTI: Toward Robust Integrated Circuits: The Embryonics Approach. In Proceedings of the IEEE, volume 88, pages 516-541, 2000. Invited Paper.
- [131] A. H. JACKSON et A. M. TYRRELL : Asynchronous embryonics with reconfiguration. In Evolvable Systems : From Biology to Hardware : 4th International Conference, ICES 2001, Proceedings, volume 2210/2001, pages 88–99. Springer Berlin / Heidelberg, 2001.
- [132] C. GAMRAT, A. MOUGIN, P. PERETTO et 0. ULRICH : The architecture of MIND neurocomputers. In Proceedings of the Second Conference on Microelectronics for Neural Networks, pages 463–469, 1991.
- [133] W. MAASS et C. M. BISHOP, éditeurs. Pulsed Neural Networks. MIT Press (Cambridge), 1999.
- [134] A. DELORME, J. GAUTRAIS, R. van RULLEN et S. THORPE : Spikenet : A simulator for modeling large networks of integrate and fire neurons. *Neurocomputing*, 26-27:989–996, 1999.
- [135] A. DELORME, J. GAUTRAIS, R. van RULLEN et S. THORPE : Spikenet : An event-driven simulation package for modelling large networks of spiking neurons. *Network : Computation in Neural Systems*, 14(4):613–627, 2003.
- [136] http://www.vieartificielle.com/article/index.php?action=article&id=57.
- [137] E.-M. IZHIKEVICH : Simple model of spiking neurons. IEEE Transactions on Neural Networks, 14(6):1569–1572, 2003.
- [138] W.-M. KISTLER et W. GERSTNER : Stable propagation of activity pulses in populations of spiking neurons. *Neural Computation*, 14(5):987–997, 2002.
- [139] S. M. BOHTE et M. C. MOZER : Reducing spike train variability : A computational theory of spike-timing dependent plasticity. In Lawrence K. SAUL, Yair WEISS et Léon BOTTOU, éditeurs : Advances in Neural Information Processing Systems 17, pages 201–208. MIT Press, Cambridge, MA, 2005.
- [140] O. TORRES, J. ERIKSSON, J. M. MORENO et A. E. P. VILLA : Hardware optimization of a novel spiking neuron model for the POEtic tissue. In IWANN (2), pages 113-120, 2003.
- [141] M. MATTIA et S. FUSI : Modeling networks with linear (VLSI) integrate-andfire neurons. In ICANN '97 : Proceedings of the 7th International Conference on Artificial Neural Networks, pages 67–72, London, UK, 1997. Springer-Verlag.

- [142] M. V. TSODYKS et H. MARKRAM : The neural code between neocortical pyramidal neurons depends on neurotransmitter release probability. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 94(2):719–723, 1997.
- [143] L.-F. ABBOTT, J.-A. VARELA, K. SEN et S.-B. NELSON : Synaptic depression and cortical gain control. Science, 275(5297):220-224, 1997.
- [144] J. A. VARELA, K. SEN, J. GIBSON, J. FOST, L. F. ABBOTT et S. B. NELSON : A quantitative description of short-term plasticity at excitatory synapses in layer 2/3 of rat primary visual cortex. *The Journal of Neuroscience*, 17(20):7926-7940, 1997.
- [145] H. MARKRAM, Y. WANG et M. TSODYKS : Differential signaling via the same axon of neocortical pyramidal neurons. Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, 95:5323-5328, 1998.
- [146] M. TSODYKS, K. PAWELZIK et H. MARKRAM : Neural networks with dynamic synapses. Neural Computation, 10(4):821–835, 1998.
- [147] G. FUHRMANN, I. SEGEV, H. MARKRAM et M. TSODYKS : Coding of temporal information by activity-dependent synapses. *Journal of Neurophysiology*, 87(1): 140–148, 2002.
- [148] H. MARKRAM, J. LUBKE, M.I FROTSCHER et B. SAKMANN : Regulation of synaptic efficacy by coincidence of postsynaptic APs and EPSPs. *Science*, 275(5297):213-215, 1997.
- [149] G.-Q. BI et M.-M. POO : Synaptic modification by correlated activity : Hebb's postulate revisited. Annual Review of Neuroscience, 24(1):139–166, 2001.
- [150] P.-D. ROBERTS et C.-C. BELL : Spike timing dependent synaptic plasticity in biological systems. *Biological Cybernetics*, 87(5-6):392-403, 2002.
- [151] L.F. ABBOTT et S.B. NELSON : Synaptic plasticity : taming the beast. Nature Neuroscience, 3:1178-1183, 2000.
- [152] W. MAASS : Pulsed neural networks, pages 321–336. MIT Press (Cambridge), 1999.
- [153] J. G. ELIAS, D. P. M. NORTHMORE et W. WESTERMAN : An analog memory circuit for spiking silicon neurons. *Neural Computation*, 9(2):419–440, 1997.
- [154] M. HOLLER, S. TAM, H. CASTRO et R. BENSON : An electrically trainable artificial neural network (ETANN) with 10240 floating gate synapses. In Artificial neural networks : electronic implementations, pages 50–55, Piscataway, NJ, USA, 1990. IEEE Press.
- [155] S. FUSI, M. ANNUNZIATO, D. BADONI, A. SALAMON et D.-J. AMIT : Spike-driven synaptic plasticity : theory, simulation, VLSI implementation. *Neural Computa*tion, 12(10):2227–2258, 2000.
- [156] E. CHICCA, G. INDIVERI et R. DOUGLAS : An adaptive silicon synapse. In Proceedings of the International Symposium on Circuits and Systems, IEEE, 2003.
- [157] L. P. MA, J. LIU et Y. YANG : Organic electrical bistable devices and rewritable memory cells. Applied Physics Letters, 80(16):2997-2999, 2002.

- [158] L. MA, S. PYO, J. OUYANG, Q. XU et Y. YANG : Nonvolatile electrical bistability of organic/metal-nanocluster/organic system. Applied Physics Letters, 82(9):1419-1421, 2003.
- [159] D. TONDELIER, K. LMIMOUNI, D. VUILLAUME, C. FERY et G. HAAS : Metal/organic/metal bistable memory devices. Applied Physics Letters, 85(23):5763-5765, 2004.
- [160] J. OUYANG, C.-W. CHU, R. J.-H. TSENG, A. PRAKASH et Y. YANG : Organic memory device fabricated through solution processing. In Proceedings of the IEEE, volume 93, pages 1287–1296, 2005.
- [161] M. GIERSIG et P. MULVANEY : Preparation of ordered colloid monolayers by electrophoretic deposition. *Langmuir*, 6(12):3408–3413, 1993.
- [162] M BRUST, M WALKER, D BETHELL, D-J SCHIFFRIN et R WHYMAN : Synthesis of thiol-derivatised gold nanoparticles in a two-phase liquid-liquid system. *Journal* of the Chemical Society Chemical communications, 7:801–802, 1994.
- [163] P. M. MENDES, Y. CHEN, R. E. PALMER, K. NIKITIN, D. FITZMURICE et J. A. PREECE : Nanostructures from nanoparticles. *Journal of physics : condensed matter*, 15:S3047–S3063, 2003.
- [164] T. SATO et H. AHMED : Observation of a coulomb staircase in electron transport through a molecularly linked chain of gold colloidal particles. *Applied Physics Letters*, 70(20):2759-2761, 1997.
- [165] S. H. M. PERSSON, L. OLOFSSON et L. GUNNARSSON : A self-assembled singleelectron tunneling transistor. *Applied Physics Letters*, 74(17):2546–2548, 1999.
- [166] M.-C. DANIEL et D. ASTRUC : Gold nanoparticles : Assembly, supramolecular chemistry, quantum-size-related properties, and applications toward biology, catalysis, and nanotechnology. *Chemical Reviews*, 104(1):293–346, 2004.
- [167] R. P. ANDRES, J. LIUA, T. LEE, D. B. JANES, B. L. WALSH, M. R. MELLOCH, J. M. WOODALL et R. REIFENBERGER : Guided self-assembly of au nanocluster arrays electronicallycoupled to semiconductor device layers. *Applied Physics Letters*, 77(3):373–375, 2000.
- [168] R. W. MURRAY et W. P. WUELFING : Electron hopping through films of arenethiolate monolayer-protected gold clusters. Journal of physical chemistry B, 106:3139-3145, 2002.
- [169] V. SANTHANAM, J. LIU, R. AGARWAL et R. P. ANDRES : Self-assembly of uniform monolayer arrays of nanoparticles. *Langmuir*, 19:7881–7887, 2003.
- [170] J.-P. BOURGOIN, C. KERGUERIS, E. LEFEVRE et S. PALACIN : Langmuir-Blodgett films of thiol-capped gold nanoclusters : fabrication and electrical properties. *Thin Solid Films*, 327-329(1-2):515-519, 1998.
- [171] R. P. ANDRES, J. D. BIELEFELD, J. I. HENDERSON, D. B. JANES, V. R. KO-LAGUNTA, C. P. KUBIAK, W. J. MAHONEY et R. G. OSIFCHIN : Self-assembly of a two-dimensional superlattice of molecularly linked metal clusters. *Science*, 273(5282):1690-1693, 1996.

- [172] A. W. SNOW, M. G. ANCONA, W. KRUPPA, G. G. JERNIGAN, E. E. FOOS et D. PARK : Self-assembly of gold nanoclusters on micro- and nanoelectronic substrates. *Journal of Materials Chemistry*, 12(4):1222–1230, 2002.
- [173] M. SASTRY : Phase transfer protocols in nanoparticle synthesis. Current Science, 85(12):1735–1745, 2003.
- [174] D.F. SIQUIERA-PETRI, G. WENZ, P. SCHUNK et T. SCHIMMEL : An improved method for the assembly of amino-terminated monolayers on SiO₂ and the vapor deposition of gold layers. *Langmuir*, 15 (13):4520-4523, 1999.
- [175] E. HUTTER, J.H. FENDLER et D. ROY : Surface plasmon resonance studies of gold and silver nanoparticles linked to gold and silver substrates by 2-aminoethanethiol and 1,6-hexanedithiol. *Journal of Physical Chemistry B*, 105(45):11159–11168, 2001.
- [176] R. LÉVY : Interactions intra et intermoléculaires, conformation des polymères adsorbés, transitions de phases sous étirement : Que peut-on apprendre des mesures de force ? Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur, 2002.
- [177] L. WANG, D. FINE, T. JUNG, D. BASU, H. von SEGGERN et A. DODABALAPUR : Pentacene field-effect transistors with sub-10-nm channel lengths. *Applied Physics Letters*, 85(10):1772–1774, 2004.
- [178] X.-Z. BO, N. G. TASSI, C. Y. LEE, M. S. STRANO, C. NUCKOLLS et Graciela B. BLANCHET : Pentacene-carbon nanotubes : Semiconducting assemblies for thinfilm transistor applications. *Applied Physics Letters*, 87(20):203510, 2005.
- [179] M. HALIK, G. SCHMID et H. KLAUK : Silicon particles as additives for improving charge carrier mobility in organic semiconductors. Patent No. 10974774 filed on 2004-10-28, 2004.
- [180] S. KOBAYASHI, T. NISHIKAWA, T. TAKENOBU, S. MORI, T. SHIMODA, T. MITANI, H. SHIMOTANI, N. YOSHIMOTO, S. OGAWA et Y. IWASA : Control of carrier density by self-assembled monolayers in organic field-effect transistors. *Nature Materials*, 3:317–322, 2004.
- [181] A. ULMAN : An introduction to ultrathin organic films. Academic press édition, 1991.
- [182] E.H. NICOLLIAN et J.R. BREWS : MOS (metal oxide semiconductor) physics and technology, chapitre 15 "control of oxide charges", pages 754–813. Wiley, New York, 1982.
- [183] W. L. LEONG, P. S. LEE, S. G. MHAISALKAR, T. P. CHEN et A. DODABALAPUR : Charging phenomena in pentacene-gold nanoparticle memory device. *Applied Physics Letters*, 90(4):042906, 2007.
- [184] V.V. ZHIRNOV, R.K. III CAVIN, J.A. HUTCHBY et G.I. BOURIANOFF : Limits to binary logic switch scaling-a gedanken. model. In Proceedings of the IEEE, volume 91, pages 1934–1939, 2003.
- [185] C. H. BENNETT : Logical reversibility of computation. IBM Journal of Research and Development, 17(6):525, 1973.

- [186] W. M. KAMINSKY et S. LLOYD : Scalable architecture for adiabatic quantum computing of np-hard problems. ArXiv Quantum Physics e-prints, 2002.
- [187] S. A. WOLF, D. D. AWSCHALOM, R. A. BUHRMAN, J. M. DAUGHTON, S. von MOLNAR, M. L. ROUKES, A. Y. CHTCHELKANOVA et D. M. TREGER : Spintronics : A spin-based electronics vision for the future. *Science*, 294(5546):1488–1495, 2001.
- [188] E. IENGO, E. ZANGRANDO et E. ALESSIO : Discrete supramolecular assemblies of porphyrins mediated by coordination compounds. *European Journal of Inorganic Chemistry*, 2003(13):2371–2384, 2003.
- [189] J.-M. LEHN : Supramolecular chemistry : from molecular information towards self-organization and complex matter. *Reports on Progress in Physics*, (3):249, 2004.

1	Schéma de la géométrie d'un transistor MOS. Les électrodes de source et de drain sont des poches de silicium dopé N dans le cas d'un transistor de type N, ou dopé P dans le cas d'un transistor de type P. Sous l'effet d'une tension appliquée sur l'électrode de grille, un canal de conduction se forme sous l'isolant de grille. Il est constitué des porteurs de charges disponibles dans les réservoirs que sont la source et le drain. En bas sont représentés les symboles des transistors NMOS et PMOS	1
2	Graphe représentant les longueurs L de l'électrode de grille pour chaque année, obtenu à partir des valeurs déjà atteintes et des projections de l'ITRS [1]	2
1.1	Schéma d'une structure de graphite [4]. a_1 et a_2 sont les vecteurs de base du réseau. En enroulant la feuille pour former un cylindre de façon à ce que les deux extrémités d'un vecteur (m,n) du réseau se joignent, on obtient un nanotube (m,n). Les indices m et n déterminent le diamètre du nanotube et sa chiralité. Ce terme désigne le motif d'arrangement formé par les atomes de carbone constituant le CNT	6
1.2	 (a) Il existe une multitude de motifs possibles, les deux motifs principaux sont dénommés armchair (m, m) et zigzag (m, 0). Les autres structures présentant des colonnes d'hexagone en spirale autour de l'axe du nanotube sont dites chirales. (b) Sur le NT Zigzag le motif est horizontal, sur le NT Armchair le motif est vertical. 	7
1.3	(a) Modélisation d'un nanotube monoparoi [5]. Ils sont souples, ils peuvent être tor- dus, aplatis, s'allonger sans craquer. (b) Modélisation d'un nanotube multiparoi [5]. Distance inter couche d'environ 3.4 Å; Il est constaté jusqu'à cinquante couches. Les NTs multi parois contiennent plus de défauts que les mono parois, ce qui diminue leurs propriétés. Ils ont une variété d'arrangements possibles qui sont répertoriés. Les MWNT sont plus faciles à produire.	7
1.4	Image au MEB d'un réseau de MWNT [4]. Chaque "tour" est un paquet de MWNT orientés perpendiculairement à la surface	9
1.5	Image MEB de nanotubes synthétisés directement entre deux couches métalliques [21].	10
1.6	Transistor CNT, image au MEB (gauche), à l'AFM (droite) [22]	11
1.7	 (a) Image AFM d'une porte logique intramoléculaire, un même CNT ayant une partie p et une partie n sert de canal pour deux transistors, la partie non recouverte par du PMMA a été dopée au potassium. (b) Caractéristique obtenue. [10] 	12

1.8	 (a) Schéma d'un décodeur CNT fabriqué par Javey et al. Les nanotubes croissent dans le circuit. (b) Image au MEB d'un CNT entre deux électrodes. [25]	12
1.9	(a) 1-La particule métallique est sous forme liquide, le silicium sous forme gazeuse se dissout dans cette goutte. 2-La croissance commence quand le liquide est saturé en silicium. Sous condition de la présence de silicium gazeux la croissance continue tant que la particule est à l'état liquide [37]. (b) Image de nanofils de phosphure d'indium InP prise au MEB [36]	14
1.10	(a) Images au MEB. Vues du dessus de la surface poreuse [38]. (b) Image au microscope électronique à balayage de nanofils après la dissolution de la membrane AAO [39].	15
1.11	Image MEB d'un nanofil croissant à travers un masque de SiO ₂ [40]	15
1.12	 (a) Schéma d'un transistor à nanofils. En haut image au microscope électronique à transmission d'un nanofil de 5 nm de diamètre. (b) Schéma montrant la passivation des défauts de l'oxyde de silicium [42]. 	16
1.13	 (a) Les valeurs sont en nanomètre. Le nanofil est composé d'un axe en silicium dopé p, d'une couche de germanium non dopé, une couche d'oxyde de silicium, et une couche de germanium dopé. (b) Vue d'ensemble du transistor. Les électrodes de drain et source sont contactées à la couche de germanium intrinsèque. L'électrode de grille est évaporée sur la couche de germanium dopé p. [49]	17
1.14	Caractéristiques I_{ds} - V_{ds} pour des tensions de grille de 0, 1, 2 et 3V. En insert en haut à gauche : les courbes représentent le courant I_{ds} en fonction de la tension V_{gs} pour $V_{ds} = 1V$. La courbe rouge labellisée par des triangles est acquise quand l'électrode de grille est assurée par le substrat. La transconductance pour ce dispositif est alors de 80 nS. La courbe bleue labellisée par des points est acquise quand l'électrode de grille est assurée par un autre nanofil. La transconductance mesurée est de 280 nS. En insert en bas à droite : schéma du transistor à nanofil [50]	18
1.15	 (a) Image MEB d'une jonction cassée [52]. (b) Schéma d'une mesure par microscopie à effet tunnel. Les molécules sont insérées dans une monocouche isolante et adressées par la pointe du STM [53]. 	19
1.16	Schéma d'une monocouche auto-assemblée	20
1.17	Schéma d'un dépôt par un procédé Langmuir-Blodgett. Le substrat est progressive- ment retiré de l'eau afin que la monocouche se dépose à sa surface. La barre mobile permet de contrôler la densité du film.	21
1.18	Caractéristiques courant-tension d'une molécule conjuguée dans une jonction cassée. Typiquement la caractéristique est instable. Mais deux allures sont le plus souvent observées : une caractéristique asymétrique (a) ou symétrique (b). Sur les deux courbes la conduction augmente par pas, à partir d'une certaine valeur elle est croissante et à	
	peu près linéaire [68]	21

1.19	(a) Molécule de γ - (n-hexadecyl) quinolinium tricyanoquinodimethanide, C ₁₆ H ₃₃ Q- 3CNQ [69]. (b) Schéma d'une diode moléculaire réalisée avec une multicouche Langmuir- Blodgett sur un substrat en verre, quartz ou silicium. Le dispositif peut être constitué d'une seule monocouche [69]. Les pointes sont en alliage de gallium et d'indium.	22
1.20	Caractéristique courant-tension d'un dispositif électrode d'or/monocouche de $C_{16}H_{33}Q_{-3}CNQ/$ électrode d'or. Le pad d'électrode a une surface de $0,283mm^2$. Le ratio de rectification défini par le rapport (courant à V_0)/(courant à $-V_0$) vaut 27,5. L'effet rectificateur est perdu au bout de cinq cycles [69]	22
1.21	 (a) Coupe d'une structure à nanopore. Elle est constituée d'un évidement formé dans une membrane de nitrure de silicium [56]. (b) Schéma de la partie active de la structure à nanopore avec des molécules 2'-amino-4-ethynylphenyl-4'- ethynylphenyl-5'-nitro-1- benzenethiolate entre les deux électrodes d'or [56]	23
1.22	Caractéristique I(V) d'une monocouche de molécules contenant des centres redox nitro-amine sur de l'or à une température de 60 K [57]	23
1.23	schéma représentant les deux états de la molécule de rotaxane	24
1.24	(a) Le dispositif mémoire à base de rotaxane est composé d'une couche de molécules de rotaxane sur du silicium dégénéré déposée par la méthode Langmuir-Blodgett. Une électrode Aluminium/titane est évaporée sur la monocouche [72]. (b) En trait plein nous avons la courbe d'un dispositif de rotaxane. On observe le passage d'un état de basse conductivité à un état de haute conductivité pour une tension de 2 V. L'état de basse conductivité est retrouvé pour une tension de -2 V. En pointillé nous avons la courbe obtenue pour un dispositif réalisé avec uniquement la partie fixe de la molécule de rotaxane. L'effet bistable est bien du à l'anneau de la molécule de rotaxane.	24
1.25	Le transistor SET est composé d'une particule métallique appelée île de Coulomb comprise entre deux barrières tunnel. La charge de l'île de Coulomb est déterminée par la tension de grille appliquée	25
1.26	(a) Caractéristique I_{ds} - V_{ds} d'un transistor SET. L'allure de la caractéristique dépend de l'état de charge de l'île de coulomb. (b) Variation périodique de la tension de seuil V_T en fonction de l'état de charge de l'île de Coulomb	25
1.27	Schéma d'un assemblage de nanofils par un procédé microfluidique. A - Un moule PDMS (composé organique) déposé à la surface forme un canal dans lequel un flux d'une solution de nanofils va être réalisé. Les nanofils vont s'organiser parallèlement à la direction du canal. B - En procédant par itération de ce procédé des réseaux croisés ou crossbars de nanofils peuvent être formés [46].	27
1.28	(a) Image MEB (échelle 1 μ m), et schémas d'une porte logique Or réalisée avec deux diodes p-n à nanofils. (b) Tension de sortie en fonction des quatre niveaux logiques possibles : (0,0) ; (0,1) ; (1,0) ; (1,1), où l'entrée logique 0 est 0 V et l'entrée logique 1 est 5 V.	28

1.29	Crossbar Or programmable [83]. Les sorties de la fonction logique Or sont restaurées par les deux crossbars situés à droite de la figure. Le premier d'entre eux envoie un signal inversé au crossbar Or suivant, le second restaure le signal mais ne l'inverse pas. Les électrodes Vpd et Vpu permettent d'isoler le crossbar durant le calcul de la fonction logique.	29
1.30	(a) Layout de la Nanofabric avec grossissement d'un cluster. (b) Schéma d'un Nanobloc.	29
1.31	(a) Structure d'un réseau Crossnet. Les fonctions sommatrices du réseau de neurones sont implantées avec les cellules CMOS (rectangles gris). Les fonctions synaptiques sont réalisées par des dispositifs moléculaires auto assemblés aux intersections des nanofils (points verts). Les lignes rouges et bleues représentent respectivement des axones et des dendrites. Les deux synapses labellisées sont celles qui relient les somas j et k. Les signes sur les sommas désignent les polarités des entrées-sorties [86]. (b) Vue latérale d'un circuit CMOL [87].	30
1.32	Caractéristique des cNW-FET après modification chimique [88]. (a) Conductance en fonction de V_g avant (bleu) et après (rouge) traitement avec du TEA. (b) Histogramme de la tension de seuil pour trente cNW-FET avant (bleu) et après (rouge) traitement avec du TEA	31
1.33	(a) Image MEB d'un décodeur 4x4 cNW-FET réalisé [88]. (b) Monitoring en temps réel des signaux en entrée (bleu) et des sorties correspondantes (rouge) du décodeur. La tension d'alimentation est de 3,5 V et la résistance de charge de 40 M Ω [88]	32
1.34	(a) Décodeur construit avec des nanofils adressables [90]. (b) Nanofil avec son code d'adressage [90]	33
1.35	Schéma représentant le positionnement des nanofils par rapport aux pins de la couche CMOS. Le crossbar de nanofils fait un faible angle α avec le réseau CMOS. Ceci permet de pallier aux incertitudes de placement et d'adresser individuellement chaque nanofil [87].	33
1.36	Représentation schématique de la propagation en vague des circuits testeurs. La région noire est testée et configurée en circuit testeur par un testeur extérieur. Puis chaque région teste et configure un voisin ayant une valeur de gris plus faible [91].	34
1.37	(a) Exemple montrant comment un dispositif défectueux est localisé en utilisant deux configurations de circuit testeur différents au cours de l'étape 2 [91]. (b) Graphiques représentant le taux de recouvrement de composants sans défaut. Les labels indiquent le nombre maximum de défauts que le circuit testeur peut comptabiliser au cours de l'étape 1 [91].	35
1.38	Graphique représentant la fraction de pixels stabilisés dans le mauvais état en fonction de la fraction de dispositifs défectueux du Crossnet. Le réseau implanté est un réseau de Hopfield. Chaque courbe est labéllisée suivant le nombre de motifs stockés dans le réseau correspondant [87]. Les courbes en trait plein sont obtenues avec une théorie	0.6
	analytique, les points proviennent d'une simulation numérique	36

1.39	(a) Schéma de cellules à quatre points quantiques, la répulsion de coulomb impose aux électrons d'occuper les coins opposés de la cellule. (b) Fil QCA	37
1.40	 (a) Porte majorité : la sortie prend la valeur majoritaire présente aux entrées. (b) Crossover QCA : l'information qui se propage sur la ligne verticale n'interagit pas avec le fil horizontal. (c) Inverseur QCA : les cellules positionnées à 45 degrés les unes par rapport aux autres interagissent inversement, leur polarisation est toujours inverse. 	37
1.41	Full adder QCA [93] : (a) fil, (b) inverseur, (c) porte majorité, (d) fan-out, (e) crossover.	38
1.42	(a) Schéma d'un registre à décalage QCA et image au MEB du registre à décalage fabriqué. (b) Fonctionnement d'un registre à décalage : (a) entrée V_{IN} appliquée au latch1; (b) horloge V_{C1} du latch ₁ ; (c) sortie du latch ₁ mesurée par la tension du dot D1; (d) horloge V_{C2} décalée en phase appliquée au latch ₂ ; (e) sortie du latch ₂ donnée par le potentiel du dot D4	39
1.43	Porte logique NAnd réalisée avec une Nanocell.	40
1.44	Image MEB de la réalisation expérimentale d'une Nanocell. L'image du haut présente cinq paires d'électrodes juxtaposées. Le rectangle central est le film discontinu d'or recouvert de nanofils à certains endroits. L'image du bas est un agrandissement de la portion centrale. On observe le film d'or discontinu avec un nanofil d'or fixé par des molécules d'OPE-dithiol.	41
1.45	$Caractéristiques \ I(V) \ acquises \ sur \ une \ paire \ d'électrodes \ adjacentes. \ Les \ courbes \ a, \ b \ et \ c \ sont \ successivement \ acquises. \ La \ flèche \ noir \ indique \ le \ sens \ de \ balayage. \ . \ . \ .$	41
1.46	(a) Caractéristiques I(V) de la Nanocell avant (a) et après (b-d) trois impulsions de tension de -8 V acquises à une température de 297 K. Les courbes b, c et d sont respectivement le premier, le second, et le troisième balayage acquis après l'application des trois impulsions de tension. Les auteurs observent un effet mémoire à lecture destructive sur la gamme de fréquence [-4 V, 0 V]. (b) Caractéristiques I(V) de la Nanocell avant (balayages a-c) et après (balayages d-f) trois impulsions de tension de -8 V acquises à une température de 297 K. L'état de haute conductivité initial (état 0) est représenté par les courbes a, b, et c qui sont respectivement le premier, le second et le troisième balayage avant l'application des impulsions. L'état de basse conductivité (état 1) est représenté par les courbes d, e, et f qui sont respectivement le premier, le second, et le troisième balayage acquis après l'application des trois impulsions de tension. Les auteurs observent un effet mémoire à lecture non destructive sur la gamme de tension [-2 V, 0 V]	42
2.1	Schéma d'une architecture de Von Neumann. L'unité de contrôle et l'unité arithmé- tique et logique (U.A.L) font partie du module appelé processeur. Les instructions de contrôle qui ordonnancent les opérations réalisées par l'U.A.L. sont acquises à un emplacement en mémoire par l'unité de contrôle. Les données sont échangées entre l'U.A.L. et l'espace mémoire qui leur est réservé. Les blocs d'entrées-sorties permettent à un opérateur extérieur d'entrer des données à l'aide du clavier, et d'afficher des ré- sultats de calcul sur l'écran.	47

2.2	Ce schéma représente l'évolution de la règle 30 à chaque pas de temps. Chaque ligne est un état de l'automate cellulaire à une dimension. Les états successifs sont présentés dans leur ordre d'apparition suivant le sens de la flèche verticale. On observe qu'un motif triangulaire se répète régulièrement.	49
2.3	Graphe représentant le fonctionnement d'un neurone de McCulloch et Pitt. Les sorties des neurones S_j sont pondérées par des poids synaptiques W_{ij} . Les flèches indiquent que les poids sont variables. Ces sorties pondérées sont additionnées dans le sommateur ou soma formant ce qui est appelé la variable d'état. Cette variable d'état constitue l'entrée de la fonction d'activation. Celle-ci est une fonction non linéaire. Typiquement dans le cas de neurones binaires, il s'agit de la fonction de Heaviside. Quand la variable d'état a_i atteint un seuil θ_i le neurone N_i envoie un signal S_i en sortie	50
2.4	Structure d'une architecture reconfigurable [126], [127].	51
2.5	Exemple de l'implantation d'une logique combinatoire sous forme de LUTs : la table de vérité de la fonction à réaliser est mémorisée dans la LUT. Chaque configuration des entrées constitue donc l'adresse d'une valeur de la fonction. Cette valeur est ensuite envoyée en sortie [126]	51
2.6	Schéma d'un interrupteur programmable	52
2.7	Paradigmes de calcul pour les architectures étudiées. Un paradigme de calcul est divisé en trois niveaux : un modèle de programmation, un modèle d'exécution, et une implantation matérielle. L'étendue de chaque flèche indique les niveaux pour lesquels des solutions existent pour une architecture donnée. Les traits pleins désignent les niveaux qui sont les mieux contrôlés. Les traits en pointillés signifient que des solutions sont proposées mais que le niveau n'est pas maîtrisé	53
2.8	Schéma d'un neurone biologique [136].	55
2.9	Schéma du fonctionnement d'un neurone impulsionnel. Dès que la somme des poten- tiels post-synaptiques atteint un seuil prédéfini, le neurone envoie un potentiel d'action sur sa sortie. Il est ensuite dans une zone réfractaire où il est insensible à ses entrées.	55
2.10	Le potentiel d'action émis peut-être excitateur ou inhibiteur suivant la nature de la synapse. Le poids synaptique se traduit par l'amplitude de la réponse post-synaptique.	56
2.11	Schéma récapitulatif sur les modèles de neurone impulsionnel \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots	57
2.12	Schéma d'un neurone formel "Integrate & Fire". Chaque groupement fonctionnel est entouré en pointillés	57
2.13	Schéma simplifié d'une synapse. L'arrivée d'un potentiel d'action entraine la libération de neurotransmetteurs. Ceux-ci vont s'appareiller aux récepteurs adéquats.	58
2.14	Potentiel post-synaptique d'une synapse en réponse à un train d'impulsions réparties selon la loi de Poisson ayant pour fréquence moyenne 4 Hz. Les traits pleins sont issus des mesures expérimentales, les points sont les valeurs obtenues par le modèle de Varela et al. Nous constatons que quand l'intervalle Δt est grand, le signal post-synaptique augmente. Par contre quand l'intervalle Δt est faible, le signal post-synaptique diminue	50
	[144]	98

160

2.15	Réponse d'une synapse à un signal incident de fréquence 10 Hz. Les traits pleins sont issus des mesures expérimentales, les points sont les valeurs obtenues par le modèle de Varela et al. Pour une fréquence élevée la synapse présente une dépression. L'amplitude du potentiel post-synaptique converge vers une valeur stabilisée [144].	60
2.16	Recouvrement du signal post-synaptique après une dépression induite par un train d'impulsions incident d'une fréquence constante de 20 Hz. L'amplitude de la réponse est normalisée par la réponse initiale. Une approximation des données par une expo- nentielle double est plus proche des données expérimentales qu'une approximation par une exponentielle simple [144].	60
2.17	Résultats de simulation d'un comportement synaptique. (A) Potentiel post-synaptique généré par un train d'impulsion incident de fréquence 20 Hz transmis à travers une synapse dépressive. (B) Même signal que précédemment mais transmis à travers une synapse facilitatrice [146].	61
2.18	Quand le neurone post-synaptique émet un signal sur sa sortie, celui-ci est également rétro propagé vers la synapse. L'amplitude du potentiel post-synaptique est fonction de la durée écoulée entre l'instant où le neurone post-synaptique envoie son signal et celui où le neurone pré-synaptique envoie un signal à la synapse.	62
2.19	Exemples de deux règles de plasticités synaptiques présentant des potentiation et dépression à long terme [151]. En abscisse sont représentées les variations du poids synaptique. L'axe des ordonnées représente les valeurs t_{pre} - t_{post} .	62
2.20	Schéma du circuit de la synapse adaptive proposée par Chicca et al.[156]. Les transis- tors M3-M6 et la capacité C_f constituent le bloc facilitateur du circuit synaptique. Les transistors M11-M14 et la capacité C_d implantent le bloc dépressif.	64
3.1	(a) Schéma du dispositif mémoire réalisé par Yang et al. [160]. Une couche de maté- riau polymère (polystyrène+DMA) contenant des nanoparticules encapsulées par des molécules de dodécanethiol est insérée entre des électrodes en aluminium. (b) Carac- téristique I-V du dispositif AL/Au-DT NP+DMA+PS/Al. Lors du premier balayage en tension on est dans un état de basse conductivité (1). A partir d'une tension de 6V on passe à un état de haute conductivité (2). On revient à l'état de basse conductivité par un balayage en tension inverse (3)[160].	68
3.2	Schéma du transistor pentacène avec des nanoparticules enterrées dans le canal conduc- teur	69
3.3	On peut modifier la fonctionnalité chimique de la nanoparticule encapsulée par échange de ligand. R désigne un groupement chimique	70
3.4	Les électrodes sont définies par lithographie électronique. Les pointes des électrodes de source et drain font une cinquantaine de nanomètres. L'électrode de grille une centaine de nanomètres. Le gap inter électrodes est de 30 nm. Sato et al. ont déposé trois nanoparticules encapsulées par des molécules d'alcanedithiol. Sur ce dispositif ils	70
	observent des comportements de blocage de coulomb.	70

3.5	Les nanoparticules en phase aqueuse sont fixées par des groupements amine $-NH_2$. La liaison s'effectue sous forme ionique NH_3^+ . Les nanoparticules en phase organique sont fixées par un groupement thiol -SH. Ce groupement perd un atome d'hydrogène pour réaliser une liaison covalente avec la nanoparticule.	71
3.6	(a) Les molécules utilisées pour les surfaces d'or sont des molécules à groupement -SH. La molécule perd un atome d'hydrogène quand elle s'accroche à la surface. R désigne un groupement chimique -SH ou -NH ₂ . (b) Les molécules d'accrochage pour les surfaces d'oxyde de silicium sont des molécules à groupement triméthoxysilane - Si(OCH ₃) ₃ . Les atomes d'oxygène assurent la liaison avec la surface d'oxyde. R désigne un groupement chimique -SH ou NH ₂ .	71
3.7	La surface est recouverte d'une couche d'accrochage puis une monocouche peut-être déposée. On obtient des multicouches en procédant de façon itérative.	72
3.8	Après un dépôt de nanoparticules en phase aqueuse sur une surface aminée, Sato obtient un réseau non compact(gauche). Cependant une monocouche de molécules alcanedithiol sur la surface des nanoparticules peut servir de couche d'accrochage pour d'autres nanoparticules. Après un autre dépôt de nanoparticules, on obtient alors un réseau plus compact (droite).	73
3.9	(a) Schéma de la grille de microscope utilisée de référence G200HS Fine Square Mesh. (b) Schéma d'un plot d'or sur un échantillon. H=113 μ m, B=12 μ m, P=125 μ m	74
3.10	Molécule de 1,4-benzènedithiol, C $_6H_6S_2$, M=142.24 g/mol	75
3.11	Molécule de 1,8-octanedithiol, C_6H_{18}S_2, M=178.35 g/mol. $\ldots \ldots \ldots \ldots \ldots \ldots$	75
3.12	$Mol \acute{e} cule \ de \ 2-Aminoethanethiol, \ C_2H_7NS, \ M=77.14 \ g/mol. \qquad . \qquad$	75
3.13	$\label{eq:Molecule} \begin{array}{l} {\rm Molecule\ de\ 3-Mercaptopropyl\ trimet\ hoxysilane,\ SH(CH_2)_3Si(OMe)_3,\ M=196.34\ g/mol.} \\ 75 \end{array}$	
3.14	$\label{eq:Molecule} Molecule \ de \ 3-aminopropyl \ trimethoxysilane, \ NH_2(CH_2)_3Si(OCH_3), \ M=179.29 g/mol.$	76
3.15	Schéma récapitulatif des protocoles des échantillons ayant subi un dépôt de molécules thiolées.	77
3.16	Schéma récapitulatif des protocoles des échantillons ayant subi un dépôt de molécules aminées.	79
3.17	(a) Image MEB de l'échantillon 2. On observe un dépôt très localisé. (b) Grossissement d'une zone de dépôt sur l'échantillon 2. Bien que le film soit irrégulier on observe un réseau 2D de nanoparticules sur des aires d'un peu plus de 200 nm ² . On observe que les nanoparticules peuvent également s'agréger entre elles.	81
3.18	Caractéristiques I_{ds} - V_{ds} acquises sur trois dispositifs de l'échantillon 2. Les conductivités mesurées sont de $1,41 \times 10^{-9} \text{S.cm}^{-1}, 2,9 \times 10^{-10} \text{S.cm}^{-1}$, et $1,14 \times 10^{-10} \text{S.cm}^{-1}$.	82
3.19	(a) Image MEB de l'échantillon 3. Les points blancs sur les plots d'or sont des amas de nanoparticules. (b) Un grossissement d'un plot d'or de l'échantillon 3 montre que les nanoparticules forment des agrégats de forme irrégulière. A l'image les nanoparticules déposées se détachent bien de la surface d'or qui est plus sombre	82
	- * *	

162

3.20	Image MEB prise sur l'échantillon 4. Sur cet échantillon il y a eu très peu de dépôt de nanoparticules. Cependant à de rares endroits un tapis de nanoparticules a pu relier deux électrodes.	83
3.21	Caractéristique I_{ds} - V_{ds} acquise sur un dispositif présentant un dépôt similaire à celui montré en figure précédente. La conductance est de 7.01×10^{-7} S.cm ⁻¹ . Elle est plus élevée que sur l'échantillon 2 en effet l'épaisseur du film nanoparticules + molécules déposé est plus importante	83
3.22	(a) Image MEB prise sur l'échantillon 6. Des deux côtés du cadre on a les électrodes d'or. Les tâches blanches sont des amas de polymères.(b) Grossissement du canal inter-électrode. Les nanoparticules forment un réseau d'une seule épaisseur, compact par endroits, avec une organisation préférentiellement linéaire.	84
3.23	Caractéristiques I_{ds} - V_{ds} pour $V_{gs} = 0$ V, 10 V, 20 V et 30 V acquises sur une paire d'électrodes de l'échantillon 6. L'effet de la tension de grille sur la caractéristique sature à $V_{gs}=30$ V. Les conductivités mesurées sont respectivement de $6,03 \times 10^{-11}$ S.cm ⁻¹ , $5,6 \times 10^{-11}$ S.cm ⁻¹ , $5,7 \times 10^{-11}$ S.cm ⁻¹ et $5,6 \times 10^{-11}$ S.cm ⁻¹	84
3.24	(a) Image MEB prise sur l'échantillon 7. Des deux côtés du cadre on a les électrodes d'or. Il semble y avoir un dépôt compact de nanoparticules. (b) Grossissement de la marche surface isolante-plot d'or. On observe que les nanoparticules sont très espacées sur la surface. Cependant à certains endroits ils peuvent former des agrégats. On remarque également des molécules polymérisées.	85
3.25	(a) Image MEB de l'échantillon 8. On observe des amas de nanoparticules sur toute la surface. Cependant le film n'est pas assez compact pour obtenir un courant électrique.(b) Grossissement du canal inter-gap montrant un réseau non compact de nanoparticules.	85
3.26	 (a) Image MEB de l'échantillon C après le dépôt de nanoparticules et avant le dépôt de pentacène. Les nanoparticules forment des agrégats sur toute la surface. (b) On observe des amas de nanoparticules sur la surface d'oxyde et sur l'électrode d'or. 	87
3.27	schéma de principe d'un bâti d'évaporation par effet joule $\ . \ . \ . \ .$	88
4.1	Présentation des résultats des mesures du courant $I_{ds}(V_{ds}=V_{gs}=-20V)$ acquises sur les dispositifs de l'échantillon A (a) Répartition statistique des courants mesurés. (b) Répartition spatiale des courants mesurés. Sur cet échantillon comme sur tous les autres, il manque la partie inférieure gauche. C'est à cette zone que les wafers ont été fixés sur le socle lors des procédés de dépôt.	93
4.2	Présentation des résultats des mesures du courant $I_{ds}(V_{ds}=V_{gs}=-20V)$ acquises sur les dispositifs de l'échantillon B (a) Répartition statistique des courants mesurés. (b) Répartition spatiale des courants mesurés.	94
4.3	Présentation des résultats des mesures du courant $I_{ds}(V_{ds}=V_{gs}=-20V)$ acquises sur les dispositifs de l'échantillon C (a) Répartition statistique des courants mesurés. (b) Répartition spatiale des courants mesurés.	94

4.4	Caractéristiques I_{ds} - V_{ds} pour V_{gs} =0V, -5V, -10V, -15V, -20V acquises sur un dispositif appartenant à l'échantillon A.	95
4.5	Caractéristiques I_{ds} - V_{ds} pour V_{gs} =-10V, -15V, -20V acquises sur un dispositif appartenant à l'échantillon B.	95
4.6	Caractéristiques I_{ds} - V_{ds} pour V_{gs} =-10V, -15V, -20V acquises sur un dispositif appartenant à l'échantillon C.	95
4.7	(a) Racine carrée du courant drain-source $\sqrt{I_{ds}}$ en fonction de la tension de grille V_{gs} . Caractéristique acquise dans la zone de saturation (V_{ds} =-20V) d'un dispositif de la majorité statistique de l'échantillon A. L'axe des abscisses est décalé pour tenir compte du courant de fuite. La mobilité est de $1,4\times10^{-4}$ cm ² .V ⁻¹ .s ⁻¹ et la tension de seuil de -4,28V (b) Répartition statistique des mobilités calculées sur les dispositifs de l'échantillon A.	96
4.8	(a) Racine carrée du courant drain-source $\sqrt{I_{ds}}$ en fonction de la tension de grille V_{gs} . Caractéristique acquise dans la zone de saturation (V_{ds} =-20V) d'un dispositif appartenant à la majorité statistique de l'échantillon B. La mobilité calculée est de $2.8 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \text{.V}^{-1} \text{.s}^{-1}$ et la tension de seuil de -11,7V (b) Répartition statistique des mobilités calculées sur les dispositifs de l'échantillon B.	97
4.9	(a)Racine carrée du courant drain-source $\sqrt{I_{ds}}$ en fonction de la tension de grille V_{gs} . Caractéristique acquise dans la zone de saturation (V_{ds} =-20V) d'un dispositif appartenant à la majorité statistique de l'échantillon C. La mobilité calculée est de 3.4×10^{-3} cm ² .V ⁻¹ .s ⁻¹ et la tension de seuil est de -10.5V. (b) Répartition statistique des mobilités calculées sur les dispositifs de l'échantillon C.	97
4.10	Courant drain-source tracé en échelle logarithmique en fonction de la tension de grille appliquée. Caractéristique acquise sur un dispositif de l'échantillon A.	98
4.11	Courant drain-source tracé en échelle logarithmique en fonction de la tension de grille appliquée. Caractéristique acquise sur un dispositif de l'échantillon B	98
4.12	Courant drain-source tracé en échelle logarithmique en fonction de la tension de grille appliquée. Caractéristique acquise sur un dispositif de l'échantillon C	98
4.13	Ratios I_{on}/I_{off} mesurés sur les dispositifs appartenant à l'échantillon A	99
4.14	Ratios I_{on}/I_{off} mesurés sur les dispositifs appartenant à l'échantillon B	99
4.15	Ratios I_{on}/I_{off} mesurés sur les dispositifs appartenant à l'échantillon C	99
4.16	Caractéristiques de charge $I_{ds}(t)$ pour $V_{ds}=V_{gs}=-20V$ acquises sur des dispositifs ap- partenant à la majorité statistique de chaque échantillon. Chaque courbe est labélisée selon l'échantillon auquel appartient le dispositif. Nous remarquons que les nanopar- ticules induisent un effet capacitif marqué. En particulier le dispositif appartenant à l'échantillon B présente une caractéristique de charge plus accentuée	100
4.17	Molécule de citrate de trisodium	102
4.18	Effet de l'application d'une tension de -50V pendant 20s sur la caractéristique I_{ds} - $V_{ds}(V_{gs}=-20V)$ d'un dispositif appartenant à l'échantillon A.	103

4.19	Effet de l'application d'une tension de -50V pendant 20s sur la caractéristique I_{ds} - $V_{ds}(V_{gs}=-20V)$ d'un dispositif appartenant à l'échantillon B. L'application d'une tension de +50V pendant une durée similaire ne ramène pas le dispositif à son état initial.	104
4.20	Effet de l'application d'une tension de -50V pendant 20s sur la caractéristique I_{ds} - $V_{ds}(V_{gs}=-20V)$ d'un dispositif appartenant à l'échantillon C.	104
4.21	Caractéristiques I_{ds} - V_{ds} (V_{gs} =-20V) acquises sur un dispositif de l'échantillon C : 1-caractéristique initiale, 2-après application d'une tension de -50V sur l'électrode de grille pendant 20s. 3-après application successive d'une tension de +100V pendant 20s.	105
4.22	Caractéristiques $\sqrt{I_{ds}}$ -V _{gs} (V _{ds} =-20V) acquises sur un dispositif de l'échantillon A avant et après applications successives d'une tension de -50V puis +50V sur l'électrode de grille	105
4.23	Caractéristiques $\sqrt{I_{ds}}$ -V _{gs} (V _{ds} =-20V) acquises sur un dispositif de l'échantillon B avant et après applications successives d'une tension de -50V puis +50V sur l'électrode de grille	106
4.24	Caractéristiques $\sqrt{I_{ds}}$ -V _{gs} (V _{ds} =-20V) acquises sur un dispositif de l'échantillon C avant et après applications successives d'une tension de -50V puis +50V sur l'électrode de grille	106
4.25	Courants $I_{ds}(V_{gs}=V_{ds}=-20V)$ mesurés après applications alternatives de niveaux de tension de -50V et +100V pendant 20s sur l'électrode de grille sur un dispositif de l'échantillon C. Nous retrouvons successivement les mêmes niveaux de courant	107
4.26	Relaxation du courant après application d'une tension de -50V sur l'électrode de grille pendant 20s sur un dispositif de l'échantillon A. Cette courbe est approximée par deux exponentielles de constantes de temps 21,4s et 353s. La courbe située dans la partie inférieure du graphe a été acquise avant l'opération d'écriture. Nous observons que le procédé de mesure n'induit pas de charges sur le dispositif.	108
4.27	Relaxation du courant après application d'une tension de -50V sur l'électrode de grille pendant 20s sur un dispositif de l'échantillon B. Cette courbe est approximée par deux exponentielles de constantes de temps 436,3s et 2889,1s. la courbe obtenue sur le dispositif à son état initial est également représentée. Le procédé de mesure induit une légère charge sur le dispositif.	108
4.28	Relaxation du courant après application d'une tension de -50V sur l'électrode de grille pendant 20s sur un dispositif de l'échantillon C. Cette courbe est approximée par deux exponentielles de constantes de temps 104,3s et 1503,8s. La courbe située dans la partie inférieure du graphe a été acquise sur le dispositif à son état initial. On observe que le procédé de mesure ne charge pas le dispositif.	109

5.1	Chronogramme des signaux appliqués aux dispositifs étudiés. Le dispositif subit d'abord une phase de programmation. Une tension V_P est appliquée sur l'électrode de grille pendant une durée t_P . Après reconfiguration de l'appareil de mesure, un signal cré- neau de tension basse V_{D1} et de tension haute V_{D2} est appliqué entre les électrodes de drain et de source. L'électrode de grille peut recevoir ce signal d'entrée ou se voir imposer une tension continue V_G .	115
5.2	Configuration du dispositif pendant l'étape de programmation par l'application d'une tension V_P sur l'électrode de grille pendant une durée t_P .	115
5.3	Configuration du dispositif durant son mode opératoire. Le signal d'entrée est appliqué sur l'électrode de drain. L'électrode de grille reçoit également ce signal d'entrée ou une tension continue V_G . L'électrode de source est à la masse. Le signal de sortie est le courant I_{ds} mesuré.	115
5.4	Evolution du courant I_{ds} pour un signal incident de tension basse $V_{D1}=0V$, de ten- sion haute $V_{D2}=-50V$ et de caractéristiques $t=0.2s$ et $T=50s$ (fréquence de $0.02Hz$). L'électrode de grille reçoit également ce même signal incident.	117
5.5	Evolution du courant I_{ds} pour un signal incident de tension basse $V_{D1}=0V$, de tension haute $V_{D2}=-50V$ et de caractéristiques $t=0,2s$, $T=5s$ (fréquence de $0,2Hz$). L'électrode de grille reçoit également ce même signal incident	118
5.6	Evolution du courant I_{ds} pour un signal incident de tension basse $V_{D1}=0V$, de ten- sion haute $V_{D2}=-50V$ et de caractéristiques $t=0.2s$ et $T=50s$ (fréquence de $0.02Hz$). L'électrode de grille reçoit également ce même signal incident.	118
5.7	Réponse du dispositif après programmation à une tension V_P de -50V pendant $t_P=20s$. Le signal incident est de tension basse $V_{D1}=0V$ et de tension haute $V_{D2}=-20V$ avec $t=2ms$ et $T=20002ms$. L'électrode de grille reçoit ce même signal incident. Le courant I_{ds} mesuré est normalisé par rapport au courant initial avant programmation du dispositif. La courbe enveloppe est approximée par deux exponentielles de constantes de temps 183s et 2395s.	119
5.8	Courbe représentant la valeur absolue du courant I_{ds} mesuré pour un signal inci- dent V_{ds} de caractéristiques V_{D1} =-10V, V_{D2} =-50V, t=10s et T=20s. La tension V_G appliquée est de -20V. Cette courbe est acquise après programmation du dispositif à V_P =-50V et t _P =20s. Le courant I_{ds} a une allure croissante évoquant le comportement d'une synapse facilitatrice.	120
5.9	Courbe représentant la valeur absolue du courant I_{ds} mesuré pour un signal incident V_{ds} de caractéristiques V_{D1} =-10V, V_{D2} =-50V, t=10s et T=20s. La tension V_G appliquée est de -20V. Cette courbe est acquise après programmation du dispositif à V_P =+100V et t _P =20s. Le courant I_{ds} a une allure décroissante évoquant le comportement d'une synapse dépressive.	120
5.10	(a) Ce schéma est tracé avec les niveaux de courant mesurés dans la réponse de la synapse facilitatrice (figure 5.8) au signal incident de caractéristiques V_{D1} =-10V, V_{D2} =-50V, t=10s et T=20s, avec V_G =-20V. Les caractéristiques I_{ds} - V_{ds} sont des tracés approximatifs. (b) Agrandissement à l'origine de la courbe de la figure 5.8	121

166
Table des figures

5.11	Courbes enveloppe obtenues sur la réponse de la synapse facilitatrice.	122
5.12	Courbes enveloppe obtenues sur la réponse de la synapse dépressive	123
5.13	Réponse du dispositif pris dans son état initial (non chargé) à un signal créneau de caractéristiques V_{D1} =-10V, V_{D2} =-50V, t=10s et T=20s	123
5.14	Courbes enveloppe du dispositif pris dans son état initial (non chargé) à un signal créneau de caractéristiques V_{D1} =-10V, V_{D2} =-50V, t=10s et T=20s	124
5.15	Réponse du dispositif non sollicité à un signal d'entrée de caractéristiques V_{D1} =-5V, V_{D2} =-30V, t=2s et T=2s. La fréquence est de 0,5 Hz. La tension de grille V_G est fixée à -20V	125
5.16	Réponses du dispositif à un signal incident identique à celui utilisé pour le graphe présenté en figure 5.15 (V_{D1} =-5 V , V_{D2} =-30 V , V_{G} =-20 V , t=2s et T=2s) après l'application d'une tension de programmation V_P =-50 V pendant t $_P$ =20s. Les courbes sont rassemblées sur un même graphe pour bien mettre en évidence l'effet de relaxation après l'application de la tension de programmation. La courbe du bas est acquise à l'instant t ₁ après l'application d'une tension de -50 V , celle du haut est obtenue à l'instant t ₂ >t ₁ .	125
5.17	La tension de programmation V_P appliquée pendant une durée t_P est assimilée à une rétro propagation de l'activité du neurone post-synaptique. La réponse du dispositif à un signal pré-synaptique émis à partir de l'instant t_1 est fonction du temps qui s'est écoulé depuis l'occurrence d'une impulsion sur l'électrode de grille	126
5.18	Réponse du dispositif non sollicité à un signal incident de tension basse V_{D1} =-5V, de tension haute V_{D2} =-30V, et de caractéristiques t=1s et T=1,2s. La tension V_G est fixée à -20V. La fréquence est de 0,83 Hz	127
5.19	Réponse du dispositif pour un même signal incident de fréquence 0,83 Hz, V _G fixée à -20V, après une première programmation à V_P =-50V et t _P =20s	127
5.20	Réponse du dispositif pour un même signal incident de fréquence de 0,83 Hz, V_G fixée à -20V, après une seconde programmation à V_P =-50V et t _P =20s	128
5.21	Changement du poids synaptique en fonction du temps écoulé entre l'instant où arrive le pulse pré-synaptique et celui où arrive le pulse post-synaptique	131
5.22	Schéma de principe pour une utilisation du dispositif transistor + nanoparticules en tant que synapse électronique.	132
5.23	Schéma de principe pour une utilisation du dispositif transistor + nanoparticules en tant que synapse électronique. La dépression post-synaptique liée à l'activité du neurone post-synaptique est mise en œuvre par l'occurrence d'un train d'impulsion émis par le neurone post-synaptique. La dépression liée à la fréquence du signal incident est mise œuvre du fait que le signal incident est acheminé sur le drain et également sur l'électrode de grille.	132
	0	_