Académie de Lille

Université des Sciences et Technologies de Lille

THESE

pour obtenir le titre de

DOCTEUR EN SCIENCES DE L'UNIVERSITE DE LILLE I

Spécialité : Electronique

Ecole doctorale : Institut d'Electronique, de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN)

Présentée par

Michaël CHARLES

Modélisation, conception et caractérisation d'un commutateur hyperfréquence à base de nanotubes de carbone verticaux

Soutenu le 10 Mars 2010 devant la commission d'examen :

L. BUCHAILLOT	IEMN, Lille	Président du jury
S. BALLANDRAS	FEMTO-ST, Besançon	Rapporteur
T. BOUROUINA	ESIEE, Paris	Rapporteur
L. NICU	LAAS, Toulouse	Examinateur
G. TANNE	LAB-STICC, Brest	Examinateur
N. ROLLAND	IEMN, Lille	Directrice de thèse
A. ZIAEI	THALES, Palaiseau	Tuteur entreprise

Titre : Modélisation, conception et caractérisation d'un commutateur hyperfréquence à base de nanotubes de carbone verticaux

Résumé

Depuis la découverte des nanotubes de carbone, leurs propriétés ont largement été étudiées. Les performances des commutateurs NEMS RF (Radio Frequency Nano Electro Mechanical System) ohmique à base de nanotubes de carbone sont susceptibles d'être supérieurs à celles des MEMS RF. Aussi l'étude de la faisabilité de tels systèmes est scientifiquement pertinente. Il existe trois géométries de commutateurs (poutre, pont et pince), cette thèse propose une étude approfondie d'un NEMS RF en configuration pince. On y détaille l'ensemble des étapes de dimensionnement, de fabrication et de caractérisation. Des croissances de nanotubes de carbone par la méthode PECVD sur un empilement de différents matériaux composant le NEMS ont été réalisées et ont abouti à une structure répondant aux exigences physiques d'un NEMS RF et ce compte tenu la contrainte thermique imposée par la synthèse PECVD (600 °C à 800 °C). Les caractérisations en tension des commutateurs NEMS DC valident la réalisation et le fonctionnement de ces structures. Les résultats encourageants en simulation hyperfréquence et la démonstration de la faisabilité de NEMS RF donnet crédit à la poursuite de ces travaux sur la base des modèles théoriques et des simulations établis avec pour objectif, des mesures expérimentales en hyperfréquence.

Mots-clés : NEMS, hyperfréquence, nanotube de carbone, MWCNT, van der Waals, croissance PECVD, EBID (Electron Beam Induced Deposition), module de Young.

Title: Modelling, design and characterization of a microwave switch based on vertical carbon nanotubes

Summary

Since their discovery, the properties of carbon nanotubes have been widely studied. The study of scientific relevance and feasibility of an ohmic and capacitive RF NEMS represents an area of research whose results would likely exceed the performances of RF MEMS. There are three switch designs (the cantilever, the bridge and the tweezer), this thesis offers a comprehensive study of RF NEMS switch in a tweezer configuration with a detailed explanation of all phases of modelization, fabrication and characterization. A literature survey set the necessary theoretical elements for the knowledge and for the consistency of this scientific process. Various experiments on the carbon nanotubes growth by PECVD method on a stack of different materials likely to compose the NEMS have been realized to result in a structure meeting the physical specifications of a RF NEMS and the thermal stress in PECVD synthesis (600 °C to 800 °C). The commutation experiments carried out on the DC NEMS switch illustrate the fabrication and the operation of these structures. The encouraging results on high frequency simulation and on fabrication of RF NEMS have brought credibility to the continuation of this work, with the objective of experimental measurements at high frequency in order to confirm or refute the theoretical developed and the software simulations.

Key words: NEMS, microwaves, carbon nanotube, MWCNT, van der Waals, PECVD growth, EBID (Electron Beam Induced Deposition), Young modulus.

A mes parents,

Pour tous les sacrifices qu'ils ont concédés à mes études et celles de mon frère.

Remerciements

L'ensemble des travaux rapportés dans ce manuscrit a été réalisé au sein du Laboratoire d'Analyses Physiques Avancées (LAPA) de Thales Research & Technology (TRT). Je tiens à remercier à ce titre mon encadrant Mr Afshin Ziaei et le responsable du laboratoire Mr Guy Garry de m'avoir accueilli au sein de l'équipe. La pertinence scientifique de leurs conseils, leur soutien indéfectible et leurs encouragements auront contribué à la réussite des travaux présentés dans ce manuscrit, ainsi qu'à l'épanouissement professionnel que ces trois années m'auront apporté.

Toute ma reconnaissance va également à Mme Nathalie Rolland de l'Institut d'Electronique de Microélectronique et de Nanotechnologie (IEMN) de Lille, qui m'aura fait l'honneur d'être ma directrice de thèse. Merci pour son encadrement, pour la justesse de ses conseils scientifiques et pour sa gentillesse.

J'adresse mes sincères remerciements à Monsieur Lionel Buchaillot, Directeur de Recherche au CNRS, qui m'a fait l'honneur de présider ce jury de thèse.

Je remercie Monsieur Sylvain Ballandras, Directeur de Recherche au LPMO à Besançon et Monsieur Tarik Bourouina, Professeur à l'ESIEE Paris, pour le sérieux et la pertinence de leur travail de rapporteur.

J'exprime une sincère gratitude à Monsieur Liviu Nicu, Chargé de Recherche au LAAS de Toulouse, et à Monsieur Gérard Tanné, Professeur à l'UBO de Brest, pour leur participation à ce jury.

Les objectifs de ce doctorat s'étant inscrits dans le cadre du projet ANR SIMS, je tiens à remercier Messieurs Costel-Sorin Cojocaru, Amaël Caillard, Aurélien Gohier et Didier Pribat du Laboratoire de Physique des Interfaces et des Couches Minces (LPICM) de l'école Polytechnique, pour l'expérience scientifique qu'ils ont partagé sur la croissance PECVD des nanotubes de carbone, pour leur patience et pour leur sympathie même sous la pression. Je remercie également Mr Arnaud Pothier, Mr Pierre Blondy et Mme Aurélie Verger de l'institut de recherche Xlim de Limoges pour les précieuses suggestions qu'ils m'ont apportéesdans le domaine des hyperfréquences.

Merci également à Messieurs Pascal Vincent, Anthony Ayari, Philippe Poncharal et Stephen Purcell du LPMCN de Lyon pour leur accueil et la pertinence des manipulations en vibration réalisées sur les nanotubes de carbone synthétisés au LPICM.

Les différentes parties de cette thèse auront été autant d'occasions pour moi de travailler avec un grand nombre de personnes aux passifs scientifiques divers et variés. Ainsi je tiens à remercier : Mr Renato Bisaro pour son expérience, la sagesse de ses conseils et les débats passionnants auxquels il m'a convié ; Mr Eric Minoux, pour ses responsabilités dans le projet ANR SIMS lié à cette thèse ; Mr Stephane Xavier, pour ses immenses talents de technologues et sa patience ; Mr Christian Collet, pour sa sérénité et sans qui le NEMS DC capacitif serait resté une étude théorique.

Je remercie également pour l'aide et le soutien qu'ils m'ont apporté : Mr Matthieu Le Baillif, Mr Frederic Wyczisk, Mme Shaïma Enouz-Vedrenne, Mme Aude Leuliet, Mr Laurent Gangloff, Mr Patrick Plouhinec, Mme Maryline Beguet et Mme Oumkelthoum Moustapha.

Merci à tous ceux qui par leur gentillesse et leur soutien auront fait de ces trois années une expérience professionnelle inoubliable : Mr Sebastien Demoustier, Mme Odile Bezencenet, Mr Bernard Servet, Mme Elodie Leveugle, Mr Ezzedine Ouerghemmi, Mme Kim-Anh Bui-Thi, Mme Virginie Trinité, Mr Michel Pate, Mr Luc Leviandier, Mr Daniel Dubreuil, Mr Olivier Durand et tous les stagiaires de ces trois dernières années.

Un grand merci à mes parents qui ont fait plus que contribuer à la réussite de ce doctorat, marquant la fin de ma scolarité. Merci à eux d'avoir inculqué à leurs deux fils l'importance des études, de la connaissance et des convictions. Merci pour tous les sacrifices qu'ils y ont concédés, bien des parents n'en auraient pas fait autant.

Merci à mon frère pour avoir toujours cru en moi et pour mes deux nièces (Eleanore et Constance) qui ont fait de moi un « tonton », même si j'avoue avoir pris un sérieux coup de vieux ces jours-là.

Merci à tous les membres de ma famille qui ont été présents le jour de ma soutenance.

Enfin un grand merci à mes amis présents ou absents pour ma soutenance (Fabien, Marion, Guillaume, Karinne, Julien, Celine et Nicolas), tous ceux et toutes celles que je considère comme une seconde famille.

Table des matières

INTRODUCTION **11**
1 : ETAT DE L'ART SUR LES CNTS ET LES NEMS **13**
1.1 Introduction de la première partie **14**
1.2 Généralités sur les CNTs **15**
1.2.1 Morphologie des CNTs 15
1.2.2 Les différents procédés de croissance des nanotubes de carbone 19
1.2.2.1 Procédés à hautes températures 19
1.2.2.1.1 Arc électrique 19
1.2.2.1.2 Ablation laser 20
1.2.2.1.3 Méthode solaire 20
1.2.2.2 Procédés à moyennes températures 21
1.2.2.2.1 Chemical Vapor Deposition (CVD) 21
1.2.2.2.2 Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD) 23
1.2.2.2.3 Décomposition catalytique (HIPCO) 24
1.2.3 Propriétés physiques des CNTs 25
1.2.3.1 Propriétés mécaniques 25
1.2.3.1.1 Le moment d'inertie 25
1.2.3.1.2 Le module de Young 25
1.2.3.2 Propriétés électriques 28
1.2.3.2.1 Caractérisation semi-conductrice ou métallique des CNTs 28
1.2.3.2.2 Influence de la géométrie d'un CNT sur ses propriétés électriques 30
1.2.3.2.3 Tenue en puissance d'un MWCNT 32
1.2.3.2.4 Caractéristiques hyperfréquences des MWCNTs 33
1.2.3.2.5 Modèle électrique équivalent à un MWCNT 33
1.2.3.2.6 Permittivité relative et conductivité électrique d'un MWCNT 36
1.2.3.2.7 Comportement hyperfréquence d'un MWCNT 37
1.2.3.3 Autres propriétés 40
1.3 Etat de l'art des NEMS DC **42**
1.3.1 Les différentes configurations de commutateurs à base de CNTs 42
1.3.2 Aperçu de la topologie d'une structure coplanaire envisagée pour la modélisation d'un NEMS RF 45
1.3.3 Les objectifs et les différentes étapes de la réalisation d'un commutateur NEMS RF 46
1.3.3.1 Première étape : Le NEMS DC 46
1.3.3.2 Seconde étape : Le NEMS RF 49
1.4 Conclusion de la première partie **50**
2 : FABRICATION ET CARACTÉRISATION PHYSIQUE DES MWCNTS **51**
2.1 Introduction de la seconde partie **52**
2.2 Caractéristiques physiques des matériaux utilisés **53**
2.2.1 Le substrat 53
2.2.2 Le diélectrique (isolant) 53
2.2.3 Le métal de conduction 54
2.2.4 La barrière de diffusion 58
2.2.5 Le catalyseur 59
2.2.5.1 L'élément 59
2.2.5.2 La géométrie du plot 60
2.3 Méthode PECVD développée par le LPICM Polytechnique **64**
2.3.1 Fonctionnement et réalisations dans le cadre de ces travaux 64

2.3.2 Influence des paramètres de croissance PECVD sur la géométrie des MWCNTs synthétisés 66
2.4 Mesures du module de Young et géométrie de nos MWCNTs 67
2.4.1 Croissance PECVD sur Mo/TiN/Ni 67
2.4.2 Analyse au TEM des MWCNTs 68
2.4.3 Mesures en oscillations des MWCNTs via un champ électrostatique 68
2.4.3.1 MWCNT issu d'une croissance PECVD pleine plaque Mo/TiN/Ni 69
2.4.3.2 MWCNT issu d'une croissance PECVD pleine plaque TiW/TiN/Ni 70
2.4.3.3 MWCNT issu d'une croissance par Arc électrique 71
2.4.3.4 Conclusions 71
2.5 Courant dans les MWCNTs 72
2.5.1 MWCNT issu d'une croissance PECVD 72
2.5.2 MWCNT issu d'une croissance par Arc électrique 73
2.5.3 Conclusions 73
2.6 MWCNT enrobé de platine, tungstène ou silice 75
2.6.1 Principe de dépôt de matériau par la méthode EBID (Electron Beam Induced Deposition) 75
2.6.2 Les matériaux déposés 76
2.6.3 Image MEB des résultats obtenus par EBID 77
2.6.3.1 Platine 77
2.6.3.2 Tungstène 78
2.6.3.3 Silice 79
2.6.4 Conséquences des résultats obtenus par la méthode EBID 79
2.7 Conclusion de la seconde partie 80
3 : MODÉLISATION, CONCEPTION ET MESURES D'UN NEMS DC 81
3.1 Introduction de la troisième partie 82
3.2 Modélisation théorique 83
3.2.1 Propriétés mécaniques 83
3.2.1.1 L'équation d'équilibre des forces 83
3.2.1.2 La force élastique 84
3.2.1.3 La force électrostatique 85
3.2.1.4 La force de van der Waals 86
3.2.1.5 La tension de commutation 88
3.2.1.6 La résistance et la surface de contact 90
3.2.1.6.1 La résistance de contact 90
3.2.1.6.2 La surface de contact 91
3.2.1.7 Le temps de commutation 93
3.2.2 Validation du modèle MATLAB 95
3.2.3 Dimensions du NEMS DC en fonction de l'état de l'art, des mesures et des limites technologiques 96
3.2.4 Commutateur ohmique à contact carbone-carbone 98
3.2.4.1 Une électrode d'activation 98
3.2.4.2 Deux électrodes d'activation 102
3.2.5 Commutateur ohmique à contact carbone-platine 104
3.2.6 Commutateur ohmique contact carbone-tungstène 107
3.2.7 Commutateur capacitif contact carbone–silice 110
3.2.8 Conclusions 113
3.3 Conception expérimentale et caractérisation en tension 114
3.3.1 Procédé de fabrication 114
3.3.2 Les différentes étapes technologiques 115

3.3.2.1 1ère étape technologique réalisée via une lithographie optique pour un dépôt de molybdène par évaporation 115
3.3.2.2 2ème étape technologique réalisée via une lithographie électronique pour un dépôt de molybdène par évaporation 116
3.3.2.3 3ème étape technologique réalisée via une lithographie électronique pour un dépôt de TiN par pulvérisation et de nickel par évaporation 116
3.3.3 NEMS DC après croissance PECVD des MWCNTs 118
3.3.4 Caractérisations en tension 119
3.3.4.1 1er résultat : Commutation entre deux MWCNTs 119
3.3.4.2 2nd résultat : NEMS DC ohmique avec une électrode d'activation 121
3.3.4.3 3ème résultat : NEMS DC ohmique avec deux électrodes d'activation 122
3.3.4.4 4ème résultat : NEMS DC capacitif avec une électrode d'activation 123
3.3.4.5 5ème résultat : NEMS DC ohmique avec une électrode d'activation 124
3.4 Conclusion de la troisième partie 126
4 : MODÉLISATION, CONCEPTION ET MESURES D'UN NEMS RF 127
4.1 Introduction de la quatrième partie 128
4.2 Modélisation théorique 129
4.2.1 Dimensions d'une ligne coplanaire en molybdène adaptée 50 Ω sur la gamme en fréquence 40 GHz et 60 GHz 129
4.2.2 Topologie et principe de fonctionnement du NEMS RF parallèle 131
4.2.3 Modèles équivalents des MWCNTs du NEMS RF parallèle aux états passant (off) et bloquant (on) 133
4.2.3.1 Etat passant 133
4.2.3.2 Etat bloquant 134
4.2.4 Simulations hyperfréquences du NEMS RF parallèle 136
4.2.4.1 Méthode de résolution via la matrice chaîne T 136
4.2.4.2 Contact carbone-carbone 137
4.2.4.2.1 Etat passant 138
4.2.4.2.2 Etat bloquant 139
4.2.4.2.3 Conclusion 140
4.2.4.3 Contact carbone-platine 140
4.2.4.3.1 Etat passant 141
4.2.4.3.2 Etat bloquant 142
4.2.4.3.3 Conclusion 142
4.2.4.4 Contact carbone-tungstène 143
4.2.4.4.1 Etat passant 143
4.2.4.4.2 Etat bloquant 144
4.2.4.4.3 Conclusion 145
4.2.4.5 Contact carbone-SiO_2 145
4.2.4.5.1 Etat passant 146
4.2.4.5.2 Etat bloquant 147
4.2.4.5.3 Conclusion 147
4.2.4.6 Conclusion 148
4.3 Fabrication et caractérisations hyperfréquences du NEMS RF 149
4.3.1 Procédé de fabrication 149
4.3.2 Les différentes étapes technologiques 151
4.3.2.1 1ère étape technologique : réalisation des électrodes en molybdène 151
4.3.2.2 2ème étape technologique : réalisation des plots de TiN/Ni 151
4.3.2.3 3ème étape technologique : gravure du SiO_2 et dépôt de TiN/Ni 152
4.3.2.4 4ème étape technologique : réalisation du guide coplanaire 153

4.3.3 NEMS RF après croissance PECVD des nanotubes de carbone 154
4.4 Conclusion de la quatrième partie 155
CONCLUSIONS 156
5 : ANNEXES 159
5.1 Les fréquences de résonances d'un nanotube de carbone 160
5.1.1 Configuration encastré - libre 161
5.1.2 Configuration encastré – encastré 162
5.2 Oscillation d'un nanotube de carbone 163
5.2.1 Oscillation via un champ électrostatique AC 163
5.2.2 Oscillation thermique 164
5.2.3 En commutation via les forces élastique et électrostatique 165
5.3 Alignement diélectrophorèse 166
5.4 Les paramètres et les matrices S et T 167
5.4.1 Les paramètres S 167
5.4.2 Les paramètres T 168
5.4.3 Théorie de passage de la matrice T à la matrice S 168
5.4.4 Théorie de passage de la matrice S à la matrice T 170
5.4.5 Modèle électrique équivalent d'un tronçon de ligne hyperfréquence 172
5.5 La force élastique 173
5.5.1 Configuration poutre 173
5.5.2 Configuration pont 174
5.6 La force électrostatique en configuration poutre et pont 175
5.7 La force de van der Waals en configuration poutre et pont 176
PUBLICATION DES RÉSULTATS DE CE TRAVAIL 177
Review sur l'état de l'art des nanotubes de carbone 178
Posters et conférences 192
J3N Grenoble 2008 192
EMRS Strasbourg 2009 193
J3N Toulouse 2009 194
BREVET 195
LISTE DES FIGURES 196
LISTE DES TABLEAUX 203
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES 204

Introduction

Au cours de ces dernières années, les MEMS (Micro-Electro-Mechanical-System) ont suscité un intérêt grandissant dans le cadre du développement de commutateurs micromécaniques hyperfréquences. Depuis les premières réalisations en 1979 [1], les progrès réalisés ont été considérables passant de la transmission d'un signal basse fréquence à la transmission d'un signal micro-ondes (> 300 MHz). Ces dispositifs présentent également de nombreux avantages par rapport aux semi-conducteurs classiques, tels que de très faibles pertes d'insertion et une consommation en puissance dérisoire. Cependant, les MEMS se caractérisent aussi par des aspects plus contraignants, tels que des tensions d'activation bien trop élevées (plusieurs dizaines de volts) et des temps de commutation importants (1 - 20 µs). La conception de NEMS (Nano-Electro-Mechanical-System) à base de nanotubes de carbone (CNTs) constitue une solution pour améliorer les propriétés des MEMS.

En 1991 les CNTs ont été découverts par Ijima [2] sous leurs formes multifeuillets (MWCNTs) et en 1993 les équipes de Ijima [3] et Béthune [4] ont parallèlement synthétisés les CNTs monofeuillets (SWCNTs). Les CNTs sont constitués d'un (SWCNTs) ou plusieurs (MWCNTs) feuillet(s) de graphène enroulé(s), se présentant ainsi sous forme de cylindres concentriques dans le cas de MWCNTs. Selon son diamètre et le vecteur d'enroulement du feuillet extérieur de graphène (chiral, zigzag ou armchair), le CNT peut avoir des propriétés semi-conductrices ou métalliques. Les propriétés physiques exceptionnelles des CNTs tant sur les plans mécaniques que thermiques ou électriques, placent ces composants à la pointe de l'innovation et suscitent un engouement exponentiel dans le monde de la R&D. En effet avec un module de Young variant de 100 GPa à 1 TPa, les CNTs suggèrent des applications mécaniques telles que les commutateurs nanométriques (NEMS DC) avec des temps de commutation bien inférieurs à 100 ns et des tensions d'activation bien plus faibles que celles des MEMS. Le comportement métallique des MWCNTs laisse entrevoir la possibilité de les utiliser au sein de dispositifs hyperfréquences en remplacement des métallisations standards ou comme éléments électromécaniques orientant le signal RF (Radio Fréquence).

A ce jour il existe trois architectures de commutateurs à l'échelle nanométrique, la poutre ou « cantilever », le pont ou « bridge » et la pince ou « tweezer ». Ces trois configurations possibles de NEMS DC ont toutes été étudiées par différentes équipes. Leurs résultats ont mis en lumière les avantages et les inconvénients que peuvent présenter chacune de ces Topologies (Tableau 5 page 44). Au-delà des performances physiques des ces trois dispositifs, le principal inconvénient est directement lié à l'aspect conceptuel des différents modèles. En effet dans le cas des topologies poutre et pont, la difficulté consiste à aligner parfaitement les nanotubes de carbone pour permettre la reproductibilité du commutateur. Dans le cas la configuration pince, le problème vient de la croissance des nanotubes de carbone qui doit être localisée à même la métallisation constituant le NEMS. Or la synthèse de CNTs avec une qualité cristalline suffisante nécessite une température d'au moins 600 °C, ce qui restreint le nombre de matériaux pouvant être utilisés. En particulier l'or, couramment employé comme métallisation dans la fabrication des MEMS ne pourra être exploité. La configuration pince présente néanmoins l'avantage d'être reproductible avec un minimum d'étapes de conception et des coûts réduits de fabrication. Les travaux se sont donc orientés sur l'étude et la réalisation d'un commutateur NEMS RF à contact ohmique et capacitif en configuration pince et ont été réalisés dans le cadre du projet ANR SIMS regroupant trois partenaires : Thales Research & Technology (TRT), le Laboratoire de Physique des Interfaces et Couches Minces de Polytechnique (LPICM) et l'institut de recherche Xlim de Limoges.

Les résultats des travaux présentés dans ce manuscrit ont été obtenus au sein de trois laboratoires de recherche. THALES TRT Palaiseau France, où j'ai passé les trois années de mon doctorat et où ont été modélisés et fabriqués l'ensemble des dispositifs NEMS. Le LPICM de polytechnique Palaiseau France, où ont été synthétisés les nanotubes de carbone sur l'ensemble des dispositifs NEMS. Et enfin le LPMCN de Lyon France, où ont été caractérisés les propriétés mécaniques et électriques des nanotubes de carbone synthétisés par le LPICM.

Ce mémoire se divise en quatre parties principales distinctes auxquelles s'ajoutent des annexes précisant certaines parties pour une meilleure compréhension du corps de cette thèse.

La première partie constitue un état de l'art exhaustif décrivant la morphologie des CNTs, leurs propriétés physiques, les différents procédés de synthèse existants, et résumant l'ensemble des résultats expérimentaux obtenus sur les NEMS par les différentes équipes travaillant dans le domaine.

La seconde partie évalue dans un premier temps la pertinence des matériaux choisis dans la conception des NEMS compte tenu de la contrainte thermique liée à la croissance des nanotubes de carbone et des impératifs de performances liés au fonctionnement du commutateur. Dans un second temps, elle détaille l'ensemble des mesures et des expérimentations réalisés sur nos MWCNTs : module de Young, densité de courant, dépôt de matériaux sur les CNTs. Ces résultats ont contribué au dimensionnement du dispositif, à l'établissement de ses limites expérimentales en commutation et à la réalisation d'un NEMS à contact capacitif.

La troisième partie définit les différentes forces en présence au sein d'un commutateur à base de nanotubes de carbone au repos et en commutation, ainsi que de l'ensemble des paramètres pouvant avoir une incidence sur l'amplitude de ces forces. Cette analyse définit les dimensions de la structure pour un fonctionnement optimal, à-savoir :

- une tension d'activation, entre les MWCNTs, qui soit la plus faible possible pour permettre la circulation du courant le plus élevé.
- un rétablissement purement mécanique dans l'état initial (au repos) lorsque la tension de commutation est coupée.

La fin de cette partie présente l'ensemble des étapes de conception du dispositif jusqu'à la croissance des MWCNTs par la méthode PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition), ainsi que les résultats expérimentaux obtenus en commutation.

La quatrième partie décrit la conception des NEMS RF à contact ohmique et capacitif. Elle présente dans un premier temps les dimensions d'une ligne coplanaire adaptées au comportement hyperfréquence des MWCNTs. Elle caractérise par la suite les extensions de cette géométrie permettant de tenir compte de l'échelle nanométrique des commutateurs à base de nanotubes de carbone. Des simulations électromagnétiques 3D dans le domaine fréquentiel réalisées via le logiciel HFSS ont permis d'affiner la géométrie du dispositif afin d'obtenir les résultats les plus performants dans les deux états du NEMS RF (passant et bloquant). Pour terminer, cette dernière partie décrit l'ensemble des étapes de fabrication du NEMS RF.

1 : Etat de l’art sur les CNTs et les NEMS

1.1 Introduction de la première partie

Au cours de ce premier chapitre, un état de l'art est dressé de l'ensemble des caractéristiques physiques des nanotubes de carbone, ainsi que des avancées obtenues dans la réalisation de commutateur NEMS DC à base de CNTs. Ces rappels permettront par la suite d'aborder dans les meilleures conditions, la caractérisation et la réalisation des différents dispositifs abordés dans ce travail. Le premier chapitre débute donc par un bref rappel des différentes spécificités d'un nanotube de carbone, ainsi que des différents types de CNTs existant. Il se poursuit par une présentation des principales méthodes de synthèses des nanotubes de carbone en insistant sur leurs principaux avantages et inconvénients. Les propriétés physiques des nanotubes de carbone mécaniques, électriques, thermiques et hyperfréquences seront ensuite rappelées. Une revue des résultats expérimentaux obtenus dans le domaine des commutateurs à base de CNTs et une présentation des objectifs de l'ensemble des travaux concluront cette partie.

1.2 Généralités sur les CNTs

1.2.1 Morphologie des CNTs

Le carbone se présente dans la nature sous quatre formes allotropiques : le diamant, le graphite, le carbone amorphe et le fullerène (Figure 1). Le diamant (figure 1b) est constitué d'atomes de carbone reliés entre eux par des liaisons hybrides sp^3 formant deux tétraèdres en position dièdrale enchevêtrée. Une simple rotation autour d'une liaison reliant les deux téraèdres suffit à faire perdre l'ordre à longue et moyenne distance conduisant à une structure amorphe (figure 1d). Mais c'est le graphite qui a thermodynamiquement la forme la plus stable et la plus abondante. Sa structure est constituée de feuillets à maille hexagonale non compacts, nommés graphènes, séparés d'environ 0.336 nm le long de la direction de leur normale. Dans chaque feuillet, les atomes de carbone sont fortement liés par des liaisons covalentes du type sp^2 tandis que les liaisons entre les feuillets sont faibles, de type π, ce qui explique le clivage et la faible dureté (Figure 1a). Lorsque le carbone est organisé en feuillets plans de graphène liés par des liaisons sp^2, il peut facilement s'enrouler pour générer un nanotube de carbone (Carbon Nanotubes, CNTs) [5]. Les CNTs sont une forme particulière de fullerènes. Si l'agencement des atomes de carbone se fait à l'aide de feuilles d'anneaux hexagonaux contenant des anneaux pentagonaux et parfois heptagonaux, la feuille n'est pas plate. Le premier fullerène découvert, de formule C_{60} (figure 1c), est composé de 12 pentagones et 20 hexagones dont la forme rappelle celle d'une sphère.

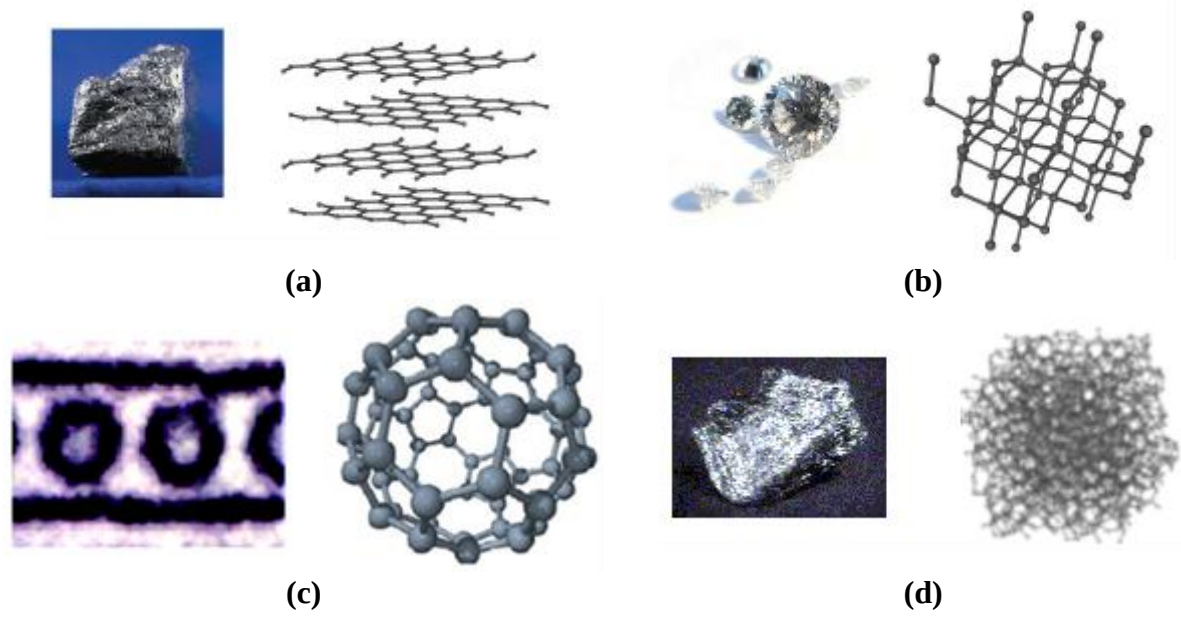


Figure 1 : Carbone sous 4 formes allotropiques : (a) graphite, (b) diamant, (c) fullerène et (d) amorphe.

On distingue deux types de nanotubes de carbone illustrés dans la Figure 2 : les multifeuillets (Multi-Wall Carbon NanoTubes, MWCNTs) et les monofeuillets (Single-Wall Carbon NanoTubes, SWCNTs). Un SWCNT est constitué d'un unique feuillet de graphène, alors qu'un MWCNT en est composée de plusieurs enroulés pour former une structure de cylindres concentriques séparés par une distance d'environ 0,34 nanomètres (l'épaisseur de van der Waals). Cette séparation correspond à la distance où un équilibre existe entre une force d'attraction et une force de répulsion des feuillets (Figure 2) dont les spécificités physiques seront explicitées en page 86 [6].

Le diamètre interne d'un MWCNT peut-être de 3 à 12 fois plus petit que le diamètre extérieur en fonction de la méthode et des conditions chimiques mises en œuvre durant le processus de croissance (Figure 3b et Figure 3d). Le diamètre externe quant à lui, peut atteindre des dimensions allant au-delà de la centaine de nanomètres. Connaissant ces deux paramètres, ainsi que la distance entre les parois d'un MWCNT, on peut déterminer le nombre de tube constituant un nanotube de carbone multifeuillets [7] :

Équation 1 :

$$N = 1 + \frac{D_{outer} - D_{inner}}{2\delta} \quad \text{Avec } \delta = 0.34nm \text{ la distance inter-paroi}$$

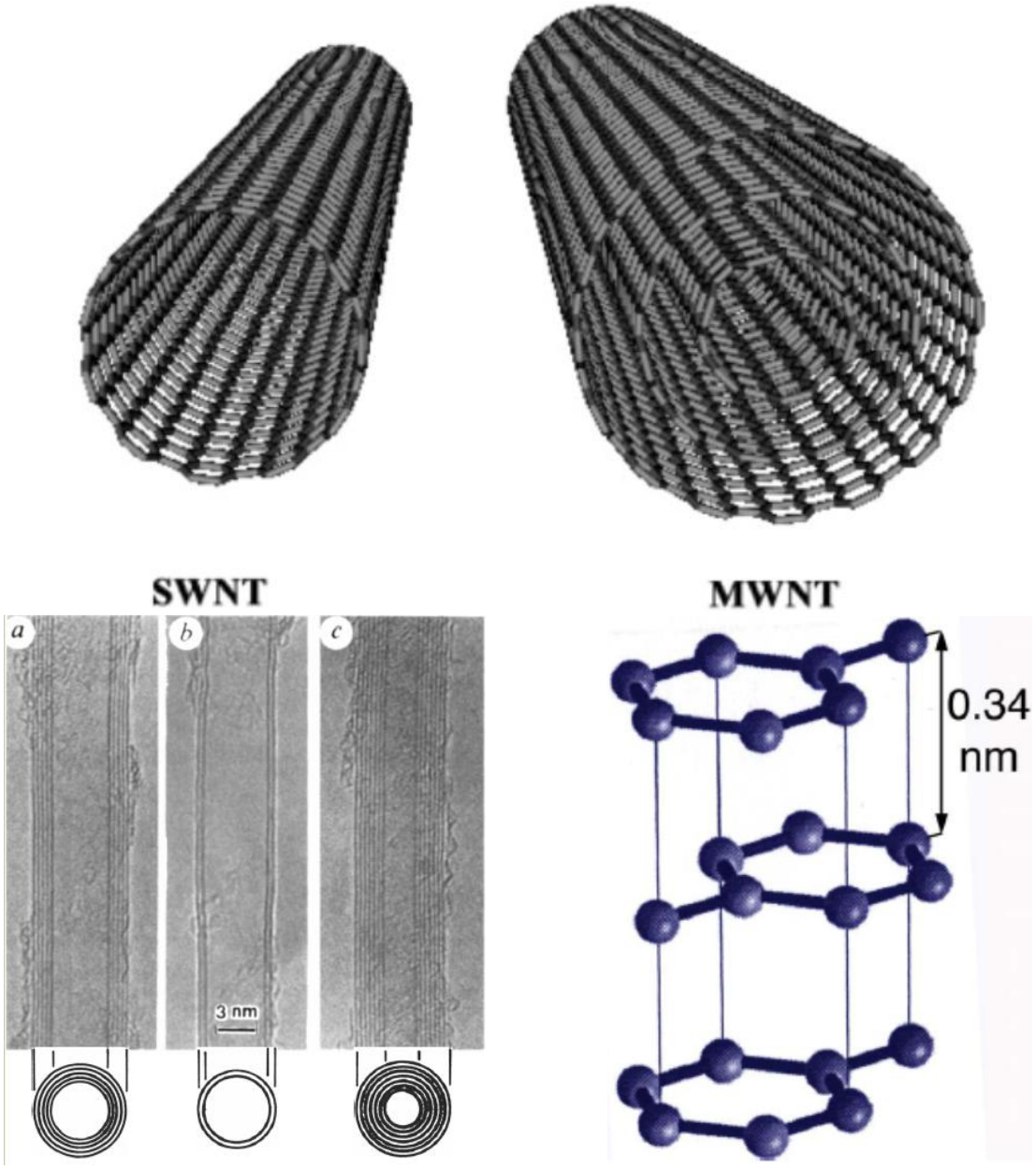


Figure 2: Représentation d'un nanotube de carbone monoparoi (SWCNT) et multiparoi (MWCNT) [8]. Image TEM de MWCNTs, (a) 5 feuillets, (b) 2 feuillets, (c) 7 feuillets [2] et illustration de la distance de van der Waals entre deux feuillets de graphène [9].

On distingue parmi les nanotubes de carbone, différentes géométries structurelles en fonction d'un angle α défini entre l'axe principale du tube et la génératrice des feuillets de graphène le composant (Figure 3). L'importance significative ou non de cet angle dépendant exclusivement de la méthode et des conditions chimiques employées au cours de la synthèse du CNT [10].

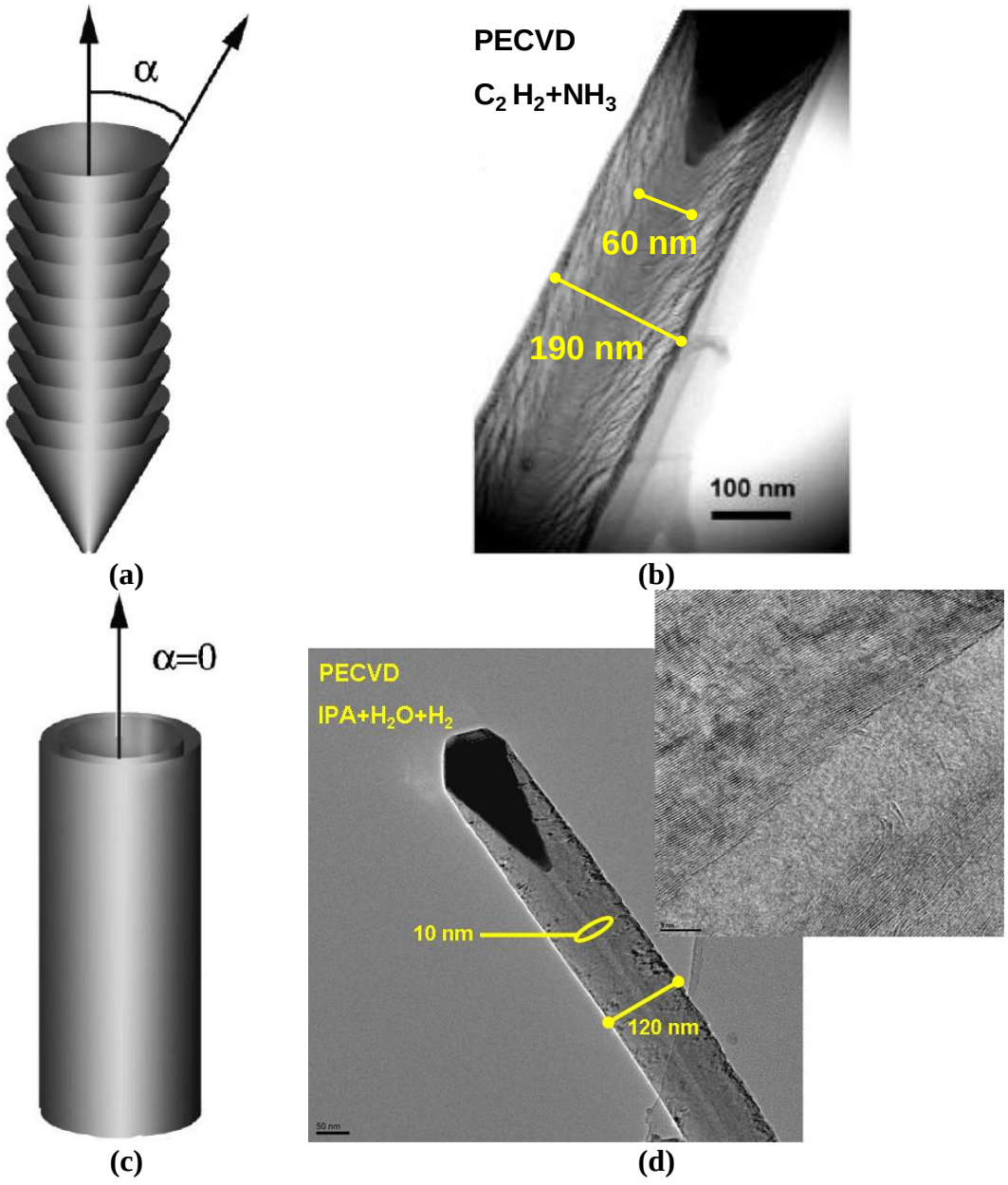


Figure 3 : (a et b) MWCNT dont les plans graphitiques sont configurés en une structure dite « bambou ». (c et d) MWCNT dont les plans graphitiques sont configurés en une structure dite « poupées russes ». [10] sauf Figure 3d (Image TEM Thales TRT Palaiseau France).

Avec des feuillets de graphène parallèles à l'axe du tube (Figure 3c et Figure 3d), les MWCNTs héritent des excellentes propriétés caractéristiques du graphite dans le plan :

- bonne conductivité électrique (Figure 15 page 31) et thermique (Tableau 4 page 40)
- forte résistance mécanique le long de l'axe principal (Tableau 2 page 27)
- toutes les liaisons étant satisfaites, ils sont inertes chimiquement (Figure 4 page 18)

Leurs atomes de carbone étant liés par des liaisons covalentes, les nanotubes de carbone sont moins sujets à l'électromigration que les métaux. Ils peuvent ainsi supporter des densités de courant allant jusqu'à 10^9 A/cm^2 [11], ce qui représente deux ordres de grandeur de plus que les métaux.

Le vecteur chiral $\overrightarrow{Ch}$ est une combinaison linéaire des vecteurs de base $\overrightarrow{a_1}$ et $\overrightarrow{a_2}$ du plan de graphène (Figure 4). On a donc $\overrightarrow{Ch} = n\overrightarrow{a_1} + m\overrightarrow{a_2}$, où (n, m) est un couple de nombres entiers définissant la structure du nanotube.

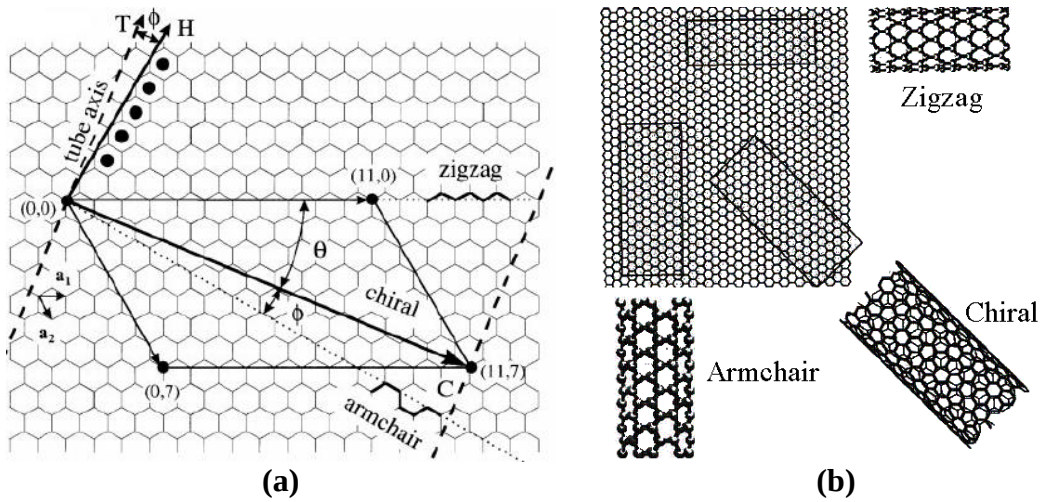


Figure 4 : (a) Structure d'un plan de graphène, le réseau hexagonal est décrit à partir des deux vecteurs de bases $\overrightarrow{a_1}$ et $\overrightarrow{a_2}$ [12]. (b) Les trois différentes hélices d'un nanotube de carbone [13].

Les nanotubes de carbone se divisent en deux familles, les non chiraux qui possèdent une symétrie miroir et les chiraux qui n'en disposent pas.

Il existe également trois types d'arrangement suivant l'angle chiral θ ($0 < \theta < 30°$), l'angle entre $\overrightarrow{Ch}$ et le vecteur de base $\overrightarrow{a_1}$:

- Si $\theta = 0°$ (soit n = 0 ou m = 0), les hexagones de carbone décrivent un cercle perpendiculaire à l'axe du tube, le nanotube est non chiral de type « zigzag » comme illustré dans la Figure 4.
- Si $\theta = 30°$ (soit m = n), les hexagones de carbone sont alignés parallèlement à l'axe du tube, le nanotube est non chiral de type « chaise » (armchair) comme illustré dans la Figure 4.
- Si $0° < \theta < 30°$ (soit $n \neq m$), les cycles forment une hélicité intermédiaire entre zigzag et armchair, le nanotube est chiral comme illustré dans la Figure 4.

Connaissant la longueur de la liaison carbone-carbone dans le graphène ($a_{c\text{-}c}$ = 142 pm), il est possible de calculer le diamètre d du nanotube ainsi que son hélicité θ à partir des indices (n, m) [14] :

Équation 2 :

$$d = a_{c-c} \times \frac{\sqrt{3 \times (n^2 + m^2 + nm)}}{\pi} \qquad \theta = \arctan\left(\frac{m \times \sqrt{3}}{m + 2n}\right)$$

1.2.2 Les différents procédés de croissance des nanotubes de carbone

Il existe différentes méthodes de synthèse qui ont chacune leurs avantages et leurs inconvénients. On distingue ainsi des procédés dits à hautes températures (> 1000 °C) dont la nucléation s'effectue en phase gazeuse, tels que l'arc électrique et l'ablation laser. Et des procédés dits à moyennes températures (< 1000 °C) dont la nucléation est réalisée directement sur le substrat, tels que la méthode par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) et ses dérivées.

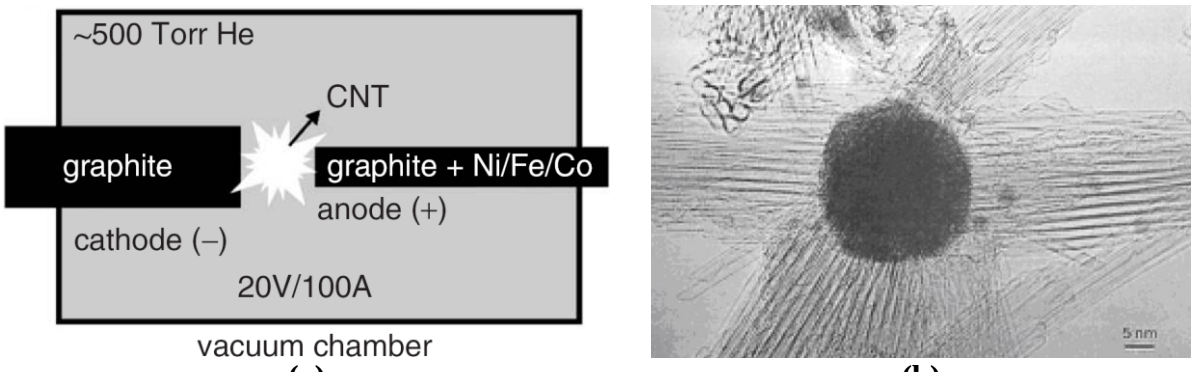
1.2.2.1 Procédés à hautes températures

Les méthodes de croissance de CNTs par arc électrique et ablation laser permettent d'obtenir des nanotubes de haute qualité en grande quantité, mais elles ne permettent pas un contrôle précis de leur position dans l'espace. Une procédure de purification est aussi nécessaire pour supprimer le carbone amorphe déposé lors de la mise en œuvre de la méthode. Dans ces procédés de croissance, la formation de nanotubes de carbone s'obtient par la sublimation d'une cible de graphite sous atmosphère inerte [15]. Pour expliquer la cinétique de croissance à haute température, on considère la dissolution du carbone dans un catalyseur métallique suivi par la diffusion du carbone dissout en surface de la particule, cette précipitation de carbone prend alors la forme d'un nanotube.

Ces deux méthodes produisent un ensemble de matériaux carbonés contenant des nanotubes (de 30 à 70 %), du carbone amorphe et des particules de carbone. De nombreux procédés de purification sont alors nécessaires afin de pouvoir extraire le nanotube de carbone et le positionner dans la configuration désirée.

1.2.2.1.1 Arc électrique

La technique par décharge consiste à produire un arc électrique entre deux électrodes, dont l'une est recouverte par un catalyseur (Fe, Ni ou Co). Un arc électrique est créé entre les deux électrodes de graphite espacées d'environ 1 cm dans une enceinte contenant un gaz neutre (He ou Ar) (Figure 5). On applique entre les électrodes une tension DC de 20 V à 35 V pour des courants variants de 50 A à 120 A, générant ainsi un plasma à 6000 °C (supérieur à la température de sublimation du graphite) entraînant la croissance des nanotubes. Cette méthode simple et peu coûteuse permet actuellement d'obtenir de bons rendements et une grande capacité de production aussi bien pour les nanotubes monofeuillets que multifeuillets [16].

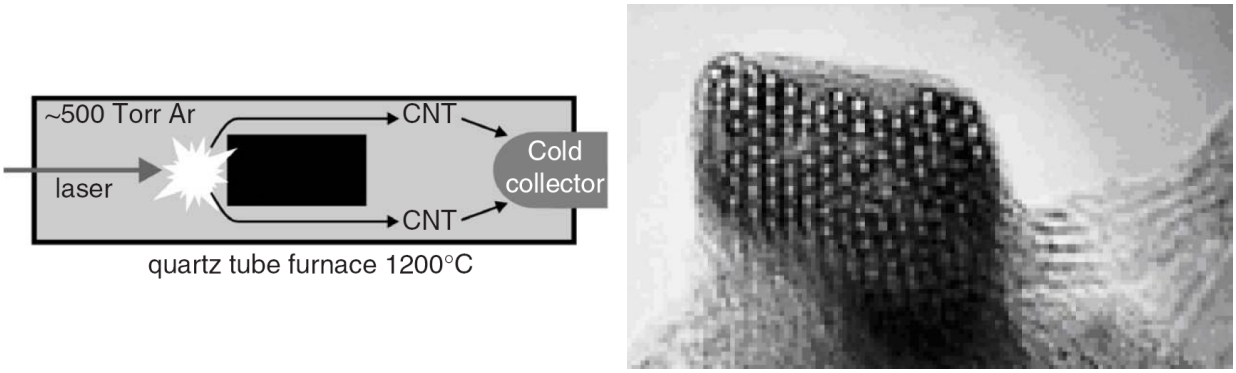


(a) **(b)**

Figure 5 : (a) Procédé de croissance de nanotubes de carbone par arc électrique [17] et (b) image TEM [18].

1.2.2.1.2 Ablation laser

La méthode par ablation laser repose sur la vaporisation de carbone issu d'un disque de graphite par irradiation laser, la cible étant placée sous vide dans un tube en quartz à 1200 °C sous une atmosphère d'argon (Figure 6). La complexité de la mise en œuvre repose sur l'utilisation de deux séries d'impulsions lasers successives de fréquences différentes.



(a) **(b)**

Figure 6 : (a) Procédé de croissance de nanotubes de carbone par ablation laser [17] et (b) image TEM [19].

1.2.2.1.3 Méthode solaire

Cette méthode consiste en la sublimation du graphite dans un gaz inerte grâce à l'énergie solaire. Par le biais de miroirs paraboliques, on concentre les rayons du soleil sur le graphite placé sous atmosphère contrôlée. La température est alors portée à 3700 °C, provoquant la vaporisation du carbone. Ce procédé permet la production de nanotubes de carbone SWCNTs et MWCNTs [20].

1.2.2.2 Procédés à moyennes températures

Le principe de croissance de nanotubes de carbone (SWCNTs et MWCNTs) à moyennes températures consiste à décomposer un gaz carboné (hydrocarbure ou monoxyde de carbone) sur des particules catalytiques métalliques pour des températures comprises entre 450 °C et 1000 °C. Ce paramètre thermique joue un rôle majeur sur la structuration et l'ordre local du carbone avec une amélioration du degré de graphitisation des parois aux températures les plus élevées (Figure 7).

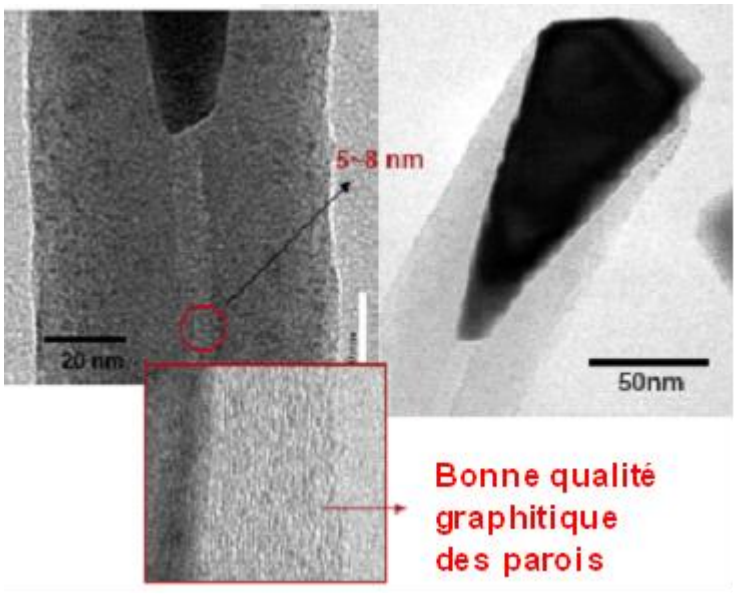
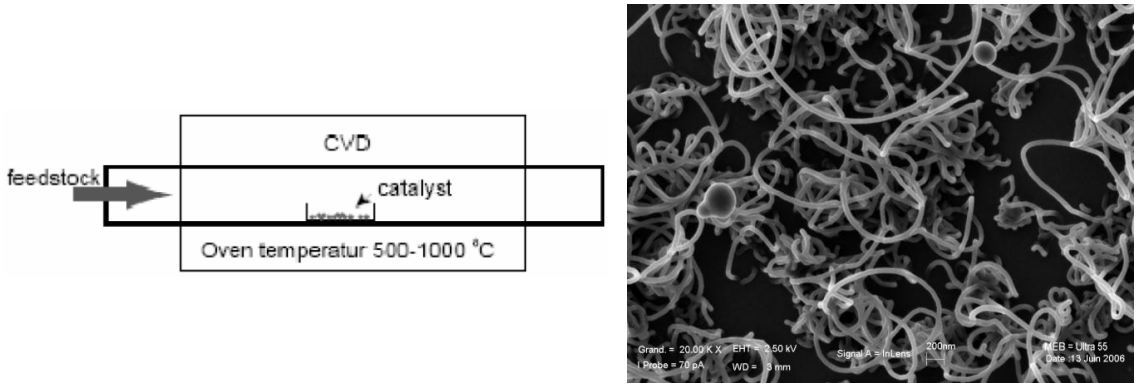


Figure 7 : Images TEM de la particule catalytique agglomérée au bout du MWCNT et de la qualité graphitique des parois.

1.2.2.2.1 Chemical Vapor Deposition (CVD)

La technique de décomposition catalytique en phase vapeur (CVD : Chemical Vapor Deposition) présente de nombreux avantages, elle est peu coûteuse, simple à mettre en œuvre et est industrialisable. De plus, elle permet l'ajustement et la modulation de nombreux paramètres tant physiques (température du four, pression …) que chimiques (nature du gaz, des catalyseurs …).

Après dépôt à température ambiante d'une fine couche de catalyseur sur le substrat, on porte la structure à température de croissance (de 450 °C à 1100 °C). Il se forme alors une multitude de nanoparticules dont la quantité est liée au catalyseur considéré (Fe, Co ou Ni paragraphe 2.2.5 page 59) et au volume de ce dernier. Le catalyseur se décompose alors dans les gaz carbonés, le carbone est dissout dans le catalyseur et précipité à l'extérieur formant ainsi la circonférence du CNT (Figure 8).



(a) **(b)**

Figure 8 : (a) Procédé de croissance de nanotubes de carbone par CVD [15] et (b) image MEB.

Par l'utilisation ou non d'une barrière de diffusion sous le catalyseur (typiquement de la silice SiO_2 ou du nitrure de titane TiN), il est possible de contrôler l'interaction de la particule catalytique avec son matériau de contact. Ainsi si l'interaction est faible (contact TiN, SiO_2) la croissance se fera à partir du bout du CNT (Figure 9 haut), sinon elle se fera à partir de la base (contact Si, etc…) (Figure 9 bas).

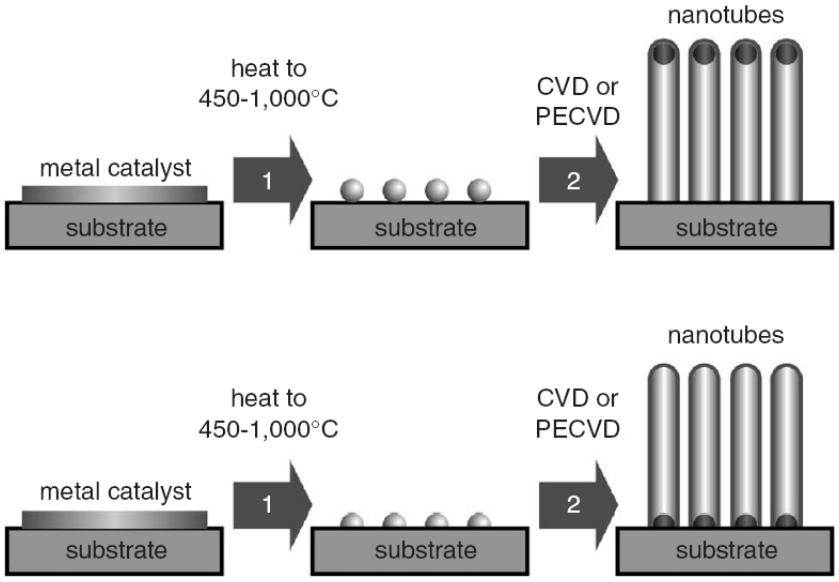


Figure 9 : Modes de croissance CVD par le bout et par la base des CNTs [17].

Le principal inconvénient de cette méthode à moyennes températures est la faible graphitisation des nanotubes, qui peuvent présenter sur leurs parois externes de nombreux défauts (heptagones, pentagones, lacunes) ou bien encore des impuretés (carbone amorphe) [15].

1.2.2.2.2 Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition (PECVD)

Une variante de la méthode CVD est la méthode dite PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition - Figure 10). Mais si ce procédé repose sur le même principe catalytique que la CVD, il n'en reste pas moins une méthode singulière avec deux aspects spécifiques. Le premier est la présence d'électrons libres dans le plasma en phase gazeuse favorisant une chimie différente de celle présente en CVD et le second est le champ électrique au niveau du porte-substrat qui oriente la croissance.

La croissance de nanotubes de carbone par PECVD requiert l'utilisation d'un mélange gaz hydrocarboné et d'agent gravant. En effet, de minces films de carbone amorphes peuvent être obtenus sans catalyseur à température ambiante en PECVD. Ainsi, pour que la synthèse soit sélective entre la croissance de nanotubes et celle de carbone amorphe, le gaz carboné (C_2H_2, CH_4, IPA,…) est dilué le plus fréquemment dans l'hydrogène, l'ammoniac ou l'eau. La proportion du premier gaz par rapport au second (Figure 10c) et la pression globale dans le réacteur de croissance (Figure 10d) doivent être judicieusement dosées pour permettre la croissance de nanotubes de carbone les plus long possibles. Le plasma offre alors une gravure physique par bombardement ionique contrôlée par la polarisation du substrat. Ce bombardement ionique détruit toutes les croissances extérieures aux particules catalytiques.

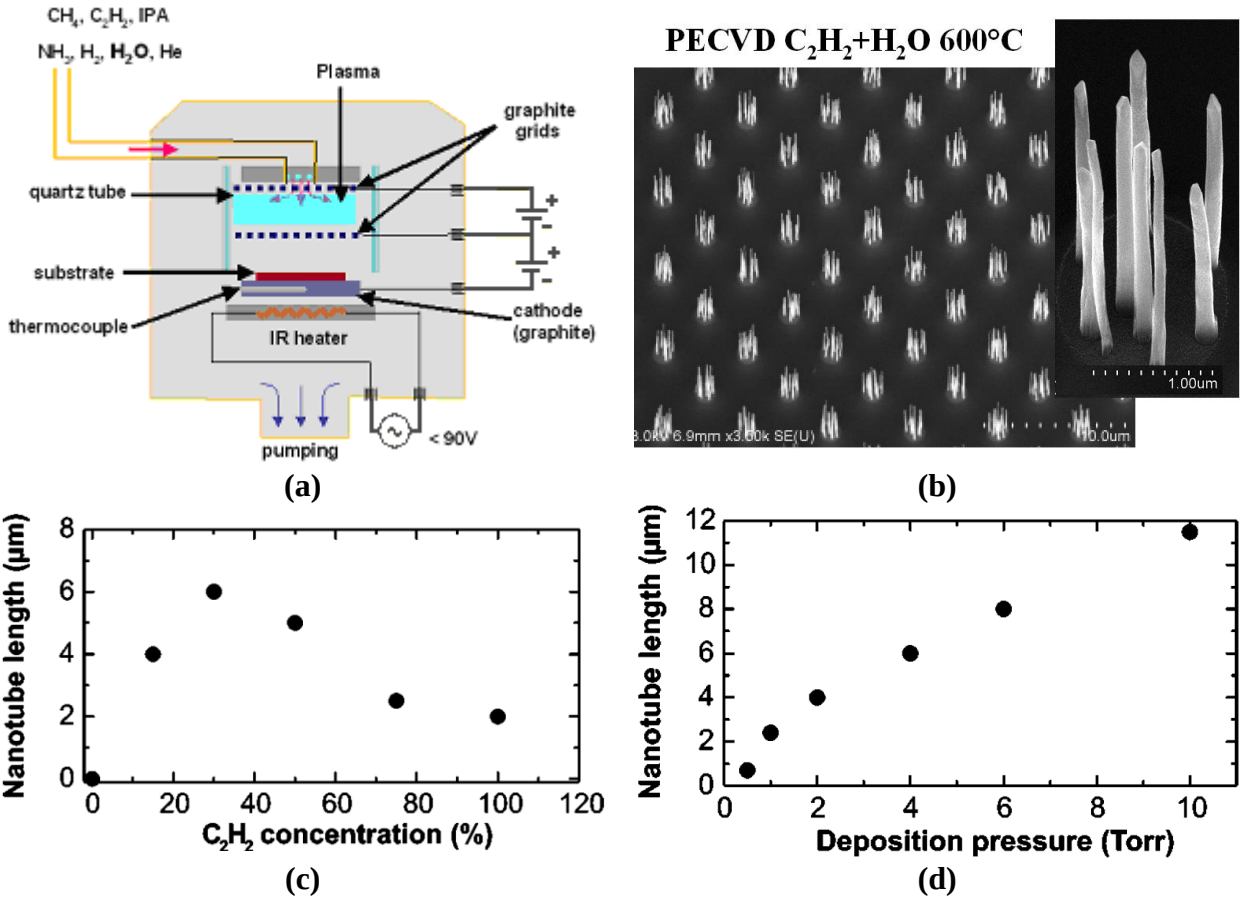


Figure 10 : (a) Procédé de croissance de nanotubes de carbone par PECVD. (b) Image MEB de nanotubes de carbone après synthèse PECVD. (c) Longueur du nanotube de carbone en fonction de la proportion du gaz précurseur C_2H_2 par rapport au gaz réducteur [21]. (d) Longueur du nanotube de carbone en fonction de la pression des gaz dans le réacteur de croissance PECVD [21].

Une des particularités de la PECVD est sa capacité à faire croître des nanotubes de carbone isolés et orientés perpendiculairement au substrat (Figure 10b). Ce phénomène, non observé en CVD, est dû à la présence d'un champ électrique alignant la croissance sur les lignes de champ.

Afin d'améliorer le contact électrique entre le nanotube de carbone et la barrière de diffusion métallique en nitrure de titane (TiN), il a été préconisé un recuit sous vide dont la finalité est de former un alliage de carbure de titane (TiC) par fusion entre le carbone et le TiN [22] [23] [7].

1.2.2.2.3 Décomposition catalytique (HIPCO)

Le procédé HiPCO (High Pressure dismutation of CO) se caractérise par un flux continu de pentacarbonyle de fer ($FeCO_5$) et de monoxyde de carbone (CO) introduit sous pression dans une enceinte chauffée à 1200 °C. La spécificité de ce mode de croissance à moyennes températures provient du fait que le catalyseur n'est pas déposé avant synthèse, mais durant cette dernière par la décomposition du gaz précurseur. De plus, le CO utilisé comme source de carbone ne se pyrolyse que sous ces conditions de croissance, ce qui permet la synthèse de nanotubes de carbone sans carbone amorphe. Cette méthode permet essentiellement la production de SWCNTs [5].

1.2.3 Propriétés physiques des CNTs

1.2.3.1 Propriétés mécaniques

1.2.3.1.1 Le moment d'inertie

Le moment d'inertie, ou moment quadratique, est une grandeur caractérisant la géométrie d'une section. Il est indispensable pour calculer la déformation d'une poutre sollicitée en torsion ou en flexion.

Dans le cas spécifique d'un nanotube de carbone, un cylindre creux est considéré comme modèle équivalent, avec pour section $S = \pi \times (R_{ext}^2 - R_{int}^2)$ où R_{ext} est le rayon extérieur du CNT et R_{int} le rayon intérieur.

Équation 3 :

$$I = \int_0^r r^2 dr \int_0^\pi r d\vartheta = \left(\int_0^{R_{ext}} r^2 dr \int_0^\pi r d\vartheta \right) - \left(\int_0^{R_{int}} r^2 dr \int_0^\pi r d\vartheta \right) = \frac{\pi}{4}\left(R_{ext}^4 - R_{int}^4\right)$$

1.2.3.1.2 Le module de Young

La liaison covalente C-C du graphène assure au nanotube de carbone des propriétés mécaniques exceptionnelles et notamment une rigidité très importante. En effet, les calculs montrent qu'un nanotube de carbone monofeuillet possède un module de Young très élevé comparable à celui du graphite (≈1 TPa), ce qui le rend cinq fois plus rigide que l'acier (Tableau 1). Toutefois, l'importance de cette donnée est liée à la qualité structurelle du CNT. Ainsi, si ce dernier présente de nombreux défauts, son module de Young sera beaucoup moins élevé. R. Gao *et al.* [24] ont mesuré pour des MWCNTs présentant des défauts structuraux, des modules élastiques pouvant descendre jusqu'à 26 GPa.

Le nanotube de carbone possède de plus une très grande résistance à la traction. Un nanotube monofeuillet pourrait résister à des élongations de l'ordre de 10 à 20 % sans se rompre. Lorsque des liaisons C-C cèdent sous la contrainte, les défauts occasionnés peuvent être redistribués sur l'ensemble de la structure. L'atome de carbone peut changer facilement d'hybridation, passant ainsi aisément d'une géométrie triangulaire (sp^2) à une géométrie tétragonale (sp^3) [25]. Le nanotube a ainsi une très grande facilité, à se courber jusqu'à des angles très importants, à se déformer ou à se tordre selon son axe [14] [15].

	Module de Young	Echelle
MWCNT	20 à 400 GPa	Nanométrique
SWCNT	1 à 1,8 TPa	Nanométrique
Nanofil SiNW	250 à 750 GPa	Nanométrique
Nanofil Si	152 GPa	Nanométrique
Nanofil Au	44 GPa	Nanométrique
Nanofil Rh	222 GPa	Nanométrique
Or	78 GPa	Massif
Diamant	900 GPa	Massif
Acier	200 GPa	Massif

Tableau 1 : Tableau comparatif du module de Young des nanotubes de carbone avec d'autres matériaux [26] [27] [28].

Treacy *et al.* ont mesuré une valeur expérimentale de 1,8TPa en mesurant *in situ* dans un microscope électronique à transmission (TEM), l'amplitude des oscillations thermiques de nanotubes multifeuillet (Annexe 5.2.2 page 164) [29].

Cependant, la rigidité d'un nanotube de carbone peut varier de la dizaine de GPa jusqu'au TPa (Tableau 2). Plusieurs paramètres, liés à la structure du CNT (monofeuillet ou multifeuillet) et à la méthode de croissance, influent sur la valeur du module de Young.

Poncharal *et al.* [30] ont mesuré au TEM la géométrie de MWCNTs ainsi que leur fréquence de résonance par excitation électrostatique (Annexe 5.1 et 5.2 page 160 et 163), permettant ainsi de déterminer leur module de Young. De cette observation, cette équipe a déduit que la rigidité d'un nanotube de carbone diminue avec l'augmentation de son diamètre (Figure 11a).

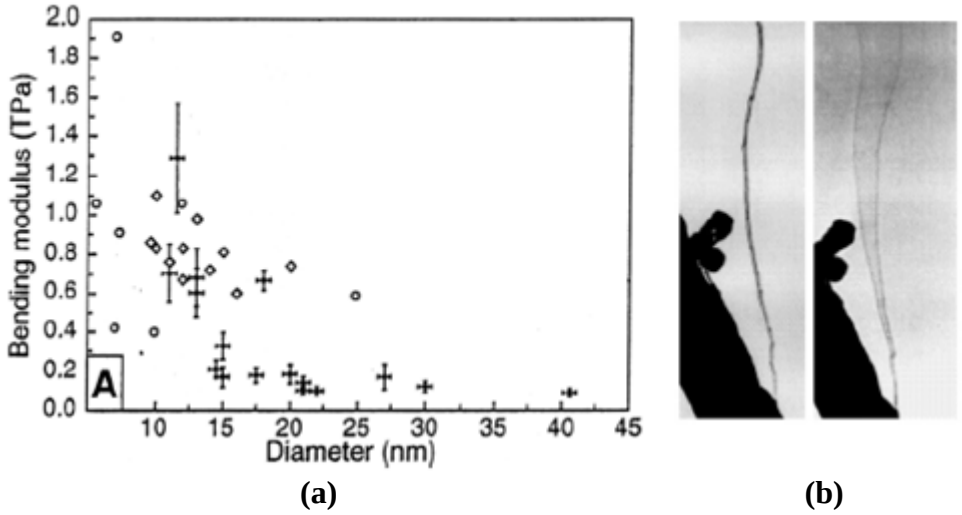


Figure 11 : (a) Variation du module de Young de MWCNTs en fonction de leur diamètre [30], (b) Image TEM d'un MWCNT en résonance [24].

Le Tableau 2 confirme cette hypothèse en illustrant différentes méthodes de mesures expérimentales de module de Young effectuées sur différents types de nanotubes de carbone issus de différentes méthodes de croissance. On constate ainsi que pour des conditions de synthèse identiques, le module de Young d'un SWCNT est plus important que celui d'un MWCNT. Le module de Young d'un MWCNT varie de 26,3 GPa à 377 GPa, alors que celui d'un SWCNT varie de 80 GPa à 1,33 TPa.

[31] [24] [32] [33] [27] [28] [34] [26] [35] [36]

Origine	Type de tube	Méthode de croissance	Méthode d'oscillation	Encrage des 2 extrémités du CNT	Illustration	Longueur	Diamètre extérieur	Diamètre intérieur	Amplitude de vibration	Gap du contact	Tension d'activation	Fréquence de résonance (mode fondamental)	Module de Young	Réf.
US	SWCNT	CVD	Oscillation par appliquation d'une tension sinusoïdale	encastré - encastré		300 nm	3,5 nm	X	X	X	X	382,7 MHz	80 Gpa	31
	MWCNT	CVD	Oscillation par appliquation d'une tension sinusoïdale	encasté - libre		5,5 µm	33 nm	18,8 nm	X	X	X	0,658 MHz	32 Gpa	24
						5,7 µm	39 nm	19,4 nm				0,644 MHz	26,5 Gpa	
						5 µm	39 nm	13,8 nm				0,791 MHz	26,3 Gpa	
						5,3 µm	45,8 nm	16,7 nm	X	X	X	0,908 MHz	31,5 Gpa	
						4,6 µm	50 nm	27,1 nm				1,420 MHz	32,1 Gpa	
						5,7 µm	64 nm	27,8 nm				0,968 MHz	23 Gpa	
	SWCNT	Evaporation laser	Oscillation thermique	encasté -libre		36,8 nm	1,5 nm	X	0,33 nm	X	X	X	1,33 Tpa	32
						24,3 nm	1,52 nm		0,18 nm				1,2 Tpa	
						23,4 nm	1,12 nm		0,3 nm				1,02 Tpa	
	MWCNT	CVD	Oscillation par appliquation d'une tension sinusoïdale	encasté - libre		10 µm	57 nm	17 nm	X	X	X	0,34 MHz	29,6 Gpa	33
	nanofil Si	X	Oscillation par appliquation d'une tension sinusoïdale	encasté - libre		11,8 µm	330 nm	X	X	X	X	1,928 Mhz	152 GPa	27
	nanofil Au	CVD	Oscillation par appliquation d'une tension sinusoïdale	encasté - libre		3,8 µm	290 nm	X	X	X	X	4,016 Mhz	44 GPa	28
	nanofil Rh	CVD				7,4µm						3,564 Mhz	222 GPa	
Japon	MWCNT	Arc électrique	Oscillation par appliquation d'une tension sinusoïdale	encasté - libre		3,248 µm	24,4 nm	X	X	X	X	2,88 Mhz	111 Gpa	34
						4,662 µm	24,5 nm					1,08 MHz	66 Gpa	
						7,686 µm	30,8 nm					0,55 MHz	80 Gpa	
						4,242 µm	24,8 nm					2,15 MHz	173 Gpa	
						2,683 µm	24,5 nm					2,39 MHz	35 Gpa	
						4,177 µm	18,4 nm					2,15 MHz	282 Gpa	
						3,261 µm	18,2 nm					2,16 MHz	114 Gpa	
						2,350 µm	18,3 nm					3,23 MHz	68 Gpa	
						3,253 µm	18,2 nm					2,45 MHz	150 Gpa	
						2,883 µm	20 nm					2,61 MHz	84 Gpa	
Corée	MWCNT	CVD	Commutation électrostatique liée à l'élasticité	encasté - libre		17 µm	300 nm	X	X	3,5 µm	93 V	X	377 Gpa	26
										2,2 µm	30 V			
						19,6 µm				6,9 µm	102 V			
Espagne	MWCNT	Arc électrique	Oscillation par appliquation d'une tension sinusoïdale	encasté - encatré		770 nm	8,4 nm	2,96 nm	X	X	X	154 MHz	300 Gpa	35
						1,37 µm	10 nm	2,52 nm				51 MHz	300 Gpa	
						650 nm	10 nm	2,52 nm				264 MHz	300 Gpa	
						785 nm	16 nm	2,4 nm				276 MHz	300 Gpa	
						195 nm	10 nm	2,52 nm				2,85 GHz	300 Gpa	
						265 nm	20 nm	2,32 nm				3,124 GHz	300 Gpa	
	SWCNT					640 nm	2 nm					30 MHz	1 Tpa	
						465 nm	1,2 nm	X				260 MHz	1 Tpa	
						572 nm	4 nm					290 MHz	1 Tpa	
						193 nm	1,4 nm					573 MHz	1 Tpa	
France	nanofil SiC	X	Oscillation par appliquation d'une tension sinusoïdale	encasté - libre		93 µm	206 nm					28,44 kHz	330 Gpa	36
						128 µm	246 nm					22,36 kHz	268 Gpa	
						2,5 µm	35 nm					11,15 MHz	660 Gpa	
						243 µm	270 nm	X	X	X	X	7,76 kHz	534 Gpa	
						103 µm	226 nm					41,05 kHz	750 Gpa	
						32,5 µm	208 nm					318,95 kHz	429 Gpa	

Tableau 2 : Etat de l'art des études mécaniques sur les nanotubes de carbone (voir annexes 5.2 à 5.2.3).

1.2.3.2 Propriétés électriques

1.2.3.2.1 Caractérisation semi-conductrice ou métallique des CNTs

A partir des indices de chiralité (n, m) d'un nanotube de carbone définis en page 18, le comportement métallique ou semi-conducteur peut être déterminé (Figure 12b) [37].

- Si n-m = 3p (n = m inclus) avec p un nombre entier, le nanotube de carbone présente un comportement métallique quelque soit son diamètre.
- Si n-m ≠ 3p, le nanotube de carbone présente un comportement semi-conducteur si son diamètre est en-dessous de 10nm et tend vers un comportement métallique s'il est au-dessus (Figure 12c).

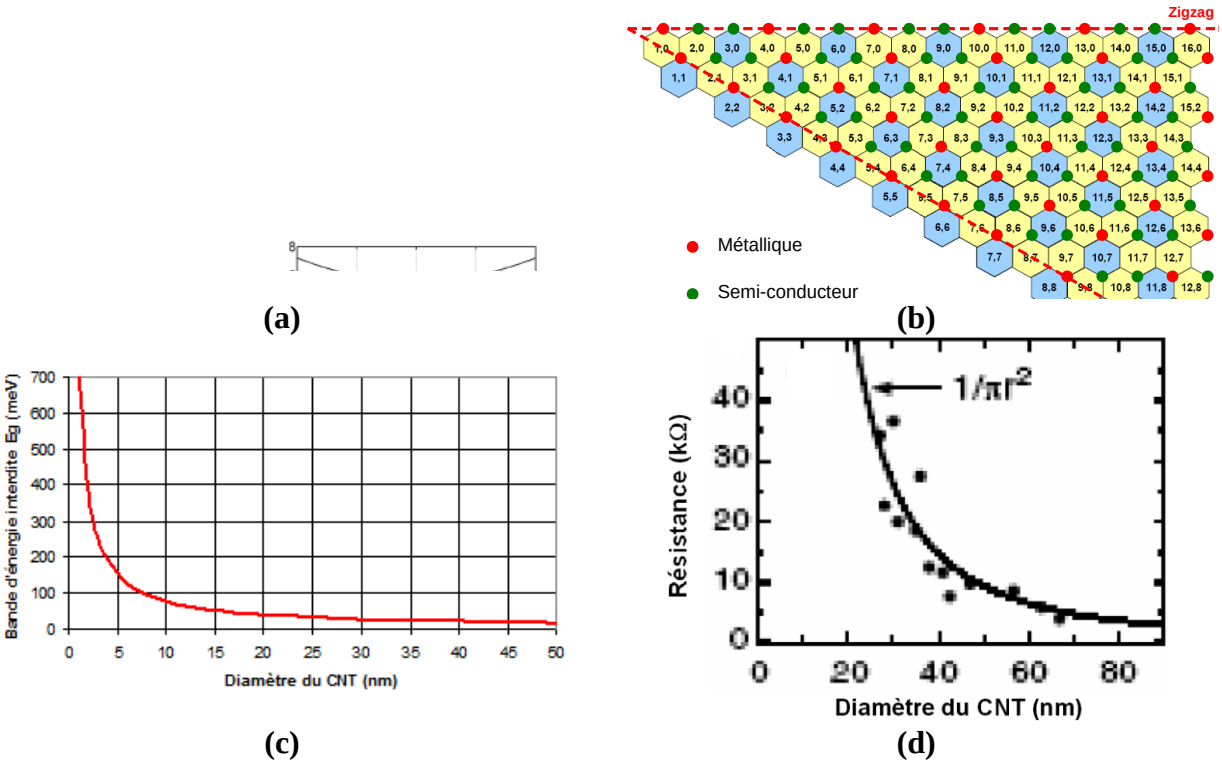


Figure 12 : (a) Largeur de la bande d'énergie interdite Eg d'un CNT semi-conducteur et métallique [38]. (b) Comportement métallique ou semi-conducteur d'un CNT en fonction de son vecteur chiral (n,m) et son diamètre [39]. (c) Largeur de la bande d'énergie interdite Eg d'un CNT semi-conducteur en fonction de son diamètre. (d) Résistance d'un CNT en fonction de son diamètre (le trait plein correspondant au résultat théorique et les points noirs à des valeurs expérimentales) [40].

La largeur de la bande d'énergie interdite Eg d'un nanotube de carbone (n, m) de type n-m ≠ 3p permet de caractériser son comportement métallique ou semi-conducteur et il se caractérise en fonction de son diamètre. Ainsi, si cette bande d'énergie interdite est quasiment nul (Eg ≈ 0), alors le CNT tend à être métallique avec un diamètre important (Figure 12a). Par contre, si cette bande d'énergie interdite est bien supérieur à 0 (Eg > 0), alors le CNT est semi-conducteur avec un faible diamètre (Figure 12a et c – Equation 4). Ces conclusions sont également corroborées par E. Olsson *et al*. qui démontrent que plus le diamètre d'un nanotube de carbone est important, plus sa conductivité électrique sera grande (Figure 12d).

Équation 4 : Quantification de la bande d'énergie interdite d'un CNT (n,m) de type n-m ≠ 3p

$$Eg = \frac{2 \cdot V_0 \cdot a_{C-C}}{d_t} \text{ [41]}$$

Avec a_{c-c} = 142 pm la longueur de la liaison carbone-carbone dans le graphite, V_0 = 2,7 eV et d_t le diamètre du nanotube.

On constate que sur une croissance de nanotubes de carbone monofeuillets, comprenant en moyenne autant de SWCNTs de type « armchair », « zigzag » et « chiral » (Figure 4 page 18), on obtient en moyenne 2/3 de tubes semi-conducteurs et 1/3 de tubes métalliques [42]. Alors que pour une croissance de nanotubes multifeuillets, on constate un comportement métallique global des tubes avec une résistance électrique propre à chacun diminuant avec l'augmentation du diamètre pour les MWCNTs de type semi-conducteur (Figure 12). La théorie prédit en effet que la mobilité électronique augmente avec le diamètre du nanotube et que de ce fait le « gap » de la bande d'énergie tend à être nul pour un MWCNT et ceux quelque soit le type d'enroulement.

J. Li *et al.* évoquent que la conductance d'un MWCNT, corollaire de son comportement métallique, peut être améliorée par l'introduction d'éléments comme l'indium (In) ou le bore (B) entre les parois du nanotube de carbone [43].

1.2.3.2.2 Influence de la géométrie d'un CNT sur ses propriétés électriques

La qualité de conduction électrique d'un nanotube de carbone métallique est définie selon le type de croissance utilisé pour la synthèse ainsi que par les deux paramètres géométriques du tube : son diamètre et sa longueur. On constate en observant la Figure 13 que plusieurs équipes ont ainsi caractérisé l'impact des deux paramètres géométriques sur la résistance électrique d'un nanotube de carbone.

J.Y. Park *et al.* (Figure 13a) ont mesuré l'incidence de la longueur d'un SWCNT métallique sur sa capacité de conduction d'un courant à tension fixe, pour un diamètre constant, via une pointe AFM se déplaçant pas à pas sur toute la longueur. Ils ont ainsi caractérisé l'évolution du courant circulant dans le nanotube de carbone et ont observé que plus la longueur de circulation du courant dans le tube est grande, plus sa résistance électrique est importante. Mais au-delà de 1µm de long l'influence de la longueur devient beaucoup moins significative et donc négligeable devant l'incidence que peut avoir le diamètre.

Svizhenko *et al.* (Figure 13b) ont caractérisé expérimentalement la perturbation que peut induire le diamètre d'un nanotube de carbone (SWCNT et MWCNT) sur sa conductance électrique à longueur constante. Ils observent que plus le diamètre est grand, plus le nanotube de carbone transporte un courant important à tension constante.

G.F. Close *et al.* (Figure 13c) ont mesuré la variation de la résistance électrique d'un nanotube de carbone multifeuillets en fonction de son diamètre à longueur constante. Cette expérience a été réalisée en disposant par diélectrophorèse (voir annexe 5.3 page 166) des MWCNTs de diamètre différents sur différents dispositifs constitués pour chacun de deux électrodes métalliques dissociées l'une de l'autre. La conclusion de cette expérience confirme les résultats émis par Svizhenko *et al.* , à-savoir que la résistance électrique propre d'un MWCNT diminue lorsque son diamètre augmente.

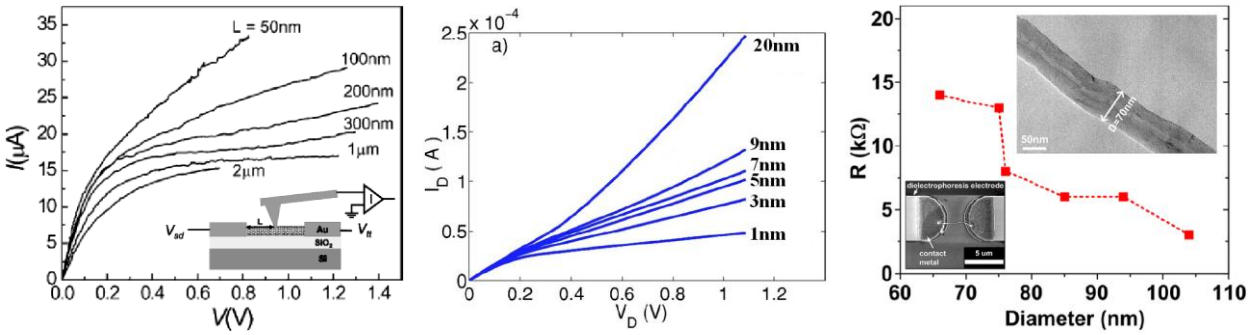


Figure 13 : (a) Conduction du courant dans un CNT en fonction de la tension appliquée pour différentes longueurs de circulation de courant [44]. (b) Conduction du courant dans un CNT en fonction de la tension appliquée pour différents diamètres [45]. (c) Résistance d'un CNT en fonction de son diamètre [46].

L'analyse de l'incidence du diamètre et de la longueur d'un nanotube de carbone convient dans le cas où l'étude porte sur un SWCNT. Mais si l'étude se focalise sur un MWCNT, il faut alors également observer l'impact des différentes parois de ce dernier sur sa conductance propre.

T.D. Yuzvinsky *et al.* [47] ont caractérisé expérimentalement la conduction électrique de chacune des parois d'un MWCNT. La manipulation a consisté à observer au cours du temps la destruction progressive de chacune des parois du nanotube soumises à une puissance bien supérieure à sa tolérance (Figure 14a). Le résultat ainsi observé est que la destruction s'opère de la paroi extérieure vers la paroi intérieure (Figure 14b) et qu'elle engendre une diminution du courant de 13,5 µA par paroi détruite. Le corollaire est que l'aptitude de conduction en courant de chaque paroi d'un nanotube de carbone multifeuillets est linéaire et proportionnelle à sa circonférence.

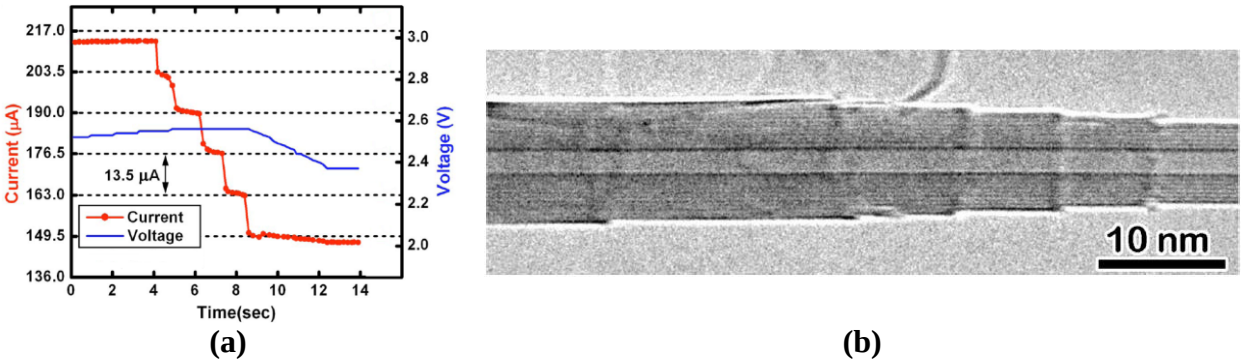


Figure 14 : Destruction paroi par paroi d'un MWCNT. (a) Graphique illustrant la chute du courant par pas de 13.5 µA traversant le MWCNT au fur et à mesure que ces dernières sont détruites. (b) Image TEM montrant la destruction paroi par paroi.

Q. Yan *et al.* [48] ont mis en évidence que lorsqu'un nanotube de carbone multifeuillets est déposé sur deux électrodes indépendantes l'une de l'autre, seule la paroi extérieure du MWCNT assure la conduction électrique comme l'illustre la Figure 15. En effet on y observe que la présence de la totalité des parois (Figure 15a) ou d'une en moins (Figure 15b) ne change pas le niveau de conduction électrique du nanotube (Figure 15c). On peut donc déduire de ce résultat que lorsque deux nanotubes verticaux sont en contact, seules les parois extérieures de ces derniers induisent la conduction et aucun effet de couplage dû aux parois intérieures n'apporte de variations significatives.

M. Ahlskog *et al.* [49] développent l'argument d'une très grande anisotropie de la conductance dans le graphène afin de justifier le couplage négligeable inter-parois d'un MWCNT lorsque ce dernier est simplement déposé entre deux électrodes dissociées.

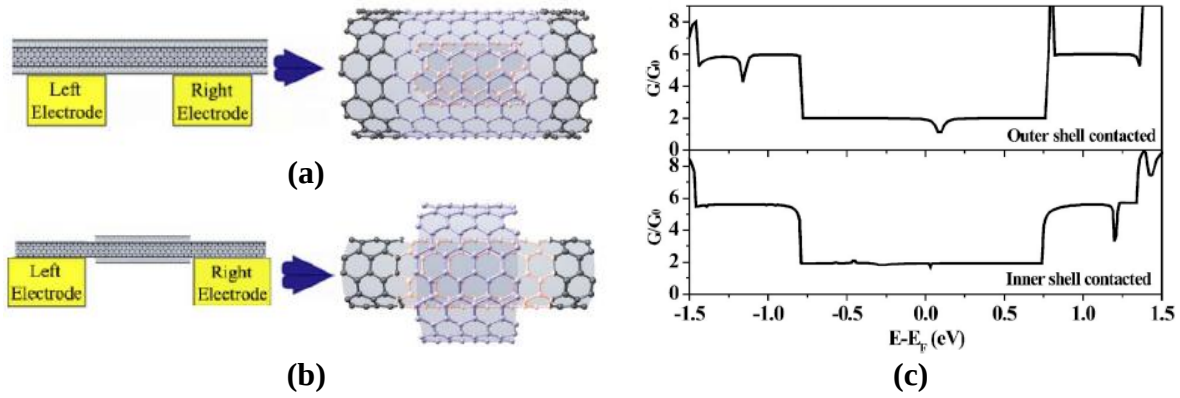
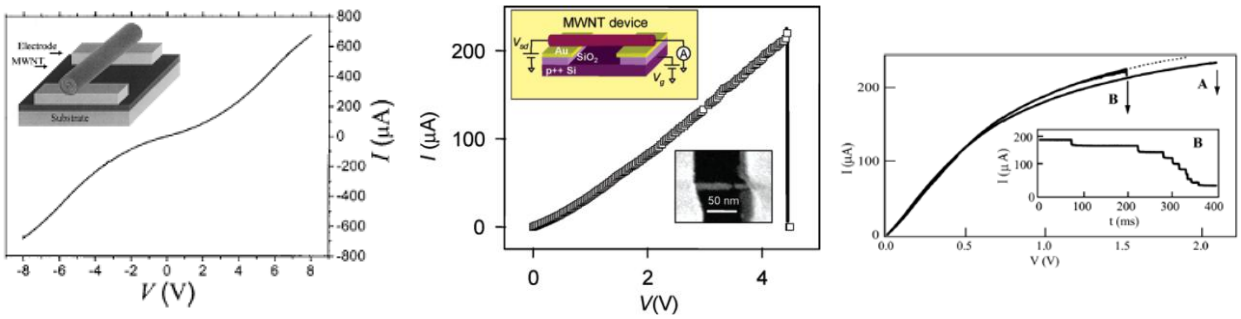


Figure 15 : (a et c) Conduction électrique d'un nanotube disposé entre deux électrodes avec deux parois et (b et c) une paroi [48].

1.2.3.2.3 Tenue en puissance d'un MWCNT

La tenue en puissance d'un nanotube de carbone représente une donnée indispensable à déterminer afin de connaître les limites du couple tension – courant susceptible d'être appliquées à ses bornes.



(a) **(b)** **(c)**

Figure 16 : (a) Mesure du courant de saturation d'un MWCNT sous tension entre deux électrodes. (b) Mesure du courant de saturation d'un MWCNT sous atmosphere d'argon jusqu'à destruction de ce dernier. (c) Mesure en puissance du point de rupture d'un MWCNT dans le vide (400 µW courbe A) et à air ambiant (320 µW courbe B). (In c) Graphique illustrant la décroissance du courant maximal circulant dans le MWCNT à air ambiant au fur et à mesure que ses parois sont détruites au cours du temps [11] [50] [51].

Si on observe à nouveau la Figure 14a du paragraphe précédent on constate que la destruction progressive des parois du nanotube multifeuillets débute sous un couple courant – tension de 215 µA et 2,5 V, soit une puissance de 540 µW.

Y.X. Liang *et al.* [11], ont réussi expérimentalement à faire circuler un courant de 670 µA dans un MWCNT sous une polarisation en tension de 8 V (Figure 16a). Ce couple (U, I) = (670 µA, 8 V) constitue au final une puissance de 5,36 mW dans le nanotube de carbone. Un résultat expérimental similaire a également été obtenu par V.V. Deshpande *et al.* [50] avec un courant maximal de 220 µA sous une polarisation en tension de 4,45 V (Figure 16b). Ces deux paramètres permettent de définir une puissance maximale de 979 µW dans le MWCNT avant la destruction de ce dernier avec le brusque saut de 220 µA à 0 µA au-delà des 4,45 V de tension de polarisation.

Sur le même principe expérimental que Q. Yan *et al.* [48], P.G. Collins *et al.* [51] ont déterminé la puissance maximale pouvant circuler dans un MWCNT, en observant la destruction progressive des parois du nanotube au cours du temps (Figure 16c in). Cette équipe a également mis en évidence l'importance du milieu dans lequel se trouve le nanotube par rapport à sa stabilité et sa dynamique de rupture. En effet, on constate sur la Figure 16c qu'un MWCNT a un seuil de puissance dans le vide de 400µW avec un couple courant – tension (U, I) égal à (200 µA, 2 V), alors qu'à l'ambiante ce seuil de puissance est plus faible à 320 µW pour un couple courant – tension (U, I) égal à (200 µA, 1,5 V).

Cependant, il faut souligner que ces mesures ont été effectuées sur des MWCNTs réalisés au cours de croissances de type arc électrique à très haute température (voir page 19). De ce fait, ces nanotubes présentent de meilleures qualités cristallines et sont plus aptes à une bonne conductivité thermique et électrique, que ceux synthétisés à moyenne température par la méthode CVD (voir page 21).

1.2.3.2.4 Caractéristiques hyperfréquences des MWCNTs

Dans le cadre de la réalisation d'un commutateur NEMS RF à base de nanotubes de carbone, il est indispensable de définir et de maîtriser les différents aspects hyperfréquences caractéristiques des CNTs exclusivement métalliques, à-savoir les MWCNTs. Afin d'obtenir des simulations hyperfréquences les plus conformes à la réalité, il faut notamment définir la permittivité relative, la perméabilité relative et la conductivité électrique des MWCNTs.

1.2.3.2.5 Modèle électrique équivalent à un MWCNT

Comme le montre les Figure 17a et b, un nanotube mono-paroi peut-être caractérisé électriquement par, une résistance propre R aussi appelé résistance mécanique quantique, une inductance cinétique L_K et une capacité quantique C_Q. La capacité électrostatique C_{ES} modélisant quant à elle le couplage avec un plan de masse pouvant être aussi bien une surface (Figure 17a) ou un autre nanotube de carbone (Figure 17e). Lorsque l'on souhaite étudier le cas du MWCNT (Figure 17c), on constate que son circuit électrique équivalent (Figure 17d) est plus complexe que pour le cas précédent. Une résistance interparoi (R_t) et une capacité de couplage inter-parois (C_{CM}) doivent dans cette configuration être considérées. Enfin, si l'on se tourne vers le modèle électrique équivalent du dispositif NEMS en configuration pince (Figure 17e), on constate que ce dernier inclut l'ensemble des éléments actifs et passifs au sein d'une structure complexe (Figure 17f)

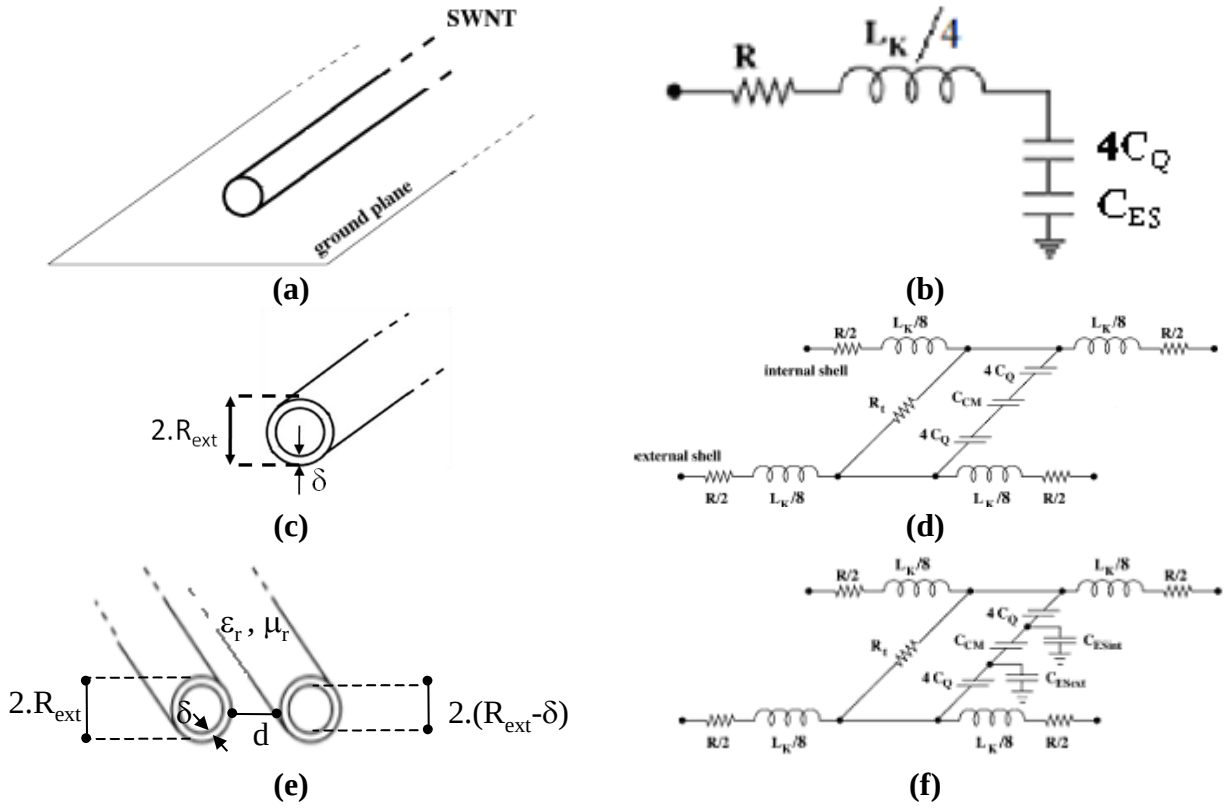


Figure 17 : (a) Visuel d'un nanotube de carbone monoparoi au dessus d'un plan de masse et (b) circuit RLC équivalent. (c) Visuel d'un MWCNT et (d) circuit RLC équivalent. (e) Visuel de deux MWCNTs en vis-à-vis et (f) circuit RLC équivalent [52].

Équation 5 : Résistance propre à chaque nanotube de carbone [52]

$$R = \begin{cases} \dfrac{h}{4e^2}, & if \quad L < \lambda_{high} \\ \dfrac{h}{4e^2}\left[\dfrac{L}{0.64(L-\lambda_{high})+\lambda_{high}}\right], & if \quad \lambda_{high} < L < \lambda_{low} \\ \dfrac{h}{4e^2}\left[\dfrac{L}{0.64(\lambda_{low}-\lambda_{high})+\lambda_{high}}\right], & if \quad L > \lambda_{low} \end{cases}$$

Où h est la constante de Planck (= 6,63.10^{-34} J.s), e la charge d'un électron (= 1,602.10^{-19} C) et L la longueur du nanotube de carbone. La valeur de λ est donnée par le mécanisme de diffusion et dépend de la longueur du nanotube. Pour les faibles polarisations (V < 160 mV), le principe de diffusion mécanique est du aux phonons acoustiques ayant un libre parcours moyen de rétrodiffusion de 1 à 1,6 µm (λ_{low}). Pour une polarisation supérieure, ce sont les propriétés optiques des phonons (avec une énergie ~ 160 meV) qui limitent la zone de diffusion (λ_{high} ~ 30 nm). De ce fait il est évident que la résistance d'un nanotube de carbone sera fonction de la tension de polarisation et de sa longueur [38].

Équation 6 : Résistance interparoi

La résistance interparoi R_t est le modèle électrique équivalent du transport électronique entre les parois d'un MWCNT. Cette circulation de type tunnel est définie de la façon suivante [53]:

$$R_t = (10k\Omega/\mu m)\cdot L$$

Équation 7 : L'inductance cinétique

L'inductance cinétique L_k a pour origine des porteurs de charges inertiels, car les électrons ne réagissent pas instantanément au champ électrique appliqué. Un nanotube de carbone possède quatre tunnels de propagation quantique, donc la valeur effective de l'inductance cinétique dans le circuit équivalent est donnée par $L_k/4$.

$$L_k = \frac{h}{2e^2 v_F} L$$

Où V_F = 8.10^5 m/s la vitesse de Fermi du graphite et d'un nanotube de carbone

Il faut également signaler la présence d'une inductance magnétique liée au plan de masse en série avec l'inductance cinétique, mais sa contribution est suffisamment faible pour pouvoir être négligée. Elle est de la forme :

$$L_M = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \cosh^{-1}\left(\frac{2d}{R_{ext}}\right)\cdot L$$

Où $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$ H/m la perméabilité du vide, $\mu_r = 1$ la perméabilité relative du nanotube de carbone (égale à celle du graphite), d la distance entre les MWCNT et R_{ext} le rayon extérieur.

Équation 8 : La capacité quantique

D'un point de vue classique, ajouter un électron à un gaz d'électrons ne coûte pas d'énergie car cela se fait avec une énergie arbitraire sur le système. Par contre, d'un point de vue quantique, en raison du principe d'exclusion de Pauli, il n'est pas possible d'ajouter un électron avec moins d'énergie que l'énergie de Fermi. On peut donc assimiler ce coût en énergie à une capacité quantique efficace [54]. De même que pour l'inductance cinétique, les quatre tunnels de propagation quantique font que dans le circuit équivalent la capacité quantique est donnée par 4 C_Q.

$$C_Q = \frac{2e^2}{h\upsilon_F} L$$

Équation 9 : La capacité électrostatique entre deux nanotubes de carbone en parallèle

Les nanotubes de carbone sont considérés comme des systèmes unidimensionnels, l'aspect métallique d'un MWNT constitue donc un bouclier électrostatique efficace aux parois internes. Les capacités de couplages entre les parois internes et le plan de masse peuvent de ce fait être négligées, seule la paroi externe d'un MWCNT est couplée au plan de masse. La capacité électrostatique entre le nanotube de carbone et le plan de masse est donc définie de la façon suivante :

$$C_{ES_ext} = \frac{\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}{\cosh^{-1}\left(\frac{d}{2R_{ext}}\right)} L,\ ..., C_{ES_\mathrm{int}} = \frac{\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}{\cosh^{-1}\left(\frac{d}{2\left(R_{ext}-(N-1)\delta\right)}\right)} L$$

Avec $\varepsilon_0 = 8{,}854\text{x}10^{-12}$ F/m la permittivité du vide, $\varepsilon_r = 20$ (au-delà de 1 GHz de fréquence de travail) la permittivité relative d'un MWCNT (Figure 18), $\delta = 0{,}34$ nm la distance inter-parois (ou distance de van der Waals) et N le nombre de parois du MWCNT.

Équation 10 : La capacité de couplage électrostatique entre deux parois adjacentes d'un MWCNT

En ce qui concerne la capacité de couplage électrostatique entre parois adjacentes, son expression dérive d'une configuration coaxiale métallique classique [55]:

$$C_{CM_1} = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}{\ln\left(\frac{R_{ext}}{R_{ext}-\delta}\right)} L, C_{CM_2} = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}{\ln\left(\frac{R_{ext}-\delta}{R_{ext}-2\delta}\right)} L, ..., C_{CM_N} = \frac{2\pi\varepsilon_0\varepsilon_r}{\ln\left(\frac{R_{ext}-(N-1)\delta}{R_{ext}-N\delta}\right)} L$$

1.2.3.2.6 Permittivité relative et conductivité électrique d'un MWCNT

La permittivité relative constitue l'une des valeurs à déterminer pour la modélisation du NEMS RF, car cette dernière a une influence non-négligeable sur la capacité électrostatique du circuit électrique équivalent à deux MWCNTs en vis-à-vis formant un commutateur à base de nanotubes de carbone (Figure 17e et f). C.A. Grimes *et al.* [56] ont quantifié expérimentalement, la conductivité électrique propre d'un nanotube multifeuillets dont la valeur se rapproche fortement de celle du graphite (Tableau 3).

	Conductivité Electrique (S/m)	Permittivité
MWCNT	77800	20 pour f > 2 GHz
Graphite	70000	1

Tableau 3 : Conductivité électrique et permittivité du graphite et d'un MWCNT.

Néanmoins, le nanotube de carbone multifeuillets se différentie électriquement du graphite par sa permittivité, qui malgré sont aspect métallique, tend vers une valeur proche de 20 pour de hautes fréquences comme l'illustre la Figure 18.

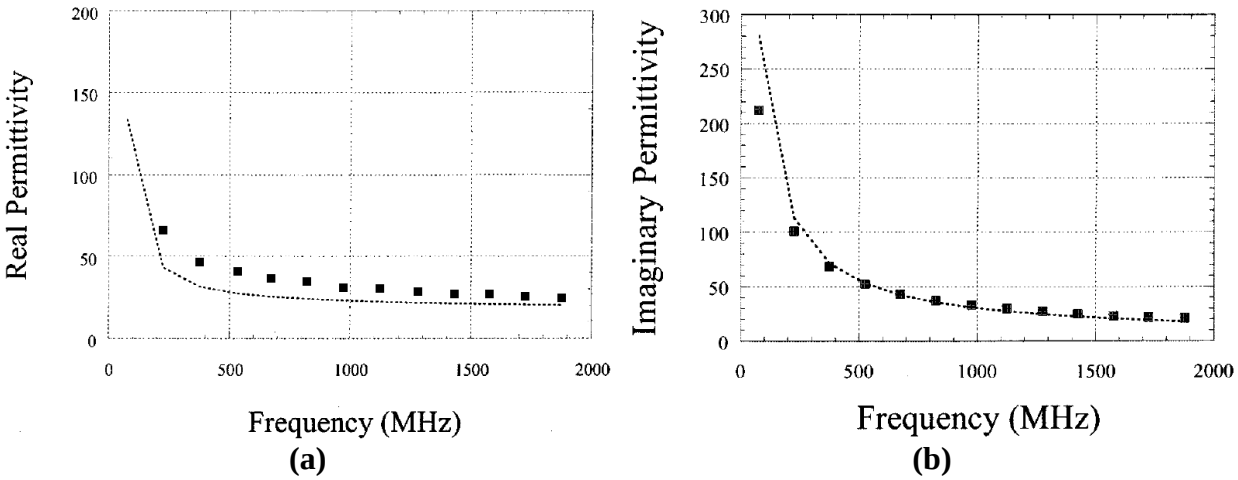


Figure 18 : Spectre de la permittivité d'un MWCNT en fonction de la fréquence. (a) La partie réelle étant liée à la propagation du signal hyperfréquence et (b) la partie imaginaire aux pertes.

1.2.3.2.7 Comportement hyperfréquence d'un MWCNT

S.C. Jun *et al.* [57] ont mis en évidence les paramètres S en transmission et en adaptation (voir annexe 5.4 page 167) d'un MWCNT synthétisé par la méthode PECVD via des mesures effectuées par l'intermédiaire d'une structure coplanaire obéissant physiquement au modèle d'une ligne en transmission dite « des télégraphistes » (Figure 19a et b).

Pour ce faire, ils ont déterminé un modèle équivalent d'une structure coplanaire ouverte dont les deux éléments indépendants sont reliés par un MWCNT pour former une structure fermée (Figure 19c).

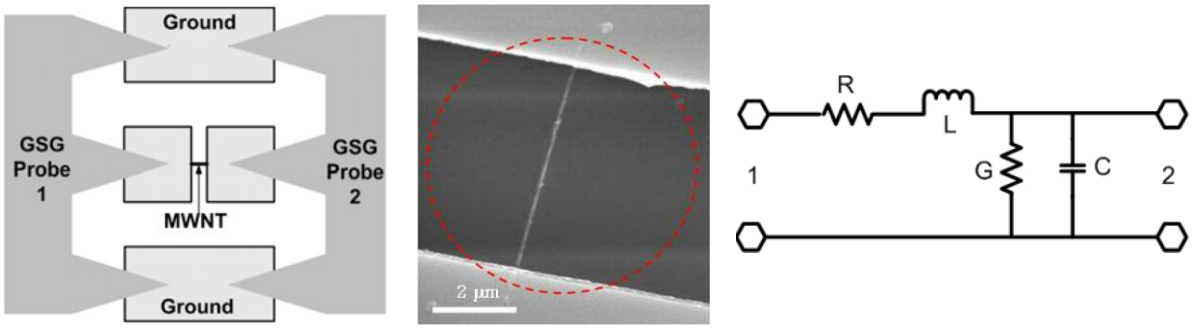
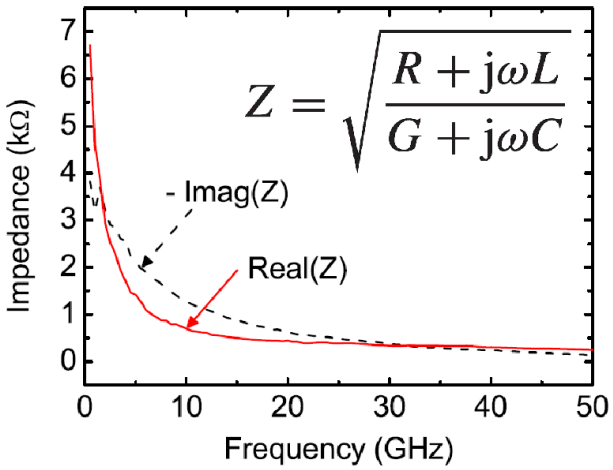


Figure 19 : (a) Schéma illustrant la mesure sous pointes HF d'une ligne coplanaire ouverte fermée via un MWCNT. (b) Image MEB de la longueur du MWCNT et de la distance séparant les deux moitiés de la ligne. (c) Circuit RLCG équivalent à la structure.

Un guide d'onde coplanaire est caractérisé en fréquence par sa constante de propagation γ et son impédance caractéristique Z dont les valeurs sont définies en fonction des éléments passifs et actifs du circuit RLCG (Équation 11).

Équation 11 :

$$\gamma = \sqrt{(R + jL\omega)(G + jC\omega)}$$



Avec ω=2πf, f étant la fréquence de travail.

Après avoir mesuré ces deux éléments, on remonte aisément aux valeurs des éléments passifs et actifs du circuit RLCG.

Équation 12 :

$$R = \mathrm{Re}\{\gamma Z\},\ L = \frac{\mathrm{Im}\{\gamma Z\}}{\omega},\ C = \frac{\mathrm{Im}\left\{\gamma / Z\right\}}{\omega}\ et\ G = \mathrm{Re}\left\{\frac{\gamma}{Z}\right\}$$

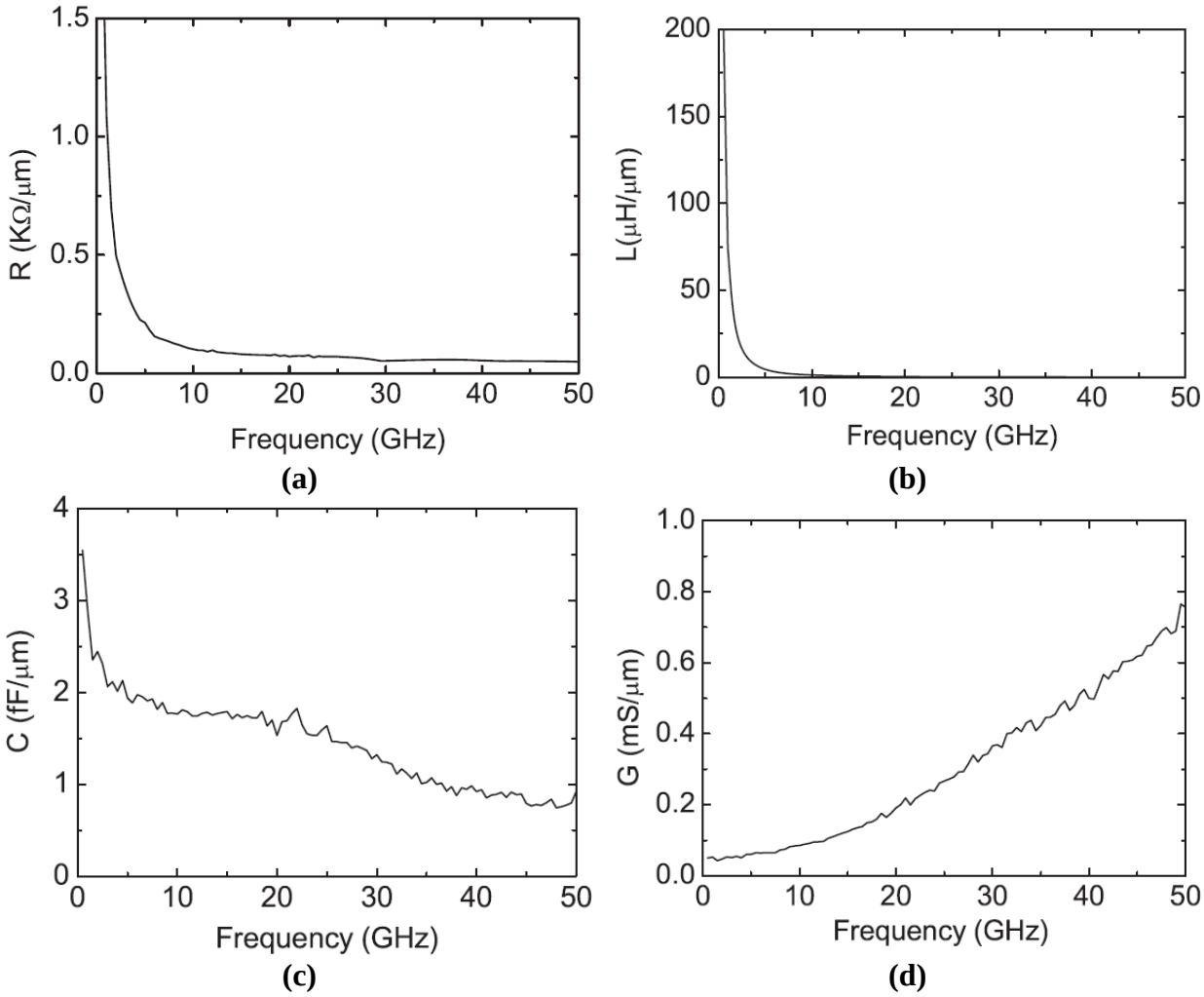


Figure 20 : Variations des paramètres RLCG du circuit équivalent à une ligne coplanaire ouverte reliée via un MWCNT en fonction de la fréquence (Figure 19). (a) Résistance par unité de longueur. (b) Inductance par unité de longueur. (c) Capacité par unité de longueur. (d) Conductance par unité de longueur.

On constate sur la Figure 20 que les éléments RLC du circuit équivalent (Figure 19a et c) subissent une décroissance avec la montée en fréquence, seule la conductance G augmente légèrement. Ce comportement traduit le fait que pour des fréquences de travail élevées, au-delà de 40 GHZ, le MWCNT subit un minimum de pertes en transmission.

Ce constat est confirmé par les mesures hyperfréquences présentées Figure 21e sur laquelle on peut observer que le comportement du MWCNT en transmission en fonction de la fréquence prend l'allure d'une courbe de type logarithmique dont la valeur tend à devenir nulle au-delà de 40 GHz. On obtient donc, au-delà de cette limite, la transmission maximale en décibel d'un MWCNT se rapprochant ainsi d'une structure coplanaire fermée (Figure 21c).

Cette constatation s'applique également au résultat en adaptation (Figure 21d) sur lequel on constate que plus on monte en fréquence, plus le MWCNT tant à se comporter comme une ligne coplanaire fermée.

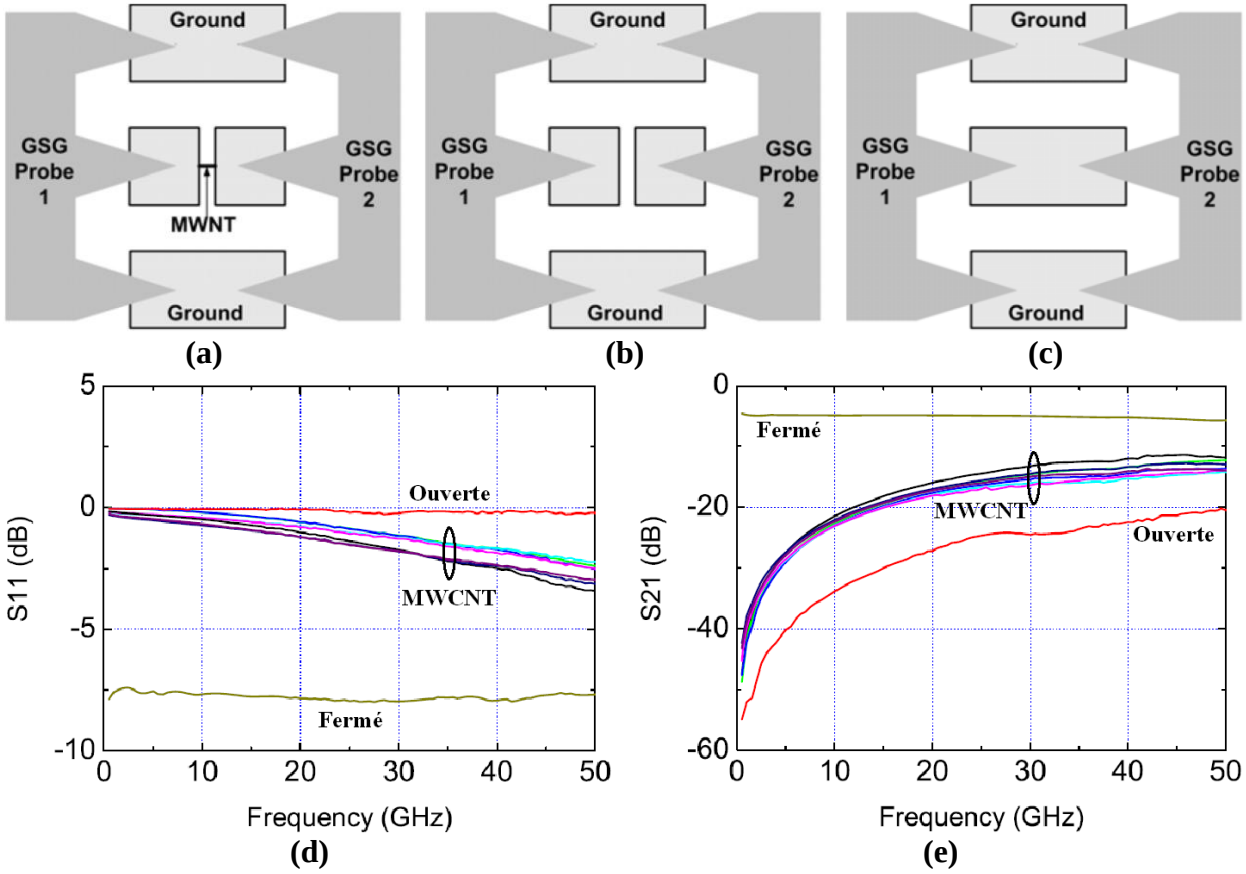


Figure 21 : Schémas illustrant la mesure sous pointes HF de trois guides coplanaires, (a) une fermée connectée via un MWCNT, (b) une ouverte et (c) une fermée. (d) Mesures en adaptation et (e) en transmission de la structure coplanaire pour les trois cas explicités à (a), (b) et (c).

1.2.3.3 Autres propriétés

Propriétés thermiques :

Des mesures effectuées sur des nanotubes de carbone monofeuillet ou multifeuillets rapportent des conductivités thermiques comprises entre 1800 et 6600 $W.K^{-1}.m^{-1}$ [58] [59] [60] [61]. Ainsi les nanotubes de carbones sont thermiquements cinq fois plus conducteurs que le cuivre et trente fois plus que le fer (Tableau 4). Cependant, ces résultats sont fortement corrélés avec l'orientation des nanotubes de carbone au cours de la mesure.

	Conductivité thermique (W/m.K)	Echelle
MWCNT	1800 – 3000	Nanométrique
SWCNT	2500 – 6600	Nanométrique
Nanofibre de carbone	12	Nanométrique
GaN	10 - 40	Nanométrique
BN	60 -180	Nanométrique
Germanium	60	Massif
Silicium	148	Massif
Aluminium	237	Massif
Fer	80	Massif
Or	317	Massif
Cuivre	485	Massif
Diamand	1000	Massif

Tableau 4 : Comparaison de la conductivité thermique des CNTs avec celle d'autres matériaux [62] [63].

Un nanotube de carbone parcouru par un courant voit sa température augmenter à cause de la dissipation thermique par effet Joule [64] [65]. On peut alors exprimer la température au niveau de l'extrémité du nanotube en fonction de la température du substrat :

Équation 13 :

$$T_{extrémité} = T_{substrat} + \frac{L \times P_{dissipée}}{2\kappa S}$$

Avec L la longueur du nanotube, $P_{dissipée}$ la puissance dissipée dans le nanotube, κ la conductivité thermique du nanotube et $S = \pi.r^2$ la section du nanotube.

Thermiquement, il est également important de définir la stabilité atomique des nanotubes de carbone lorsqu'ils sont contraints sous de fortes températures. Dans cette perspective K.M. Liew *et al.* [66] ont effectué des mesures sur des SWCNTS et des MWCNTS et compte tenu des résultats présentés Figure 22, on constate qu'au-delà de 1000 K (727 °C) une instabilité commence à être perceptible sur les deux types de nanotubes de carbone avec une instabilité plus importante pour les MWCNTs que pour les SWCNTs à cause du nombre de parois. Quand un MWCNT est soumis à une charge thermique, les atomes commencent à vibrer et à haute température les vibrations deviennent importantes engendrant la collision des atomes entre parois voisines. Cette réaction facilite donc un peu plus la destruction du MWCNT à haute température par rapport au SWCNT. On peut également rappeler que la température de fusion du carbone est de 3827 °C.

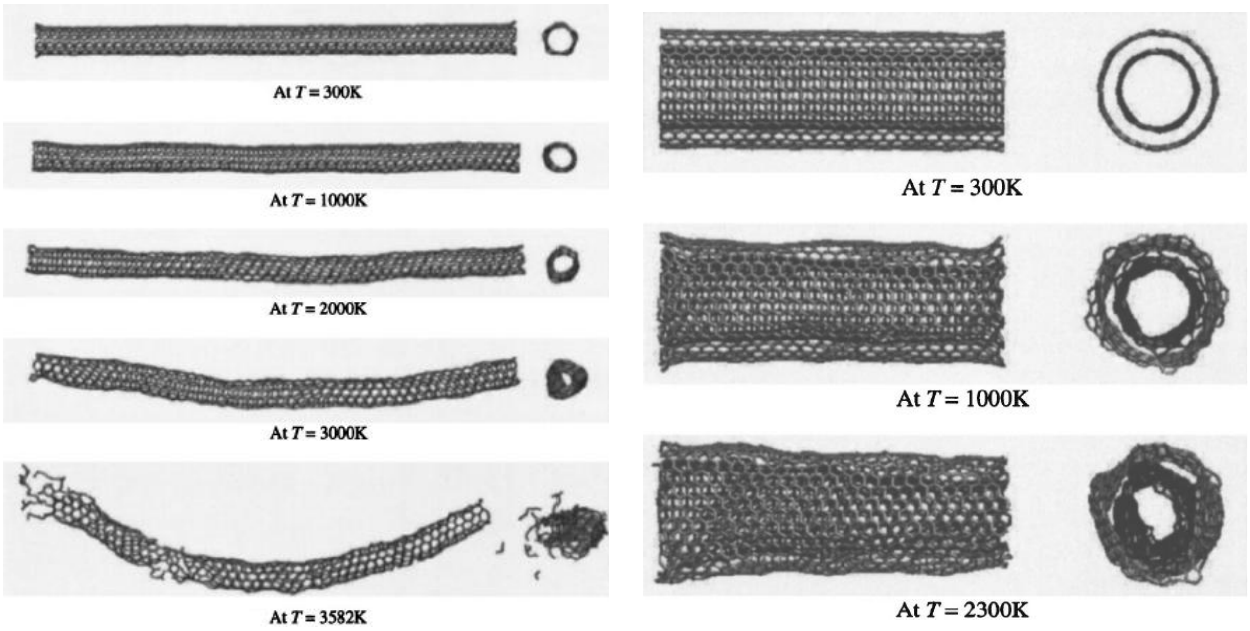


Figure 22 : (a) Evolution de la structure atomique d'un SWCNT et (b) d'un MWCNT, en fonction de la température.

Propriétés supraconductrices :

Des études menées sur des fagots de nanotubes de carbone monofeuillets tendent à prouver qu'ils possèdent intrinsèquement des propriétés supraconductrices [67].

Propriétés de capillarités :

Le nanotube peut être considéré comme un « nanofil » creux qu'il est possible de combler par capillarité. Il est ainsi réalisable d'introduire à l'intérieur du nanotube des métaux [68] ou bien des macromolécules comme des fullerènes C_{60} (Figure 1c page 15). De nombreux métaux ont ainsi pu être isolés à l'état atomique et arrangés sous la forme d'une chaîne [69].

1.3 Etat de l'art des NEMS DC

1.3.1 Les différentes configurations de commutateurs à base de CNTs

Plusieurs expérimentations sur le sujet ont été réalisées au sein de différents laboratoires de par le monde. Il existe trois types de commutateurs à nanotubes de carbone, la configuration pince (Figure 23a), la configuration poutre (Figure 23b) et la configuration pont (Figure 23c).

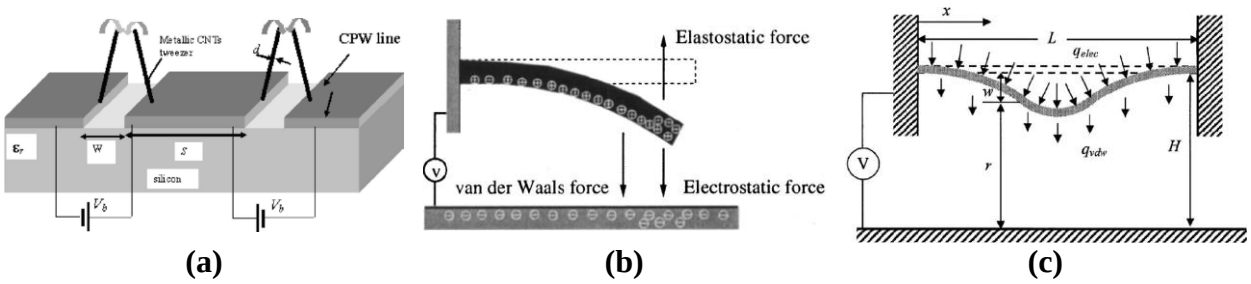


Figure 23: (a) Commutateur NEMS DC en configuration pince [70], (b) en configuration poutre [71] et (c) en configuration pont [72].

Les différentes caractéristiques de commutation du NEMS DC (tension d'activation et temps de commutation) sont définies en fonction de différents paramètres de la structure, tels que le diamètre, la longueur et le module de Young du nanotube de carbone, et le gap entre le CNT et l'électrode de contact.

En effet, l'activation du NEMS DC est réalisée via une force électrostatique créée par une différence de potentiel entre le CNT et une électrode. Si cette force électrostatique est supérieure à la force élastique du CNT (voir page 84), alors ce dernier est attiré vers l'électrode. Afin de limiter la tension d'activation appliquée sur le nanotube de carbone et y permettre la circulation d'un courant sans risquer sa destruction en puissance, on utilise une topologie à 3 électrodes (Figure 24). Cette configuration permet d'appliquer une faible différence de potentiel entre les MWCNTs en contact ($V_{lecture}$), tout en appliquant un potentiel élevé sur la 3ème électrode induisant la commutation par répulsion ($V_{activation}$).

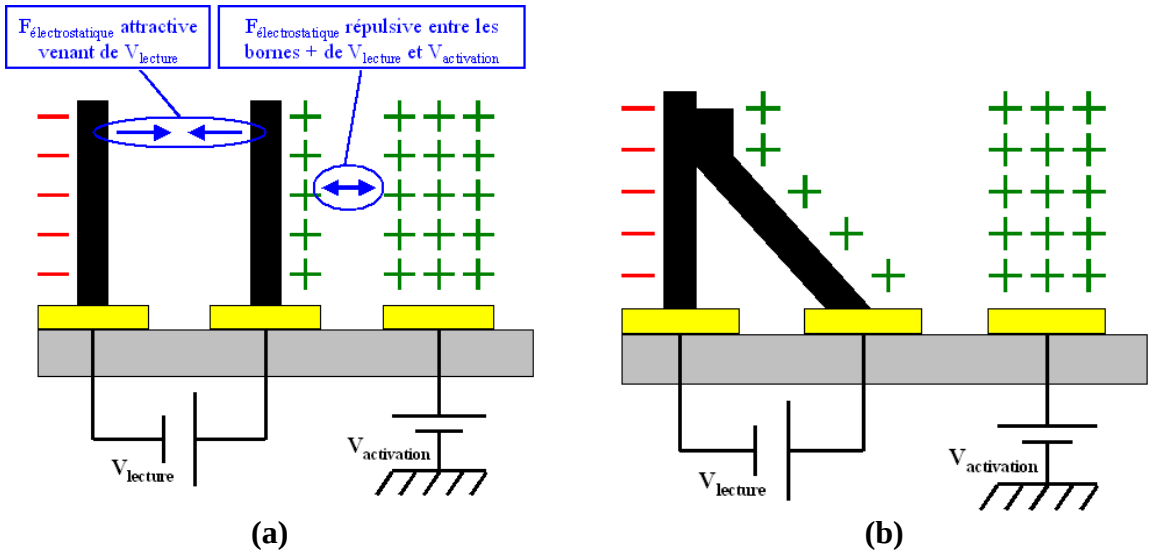


Figure 24 : Topologie à 3 électrodes d'un commutateur NEMS DC. (a) au repos et (b) en commutation.

D’autres forces doivent être prises en compte si, à la coupure de la force électrostatique, l’on désire rompre le contact entre les MWCNTs par le seul biais de leurs élasticités. Ce sont les forces de van der Waals ou forces inter-atomiques (voir page 86) qui provoquent l’attraction de deux éléments suffisamment proche l’un de l’autre et ce en l’absence d’une force électrostatique. Un rétablissement purement mécanique de la structure dans son état initial impose que le NEMS soit dimensionné de telle façon que la force élastique en commutation compense au moins les forces de van der Waals.

Dans l’état actuel des avancées technologiques sur le sujet, on peut établir que les premières caractérisations effectuées sur des structures NEMS DC, ont donné les résultats suivants (Tableau 5) :

- Des tensions d’activation variant de 1,4 V à 102 V.
- Un rétablissement dans l’état initial à des tensions variant de 0 V à 2 V.
- Des temps de commutations variant de 5 ps à 95 ns.

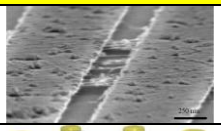
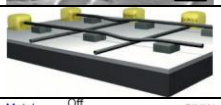
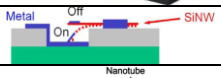
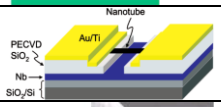
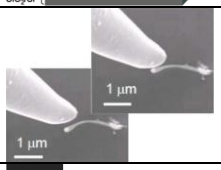
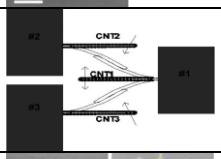
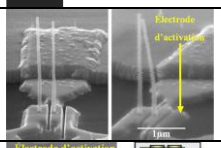
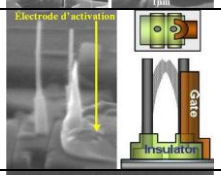
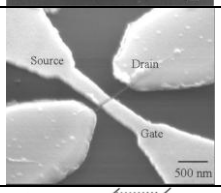
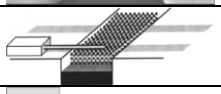
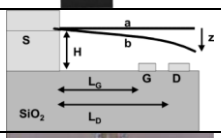
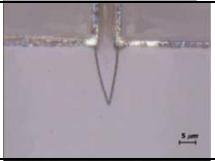
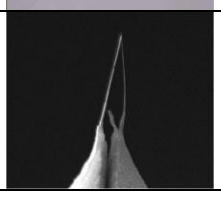
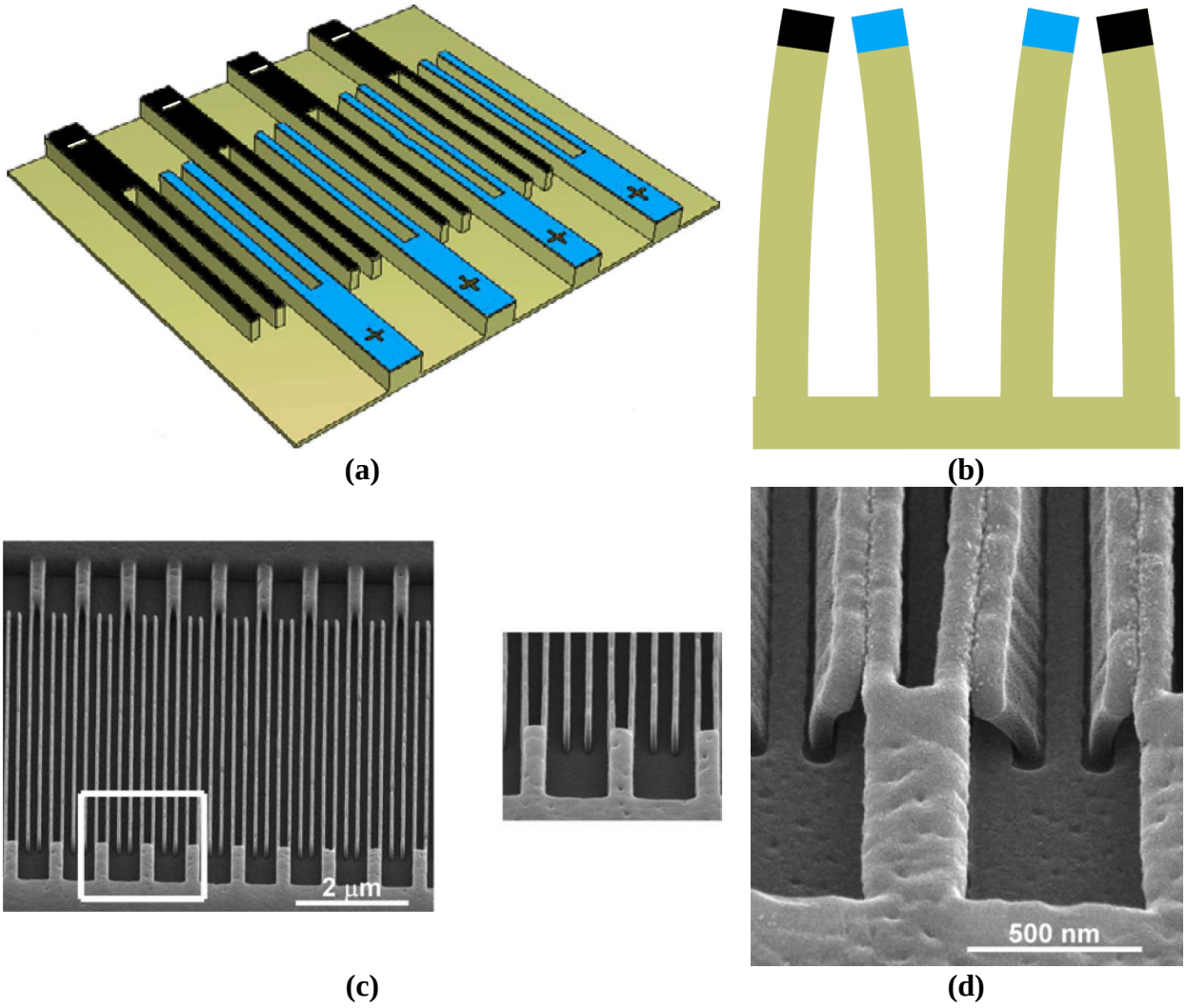
Origine	CNT	NEMS DC	Contact	Illustration	Tension d'activation	Tension de reset	Temps de commutation	Réf.
US	SWCNT	Pont	Ti/Pd		1,4 V	0,5 V	> ns	[73]
US	SWCNT	Pont	Carbone		6 V	Non	5 ps	[74]
US	Nanofil	Poutre	Au/Al		5 V	0,5 V	X	[75]
US	SWCNT	Pont	Niobium		5 V	2 V	95 ns	[76]
US	MWCNT	Poutre	Tungstène		18 V	16 V	X	[77]
US	CNT	Pince	Carbone		4–13 V	X	X	[78]
UK	MWCNT	Pince	Carbone		20-25 V	0 V	X	[79]
UK	MWCNT	Pince	Carbone		4,5 V	0 V	X	[80]
UK	MWCNT	Pince	Carbone		8,5 V	X	X	[81]
UK	MWCNT	Pont	Cr/Au		3,6 V	X	X	[82]
France	MWCNT	Poutre	Or		3 V	2 V	X	[83]
Suède	MWCNT	Poutre	Or		5 V	1 V	X	[84]
Corée	MWCNT	Pince	Carbone		30 – 102 V	X	X	[26]
Japon	MWCNT	Pince	Carbone		4,5 V	0 V	X	[85]

Tableau 5 : Tableau comparatif de NEMS DC issus de la littérature.

1.3.2 Aperçu de la topologie d'une structure coplanaire envisagée pour la modélisation d'un NEMS RF

S. Ghatnekar-Nilsson *et al.* [86] ont développé le concept d'une structure NEMS RF à peignes interdigités commutant par l'application d'une différence de potentiel entre peignes (Figure 25a et Figure 25b). Cette géométrie représente une voie cohérente pour rapprocher suffisamment la ligne et les masses d'une structure coplanaire à l'aide d'extensions partants de ces dernières (Figure 25c et Figure 25d). Ce concept permet d'envisager la modélisation d'un NEMS RF parallèle à base de MWCNTs positionnés à des distances nanométriques les uns des autres.



(a) **(b)** **(c)** **(d)**

Figure 25 : (a et b) Schémas et (c et d) images MEB de la structure NEMS RF proposée par S. Ghatnekar-Nilsson *et al.* au repos (a et c) et commutée (b et d).

1.3.3 Les objectifs et les différentes étapes de la réalisation d'un commutateur NEMS RF

La finalité de ce travail de thèse porte sur la réalisation de deux démonstrateurs de commutateur à base de nanotubes de carbone verticaux (pince), l'un entre deux MWCNTs (Figure 26) et l'autre hyperfréquence entre rangées de MWCNTs (Figure 29 page 49). Ces démonstrateurs devront présenter des tensions d'activation entre les nanotubes de carbone inférieures à 10 V, des temps de commutation inférieurs à 100 ns, un courant circulant entre les CNTs commutés maximum et une consommation en puissance faible. La topologie pince a été choisie par rapport aux topologies poutre ou pont afin de faciliter les étapes de conception technologique et la reproductibilité du commutateur NEMS DC. En effet la croissance des nanotubes de carbone d'un commutateur NEMS DC en configuration pince se fait sur le dispositif après avoir réalisé l'ensemble des étapes technologiques et notamment le dépôt précis du catalyseur engendrant le CNT. Alors que la fabrication de commutateurs NEMS DC en configuration poutre ou pont nécessite des étapes technologiques de dépôt de nanotubes de carbone sur le substrat et d'alignement précis de ces derniers par différentes méthodes dont la précision n'est pas pour l'heure optimale et reproductible (voir annexe 5.3 page 166).

1.3.3.1 Première étape : Le NEMS DC

Le premier de ces démonstrateurs consiste en la conception de deux NEMS DC à base de nanotubes de carbone verticaux, l'un à contact ohmique (métal – métal, Figure 26a et Figure 26b) et l'autre à contact capacitif (métal – diélectrique Figure 26c). Les dimensions de ces deux topologies devront permettre la compensation en commutation des forces de van der Waals par la seule élasticité des MWCNTs commutés.

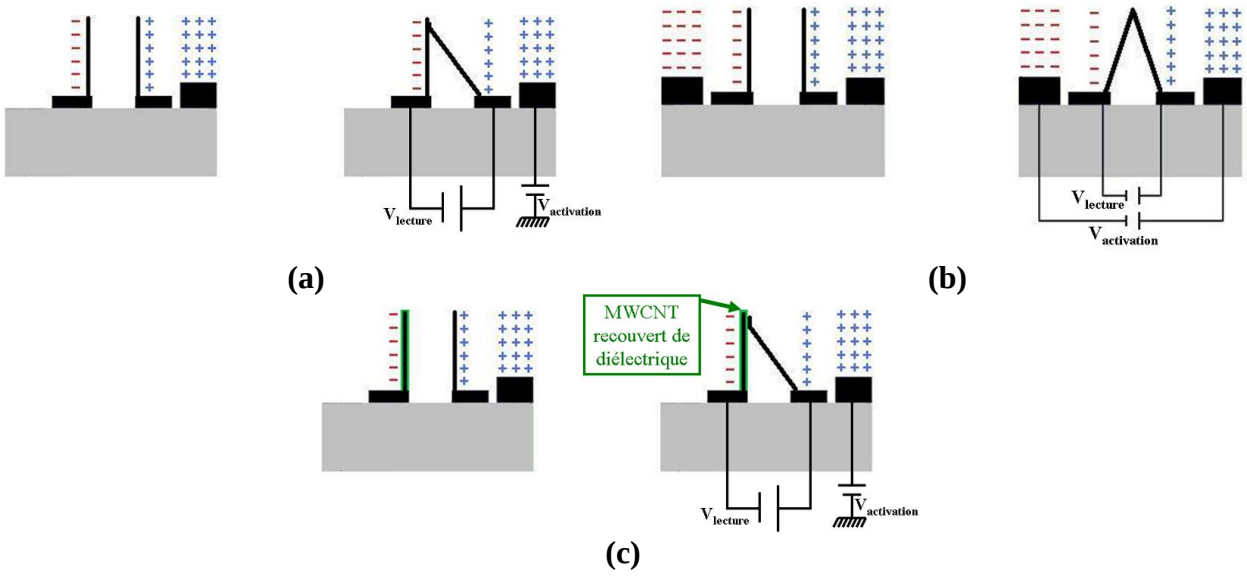
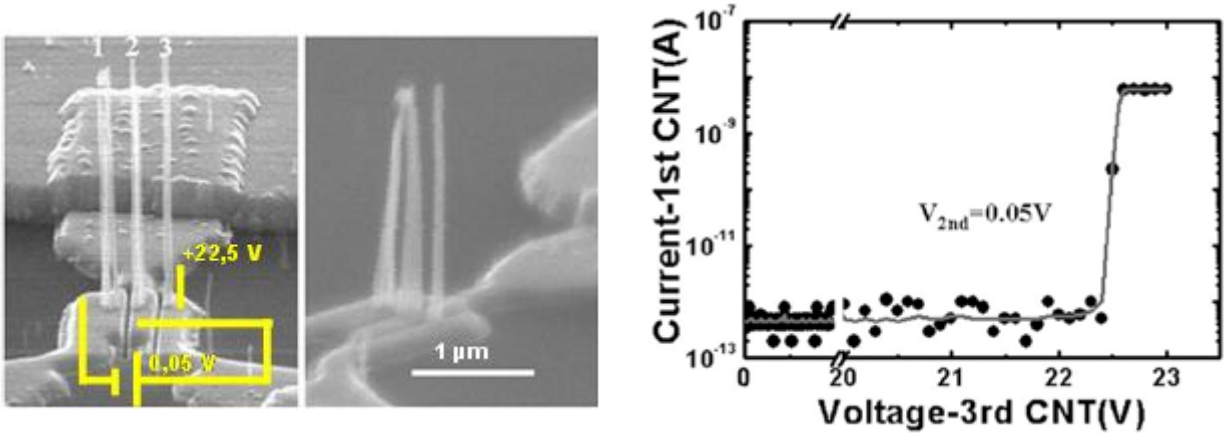


Figure 26 : Commutateurs NEMS DC en configuration pince, (a) contact ohmique à une électrode d'activation, (b) contact ohmique à deux électrodes d'activation et (c) contact capacitif.

D'un point de vue géométrique, l'approche préconisée dans ce manuscrit s'inspire du concept développé par J.E. Jang *et al.* [79], qui les premiers ont eu l'idée d'utiliser une électrode d'activation afin de limiter la tension entre les MWCNTs commutés (≈ 0 V) pour y faire ainsi circuler un maximum de courant sans engendrer la destruction de la structure en puissance

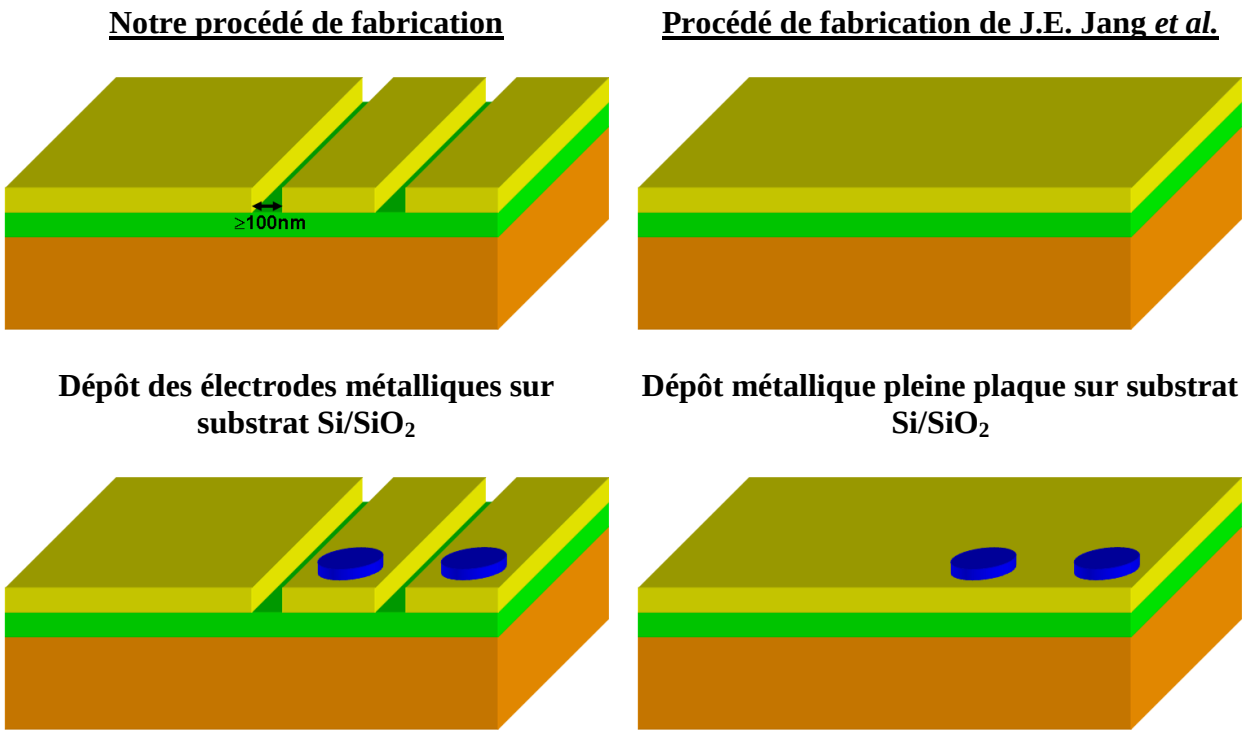
(Figure 27). Le principe consiste à polariser l'électrode d'activation afin qu'elle soit chargée de façon identique au nanotube de carbone se trouvant à proximité, créant ainsi un champ électrostatique qui repousse les deux matériaux l'un de l'autre. Ce phénomène physique a pour effet de mettre en mouvement le nanotube de carbone vers le second CNT jusqu'au contact.



(a) **(b)**

Figure 27 : (a) images MEB du concept de J.E. Jang *et al.* [79]. (b) Caractéristique du courant circulant dans les MWCNTs commutés en fonction de la tension appliquée sur l'électrode d'activation.

L'originalité du premier dispositif développé dans cette thèse par rapport à celui réalisé par J.E Jang *et al.* à Cambridge consiste à supprimer une étape de gravure FIB (Focused Ion Beam). En effet afin de séparer les 3 électrodes après croissance des nanotubes de carbone, l'équipe de Cambridge a recourt à une étape supplémentaire de gravure à la FIB, ce qui représente une contrainte sur la durée de conception et hypothèque presque de façon rhédibitoire une industrialisation potentielle (Figure 28).



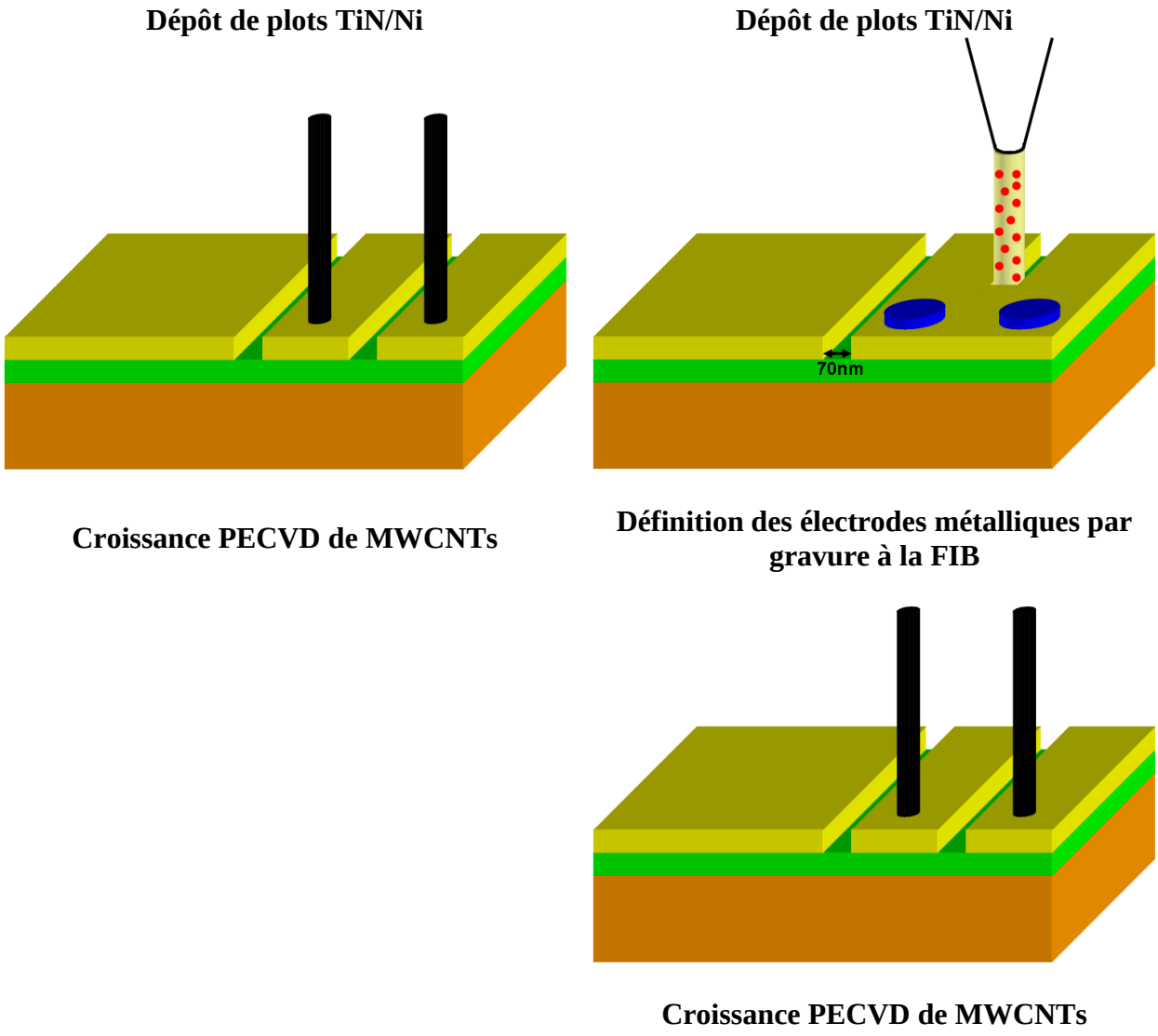


Figure 28 : Procédé de fabrication de notre commutateur NEMS DC en configuration pince en 3 étapes et procédé de fabrication de J.E. Jang *et al.* en 4 étapes.

1.3.3.2 Seconde étape : Le NEMS RF

Le second de ces démonstrateurs constitue la seconde étape de ces travaux et reprend les résultats obtenus précédemment, afin de réaliser à partir de la base d'une ligne coplanaire deux commutateurs hyperfréquences à base de nanotubes de carbone verticaux, l'un ohmique et l'autre capacitif. Compte tenu des résultats hyperfréquences en transmission d'un nanotube de carbone multifeuillets (voir Figure 21 page 39), on comprend qu'il sera impossible de provoquer en hyperfréquence un changement d'état suffisamment probant du NEMS RF (commuté et non-commuté) avec un seul NEMS DC. Le dispositif prendra donc en considération ce fait en multipliant le nombre de ces couples sur la structure définitive (Figure 29).

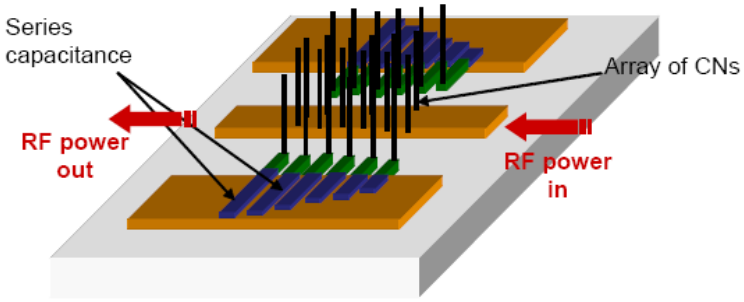


Figure 29 : Illustration d'un NEMS RF.

1.4 Conclusion de la première partie

Au cours de cette première partie, un état de l'art a été dressé sur les différentes propriétés physiques des nanotubes de carbone multiparois (MWCNTs) : mécaniques, électriques et hyperfréquences. Cette morphologie de nanotubes de carbone a été privilégiée pour ses propriétés métalliques indispensables à la fabrication d'un NEMS hyperfréquence. Une présentation des différents procédés de croissance de nanotubes de carbone a été réalisée en insistant particulièrement sur la méthode PECVD retenue pour la conception des différents démonstrateurs. Cette première partie se conclut par un état de l'art sur les NEMS DC et par un rappel de l'énoncé des différents objectifs des travaux de cette thèse.

2 : Fabrication et caractérisation physique des MWCNTs

2.1 Introduction de la seconde partie

Ce second chapitre aborde en premier lieu les différents matériaux qui seront utilisés pour la conception des démonstrateurs NEMS DC en tension et hyperfréquence, en justifiant les raisons scientifiques et technologiques qui ont orienté ces choix. Cette partie démontre l'influence des paramètres de croissance PECVD IPA+H_2O+H_2 sur la qualité cristalline des nanotubes de carbone synthétisés. Elle évoque ensuite différentes expérimentations qui ont permis de déterminer le module de Young ainsi que la densité de courant des MWCNTs synthétisés sur l'empilement de matériaux définit précédemment. Pour conclure, la méthode de dépôt EBID (Electron Beam Induced Deposition) est décrite et les résultats expérimentaux laissant entrevoir la faisabilité d'un NEMS à contact capacitif présentés.

2.2 Caractéristiques physiques des matériaux utilisés

2.2.1 Le substrat

Afin d'obtenir en croissance des nanotubes de carbone localisés, parfaitement perpendiculaires au substrat et rectilignes, nous utilisons la méthode PECVD (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition) avec plasma et support du substrat polarisé en inverse afin d'obtenir un champ électrique orienté induisant une croissance parfaitement verticale des nanotubes de carbone (Figure 30).

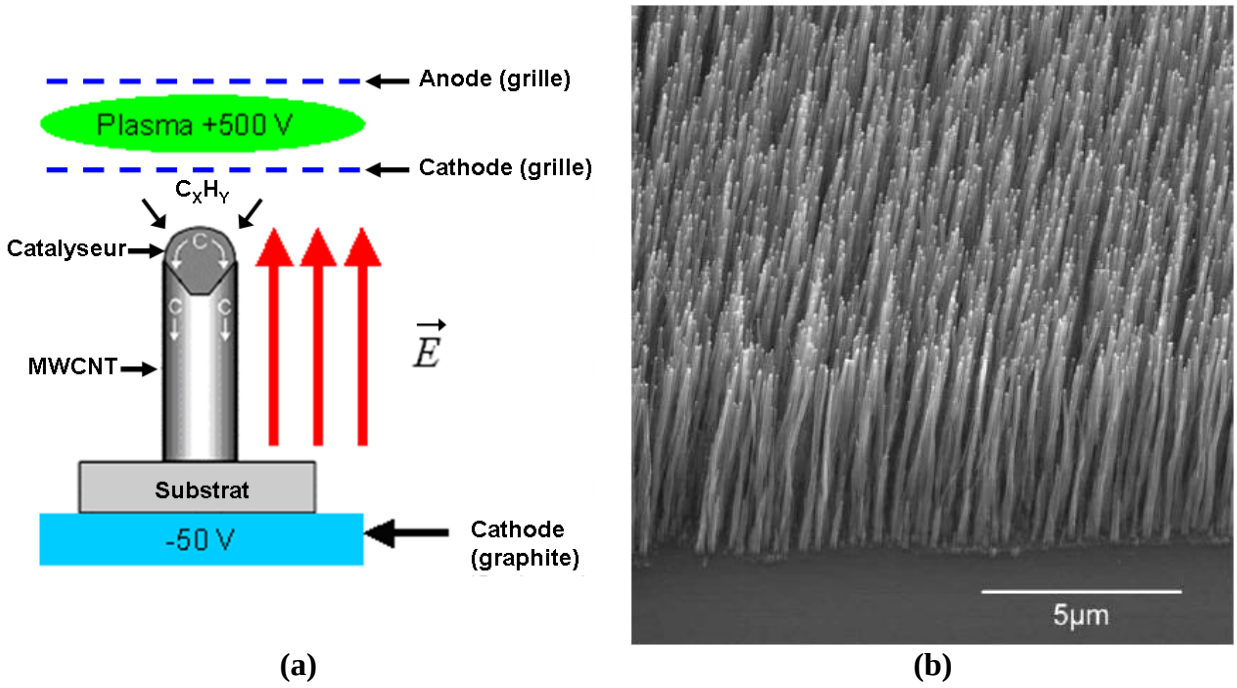


Figure 30 : (a) Illustration schématique du champ E généré par une croissance PECVD. (b) Image MEB d'une croissance PECVD [17].

Le corollaire d'une utilisation optimale de cette manipulation implique que le substrat soit électriquement conducteur pour permettre l'évacuation des charges générées au cours de la croissance et ainsi améliorer les conditions de synthèse. Le silicium semble donc être, grâce à une conductivité électrique de $2{,}52.10^{-4}$ S/m, un matériau adapté aux contraintes liées à la méthode PECVD. Enfin, le silicium massif est compatible avec les températures utilisées dans ce procédé de croissance (600 °C à 750 °C) compte tenu du dispositif NEMS DC réalisé par J.E. Jang *et al.* Cambridge [79].

2.2.2 Le diélectrique (isolant)

Le bon fonctionnement d'un commutateur à base de nanotubes de carbone verticaux positionnés sur des électrodes conductrices nécessite que ces dernières soient électriquement isolées les unes des autres. La présence d'un diélectrique entre le substrat de silicium électriquement conducteur et les électrodes métalliques est donc indispensable pour assurer une isolation électrique entre les électrodes. Sur silicium on utilise généralement de la silice (SiO_2) comme diélectrique, mais une contradiction apparaît avec la nécessité d'évacuer des charges durant la croissance PECVD évoquée précédemment.

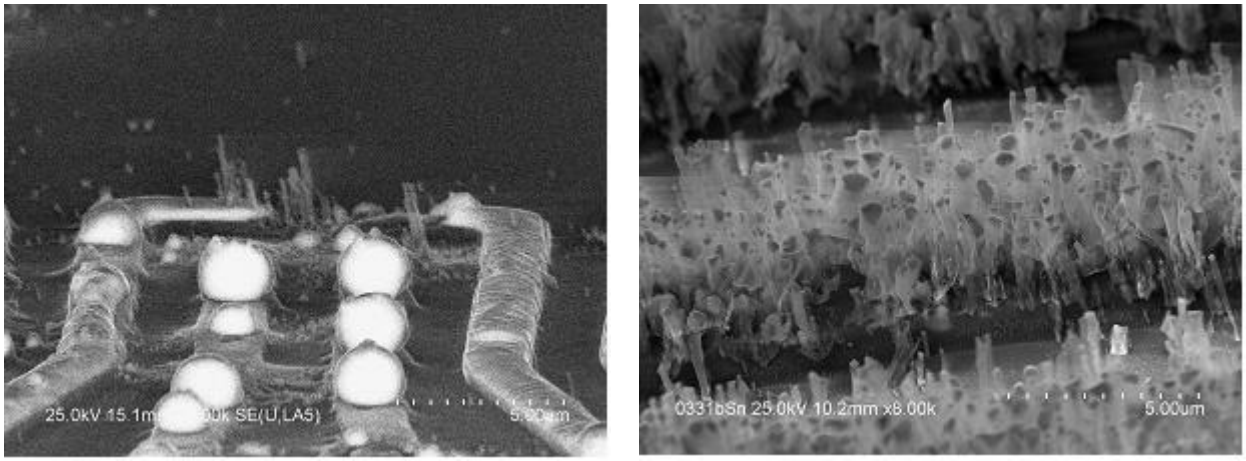
Deux solutions peuvent être envisagées. La première consiste à minimiser au maximum l'épaisseur de la silice (500 nm), afin que cette dernière ne nuise que très faiblement à l'évacuation des charges [79]. La seconde est d'envisager d'autres diélectriques qui au-delà d'une certaine température deviennent conducteurs, puis redeviennent isolants en-dessous de ce seuil. Certains oxydes de terres rares ont ce type de comportement, comme par exemple le $SmNiO_3$ dont la température de transition se situe approximativement à 130 °C [87]. Une température de transition élevée constitue également une sécurité nécessaire liée à l'échauffement du NEMS en fonctionnement.

Dans le cadre de la réalisation de nos démonstrateurs, la silice sera privilégiée comme diélectrique avec une épaisseur de 500 nm, car l'utilisation fréquente de ce matériau au sein du laboratoire THALES-TRT ne nécessitera pas de phase longue de mise au point pour effectuer le dépôt, à la différence des oxydes de terres rares.

2.2.3 Le métal de conduction

La réalisation d'un commutateur NEMS DC à base de nanotubes de carbone verticaux implique que la croissance PECVD se fasse sur un métal. En effet, une métallisation est indispensable comme élément de conduction électrique pour les différentes électrodes de la structure. Il faut donc déterminer les caractéristiques mécaniques et électriques des nanotubes de carbone lorsqu'ils sont synthétisés sur un métal.

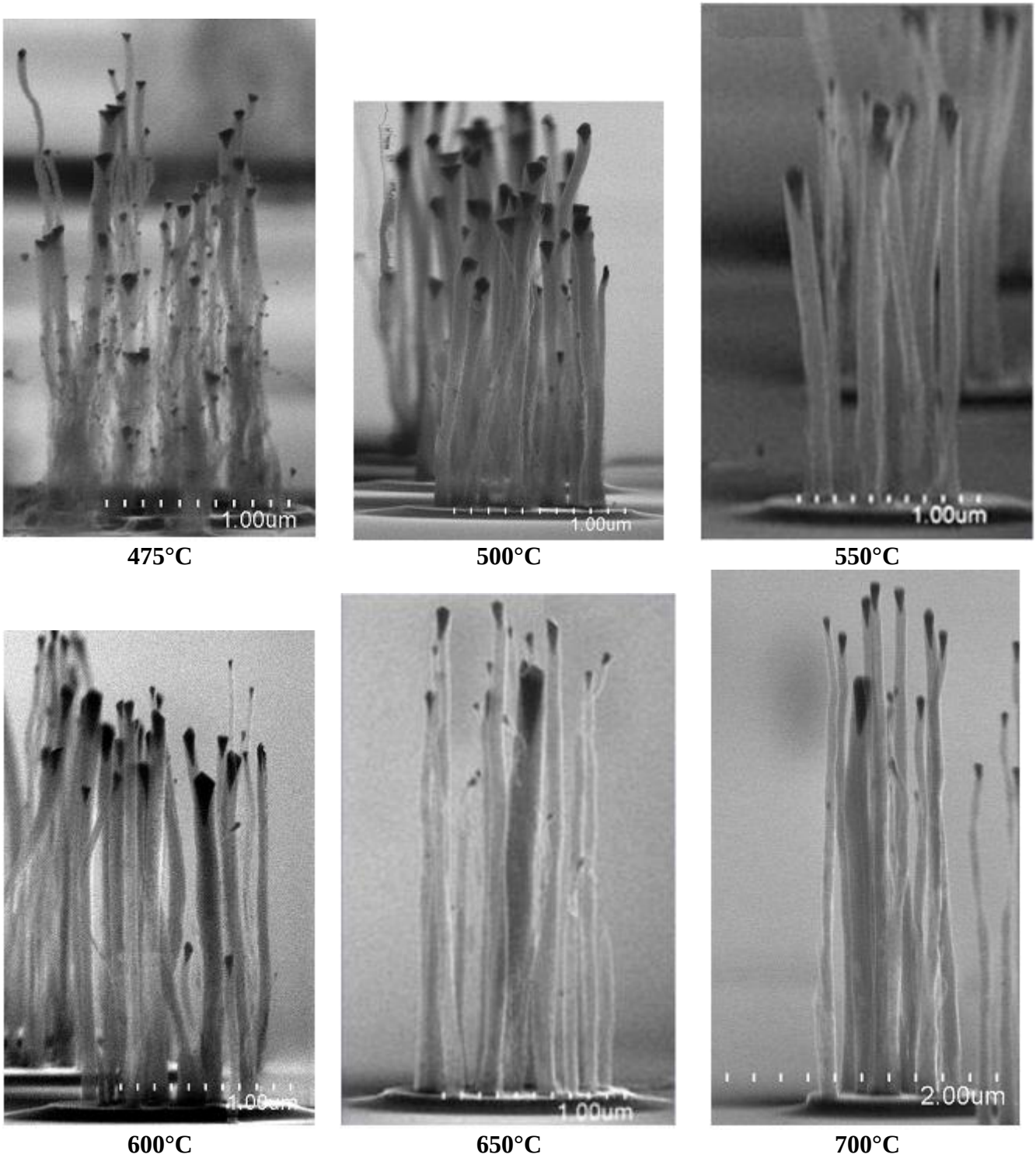
Néanmoins il faut que cette métallisation supporte les températures de croissance imposées par la méthode PECVD (600 °C à 750 °C). Dans cette perspective un premier essai a été réalisé sur de l'or, constituant la métallisation généralement utilisée dans la réalisation de lignes coplanaires hyperfréquences. On observe sur la Figure 31a que l'or rentre en état fusion, devient instable et donc inexploitable aux températures de croissance des nanotubes de carbone. La Figure 31b illustre une seconde tentative infructueuse sur palladium, où on constate que ce dernier se comporte comme un catalyseur et qu'en lieu et place du dépôt métallique des nanotubes de carbone apparaissent. Ces résultats infructueux constituent cependant des résultats utiles dans le choix de la métallisation idéal pour la réalisation du commutateur NEMS hyperfréquence.



(a) **(b)**

Figure 31 : (a) Image MEB d'une croissance PECVD sur de l'or. (b) Image MEB d'une croissance PECVD sur du palladium.

Le niobium peut également être utilisé comme référence. Les résultats obtenus par J.E. Jang *et al.* à Cambridge [79] avec ce métal en croissance PECVD à 600 °C sont concluants (Figure 27a page 47).



475°C **500°C** **550°C**

600°C **650°C** **700°C**

Figure 32 : Croissance PECVD C_2H_2 + H_2O + H_2 sur lithographie 1µm TiN/Ni pendant 40 minutes à différentes températures.

Cependant, des expérimentations effectuées au LPICM de Polytechnique Palaiseau France laissent apparaître que plus la température de croissance des nanotubes de carbone est élevée, plus ces derniers sont verticaux et longs, avec des plans cristallins de plus grande qualité (Figure 32). Cette constatation est d'autant plus vraie lorsque l'on souhaite réaliser des croissances de CNTs localisées, comme dans notre cas. Il semble donc judicieux de considérer des métaux dont la température de fusion est plus élevée que celle du Niobium (Figure 33a) afin de pouvoir réaliser des croissances PECVD à des températures pouvant atteindre 750 °C.

La conductivité électrique constitue également un paramètre important à considérer pour la métallisation si l'on se projette sur la conception du commutateur NEMS RF. Il faut que celle-ci soit la plus élevée possible afin de minimiser au maximum les pertes hyperfréquences liées à la résistivité de la métallisation utilisée (Figure 33b).

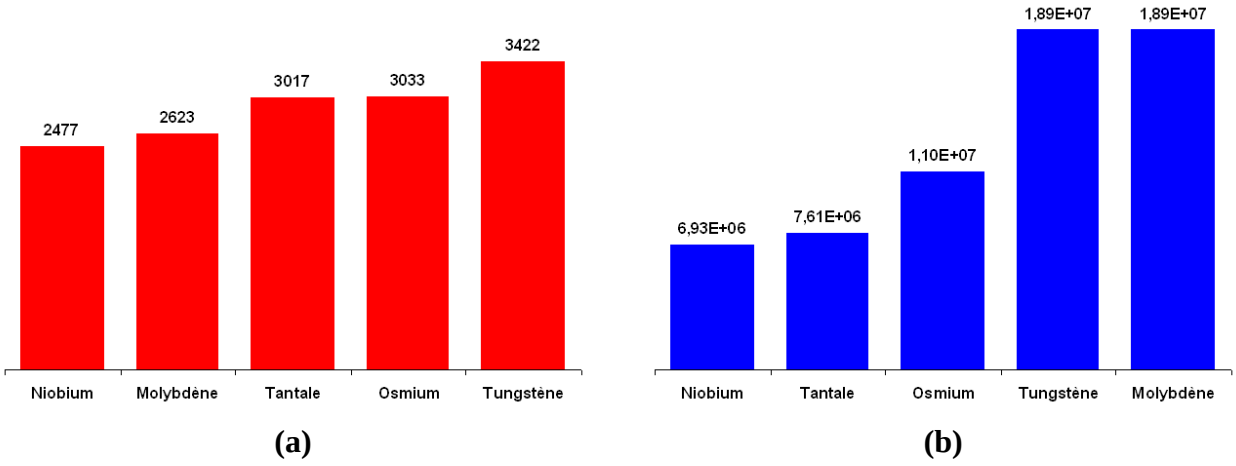


Figure 33 : Graphiques illustrants, (a) les températures de fusion en °C et (b) les conductivités électriques en S/m, des métaux de transition « bulk » qui sont supérieures à celles du Niobium [88].

Au regard de la Figure 33, quatre métaux semblent pouvoir convenir à la contrainte liée aux températures de croissance des nanotubes de carbone. Parmi ces quatre possibilités, le molybdène et le tungstène présentent les conductivités électriques les plus importantes et semblent de ce fait pouvoir convenir tous deux comme métallisations dans la fabrication de démonstrateurs NEMS.

Mais la perspective hyperfréquence de ces travaux oblige à considérer une caractéristique physique supplémentaire dans le choix de la métallisation, à-savoir la susceptibilité magnétique des métaux conditionnant le magnétisme (l'aimantation) de ces derniers. Plus cette susceptibilité est importante, plus le champ magnétique est confiné dans le métal, perturbant ainsi le mode TEM (Transverse Electro-Magnétique) indispensable à la transmission d'un signal RF. La Figure 34 caractérise l'importance de la susceptibilité magnétique de certains métaux en fonction de la température et on y constate que le molybdène est moins soumis à la magnétisation que le tungstène. Le molybdène apparaît donc comme étant le choix le plus judicieux comme métallisation pour nos démonstrateurs NEMS [88].

La pertinence du molybdène est confirmée par les expérimentations de A. Javey *et al.* [89], qui synthétisent des SWCNTs par CVD sur molybdène à 800 °C.

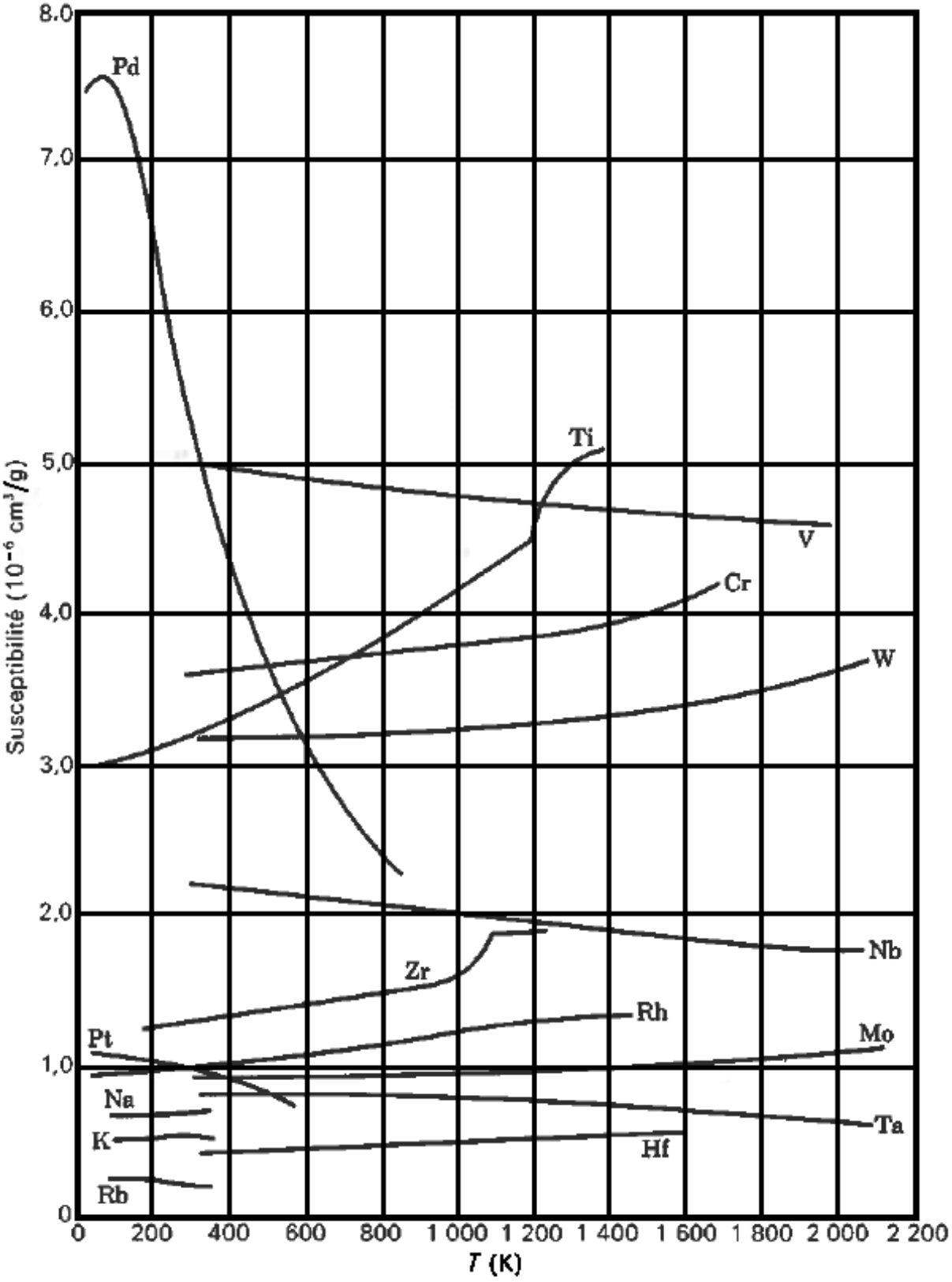


Figure 34 : Variation de susceptibilité magnétique des métaux en fonction de la température.

2.2.4 La barrière de diffusion

L'importance d'utiliser une barrière de diffusion positionnée entre le catalyseur et la métallisation provient de l'interaction pouvant exister entre la particule de catalyseur et son support durant la montée en température au cours du processus de croissance. Ainsi, si cette interaction est importante (sans barrière de diffusion - Figure 35a) on constate une croissance du nanotube de carbone à partir de sa base, dont l'orientation par synthèse PECVD s'avère être aléatoire (Figure 35b). Par contre si l'interaction entre le catalyseur et son support est faible, la croissance PECVD se fait à partir de la tête du nanotube de carbone (avec barrière de diffusion - Figure 35b) avec une orientation perpendiculaire au support (Figure 35d). Il est préférable de privilégier une croissance par la tête pour obtenir des MWCNTs parfaitement droit et perpendiculaire au substrat. Cette voie technologique permet également, en influant sur le temps de croissance et la pression des gaz, d'avoir une incidence sur la longueur finale du nanotube.

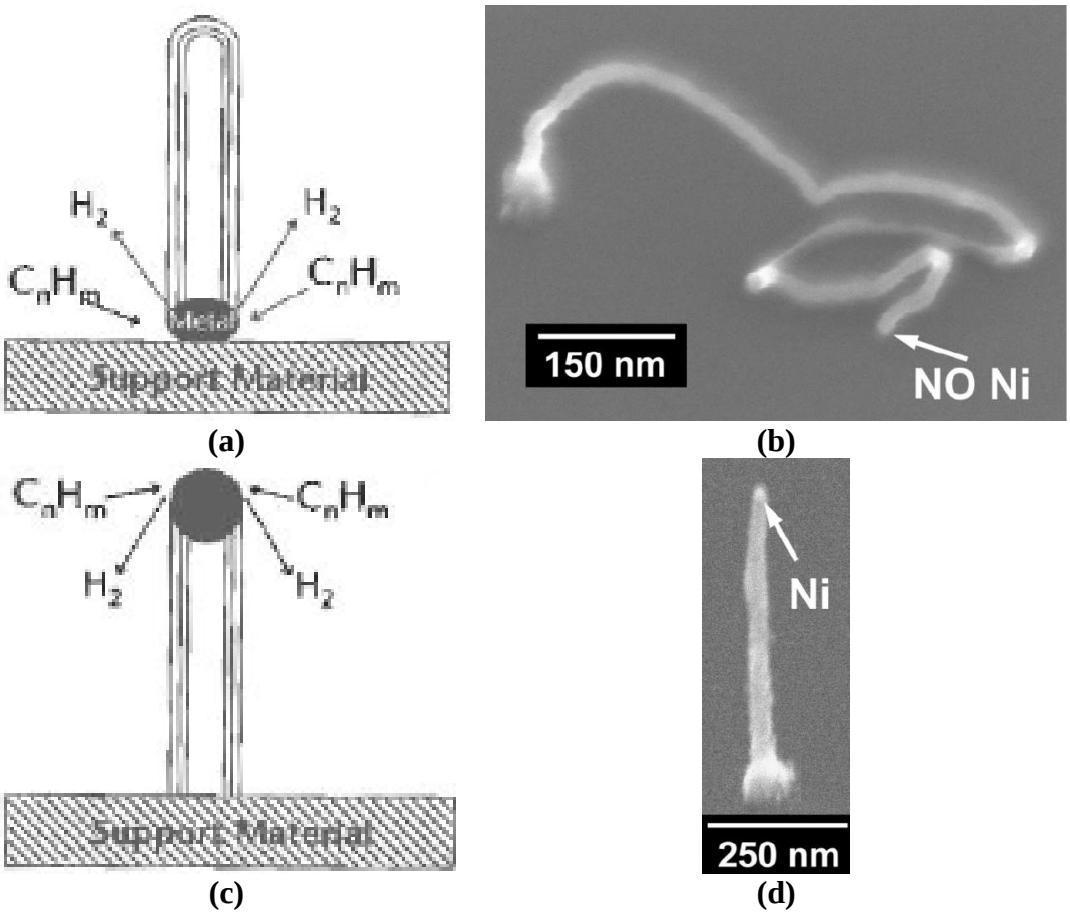


Figure 35 : (a) Schéma et (b) image MEB d'une croissance de nanotube par la base sans barrière de diffusion. (c) Schéma et (d) image MEB d'une synthèse par la tête avec barrière de diffusion [7] [90].

De plus, M. Nihei *et al.* [91] montrent que la présence d'une barrière de diffusion métallique, dans leur cas du titane, diminue considérablement la résistance de contact entre le CNT et son support. En effet cette équipe constate que sans barrière de diffusion la résistance entre le nanotube de carbone et son support est de 25 MΩ, alors qu'en présence d'une barrière de diffusion cette résistance de contact est beaucoup plus faible de l'ordre de 134 kΩ (Figure 36).

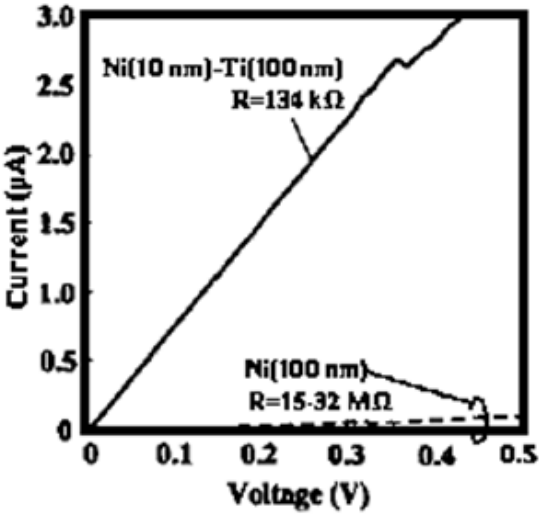


Figure 36 : Caractéristique I-V. Le trait plein indique l'électrode avec Ni/Ti et le trait en pointillés indique l'électrode avec Ni et sans Ti.

La barrière de diffusion constitue donc un gain non-négligeable dans la conductance globale d'un commutateur à base de nanotubes de carbone multifeuillets. Trois matériaux sont généralement utilisés comme barrière de diffusion, il s'agit de la silice (SiO_2), du nitrure de titane (TiN) et du chrome (Cr) [92]. L'impératif de conduction électrique entre la métallisation et les nanotubes de carbone impose que la barrière de diffusion soit métallique, ce qui exclut la silice isolante.

Les deux derniers matériaux se singularisent par leurs propriétés thermiques et électriques. Le chrome a un point de fusion situé à 1857 °C et une conductivité électrique de $7{,}74.10^6$ S/m, alors que le nitrure de titane à un point de fusion à 3200 °C et une conductivité électrique de 4.10^3 S/m [93]. Cependant il est préférable de privilégier le nitrure de titane car son point de fusion est supérieur à celui du niobium (voir page 56), ce qui n'est pas le cas du chrome, même si ce dernier à une conductivité électrique supérieur au TiN.

2.2.5 Le catalyseur

2.2.5.1 L'élément

Plusieurs catalyseurs sont évoqués dans la littérature, il s'agit du nickel (Ni), du fer (Fe), du cobalt (Co), du cuivre (Cu), du platine (Pt), du palladium (Pd) et de l'or (Au) [94], [95]. Mais les plus fréquemment utilisés sont les trois ferromagnétiques que sont le fer, le cobalt et le nickel. On constate compte tenu du Tableau 6 que parmi les trois métaux ferromagnétiques, le nickel a une température d'eutectique avec le carbone plus élevée que le cobalt et le fer. De plus, aux températures de croissance (600 °C à 750 °C), le Fe et le Co se scindent en agrégats beaucoup plus petits que le Ni [96], ce qui engendre des nanotubes de carbone avec de faibles diamètres risquant de ce fait d'être semi-conducteurs (1.2.3.2.1 page 28).

Catalyseur	Point d'eutectisme avec le carbone (°C)
Fer (Fe)	727 [97]
Cobalt (Co)	1320 [98]
Nickel (Ni)	1326,5 [98]

Tableau 6 : Température d'eutectisme entre les 3 différents ferromagnétiques et le carbone.

De plus, A.M. Cassell *et al.* [99] montrent que durant une synthèse PECVD avec différentes barrières de diffusion, le catalyseur de nickel permet d'obtenir des nanotubes de carbone avec une qualité de croissance supérieur au catalyseur de cobalt ou de fer et ce quelle que soit la barrière de diffusion utilisée (Figure 37). Il est donc plus judicieux de considérer le nickel comme catalyseur pour la synthèse PECVD afin d'obtenir des MWCNTs de diamètres importants et d'éviter tous risques de fusion entre la particule de nickel et le carbone des nanotubes.

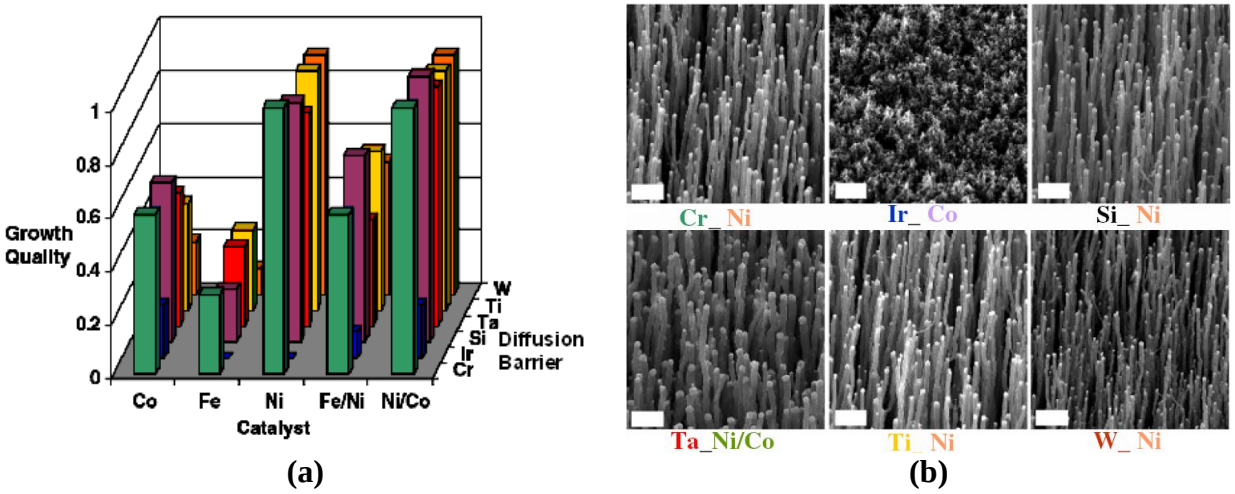


Figure 37 : (a) Qualité de croissance de nanotubes de carbone en PECVD en fonction du couple catalyseur/barrière de diffusion. (b) Images MEB de croissances PECVD pour différents couples catalyseur/barrière de diffusion.

2.2.5.2 La géométrie du plot

Dans le cadre de la réalisation de nos démonstrateurs NEMS, il est impératif que les MWCNTs synthétisés sur la structure soient unitairement localisés. Il faut donc effectuer des dépôts de catalyseur sous la forme de plots sur lesquels un seul MWCNT devra croître.

On observe sur la Figure 38 la limite du diamètre d'un plot de catalyseur de nickel pour obtenir un seul nanotube de carbone après synthèse PECVD à 700 °C (Figure 38). On définit ainsi par lithographie électronique des plots de Ni de diamètres variables de 100 nm à 800 nm avec une épaisseur constante de 7 nm sur un substrat de Si recouvert d'une couche continue de silice comme barrière de diffusion.

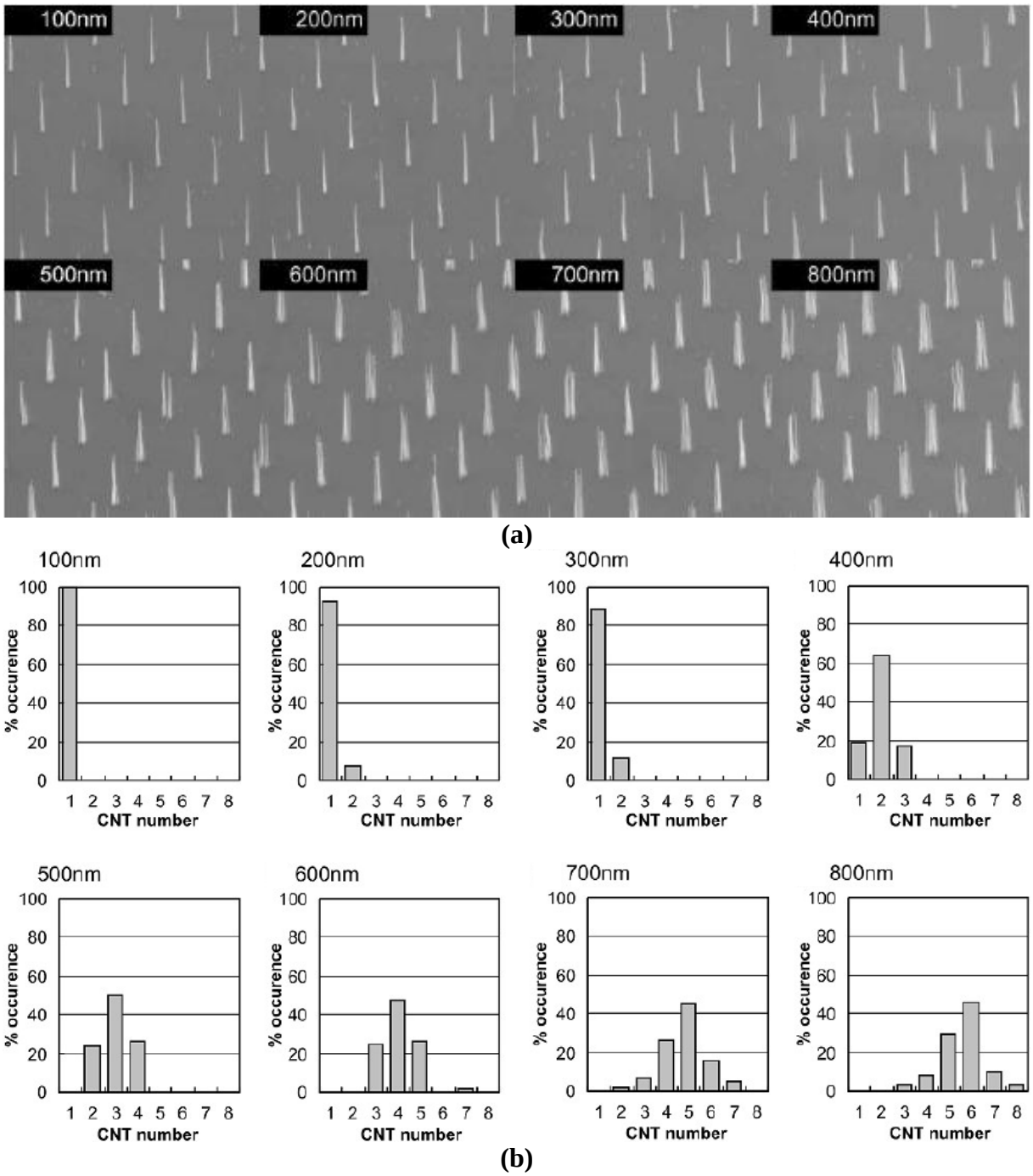


Figure 38 : (a) Croissance de nanotubes de carbone par PECVD sur des plots de catalyseur de tailles variable entre 100 nm et 800 nm. (b) Graphiques statistiques sur le nombre de CNTs sur un plot de Ni de différents diamètres [96].

On observe sur la Figure 38, qu'au-delà de 300 nm de diamètre, il y a en moyenne bien plus d'un nanotube par plot. Durant la conception des démonstrateurs NEMS, les plots de catalyseur de nickel n'excéderont donc pas 300 nm de diamètre.

La géométrie du nanotube de carbone a également une incidence non-négligeable sur le comportement mécanique de ce dernier. Il est donc indispensable d'être en mesure d'anticiper le diamètre du MWCNT, à partir du volume du plot de catalyseur. La longueur du nanotube de carbone étant caractérisée en fonction du temps de croissance (page 66), de la température de croissance (page 67), de la pression à l'intérieur du réacteur de croissance PECVD et du rapport entre le gaz précurseur et le gaz réducteur (page 23).

Durant le processus de croissance, la montée en température fait que les forces d'interactions entre le catalyseur et la barrière de diffusion deviennent faibles et l'énergie de répulsion augmente. Ce phénomène ajouté à la liquéfaction progressive du plot de catalyseur fait que ce dernier prend la forme d'une ou plusieurs bille(s) de particule(s) en fonction du diamètre initial du plot. Ensuite le gaz hydrocarboné (acétylène C_2H_2, méthane CH_4 ou alcool isopropylique (IPA = $CH_3CH(OH)\text{-}CH_3$) est adsorbé et décomposé à la surface des particules de catalyseur. Puis, il y a dissolution et diffusion des espèces carbonées dans les particules et enfin précipitation du carbone pour former les nanotubes (cette étape est plus communément appelée « étape de nucléation »). Les particules de nickel se retrouvent à la fin de la croissance au niveau de la tête du nanotube de carbone si les interactions avec le support sont suffisamment faibles pour éviter une croissance à la base (Figure 35 page 58). Les particules prennent alors une forme conique dont la somme des volumes correspond au volume initial du plot. Si on considère le cas où un seul nanotube de carbone est synthétisé sur le plot, le diamètre du MWCNT correspond alors au diamètre de la particule de catalyseur conique. Le volume du plot de catalyseur de 7 nm d'épaisseur détermine alors le diamètre final du MWCNT car ce volume est équivalent à celui de la particule à l'extrémité de la croissance (Figure 39).

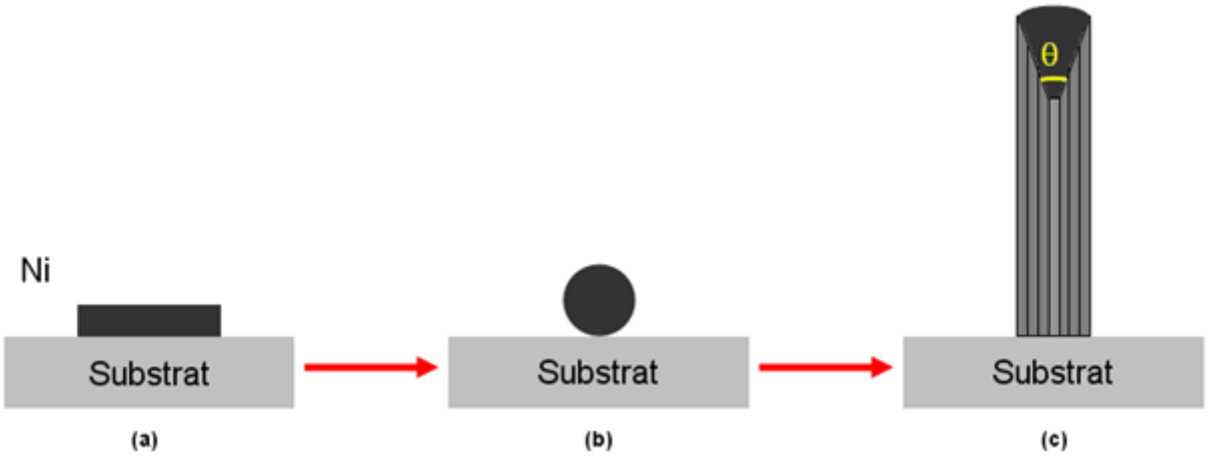


Figure 39 : Les différentes géométries du catalyseur de nickel durant la croissance. (a) le plot avant début de la synthèse. (b) bille de catalyseur liquide peu après le début en croissance. (c) Croissance du nanotube de carbone par la tête.

On peut alors appliquer la relation $Volume_{plot} = Volume_{cône}$, soit :

Équation 14 :

$$h_p \cdot \pi R_p^2 = \frac{1}{3\tan\left(\theta/2\right)} \cdot \pi R_{ext}^3 - \frac{1}{3\tan\left(\theta/2\right)} \cdot \pi R_{\text{int}}^3$$

Avec h_p = 7 nm l'épaisseur du plot, R_p le rayon du plot, R_{ext} le rayon extérieur du MWCNT, R_{int} le rayon intérieur du MWCNT et θ l'angle du cône formé par la particule de catalyseur Figure 39c.

La Figure 40 confirme que déterminer le rayon du MWCNT à partir du volume du plot de catalyseur de nickel constitue une méthode probante au vue des observations sur les croissances réalisées sur des plots de diamètres compris entre 30 nm et 100 nm. Les points représentant les valeurs mesurées sur des échantillons après croissance et la ligne continue extraite de l'Équation 14 pour une épaisseur de Ni de 7 nm.

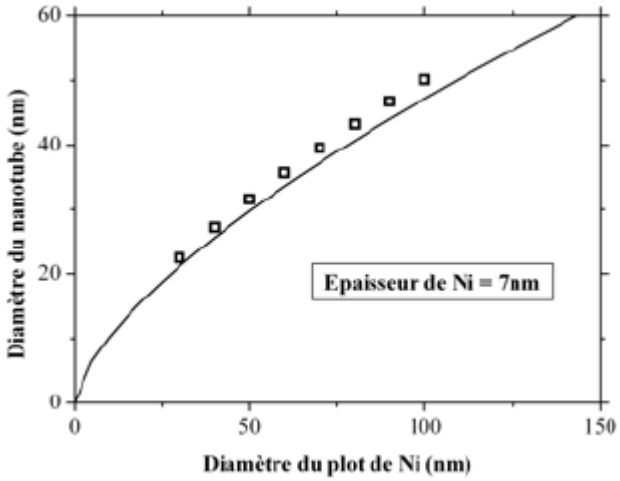


Figure 40 : Diamètre du nanotube en fonction du diamètre du plot de catalyseur. Mesures et approximations théoriques [96].

2.3 Méthode PECVD développée par le LPICM Polytechnique

2.3.1 Fonctionnement et réalisations dans le cadre de ces travaux

Pour la croissance localisée de réseaux alignés de nanotubes de carbone individuels, le LPICM de l'Ecole Polytechnique a développé un réacteur de type PECVD (Figure 41) avec la possibilité d'utiliser une double activation par filament chaud (1700 °C – 2000 °C) et par décharge plasma en courant continu. Cette méthode de croissance des nanotubes de carbone permet de combiner le contrôle de la position et de l'alignement des nanotubes avec des vitesses de croissance élevées (jusqu'à quelques µm/minute) et à des températures moyennes compatibles avec une grande variété de substrats (≤ 750 °C).

La partie liminaire de la synthèse PECVD consiste à porter à la température de croissance le substrat sur lequel se trouve le catalyseur de nickel. Ce dernier se fend alors en une certaine quantité d'agrégats en fonction de sa surface initiale et des particules de Ni liquide en forme de billes apparaissent. L'étape suivante de la croissance est la PECVD en elle-même. Elle consiste à activer un mélange gazeux pour isoler les atomes de carbone qui vont être diffusés dans la particule de catalyseur. Pour ce faire on utilise deux gaz, un gaz précurseur qui apporte l'élément carbone (dans notre cas l'alcool isopropylique IPA (37 %)), et un gaz réducteur qui vient graver le carbone amorphe se déposant sur la particule de Ni durant la croissance (dans notre cas H_2O (43 %) + H_2 (20 %)). A l'instant où les gaz sont injectés, un plasma est créé entre les deux grilles du réacteur (anode et cathode) dont la polarisation est inverse à celle appliquée sur le porte substrat. Un champ électrique apparaît donc perpendiculairement au substrat, permettant ainsi d'orienter verticalement la croissance des nanotubes de carbone. En présence d'une barrière de diffusion de nitrure de titane (TiN), la croissance est réalisée par la tête du nanotube (Figure 39), ce qui permet en jouant sur le temps et la température de croissance d'avoir un contrôle sur la longueur finale du MWCNT.

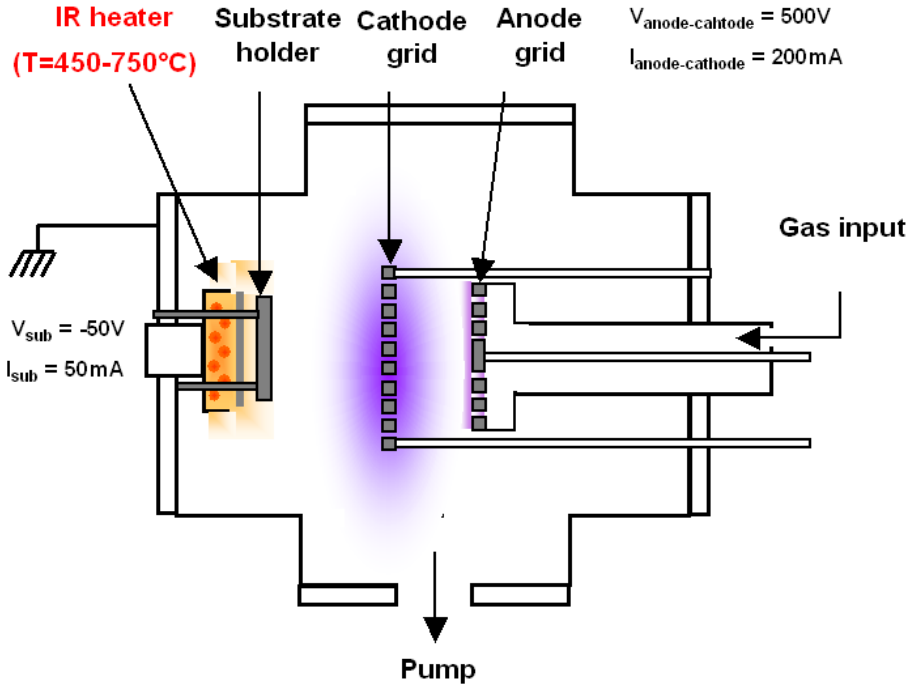
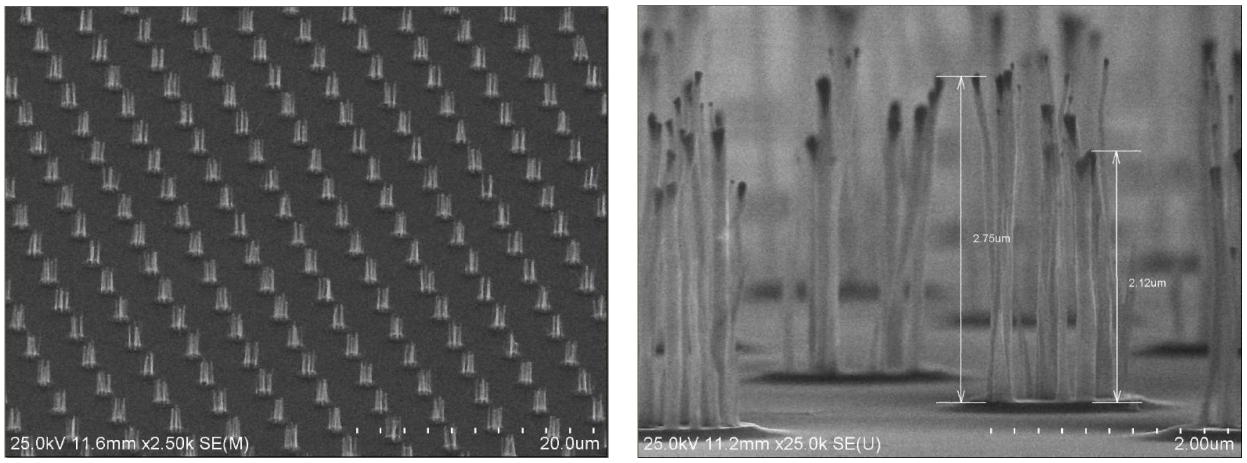


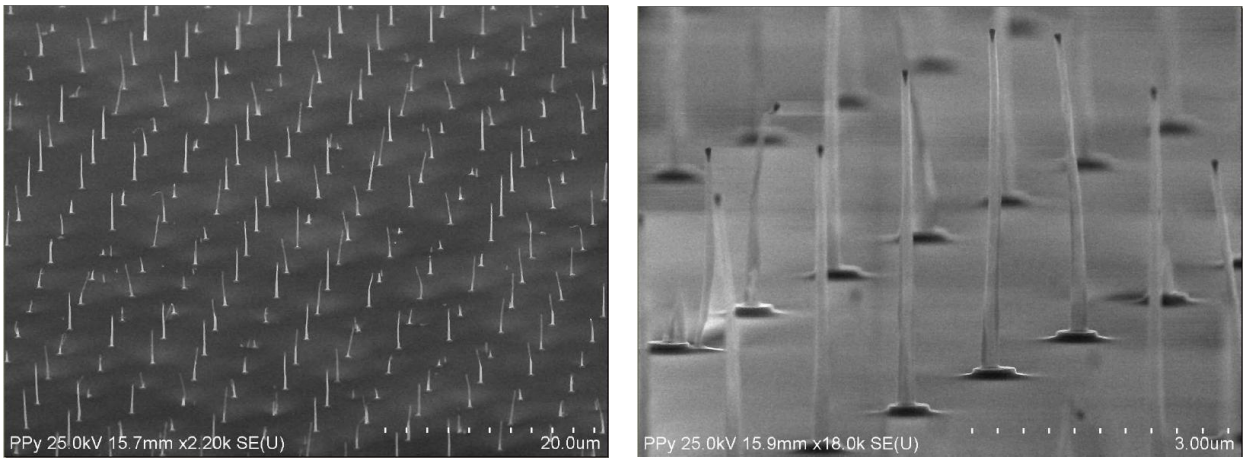
Figure 41 : Schéma illustrant le fonctionnement du réacteur de croissance PECVD du LPICM Polytechnique.

En utilisant cette méthode de croissance, nous avons synthétisé des réseaux de nanotubes orientés et multiples sur des plots de catalyseur de ~ 1 µm de diamètre obtenus par lithographie optique (Figure 42), ainsi que des réseaux de nanotubes orientés et individuels sur des plots de catalyseur de 300 nm de diamètre obtenus par lithographie électronique (Figure 43).



(a) **(b)**

Figure 42 : Image MEB d'une croissance PECVD IPA + H_2O + H_2 à 600 °C sur lithographie TiN/Ni 1 µm de diamètre.



(a) **(b)**

Figure 43 : Image MEB d'une croissance PECVD IPA + H_2O + H_2 à 600 °C sur e-beam TiN/Ni 300 nm de diamètre.

2.3.2 Influence des paramètres de croissance PECVD sur la géométrie des MWCNTs synthétisés

Comme précisé précédemment, les paramètres définis pour la synthèse des nanotubes de carbone en méthode PECVD influent sur la longueur finale des CNTs. En effet compte tenu de la Figure 44, le temps de croissance est l'un des paramètres ayant une incidence majeure sur la longueur des tubes. On peut également remarquer que ce n'est qu'au bout de 4 minutes que l'on commence à distinguer les parois des MWCNTs par contraste avec les catalyseurs au niveau des têtes. Au final, on peut obtenir au bout de 100 minutes des MWCNTs faisant en moyenne 11 µm de long.

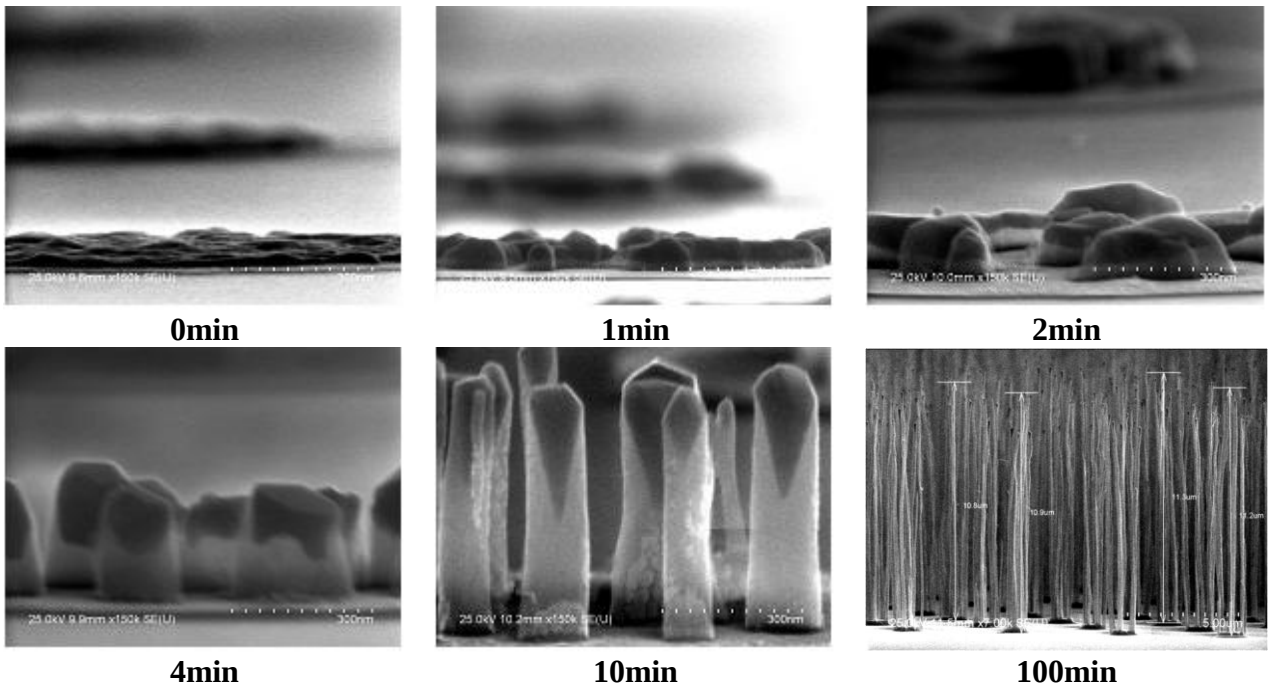


Figure 44 : Etude de la cinétique de croissance aux cours du temps à 600°C en PECVD IPA + H_20 + H_2.

La température a également une grande incidence sur la longueur des nanotubes de carbone. Les résultats obtenus (Figure 45) laissent apparaître que plus la température de croissance est élevée, plus les MWCNTs seront longs. Ainsi on constate qu'à 475 °C, les nanotubes de carbone font en moyenne 1,7 µm de long, à 500 °C 2 µm, à 600 °C 2,2 µm et à 700 °C 3,5 µm.

La réalisation des démonstrateurs NEMS nécessitera que la longueur des MWCNTs soit au-delà des 2 µm. Compte tenu des résultats présentés à la Figure 45, les croissances sur nos dispositifs NEMS devront donc être réalisées au minimum à 650 °C.

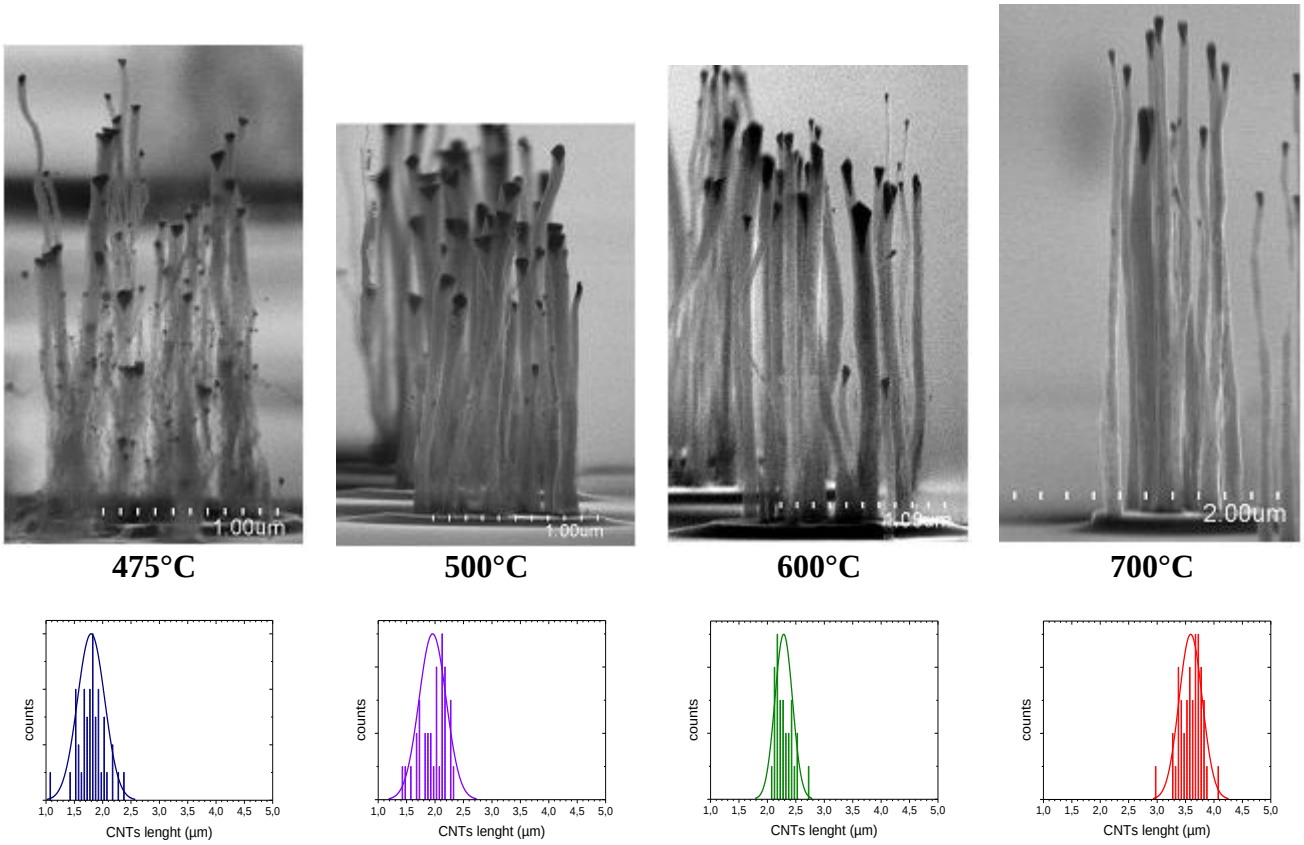


Figure 45 : Etude de la cinétique de croissance en fonction de la température en PECVD C_2H_2 + H_20 + H_2 pendant 40 minutes.

2.4 Mesures du module de Young et géométrie de nos MWCNTs

Afin de mieux maîtriser théoriquement en amont de la conception les caractéristiques d'activation des NEMS, plusieurs études ont été menées. Au TEM (Transmission Electron Microscope), sur les différentes tailles des nanotubes de carbone produit par le LPICM sur Molybdène/TiN/Ni et en oscillation par le LPMCN de Lyon afin de déterminer le module de Young de nos MWCNTs (ou module élastique) ainsi que la densité de courant maximale pouvant y circuler.

2.4.1 Croissance PECVD sur Mo/TiN/Ni

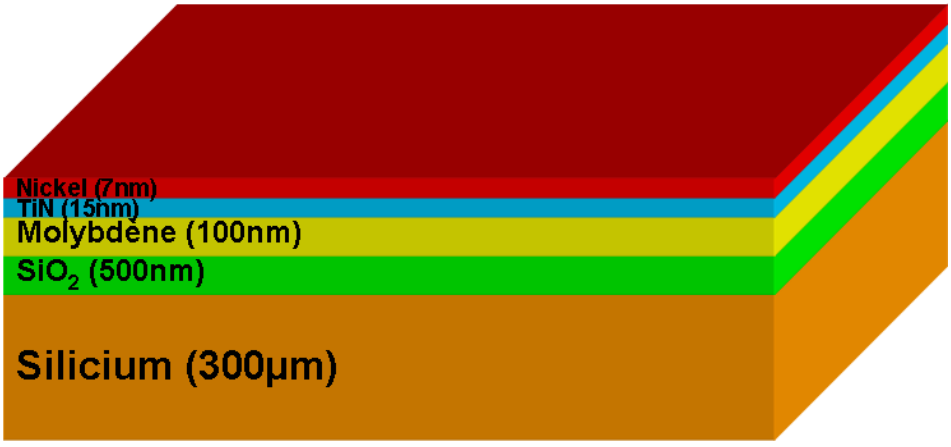
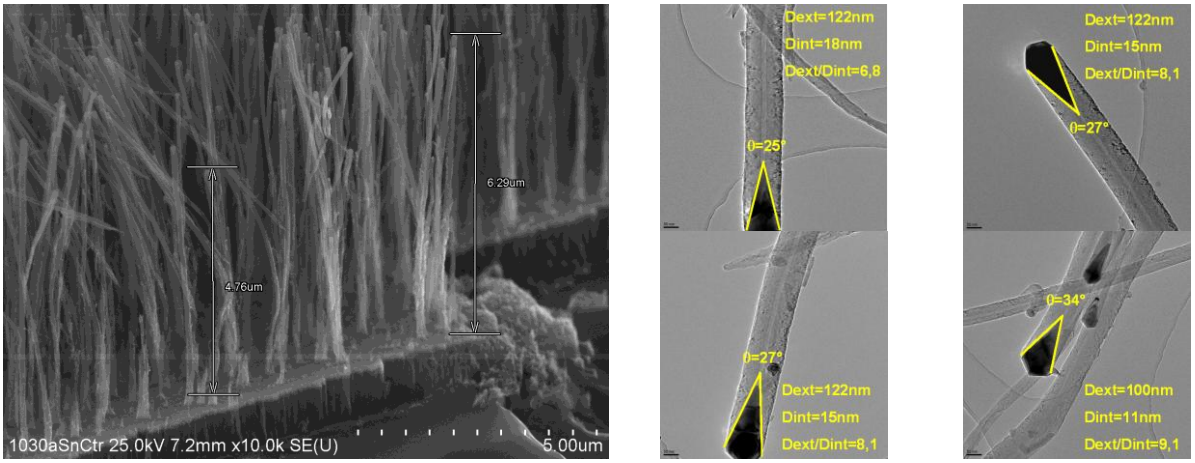


Figure 46 : Les différentes étapes de conception technologique avant croissance.

Afin de s'assurer d'un grand nombre de nanotubes de carbone sur une puce de 1 mm^2, on procède à une croissance pleine plaque (Figure 46), c'est-à-dire du TiN/Ni déposé sur toute la surface de la puce pour obtenir une forêt de MWCNTs après synthèse PECVD (Figure 47a).

2.4.2 Analyse au TEM des MWCNTs

La grande quantité de nanotubes de carbone issue d'une croissance pleine plaque permet donc une étude au TEM de plusieurs MWCNTs afin d'effectuer une moyenne du rapport diamètre extérieur sur diamètre intérieur, ainsi qu'une moyenne de l'angle du cône de la particule de nickel se situant à la tête du nanotube (Figure 129b). On obtient ainsi un rapport moyen $D_{ext}/D_{int} = 8,1$ et un angle $\theta = 27°$.

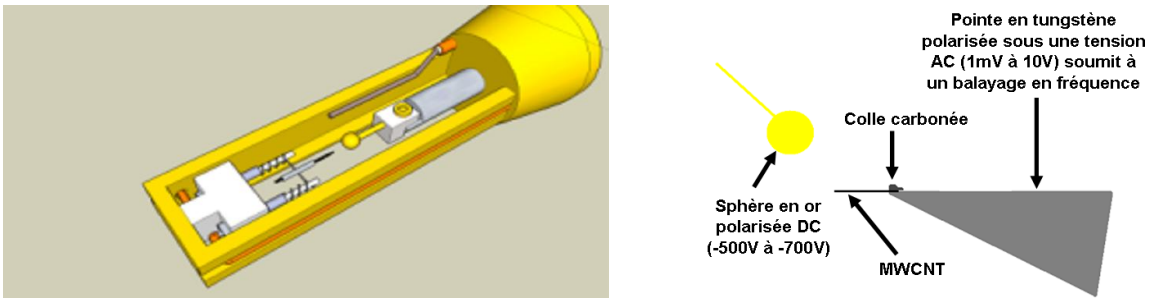


(a) **(b)**

Figure 47 : (a) Images MEB d'une forêt de MWCNTs synthétisés à 700 °C IPA + H_2O + H_2 et (b) TEM des MWCNTs obtenus sur Molybdène/TiN/Ni.

2.4.3 Mesures en oscillations des MWCNTs via un champ électrostatique

L'expérience effectuée par le LPMCN de Lyon [100] correspond à la méthode d'oscillation d'une poutre via un champ électrostatique AC dont l'amplitude est fixée pour que la contrainte en traction sur l'extrémité libre du nanotube de carbone soit suffisament faible pour que le modèle soit assimilable à l'oscillation d'une poutre [36]. En effet, on observe sur la Figure 48b que la mise en résonance du nanotube s'opère par l'application d'une faible tension AC (1 mV à 10 V) sur ce dernier et d'une tension négative DC élevée sur une sphère en or (-500 V à -700 V). Ce dispositif a pour effet de créer un champ électrostatique entre les deux éléments polarisés. Ce champ permet d'accorder le nanotube le rendant ainsi plus sensible au balayage en fréquence qui lui est appliqué. On peut alors observer au TEM, sous un vide de 10^{-7} Torr, les différents modes de vibrations propres du MWCNT (Figure 48).



(a) **(b)**

Figure 48 : (a) Dispositif de mesure TEM en vibration et en émission de champs d'un nanotube de carbone développé par P. Poncharal et D. Guillot [101]. (b) Schéma illustrant le principe de fonctionnement de l'oscillation d'un nanotube encastré-libre via un champ électrostatique AC.

2.4.3.1 MWCNT issu d'une croissance PECVD pleine plaque Mo/TiN/Ni

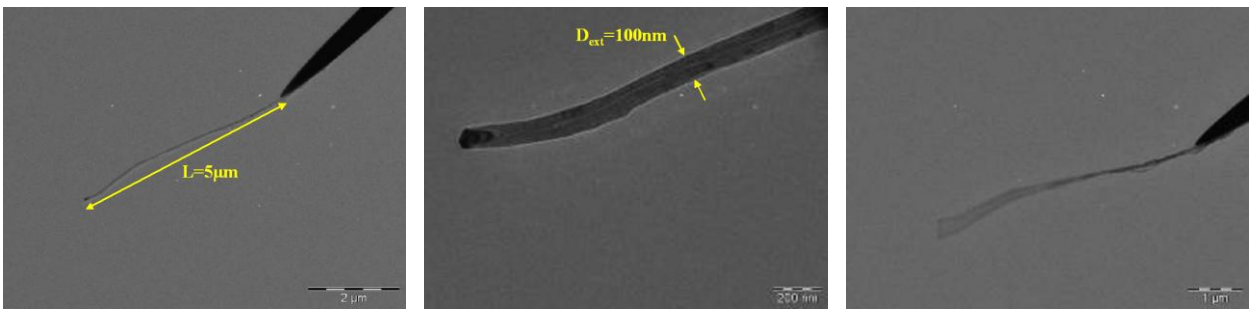
Pour effectuer cette mesure, on extrait du substrat, sur lequel on a réalisé la croissance PECVD sur Molybdène/TiN/Ni, un MWCNT suffisamment long pour pouvoir être manipulé (> 3 µm) et fixé sur une pointe en tungstène via une colle à base de carbone comme schématisé sur la Figure 48b [102].

La mesure fournit ainsi la fréquence fondamentale de vibration à 3,96 MHz pour un nanotube de 5 µm de long, de diamètre extérieur 100 nm et de diamètre intérieur 10 nm. En appliquant la relation définie par l'Équation 15, on obtient un module de Young de 114 GPa (Figure 49) correspondant en moyenne aux résultats obtenus par d'autres équipes et reportés Tableau 2 page 27.

Équation 15 :

$$E = \left(\frac{8\pi f_j L^2}{\beta_j^2} \right)^2 \frac{\rho}{\left(D_{ext}^2 - D_{\text{int}}^2 \right)}$$ (voir Annexe 5.2 page 163)

avec E le module de Young, L la longueur du nanotube, f_j la fréquence de vibration du $j^{ième}$ mode, D_{ext} le diamètre extérieur du nanotube, D_{int} le diamètre intérieur du nanotube, $\rho = 2.24$ g/cm^3 la masse volumique du carbone et $\beta_j = j + 0,5$ la constante du mode de vibration j.



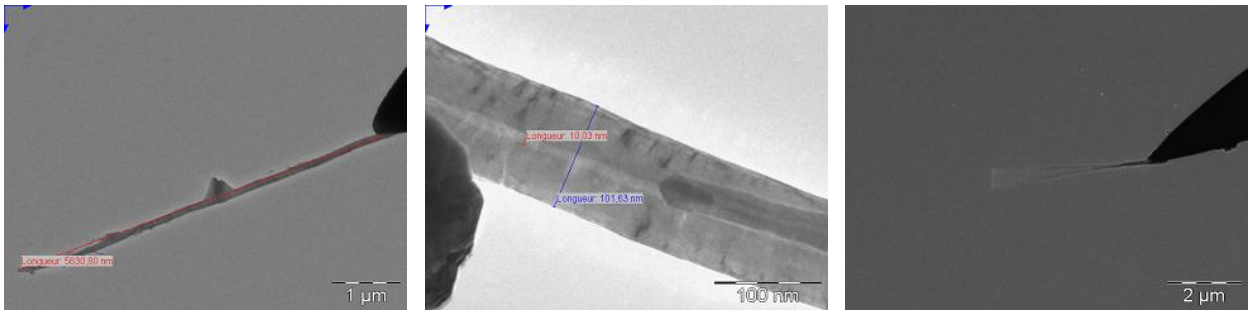
(a) **(b)** **(c)**

Figure 49 : Images TEM de l'étude en oscillation sur un MWCNT issu d'une croissance PECVD sur Molybdène/TiN/Ni, (a) longueur du MWCNT, (b) diamètre du MWCNT et (c) vibration du MWCNT à sa fréquence fondamentale.

2.4.3.2 MWCNT issu d'une croissance PECVD pleine plaque TiW/TiN/Ni

Afin d'étudier l'impact de la métallisation sur les caractéristiques physiques de nos MWCNTs, une seconde expérience a été réalisée avec un alliage titane-tungstène en substitution du molybdène sous des conditions de synthèse PECVD similaires à celles de la première mesure. Cet alliage métallique résiste à la température de croissance de 700 °C et respecte du fait la condition thermique liée à la métallisation définie à la Figure 33 page 56.

Cette mesure fournit ainsi la fréquence fondamentale de vibration à 3,29 MHz pour un nanotube de 5,6 µm de long, de diamètre extérieur 102 nm et de diamètre intérieur 10 nm. En appliquant la formule définie par l'Équation 15, on obtient un module de Young de 116 GPa (Figure 50).



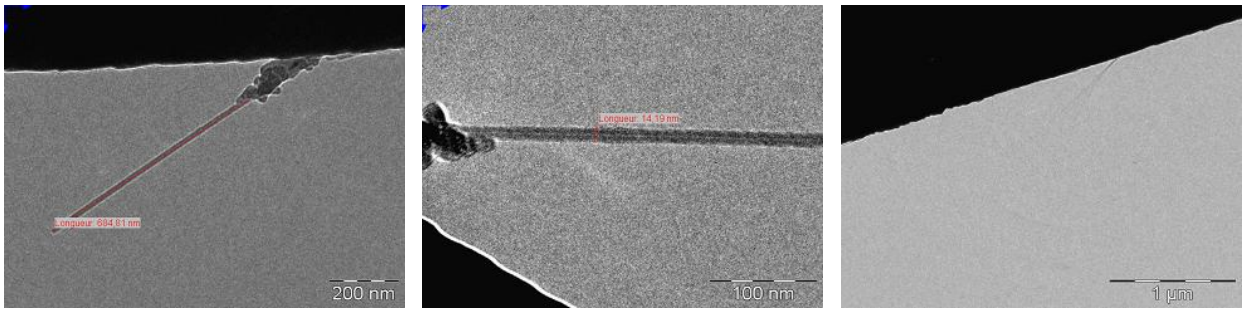
(a) **(b)** **(c)**

Figure 50 : Images TEM de l'étude en oscillation sur un MWCNT issu d'une croissance PECVD sur TiW/TiN/Ni, (a) longueur du MWCNT, (b) diamètre du MWCNT et (c) vibration du MWCNT à sa fréquence fondamentale.

Compte tenu de ce second résultat, il apparait que le module de Young reste constant à 2 GPa près et ceux quelque soit la métallisation située entre le SiO_2 et le TiN.

2.4.3.3 MWCNT issu d'une croissance par Arc électrique

Afin de fournir une mesure comparative, une dernière expérience a été effectuée sur un nanotube de carbone provenant d'une synthèse réalisée au LPMCN à haute température par arc électrique. De cette manipulation, on obtient la fréquence de vibration fondamentale à 59,7 MHz pour un nanotube de 685 nm de long, de diamètre extérieur 14 nm et de diamètre intérieur 2 nm. En appliquant la formule définie par l'Équation 15, on obtient un module de Young de 456 GPa (Figure 51). Ce résultat coïncide avec les résultats obtenus par d'autres équipes (Tableau 2 page 27).



(a) **(b)** **(c)**

Figure 51 : Images TEM de l'étude en oscillation sur un MWCNT issu d'une croissance par arc électrique, (a) longueur du MWCNT, (b) diamètre du MWCNT et (c) vibration du MWCNT à sa fréquence fondamentale.

2.4.3.4 Conclusions

On constate aux vues des deux résultats en croissance PECVD, que la métallisation située entre l'isolant SiO_2 et la barrière de diffusion TiN ne semble pas avoir d'impact sur la valeur du module de Young des MWCNTs du moment que cette dernière résiste à la température de synthèse des nanotubes de carbone. Ainsi par une croissance de type PECVD IPA + H_2O + H_2 à 700 °C sur substrat Si (300 µm) / SiO_2 (500 nm) / métallisation (100 nm) / TiN (15 nm) / Ni (7 nm), on obtient des MWCNTs dont le module de Young est en moyenne de 115 GPa (Tableau 7).

Ces expérimentations font également état que la méthode de croissance utilisée pour obtenir des nanotubes de carbone influe fortement leurs propriétés mécaniques. En effet une synthèse par arc électrique génère une meilleure qualité cristalline des parois du nanotube de carbone que celle obtenue par une synthèse par PECVD. Ainsi par une croissance à moyenne température (PECVD), on obtient un MWCNT dont le module de Young est en moyenne de 115 GPa (Tableau 7). Alors que par une croissance à haute température de type arc électrique, on obtient un module de Young de 456 GPa (Tableau 7). Pour conclure, la validité de ces résultats est confirmée par la concordance existante avec les résultats issus de la bibliographie définis dans le Tableau 2 page 27.

Procédé de croissance	Type de nanotube	Longueur	Diamètre extérieur	Diamètre intérieur	Résonance fondamentale	Module De Young
PECVD	MWCNT	5,6 µm	102 nm	10 nm	3,29 MHz	116 GPa
PECVD	MWCNT	5 µm	100 nm	10 nm	3,96 MHz	114 GPa
Arc électrique	MWCNT	685 nm	14 nm	2 nm	51,7 MHz	456 GPa

Tableau 7 : Récapitulatif des résultats expérimentaux obtenus.

2.5 Courant dans les MWCNTs

Le courant pouvant circuler dans les MWCNTs est une donnée importante à déterminer dans la perspective des mesures en activation qui seront réalisées sur les démonstrateurs NEMS DC développés dans le chapitre 3. Pour ce faire, on utilise l'expérience présentée à la Figure 48 sur le principe de l'analyse de Fowler-Nordheim, qui permettra de caractériser la densité de courant pouvant circuler dans nos MWCNTs. Il faut savoir qu'en moyenne la densité de courant pour un SWCNT est de 10^9 A/cm^2 [103] et de 10^8 A/cm^2 pour un MWCNT [104].

L'analyse de Fowler-Nordheim correspond au mécanisme induit par l'émission de champ permettant la caractérisation de la densité de courant émise par un matériau en fonction du champ électrique appliqué à sa surface par une tension d'excitation. L'émission de champ est un phénomène purement quantique s'appuyant sur l'existence d'une barrière de potentiel étroite entre un métal et le vide permettant le passage de l'électron. L'application d'un champ électrique suffisamment élevé réduit artificiellement la largeur de la barrière de potentiel et permet d'obtenir l'émission d'un courant par effet tunnel [96].

Des mesures par cette méthode ont été effectuées sur les nanotubes de carbone synthétisés par PECVD par le LPICM (Figure 49) ainsi que sur un nanotube synthétisé par arc électrique par le LPMCN (Figure 51).

2.5.1 MWCNT issu d'une croissance PECVD

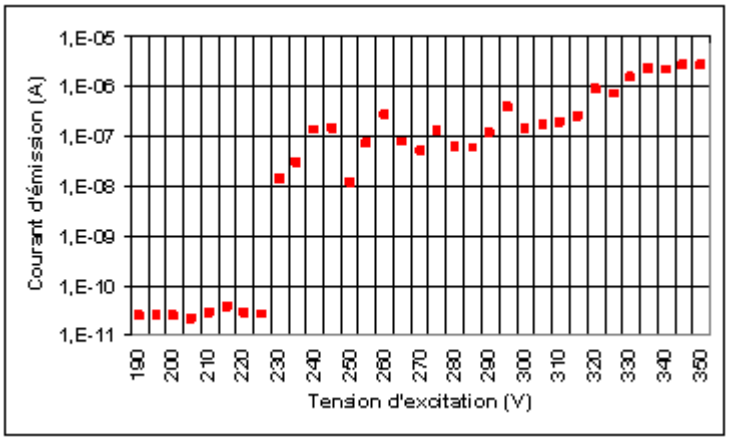


Figure 52: Courant d'émission d'un MWCNT issu d'une croissance PECVD en fonction de la tension d'excitation.

En analysant les résultats obtenus en émission de champ, Figure 52, on constate que sans aller jusqu'à la destruction du nanotube de carbone, on obtient un courant d'émission saturé circulant au sein du MWCNT de I = 2,7 µA.

A partir du diamètre extérieur du nanotube de carbone D_{ext} = 102 nm (Tableau 7), la densité de courant peut donc être extrapolée par cm^2 pour obtenir 3,3.10^4 A/cm^2 (Équation 16).

Équation 16 : Densité de courant d'un nanotube de carbone

$$\text{Densité de courant} = I / (\pi * R_{ext}^2)$$

2.5.2 MWCNT issu d'une croissance par Arc électrique

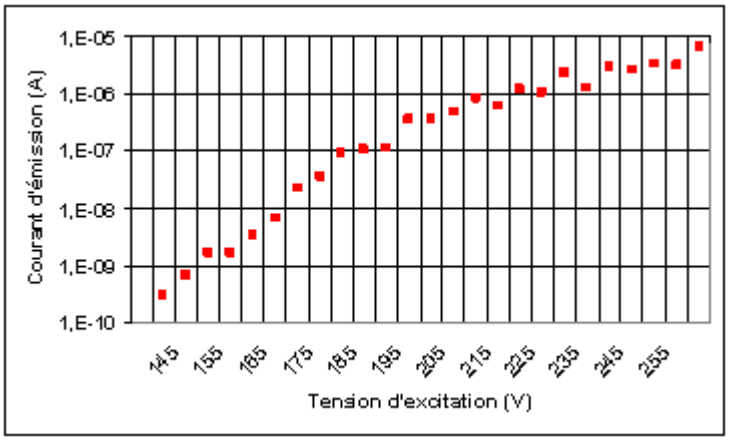


Figure 53: Courant d'émission d'un MWCNT issu d'une croissance par arc électrique en fonction de la tension d'excitation.

En analysant les résultats obtenus en émission de champ (Figure 53), on constate que sans aller jusqu'à la destruction du nanotube de carbone, on obtient cette fois un courant d'émission saturé circulant au sein du MWCNT de I = 6,51 µA.

A partir du diamètre extérieur du nanotube de carbone D_{ext} = 14 nm (Tableau 7), la densité de courant peut donc être extrapolée par cm^2 pour obtenir $4{,}2.10^6$ A/cm^2 (Équation 16).

2.5.3 Conclusions

On constate au vue des résultats, que les MWCNTs issus de la croissance PECVD ne fournissent pas les mêmes performances en densité de courant que les MWCNTs issus de croissance par arc électrique (Tableau 8). On remarque également que lors d'une croissance PECVD, le couple précurseur-réducteur utilisé a une incidence non-négligeable. Ainsi les MWCNTs synthétisés par le LPICM de Polytechnique par PECVD avec le couple IPA + H_2O + H_2, supportent une densité de courant moins importante que les croissances PECVD avec les couples C_2H_2 + NH_3 ou CH_4 + H_2.

Il est important également de noter que dans l'étude en émission de champ, le travail de sortie ϕ, correspondant à l'énergie minimale nécessaire à fournir à un électron pour l'extraire du nanotube de carbone à zéro Kelvin, a une incidence non négligeable sur la valeur du potentiel de surface (Équation 17) et donc sur la densité de courant. Les mesures expérimentales du travail de sortie d'un nanotube de carbone laissent apparaître une grande disparité dans les résultats, variant de 2 eV à 7,3 eV [105] [106]. Ces écarts peuvent avoir plusieurs origines, comme le procédé de synthèse des CNTs explicité précédemment ou encore la présence d'impuretés en surface.

Équation 17 :

$$V(z) \approx E_F + \phi - \frac{e^2}{4z}$$

où E_F est le niveau de Fermi du nanotube de carbone, ϕ le travail de sortie, z la distance entre le CNT et la source d'excitation en tension et e la charge de l'électron (e = -1,60217653.10^{-19} C).

Pour conclure, les courbes d'émission de champ sont reproductibles à condition que le nanotube de carbone soit débarrassé des impuretés en surface et que le champ ne génère pas un courant d'émission trop élevé qui provoquerait un début de destruction du CNT. La suppression des impuretés peut être réalisée par traitement thermique ou par un chauffage par effet joule en émission de champ [107].

Procédé de croissance	Type de nanotube	Longueur	Diamètre extérieur	Diamètre intérieur	Courant mesuré	Densité de courant
PECVD IPA + H_2O + H_2 700°C	MWCNT	5,6 µm	102 nm	10 nm	2,7 µA	3,3E+04 A/cm²
Arc électrique	MWCNT	685 nm	14 nm	2 nm	6,51 µa	4,2E+06 A/cm²
PECVD C_2H_2 + NH_3 700°C [108]	MWCNT	5 µm	50 nm	X	100 µA	5E+06 A/cm²
PECVD CH_4 + H_2 750°C [109]	MWCNT	25 µm	100 nm	50 nm	7,25 mA	1E+08 A/cm²

Tableau 8 : Récapitulatif des résultats de mesures issus de nos expérimentations et de l'état de l'art.

2.6 MWCNT enrobé de platine, tungstène ou silice

2.6.1 Principe de dépôt de matériau par la méthode EBID (Electron Beam Induced Deposition)

Afin de concevoir un démonstrateur NEMS capacitif il est indispensable de développer une méthode permettant d'enrober un MWCNT avec un matériau isolant. La technique envisagée est l'EBID, elle consiste à injecter localement sur la zone du MWCNT un gaz organo métallique contenant l'espèce à déposer et à bombarder d'électrons ce gaz pour y séparer l'espèce désirée (Figure 54a). Cette technique permet également d'envisager, l'amélioration de la conductance du contact ohmique initialement carbone-carbone avec l'un des deux MWCNTs commutés enrobé d'une métallisation et l'amélioration du contact entre les CNTs et le matériau sur lequel ils ont été synthétisés par un dépôt métallique à la base des nanotubes de carbone (Figure 54c et Figure 54d).

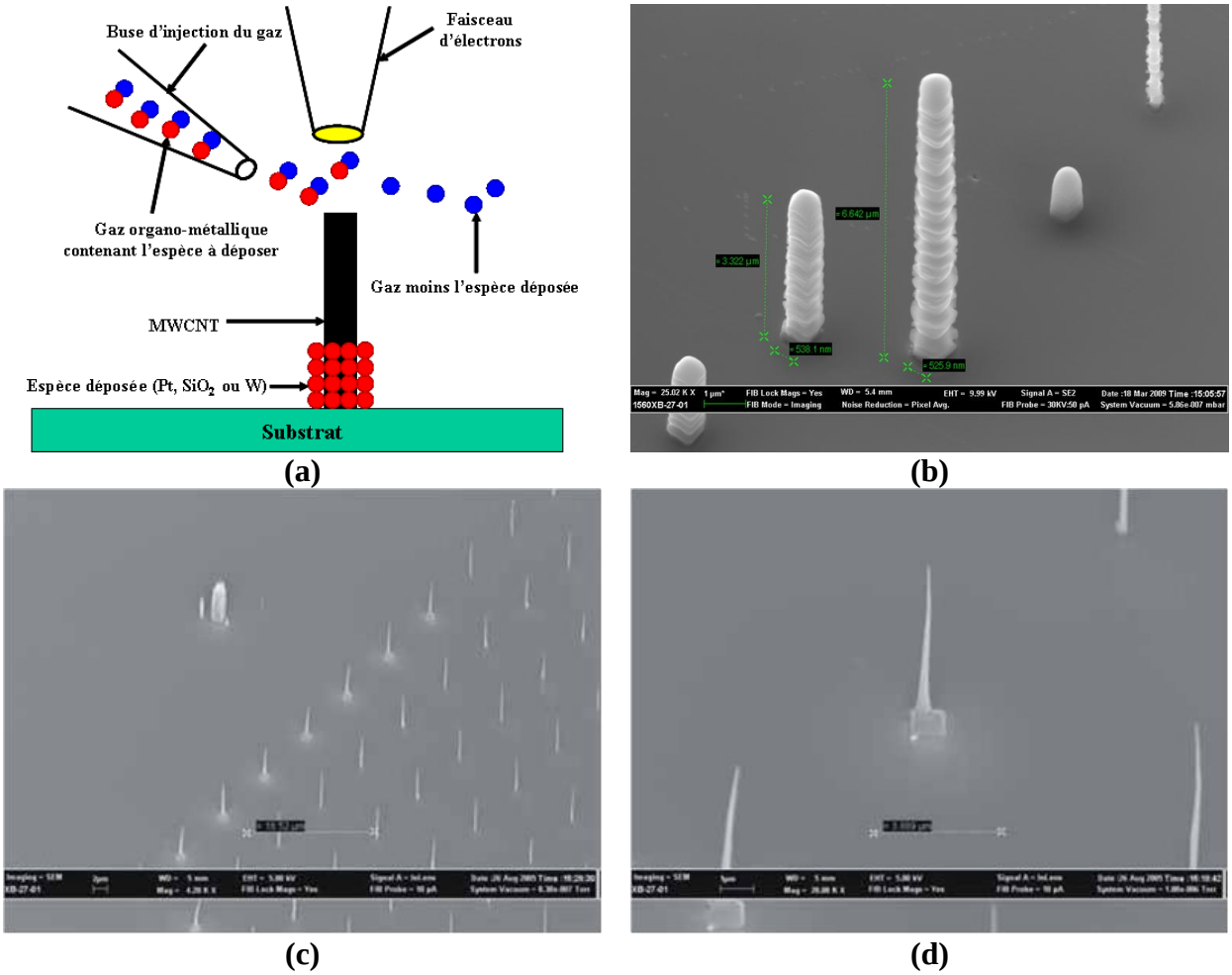


Figure 54 : (a) Schéma de la méthode EBID. (b) Réalisation d'un fil de silice (SiO_2) [110]. (c) et (d) Dépôt de platine au pied de MWCNTs pour améliorer le contact électrique avec le substrat [96].

2.6.2 Les matériaux déposés

L'objectif de cette thèse est la modélisation d'un commutateur NEMS hyperfréquence, pour cela il est nécessaire que les matériaux ayant pour fonction le transport du signal soient les meilleurs conducteurs électriques possibles. L'idée consiste à améliorer la conductivité générale d'un NEMS à contact ohmique en recouvrant l'un des deux MWCNT d'une métallisation qui sera plus conductrice électriquement que le graphène des nanotubes de carbone. Le platine et le tungstène présentent des conductivités électriques supérieures au graphène (Tableau 9) et peuvent être déposés par EBID au sein du laboratoire THALES TRT.

	Graphène	Platine	Tungstène
Conductivité électrique (S/m)	7,78E+04	9,66E+06	1,89E+07

Tableau 9 : Tableau comparatif de la conductivité électrique du platine et du tungstène avec le graphène.

Un autre objectif de cette thèse repose sur la modélisation d'un démonstrateur NEMS capacitif. Il faut donc dans ce cas enrober un MWCNT avec un diélectrique et seule la silice (SiO_2) peut être déposée au sein du laboratoire THALES TRT via la méthode EBID.

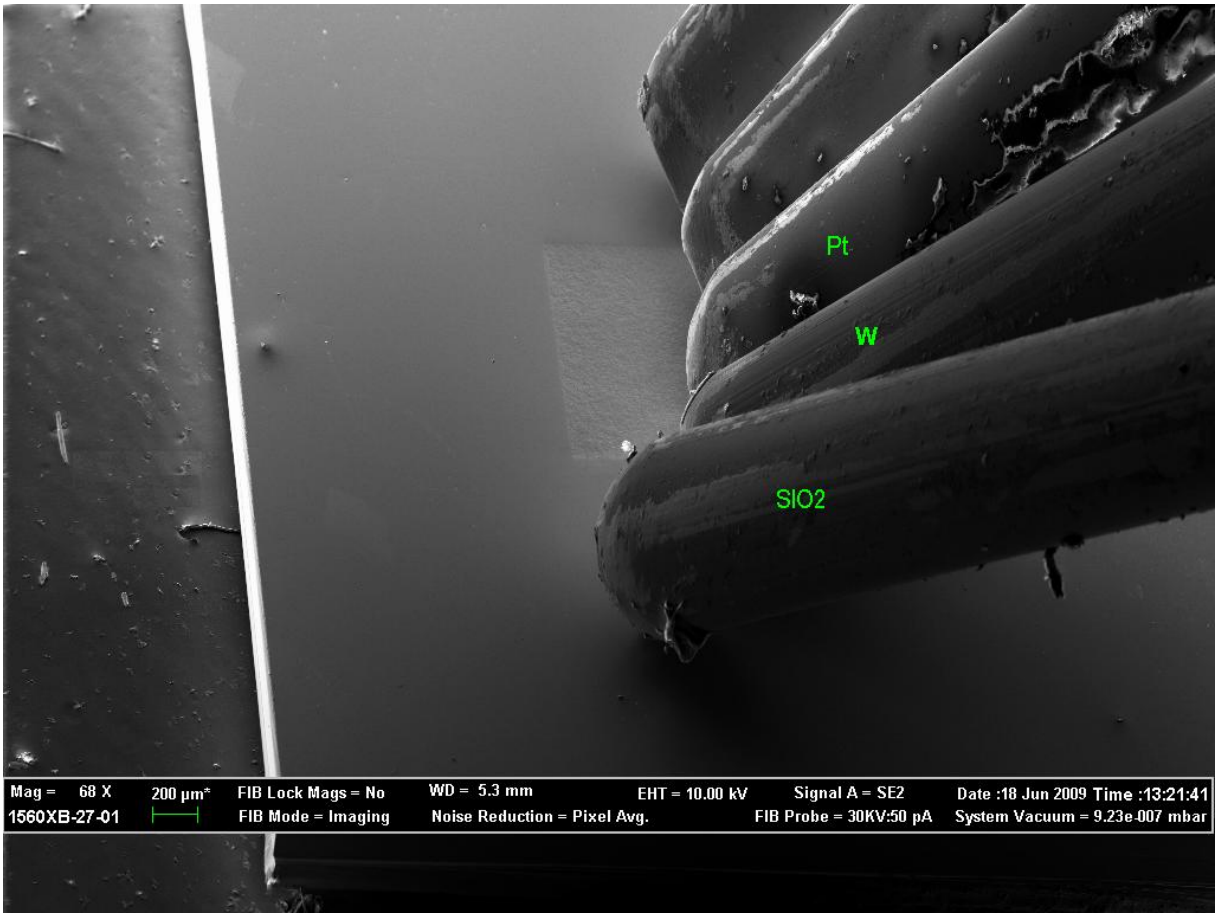


Figure 55 : Image MEB des buses d'injection de gaz permettant le dépôt de Pt, W et SiO_2.

2.6.3 Image MEB des résultats obtenus par EBID

2.6.3.1 Platine

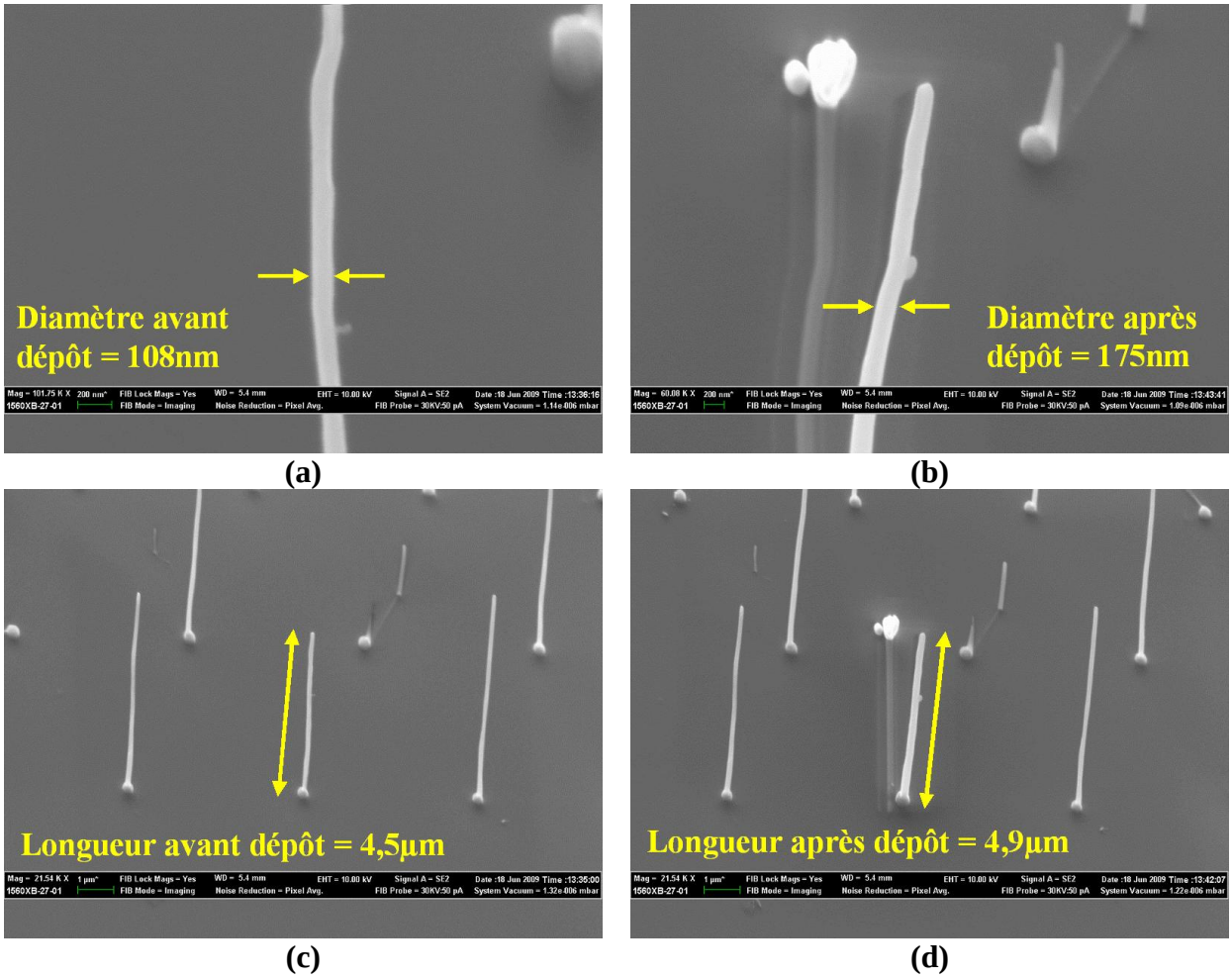


Figure 56 : (a et c) Image MEB d'un MWCNT avant dépôt de platine et (b et d) après dépôt de platine d'une minute par EBID.

Sur les images MEB de la Figure 56 on constate que le dépôt de platine par EBID procure des résultats encourageants. En effet on observe qu'avant dépôt de matériau via le gaz $C_7H_{17}Pt$ (Platinum carbonyl), le MWCNT est moins large et moins long (Figure 56a et Figure 56c) qu'après dépôt (Figure 56b et Figure 56d). La manipulation semble donc concluante pour le platine et de ce fait envisageable pour la réalisation de démonstrateurs NEMS à contact ohmique carbone-platine.

2.6.3.2 Tungstène

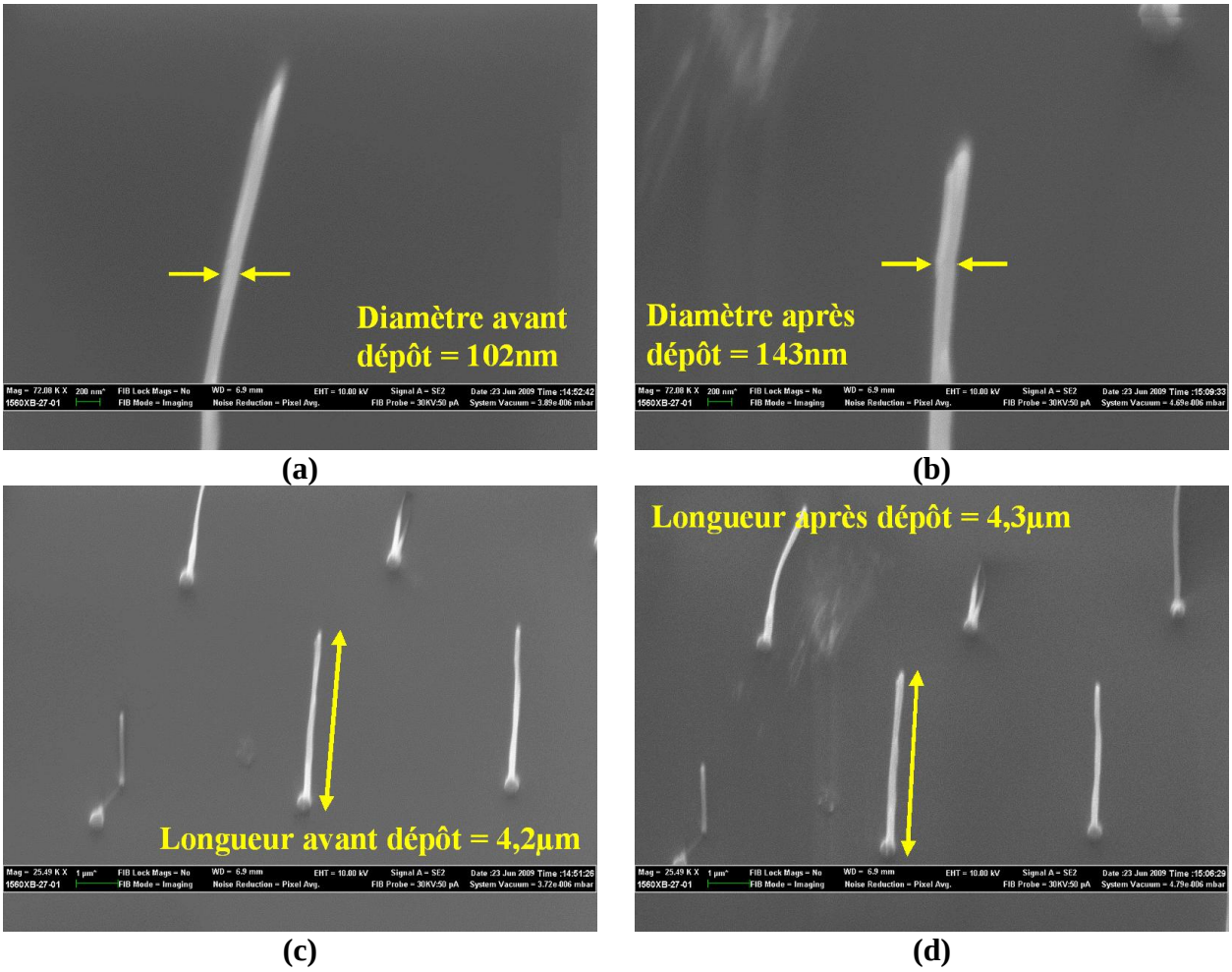


Figure 57 : (a et c) Image MEB d'un MWCNT avant dépôt de tungstène et (b et d) après dépôt de tungstène de trois minutes par EBID.

Sur les images MEB de la Figure 57 on observe qu'avant dépôt de tungstène via le gaz $W(CO)_6$ (Tungsten hexacarbonyl), le MWCNT est moins large et moins long (Figure 57a et Figure 57c) qu'après dépôt (Figure 57b et Figure 57d). La manipulation semble donc également cohérente pour le tungstène qui peut aussi de ce fait être envisagé pour la conception de démonstrateurs NEMS à contact ohmique carbone-tungstène.

2.6.3.3 Silice

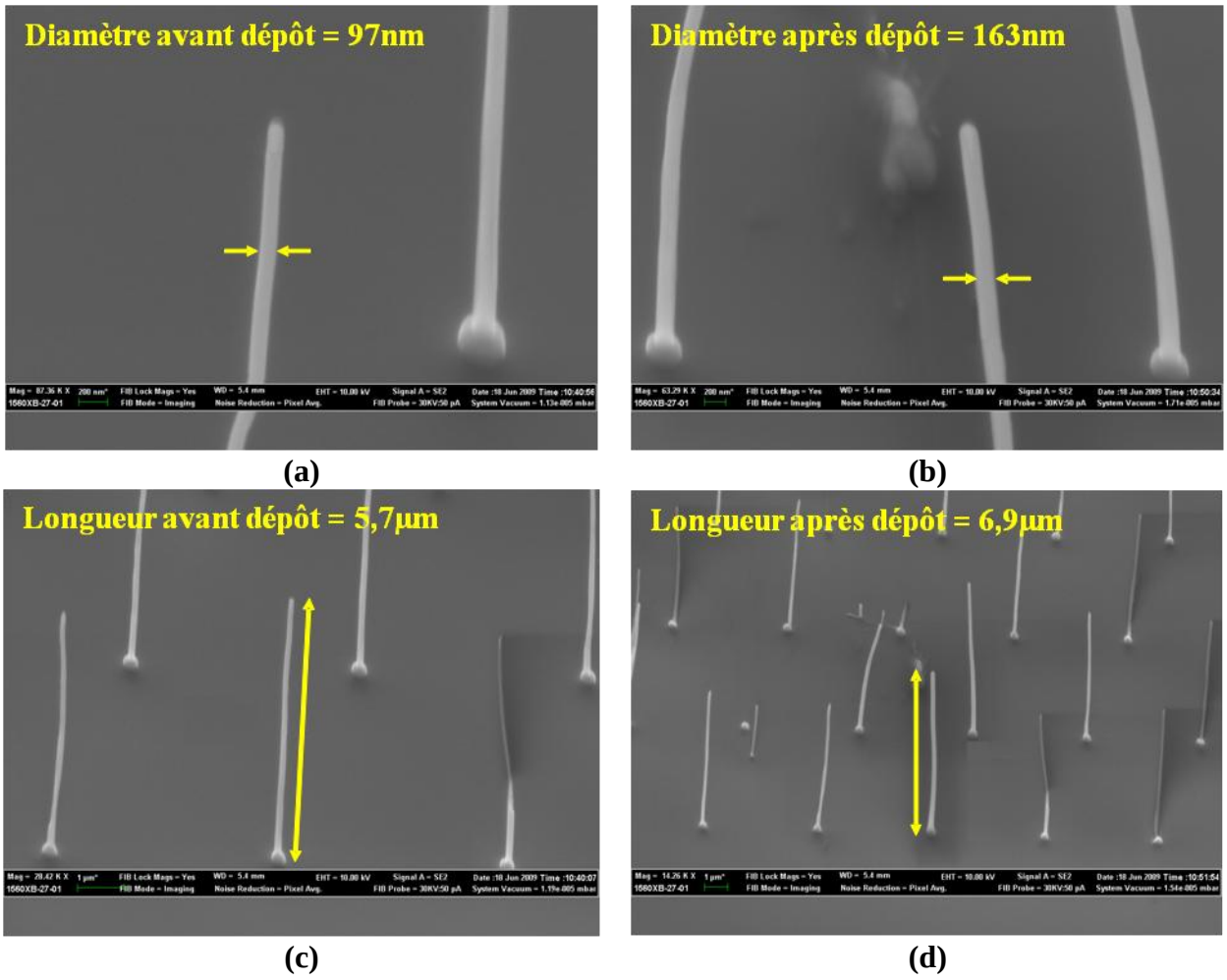


Figure 58 : (a et c) Image MEB d'un MWCNT avant dépôt de silice et (b et d) après dépôt de silice de trois minutes par EBID.

Sur les images MEB de la Figure 58 on observe qu'avant dépôt de silice via le gaz DTBS (Diaceto-di-Tert-ButxySilane), le MWCNT est moins large et moins long (Figure 58a et Figure 58c) qu'après dépôt (Figure 58b et Figure 58d). L'expérimentation fonctionne donc également avec la silice, rendant possible la réalisation de démonstrateurs NEMS capacitifs à contact carbone-SiO_2.

2.6.4 Conséquences des résultats obtenus par la méthode EBID

Les premières expériences de dépôts recouvrant des MWCNTs de différents matériaux par EBID ont été concluantes. Elles caractérisent un nouvel aspect des travaux de ce manuscrit avec la possibilité de réduire la résistance électrique globale d'un commutateur NEMS à contact ohmique avec du platine ou du tungstène, et rend possible la conception expérimentale d'un NEMS capacitif par le biais du SiO_2. D'autres matériaux sont envisageables comme l'or pour l'aspect ohmique ou la nitrure de silicium (Si_3N_4) pour l'aspect capacitif.

2.7 Conclusion de la seconde partie

Cette seconde partie met en évidence le choix et les dimensions des différents matériaux adaptés aux contraintes et aux exigences de nos travaux. Ainsi, le silicium a été défini comme substrat pour faciliter l'orientation du champ électrique au cours de la synthèse PECVD, le SiO_2 pour isoler entre-elles les électrodes des commutateurs NEMS, le molybdène comme métallisation car résistant aux températures de croissance, le TiN comme barrière de diffusion entre le catalyseur et la métallisation et le nickel comme catalyseur pour obtenir un unique MWCNT par plot avec un diamètre supérieur à 50nm, donc de caractère métallique (Figure 12 page 28). Ce second paragraphe aborde les différentes expérimentations effectuées sur nos nanotubes de carbone afin d'en déterminer les propriétés mécaniques (module de Young) et électriques (densité de courant) indispensables à la conception d'un modèle théorique cohérent développé sous Matlab. Pour conclure, cette seconde partie présente une méthode permettant de recouvrir d'une métallisation (platine ou tungstène) ou d'un diélectrique (SiO_2) un nanotube de carbone. Cette manipulation nommé EBID permet donc d'améliorer les performances d'un contact ohmique et de rendre possible la réalisation d'un NEMS capacitif.

3 : Modélisation, conception et mesures d’un NEMS DC

3.1 Introduction de la troisième partie

Ce troisième chapitre débute par la présentation des différentes forces en présence au sein d'une structure nanométrique en fonction des divers phénomènes physiques liés à cette échelle et des dimensions du NEMS. Un programme MATLAB, dont la fiabilité est confirmé par des simulations sous Ansys, a permis de concevoir théoriquement la topologie de commutateurs NEMS DC avec quatre contacts différents (carbone-carbone, carbone-platine, carbone-tungstène et carbone-silice) en prenant en compte l'impact des différentes forces à toutes les étapes de la commutation. Pour conclure le procédé de fabrication est exposé en détail avec les différentes étapes technologiques permettant la fabrication du NEMS DC, ainsi que les résultats expérimentaux obtenus en tension sur nos démonstrateurs.

3.2 Modélisation théorique

3.2.1 Propriétés mécaniques

3.2.1.1 L'équation d'équilibre des forces

Le mouvement d'un nanotube de carbone au sein d'un NEMS est caractérisé par différentes forces en présence dont les impacts sont plus ou moins négligeables selon que le commutateur est à l'état « on » ou à l'état « off ». Si on se place dans un cas général mettant en avant l'ensemble des forces en présence, on obtient l'Équation 18 suivante [15] [111] [112]:

Équation 18 :

$$EI\frac{d^4W}{dx^4} = F_{elect} + F_{vdW} + F_{elast} + F_{therm} + P$$

Où W correspond à la position du nanotube de carbone au dessus du plan de masse, E son module de Young, I son moment d'inertie, F_{elec} la force électrostatique appliquée pour la commutation, F_{vdW} la force de van der Waals représentant l'attraction entre atomes liées à des forces électromagnétiques résiduelles faibles, F_{elast} correspondant à la force de rappel élastique du nanotube, F_{therm} liées aux fluctuations thermiques du MWCNT et P représentant le poids du nanotube.

La masse d'un nanotube de carbone étant excessivement faible, on peut considérer que son poids est également négligeable sous l'accélération de la pesanteur terrestre g_0 = 10 m/s^2. Si on considère un MWCNT de 10nm de diamètre et de 1 µm de long, la masse serait approximativement de 0,2 fg et le poids produirait une déflexion de 0,01 fm ce qui est parfaitement négligeable à l'échelle des déflexions des NEMS étudiés dans ce manuscrit ; celles-ci étant au minimum de 213 nm (3.2.5 page 104).

Les fluctuations thermiques, c'est-à-dire les oscillations libres du CNT dues à l'agitation thermique, font état d'une dépendance linéaire avec la température. A température ambiante, pour un MWCNT de 10 nm de diamètre et 1 µm de long, l'amplitude maximale est de 0.2 nm environ, donc négligeable.

L'Équation 18 se résume donc à :

Équation 19 :

$$EI\frac{d^4W}{dx^4} = F_{elect} + F_{vdW} + F_{elast}$$

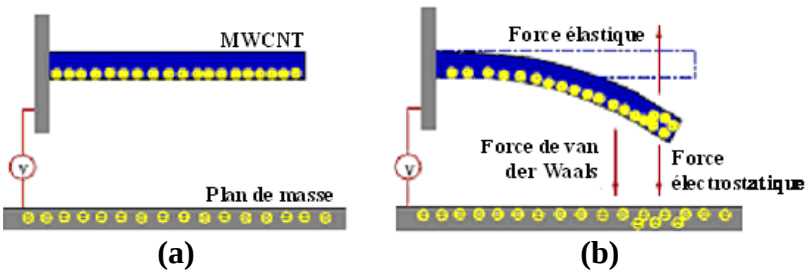


Figure 59 : Forces en présences sur un NEMS DC dans le cadre de l'approximation de la poutre de Bernoulli, (a) à V = 0, (b) à V ≠ 0.

3.2.1.2 La force élastique

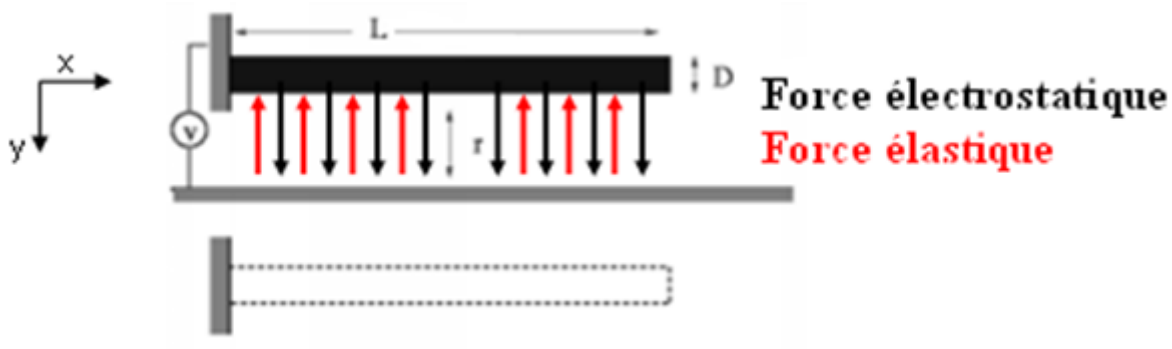


Figure 60 : Illustration d'un commutateur NEMS DC en configuration pince dans le cadre de l'approximation de la poutre de Bernoulli.

La force de rappel élastique est la seule s'opposant à la déformation du nanotube. Elle est comprise dans la description du modèle mécanique, en particulier par le biais du module de Young (E) et du moment d'inertie (I) du nanotube de carbone [15].

La définition analytique de la force élastique d'un nanotube de carbone au sein d'un NEMS en configuration pince impose au préalable de poser l'équation du mouvement d'une telle structure en tenant compte des conditions aux limites imposées par sa géométrie.

L'équation à résoudre prend la forme suivante :

Équation 20 :

$$F_{elast} + EI\frac{d^3y}{dx^3} = 0 \Rightarrow y''' = -\frac{F_{elast}}{EI} \Rightarrow \begin{cases} y'' = -\dfrac{F_{elast}}{EI}x + A \\ y' = -\dfrac{F_{elast}}{2EI}x^2 + Ax + B \\ y = -\dfrac{F_{elast}}{6EI}x^3 + \dfrac{A}{2}x^2 + Bx + C \end{cases} \qquad [A,B,C] \in \Re$$

Le NEMS est en configuration encastrée-libre, les conditions aux limites sont donc définies par :

$$\begin{array}{l} y(x=0) = 0 \ \ (déplacement = 0) \\ y'(x=0) = 0 \ \ (angle\ de\ rotation = 0) \\ y''(x=L) = 0 \ \ (Moment = 0) \end{array} \Rightarrow \begin{array}{l} A = F_{elast}L/EI \\ B = 0 \\ C = 0 \end{array} \Rightarrow y = \frac{F_{elast}}{6EI}x^2(3L - x)$$

Afin de déterminer la force élastique il faut considérer le déplacement induit par la force électrostatique appliquée. Dans le cas d'une configuration pince (Figure 60), ce déplacement est défini de la façon suivante :

Équation 21 :

$$\langle y \rangle = \frac{1}{L}\int_0^L \frac{F_{elast}(3L - x)x^2}{6EI}dx = \frac{F_{elast}L^3}{8EI} \quad [113]$$

On déduit de cette intégrale la forme analytique de la force élastique [114] :

Équation 22 :

$$F_{elast} = \frac{8EI}{L^3} r \text{ avec } I = \frac{\pi}{4}\left(\left(\frac{D_{ext}}{2}\right)^4 - \left(\frac{D_{\text{int}}}{2}\right)^4\right)$$

Où E est le module de Young, I le moment d'inertie (1.2.3.1.1 page 25) et r la demi-distance les séparant avant l'application du potentiel (Figure 60).

Les équations analytiques de la force élastique d'un nanotube de carbone en configuration poutre et pont sont détaillées aux annexes 5.5.1 et 5.5.2 pages 173 et 174.

3.2.1.3 La force électrostatique

En configuration pince la force électrostatique est créée par la différence de potentiel entre les deux nanotubes de carbone en vis-à-vis générant la déflexion des MWCNTs. A partir d'un certain seuil, les CNTs deviennent instables et rentrent brutalement en contact car la force élastique des nanotubes de carbone ne compense plus à cet instant la force électrostatique [115]. Le CNT étant conducteur, cela implique que le potentiel est constant le long de ce dernier [116]. De ce fait en configuration pince, la largeur du champ électrostatique induit par la différence de potentiel appliquée entre les MWCNTs correspond à leurs longueurs (Figure 60).

L'énergie électrostatique permettant la commutation est définie selon l'Équation 23 suivante [117] [38] :

Équation 23 :

$$\frac{E_{elect}}{L} = \frac{1}{2} C(r) V^2 \text{ avec } C(r) = \frac{\varepsilon_0 \pi}{\ln\left[1 + \frac{r}{R} + \sqrt{\left(\frac{r}{R}+1\right)^2 - 1}\right]}$$

Où V est la tension d'activation, ε_0 la permittivité du vide, L la largeur du champ électrostatique (ou longueur des nanotubes de carbone), C(r) la capacité de couplage entre les MWCNTs, R leurs diamètres et r la demi-distance les séparant avant l'application du potentiel (Figure 60).

La force électrostatique s'obtient en dérivant l'énergie électrostatique par rapport à la distance r entre les MWCNTs :

Équation 24 :

$$\frac{F_{elect}}{L} = -\frac{d\left(E_{elect}/L\right)}{dr} = -\frac{\pi \varepsilon_0 V^2}{\sqrt{r(r+2R)}\ln^2\left(1 + \frac{r}{R} + \sqrt{\frac{r(r+2R)}{R^2}}\right)}$$

Les équations analytiques de la force électrostatique d'un nanotube de carbone en configuration poutre et pont sont détaillées en annexe 5.6 page 175.

3.2.1.4 La force de van der Waals

La force de van der Waals a pour origine l'interaction qui réside entre les atomes de deux matériaux en vis-à-vis. Le potentiel de Lennard-Jones illustre cette interaction et comporte deux termes, l'un répulsif et l'autre attractif. Ce potentiel est défini de la manière suivante [118] :

Équation 25 :

$$\phi_{ij} = \frac{C_{12}}{\nu_{ij}^{12}} - \frac{C_6}{\nu_{ij}^{6}} = 4\varepsilon\left[-\left(\frac{\sigma}{\nu_{ij}}\right)^{6} + \left(\frac{\sigma}{\nu_{ij}}\right)^{12}\right]$$

Où ν_{ij} est la distance entre les deux matériaux, C_6 et C_{12} sont respectivement les constantes attractive et répulsive, σ la distance d'équilibre de van der Waals et ε l'énergie potentielle à la distance d'équilibre de van der Waals.

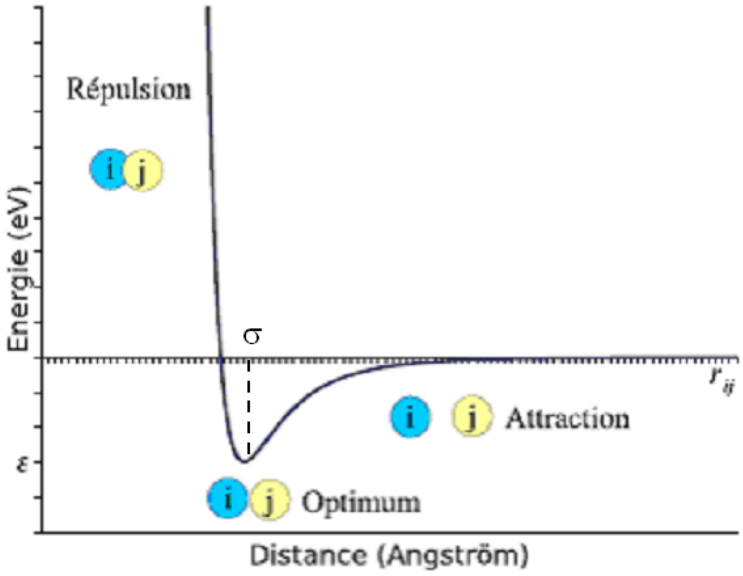


Figure 61 : Potentiel de Lennard-Jones [119].

Dans un modèle atomique, la composante répulsive impose que la distance entre deux atomes ne soit jamais inférieure à la distance d'équilibre de van der Waals des deux atomes considérés. Au-dessus de cette distance la composante répulsive peut-être ignorée (Figure 61).

	M_V (kg/m^3)	M_A (kg)	ρ (m^{-3})
Carbone	2267	12,0107u	$1{,}14.10^{29}$
Or	19300	196,96655u	$5{,}9.10^{28}$
Platine	21090	195,078u	$6{,}5.10^{28}$
Tungstène	19250	183,84u	$6{,}3.10^{28}$
Silice	X	X	X
Silicium	2330	28,0855u	5.10^{28}

u = $1{,}66053878283.10^{-27}$ kg (unité de masse atomique)

(a)

	σ (nm)	ε (meV)	C_6 (eV.Å^6)	H (eV)
C-C	0,34	2,964	18,3	2,35
C-Au	0,3	1,273	3,71	0,25
C-Pt	0,21	3,76	1,29	0,09
C-W	X	X	X	X
C-SiO_2	X	X	X	X
C-Si	0,374	X	X	X

(b)

Tableau 10 : (a) Caractéristiques physiques d'un groupe de matériaux. (b) Caractéristiques physiques des liaisons atomiques entre le carbone et d'autres matériaux [116] [120] [121] [122] [123].

En configuration pince l'énergie de van der Waals entre deux structures cylindriques est définie par l'Équation 26 suivante [124] :

Équation 26 :

$$\frac{E_{vdW}}{L_c} = \frac{H_{A-B}}{12\sqrt{2}\cdot \nu^{3/2}}\sqrt{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} = \frac{\pi^2 C_{A-B}\rho_A\rho_B}{12\sqrt{2}\cdot \nu^{3/2}}\sqrt{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}} \text{ avec } \rho = \frac{M_V}{M_A}$$

Où $H_{A\text{-}B}$ est la constante d'Hamaker entre les deux matériaux A et B, ρ correspond a la densité volumique d'un matériau, M_V la masse volumique d'un matériau, M_A la masse atomique d'un matériau, R_1 et R_2 respectivement le rayon du premier et du second MWCNT, ν la distance les séparant, $C_{A\text{-}B}$ ($C_6 = 4\varepsilon\sigma^6$) l'attraction entre deux atomes des deux matériaux en vis-à-vis et L_C la longueur du contact lorsque le NEMS commute (Tableau 10).

La force de van der Waals s'obtient en dérivant l'énergie de van der Waals par rapport à la distance entre les MWCNTs (ν) :

Équation 27 :

$$\frac{F_{vdW}}{L_C} = \frac{d\left(\frac{E_{vdW}}{L_C}\right)}{d\nu} = -\frac{\pi^2 C_{A-B}\rho_A\rho_B}{8\sqrt{2}\cdot \nu^{5/2}}\sqrt{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}}$$

La force de van der Waals est uniquement considérée lorsque le NEMS a commuté, car au repos la distance entre les deux MWCNTs est suffisamment grande pour que la force de van der Waals devienne négligeable devant les forces élastiques de ces derniers.

Afin de définir la géométrie du NEMS, on prend en compte la longueur du contact en commutation et on dimensionne les nanotubes de carbone afin que $F_{elast} / F_{vdW} > 1$. Le respect de cette condition permet aux CNTs de retrouver mécaniquement leurs positions initiales dès lors que l'alimentation est coupée.

Les équations analytiques de la force de van der Waals entre un nanotube de carbone en configuration poutre et pont et un plan métallique sont détaillées en annexe 5.7 page 176.

3.2.1.5 La tension de commutation

L'étude de la tension d'activation d'un commutateur à nanotubes de carbone implique exclusivement, la force élastique propre au MWCNT et la force électrostatique induite par le potentiel appliqué. Afin de déterminer la tension minimale nécessaire à la commutation, il faut résoudre le cas où la force élastique globale induite par les nanotubes de carbone au sein d'un NEMS est compensée par la force électrostatique (Équation 28).

Équation 28 :

$$F_{elast} + F_{elect} = 0$$

De cette Équation 28 on peut donc déterminer la tension d'activation minimum à appliquer entre les nanotubes de carbone dans le cas d'une configuration pince (Équation 29) [116].

Équation 29 :

$$V = 2\sqrt{\frac{8EI}{L^3}\left(r - \frac{3}{5}r\right)\sqrt{\frac{3}{5}r\left(\frac{3}{5}r + 2R\right)} \cdot \ln^2\left(1 + \frac{\frac{3}{5}r}{R} + \sqrt{\frac{\frac{3}{5}r\left(\frac{3}{5}r + 2R\right)}{R^2}}\right)\frac{1}{L\pi\varepsilon_0}}$$

Où E est le module de Young des MWCNTs, I le moment d'inertie, L la longueur, R le diamètre extérieur, r la distance qui initialement les sépare et $\varepsilon_0 = 1 / (36\pi.10^9) \approx 8{,}8542.10^{-12}$ F/m la permittivité du vide.

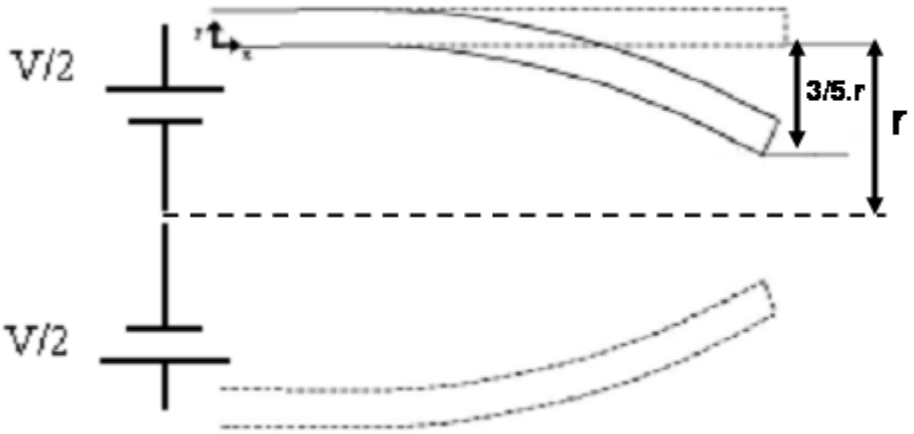


Figure 62 : Illustration de la commutation des MWCNTs en configuration pince.

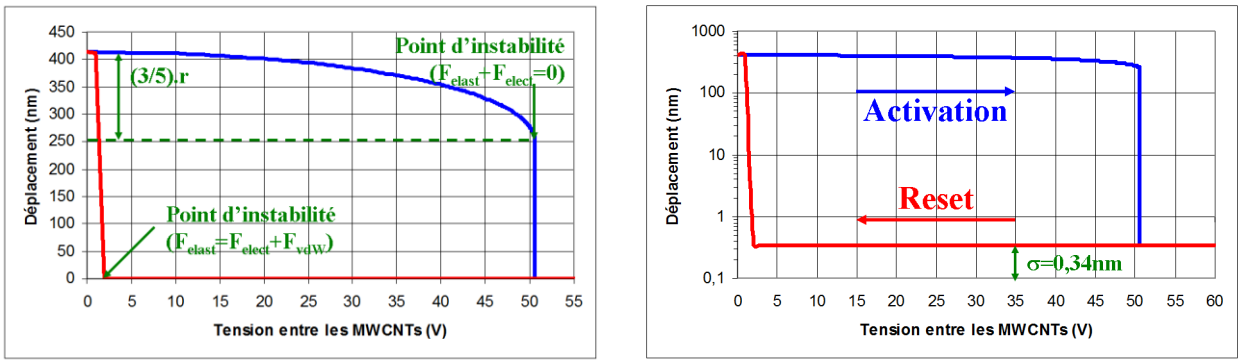
La déflexion de (3/5).r correspond au point d'instabilité à partir duquel la tension devient suffisante pour que les MWCNTs commutent par effondrement (Figure 62 et Figure 63a).

Comme l'illustre la Figure 63, l'activation et la réinitialisation du commutateur obéit à un cycle d'hysterisis. Ainsi il est également possible de déterminer la tension à partir de laquelle la force de van der Waals et la force électrostatique ne compenseront plus la force élastique propre aux MWCNTs (à condition que la géométrie de la structure ait été définie en conséquence).

Équation 30 :

$$V_{reset} = 2\sqrt{\left[\frac{16EI\left(r-\sigma/2\right)-F_{vdW}(L-L_C)^3}{2\cdot(L-L_C)^3}\right]\frac{\sqrt{\sigma/2\left(\sigma/2+2R\right)}\cdot\ln^2\left(1+\sigma/2R+\sqrt{\sigma/2R^2\left(\sigma/2+2R\right)}\right)}{\pi\varepsilon_0 L_C}}$$

Où σ est la distance d'équilibre de van der Waals entre deux atomes de carbone (0,34 nm) et L_C la longueur du contact entre les MWCNTs (≈ 120 nm voir page 92).



(a) **(b)**

Figure 63 : Cycle d'hysterisis du déplacement des nanotubes de carbone en fonction de la tension entre ces derniers ((a) déplacement en échelle linéaire et (b) déplacement en échelle logarithmique).

3.2.1.6 La résistance et la surface de contact

3.2.1.6.1 La résistance de contact

En observant les résultats de S.N. Cha *et al.* [82], on constate l'impact du contact entre un MWCNT et un métal (dans ce cas de l'or) dans le cadre d'une configuration dite « pont » (Figure 64a).

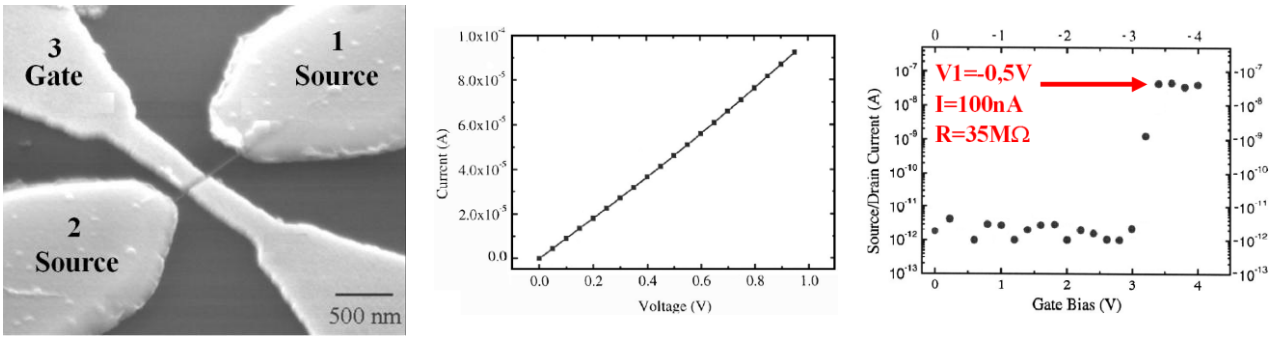


Figure 64 : (a) Image MEB d'un NEMS DC en configuration pont. (b) Caractéristique I-V du MWCNT suspendu (à l'état haut). (c) Caractéristique I-V du MWCNT en contact (à l'état bas).

En effet on constate sur la Figure 64b que la résistance entre les plots 1 et 2 (Figure 64a) est de 10 kΩ à l'état haut (résistance assimilable à la résistance propre d'un MWCNT de 6.45 kΩ/µm) et que le MWCNT supporte une densité de courant de 2.10^7 A/cm^2 sans subir de dommage. Lorsque le NEMS DC est activé à 3,5 V (Figure 64c), on constate que le courant circulant entre les plots 1 et 3 est de l'ordre de 100 nA ce qui équivaut à une résistance de contact de l'ordre de 35 MΩ.

J.E. Jang *et al.* [79] ont étudié le comportement d'un commutateur NEMS DC en configuration pince. On constate que lorsque les MWCNTs ont commuté, un courant de l'ordre de 10 nA circule entre les nanotubes de carbone sur une longueur de contact d'approximativement 120 nm et avec une tension entre les tubes de 0,05 V (Figure 65). La résistance totale de cette structure est donc de l'ordre de 5 MΩ.

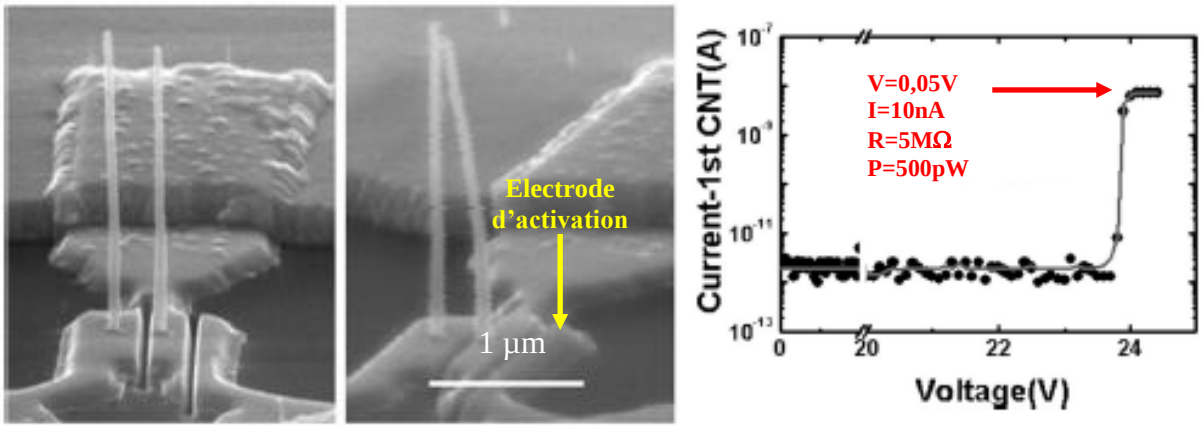


Figure 65 : Image MEB de la commutation de 2 MWCNTs de 2 µm de long et graphique du courant en fonction de la tension appliquée sur l'électrode d'activation avec 0,05 V appliquée entre les MWCNTs.

Si on néglige la résistance liée aux lignes de transmission, si on soustrait deux fois la résistance par unité de longueur d'un nanotube de carbone (6,45 kΩ/µm) et si on considère que l'impact de la conductivité électrique du TiN (barrière de diffusion) à la base du MWCNT représente une résistivité négligeable (20 µΩ.cm [125]), on obtient une résistance globale caractérisant les contacts MWCNTs-MWCNTs et MWCNT-TiN de l'ordre de 4,97 MΩ. Ce résultat indique que la résistance globale de la structure est exclusivement celle des contacts avec les nanotubes de carbone et donc que la résistance de contact par unité de longueur entre deux MWCNTs en configuration pince est de 0,582 Ω.m.

Cependant il semble possible de réduire de façon non négligeable la résistance de contact entre un nanotube et une autre surface par un recuit [43]. Ainsi A. Vijayaraghavan *et al.* [126] évoquent la possibilité de passer d'une résistance de contact de 5 MΩ à 500 kΩ par un recuit à 200 °C pendant 2 heures. Cette étape technologique permettrait d'optimiser la conductivité électrique globale du NEMS par une diminution de la résistance de contact entre le nanotube de carbone et la barrière de diffusion de TiN.

3.2.1.6.2 La surface de contact

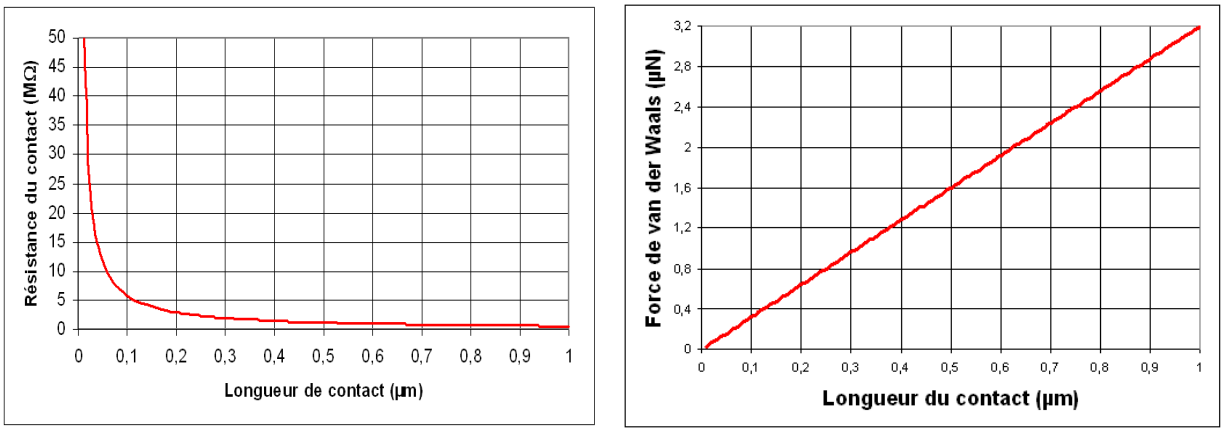
Plusieurs publications insistent sur l'importance évidente de la surface de contact entre un MWCNT et un autre support métallique, pouvant être lui-même un MWCNT. Ainsi, J. Li *et al.* [43] [127] rapportent la nécessité d'une longueur de contact d'au moins 10 nm pour espérer y faire circuler un courant.

C. Lan *et al.* [128] ont développé un modèle théorique visant à déterminer la résistance d'un contact entre un CNT et une autre surface pouvant être un CNT. Cette équation prend la forme suivante :

Équation 31 :

$$R_C = \sqrt{r_{CNT} r_C}\,\coth\left(\sqrt{\frac{r_{CNT}}{r_C}} L_C\right)$$

Avec R_C la résistance de contact, r_{CNT} = 6.45 kΩ/µm la résistance d'un nanotube par unité de longueur [129], L_C la longueur du contact et r_C la résistance de contact par unité de longueur (0.582 Ω.m si on considère le cas défavorable où la résistance globale du NEMS DC commuté en configuration pince est porté exclusivement par le contact entre les MWCNTs).



(a) **(b)**

Figure 66 : (a) Résistance de contact entre 2 MWCNTs en fonction de la longueur du contact. (b) Force de van der Waals entre 2 MWCNTs en fonction de la longueur du contact.

On observe sur la Figure 66a qu'au-delà de 120 nm de contact la résistance tend à devenir constante et inférieure à 5 MΩ. Au niveau des forces de van der Waals, la décroissance de la résistance de contact devient alors un facteur négligeable devant l'impact d'une augmentation trop importante de la longueur de contact (Figure 66b à partir de l'Équation 27 page 87).

A. Buldum *et al.* [130] mettent en avant l'influence de l'écrasement au niveau du contact et de ce fait l'augmentation de la surface de contact sur la conductivité et sur les forces de van der Waals. On peut observer sur la Figure 67 que sans écrasement on mesure une résistance de 3,21 MΩ, alors qu'avec une force plus importante venant augmenter la surface de contact en vis-à-vis des deux nanotubes on mesure une résistance de 1,66 MΩ.

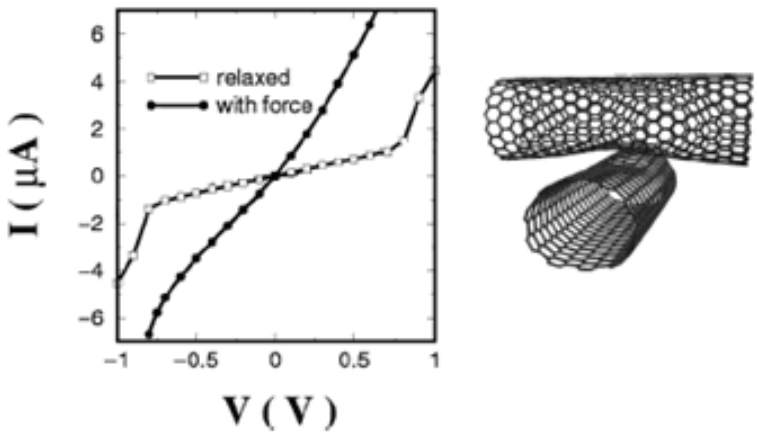


Figure 67 : Caractéristique I=f(V) d'une jonction entre 2 MWCNTs et illustration de l'écrasement au contact lié à la force appliquée.

3.2.1.7 Le temps de commutation

Déterminer le temps de commutation d'une structure NEMS revient à résoudre l'Équation 32 du mouvement suivante :

Équation 32 :

$$m\vec{a} = \overrightarrow{F_{elast}} + \overrightarrow{F_{elect}}$$

$$\ddot{x} = -\frac{8EI}{m(L-L_C)^3}x + \frac{\varepsilon_0 \pi V^2 L}{m\sqrt{x(x+2R)}\ln^2\left(1+\frac{x}{R}+\sqrt{\frac{x(x+2R)}{R^2}}\right)}$$

Avec m la masse du MWCNT (≈ 3,24.10^{-15} kg/m [71]), $\vec{a}$ le vecteur d'accélération et x le déplacement.

La résolution de cette équation pour déterminer le temps de commutation passe par la mise en œuvre d'une boucle itérative sur l'accélération, la vitesse et le mouvement du MWCNT. Cette itération sur le temps par pas de 1 ps (dt) a été réalisée à l'aide du logiciel MATLAB. Pour ce faire il faut tout d'abord définir des conditions initiales au déplacement, à la vitesse et à l'accélération, qui permettront de mettre en place cette itération.

A t = 0 s:

$$x(t=0) = r$$

$$\dot{x}(t=0) = 0$$

$$\ddot{x}(t=0) = \frac{\varepsilon_0 \pi V^2 L}{m\sqrt{r(r+2R)}\ln^2\left(1+\frac{r}{R}+\sqrt{\frac{r(r+2R)}{R^2}}\right)}$$

A t=t+dt :

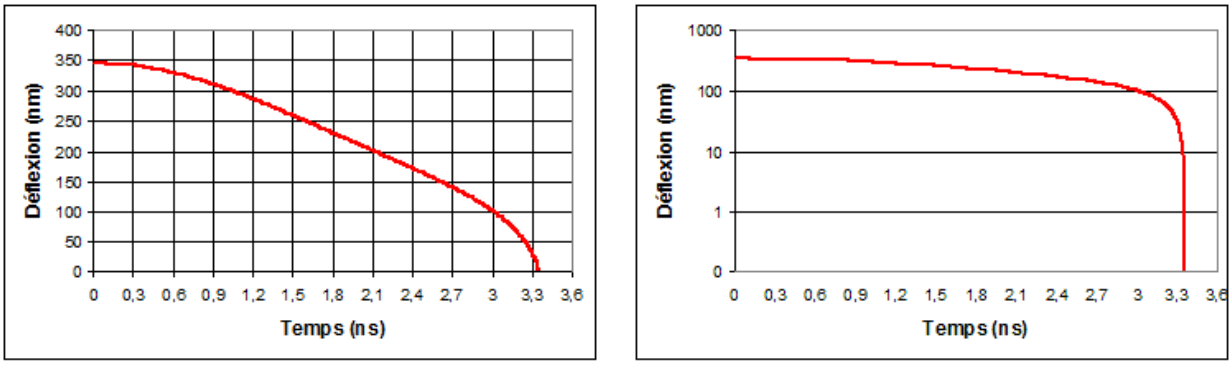
$$x(t+dt) = x(t) - dt \cdot \dot{x}(t)$$

$$\dot{x}(t+dt) = \dot{x}(t) + dt \cdot \ddot{x}(t)$$

$$\ddot{x}(t+dt) = -\frac{8EI \cdot [x(0) - x(t+dt)]}{m(L-L_C)^3} + \frac{\varepsilon_0 \pi V^2 L}{m\sqrt{x(t+dt)[x(t+dt)+2R]}\ln^2\left(1+\frac{x(t+dt)}{R}+\sqrt{\frac{x(t+dt)[x(t+dt)+2R]}{R^2}}\right)}$$

Où r est la distance initiale entre les MWCNTs.

Si on considère une structure NEMS en configuration encastrée-libre ayant les dimensions suivantes, R_{ext} = 37 nm, R_{int} = 4,6 nm, m = 0,28 fg, L = 1,6 µm, r = 346 nm, E = 116 GPa, I = 1,46.10^6 nm^4 et L_C = 117 nm. Et si on applique entre les MWCNTs la tension d'activation minimale de 45,6 V (voir page 175), on obtient un temps de commutation du NEMS de l'ordre de 3,356 ns (Figure 68).



(a) **(b)**

Figure 68 : Déflexion des MWCNTs d'un NEMS en configuration pince en fonction du temps ((a) déflexion en échelle linéaire et (b) déflexion en échelle logarithmique).

J.B. Muldavin *et al.* [131] mettent en avant une méthode plus simple permettant d'obtenir une valeur approchée du temps de commutation. En effet, afin de caractériser le temps de commutation ils considèrent l'élasticité du nanotube, la force électrostatique minimale que l'on doit appliquer pour assurer la commutation et la force électrostatique que l'on compte appliquer. Cela se résume donc à définir le temps de commutation en fonction de la tension minimale à l'activation et celle que l'on souhaite appliquer (Équation 33).

Équation 33 :

$$t_s = \frac{V_p}{\omega_0 V_S}\sqrt{\frac{27}{2}} \text{ avec } \omega_0 = \sqrt{\frac{8EI}{mL^3}}$$

Avec V_p la tension d'activation minimale selon la configuration du NEMS (pince, poutre ou pont), V_S la tension d'activation appliquée et ω_0 la fréquence de résonance mécanique du NEMS.

Si on applique la tension minimale d'activation, seule la fréquence de résonance mécanique ω_0 fait varier le temps de commutation. Dans ce cas l'Équation 33 prend la forme suivante :

Équation 34 :

$$t_s = \sqrt{\frac{27}{2\omega_0^2}} = 3{,}5ns$$

Si on considère les dimensions de la structure définies précédemment, on obtient :

$$t_s \approx 3{,}395ns$$

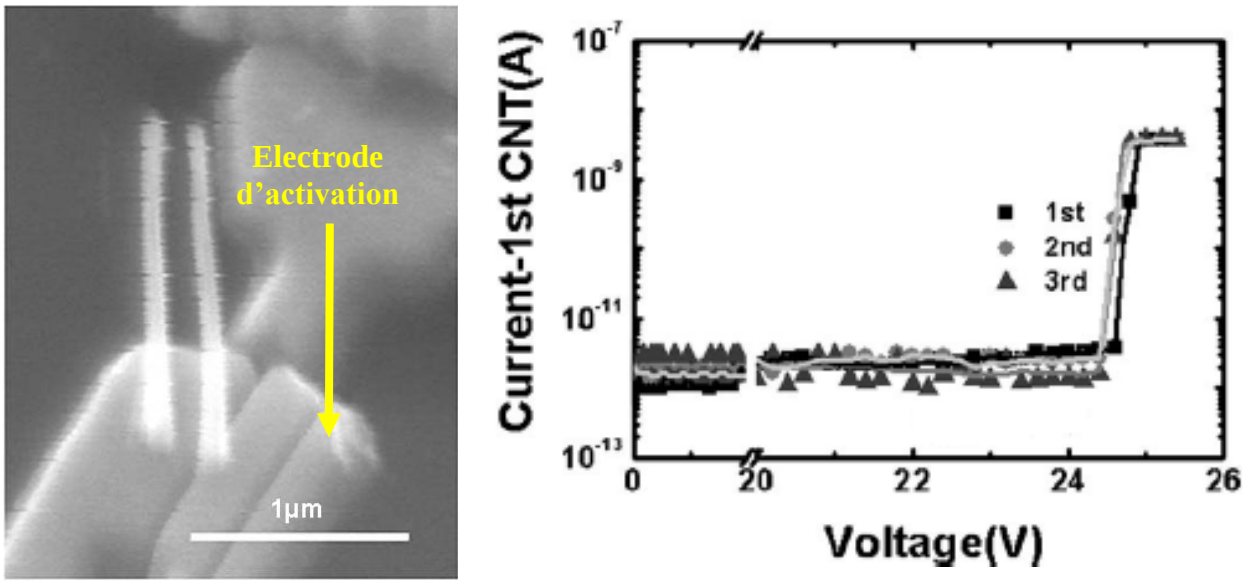
On peut conclure que la méthode approchée proposée par J.B. Muldavin *et al.* permet d'obtenir un résultat équivalent à la méthode itérative avec une erreur inférieure à 2 %.

3.2.2 Validation du modèle MATLAB

L'un des objectifs concernant la réalisation d'un démonstrateur NEMS DC en configuration pince se définit par la parfaite maîtrise des trois forces mécaniques à l'origine de l'activation et de la réinitialisation, à-savoir la force de van der Waals (voir page 86), la force électrostatique (voir pages 85 et 88) et la force élastique (voir page 84). L'analyse des différentes forces en présence dans les deux états du NEMS DC a contribué au développement d'un programme Matlab permettant de dimensionner notre structure pour obtenir, une tension d'activation minimale pour des forces élastiques supérieures à celles de van der Waals en commutation.

Afin de valider le modèle MATLAB, deux comparaisons ont été réalisées. L'une, en retrouvant la tension d'activation de la structure NEMS DC en configuration pince réalisée par J.E. Jang *et al.* [79] en fonction des différentes géométries et caractéristiques physiques de la structure détaillées dans leur article, l'autre, en comparant les résultats obtenus par le programme Matlab aux résultats issus d'une modélisation sous Ansys avec une géométrie et des caractéristiques physiques identiques.

En effet si l'on considère les dimensions de la structure NEMS DC de J.E. Jang *et al.* (70 nm pour le diamètre du MWCNT, 1,4 µm pour sa longueur et 70 nm de distance entre les MWCNTs), on retrouve via le programme Matlab les 24,6 V nécessaires à appliquer sur l'électrode d'activation pour permettre la commutation (Figure 69). Il est également important de noter que cette structure retrouve son état initial lorsque la tension est coupée et qu'après simulation avec le programme Matlab on constate effectivement, qu'au contact, la force van der Waals est plus faible que la force élastique avec un rapport de $F_{elast} / F_{vdW} = 1{,}0065$.



(a) **(b)**

Figure 69 : (a) Image MEB du NEMS DC de J.E. Jang *et al.* [79] et (b) tension sur l'électrode permettant l'activation.

La seconde méthode utilisée pour valider le programme Matlab a été mise en œuvre à Limoges au sein du laboratoire Xlim [132]. Elle consiste en la simulation d'un modèle NEMS DC en configuration poutre sous Ansys (les équations étant définies en annexes 5.5.1, 5.6 et 5.7 pages 173, 175 et 176). Les résultats sous Ansys sont comparés à ceux issus du programme Matlab avec bien évidemment les mêmes configurations géométriques et les mêmes caractéristiques physiques. On constate compte tenu de la Figure 70b que pour trois longueurs différentes du MWCNT, les courbes issues du programme Matlab et celles obtenus par Ansys se confondent presque. Matlab et Ansys permettent donc d'obtenir des résultats similaires avec des temps de calculs beaucoup plus raisonnables avec Matlab.

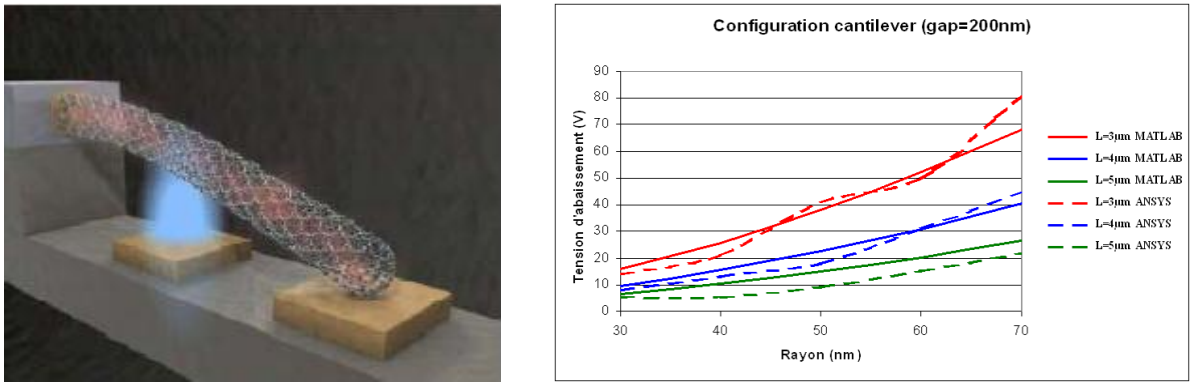


Figure 70 : (a) Illustration d'un NEMS DC en configuration poutre [133] et (b) tensions d'abaissement en fonction du rayon du MWCNT pour trois longueurs différentes obtenues, par simulation sous Ansys et par le programme Matlab.

Les deux méthodes ainsi étudiées valident la précision des résultats fournis par le programme Matlab. La géométrie du NEMS DC en configuration pince peut de ce fait être définie pour obtenir une tension d'activation optimale tout en s'assurant que la force élastique compense la force de van der Waals en commutation.

3.2.3 Dimensions du NEMS DC en fonction de l'état de l'art, des mesures et des limites technologiques

L'ensemble des paramètres géométriques d'un NEMS DC en configuration pince influe sur ses performances mécaniques et électriques. Il convient donc d'en fixer certains, compte tenu de l'ensemble des données explicitées jusqu'à présent en vue de la modélisation d'un NEMS hyperfréquence. Ceci en prenant en compte les limites dimensionnelles de fabrication.

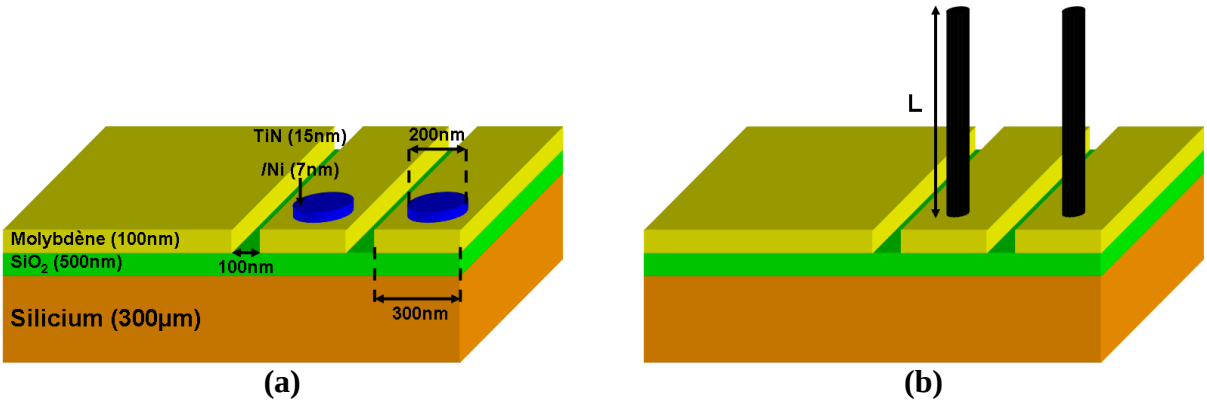


Figure 71 : (a) Schémas de la structure NEMS DC avant et (b) après croissance de nanotubes de carbone.

Comme on peut le constater aux Figure 13b et Figure 13c page 30, plus le diamètre du nanotube de carbone augmente et plus sa résistance diminue. La réalisation d'un NEMS DC en configuration pince consiste notamment à faire croître localement un unique MWCNT sur une électrode métallisée (Figure 71). Compte tenu de la Figure 38 page 61, plus le diamètre du plot de TiN/Ni est important, plus la probabilité d'avoir plus d'un nanotube de carbone localisé par plots augmente. Cette contrainte limite le diamètre du plot de TiN/Ni à 300 nm, permettant ainsi d'avoir 90 % de chance qu'il n'y ait qu'un seul MWCNT après croissance à l'endroit du plot de catalyseur. Afin d'augmenter cette probabilité, le diamètre des plots de TiN/Ni est fixé à 200 nm, ce qui théoriquement engendrera un MWCNT de l'ordre de 75 nm de diamètre (Figure 39 page 62 et Figure 47b page 68).

Afin de pallier à l'erreur liée à la précision d'alignement du masque permettant le dépôt des plots de TiN/Ni à l'extrémité des électrodes en molybdène, la largeur de ces dernières est fixée à 300 nm (Figure 71a), à-savoir 100 nm de plus que le diamètre des plots catalytiques.

Comme constaté au paragraphe 3.2.1.4 page 86, la longueur de contact entre les deux MWCNTs commutés, définie en fonction de la tension d'activation, a une incidence sur l'amplitude de la force de van der Waals et donc sur la force élastique nécessaire pour éviter que les MWCNTs restent collés définitivement après le premier actionnement. On constate à la Figure 66a page 92 qu'au-delà de 120 nm, l'impact de cette longueur sur la résistance devient quasiment nul. Par contre plus cette longueur augmente, plus la force de van der Waals est importante due à son évolution linéaire en fonction de la longueur du contact (Figure 66b page 92). Dans une perspective de fabrication d'un NEMS hyperfréquence, il est indispensable de minimiser l'ensemble des éléments résistifs liés aux matériaux et aux différents contacts, la longueur de contact est de ce fait fixée à 120 nm. Le module de Young quant à lui est fixé à 115 GPa, reprenant ainsi les résultats des mesures en vibrations sur nos MWCNTs rapportés au paragraphe 2.4.3.4 page 71.

En résumé, seuls deux paramètres géométriques doivent être définis via le programme MATLAB : la longueur L des MWCNTs (Figure 71b) et la distance r entre les électrodes de molybdène (Figure 71a). Pour des raisons associées aux limites technologiques de la méthode de dépôt par évaporation associée à la lithographie électronique (e-beam), l'espace r entre les électrodes de molybdène sera au minimum de 100 nm. Cette distance représente l'un des paramètres définissant la distance de contact entre les MWCNT. Les autres paramètres étant la précision d'alignement des plots de catalyseur (ϕ = 200 nm) par rapport aux électrodes en molybdène (ϕ = 300 nm) et le diamètre du plot de catalyseur avant synthèse PECVD par rapport à celui de la particule catalytique située à la tête du nanotube de carbone après croissance et qui définit le diamètre du MWCNT (Figure 39 page 62).

Au cours de cette étude, quatre contacts différents seront caractérisés. Le contact ohmique carbone-carbone entre deux MWCNTs, le contact ohmique carbone-platine avec l'un des deux MWCNTs enrobé de platine via la méthode EBID (paragraphe 2.6 page 75), le contact ohmique carbone-tungstène avec l'un des deux MWCNTs enrobé de tungstène et le contact capacitif carbone-SiO_2 avec l'un des deux MWCNTs enrobé de silice. L'objectif consiste à dimensionner les différents NEMS DC en fonction du type de contact, tout en permettant aux forces élastiques de compenser celles de van der Waals pour un rétablissement à l'état « off » qui soit purement mécanique et ce avec des tensions d'alimentations les plus faibles possibles. Pour ce faire, et afin d'assurer une marge de sécurité (environ 10 %), le rapport de la force élastique sur la force de van der Waals sera pris égal à 1,1.

3.2.4 Commutateur ohmique à contact carbone-carbone

3.2.4.1 Une électrode d'activation

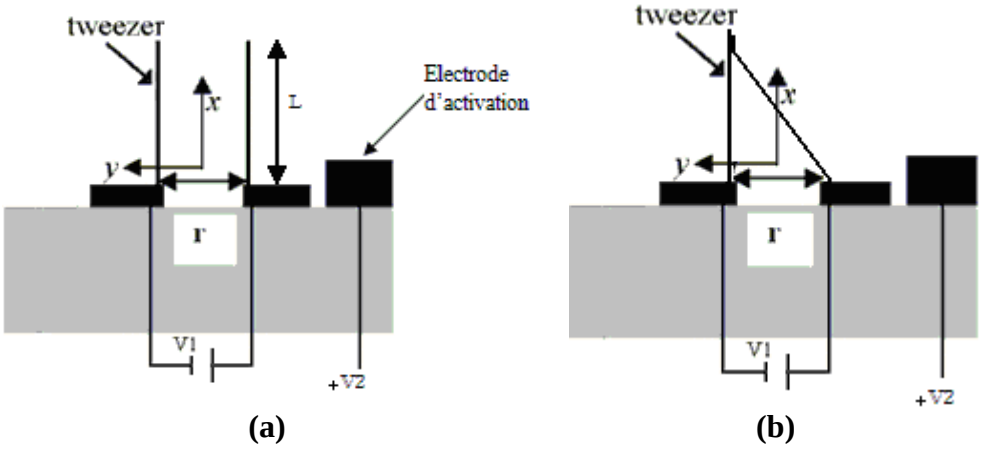
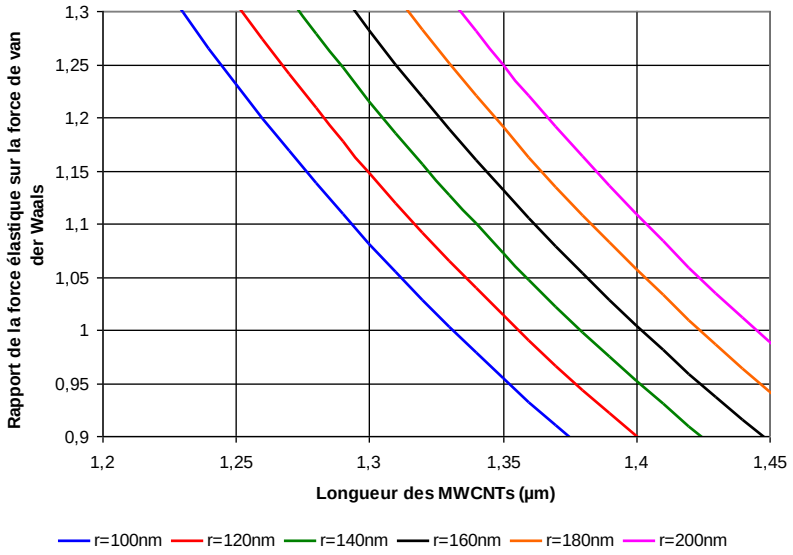


Figure 72 : Topologie du NEMS DC ohmique pince à contact carbone-carbone avec une électrode d'activation, (a) au repos et (b) en commutation.

On observe sur la Figure 73 le rapport de la force élastique sur la force de van der Waals en fonction de la longueur des MWCNTs pour différentes distances r entre les électrodes de molybdène. Cette donnée constitue la colonne vertébrale permettant de définir l'ensemble des paramètres géométriques et électriques nécessaires à la commutation et au rétablissement en l'état initial lorsque les tensions sont coupées.

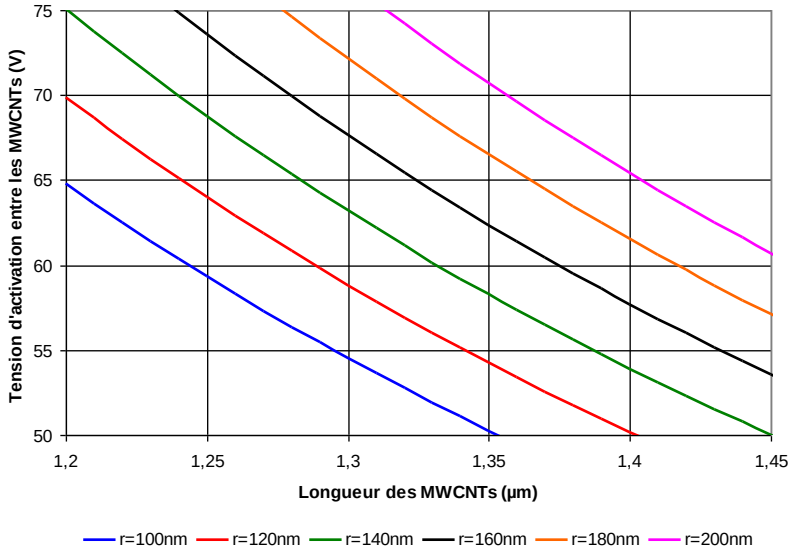


Distance r	100 nm	140 nm	200 nm
Distance de contact	326 nm	366 nm	426 nm

Figure 73 : Rapport de la force élastique sur la force de van der Waals en fonction de la longueur des MWCNTs.

On constate sur ce graphique que la distance r entre les électrodes de molybdène a une incidence sur le rapport de la force élastique sur la force de van der Waals et donc sur la longueur nécessaire et suffisante que doivent avoir les MWCNTs.

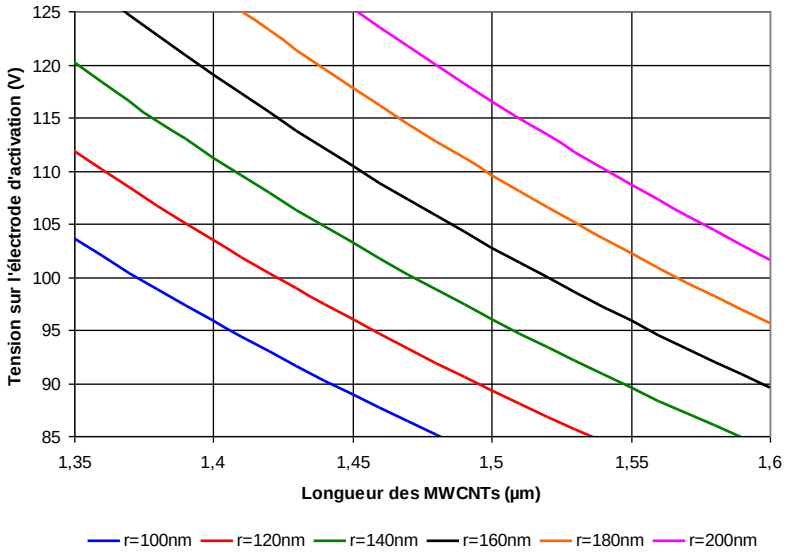
La Figure 74 illustre la tension nécessaire à appliquer entre les MWCNTs pour obtenir une commutation. Ces courbes permettent de constater que plus la distance r est élevée, plus la tension d'activation sera importante pour une même longueur de nanotubes de carbone. Mais de tels niveaux de tension, supérieurs à 40 V entre les MWCNTs commutés, limitent fortement la quantité de courant pouvant y circuler si l'on souhaite éviter la destruction de la structure en puissance (Figure 14 page 31).



Distance r	100 nm	140 nm	200 nm
Longueur des MWCNTs	1,3 µm	1,35 µm	1,4 µm
Tension d'activation entre les MWCNTs	55 V	58 V	65 V

Figure 74 : Tension d'activation entre les MWCNTs en fonction de leur longueur.

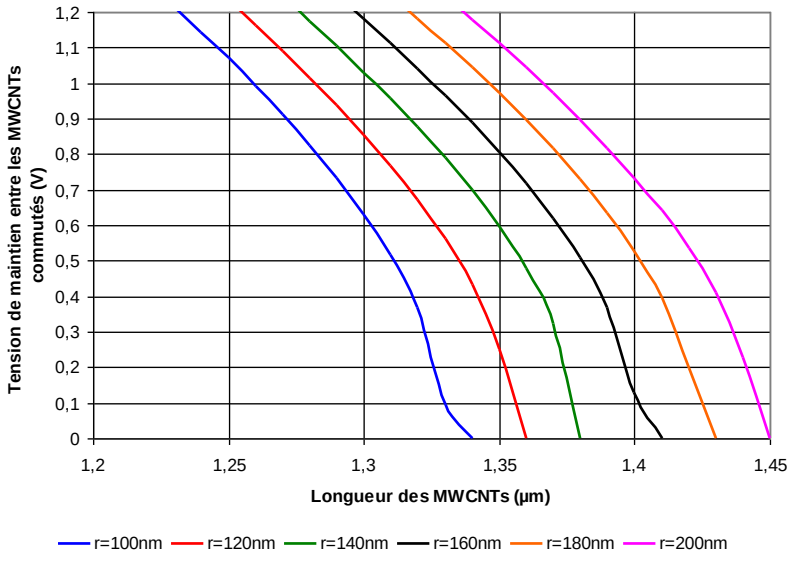
L'utilisation d'une électrode d'activation (Figure 72a) apparaît donc comme une solution permettant d'éviter l'application d'une tension disproportionnée entre les MWCNTs. Le principe consiste à charger et polariser une électrode de façon identique au nanotube de carbone se trouvant à proximité, créant ainsi un champ électrostatique repoussant le CNT (Figure 72b). Ce phénomène physique a pour effet de permettre le contact entre les deux MWCNTs en ne leur appliquant qu'une faible différence de potentiel de l'ordre de la dizaine de millivolts. La Figure 75 illustre la tension d'activation nécessaire et suffisante à appliquer à l'électrode d'activation pour permettre la commutation du NEMS DC.



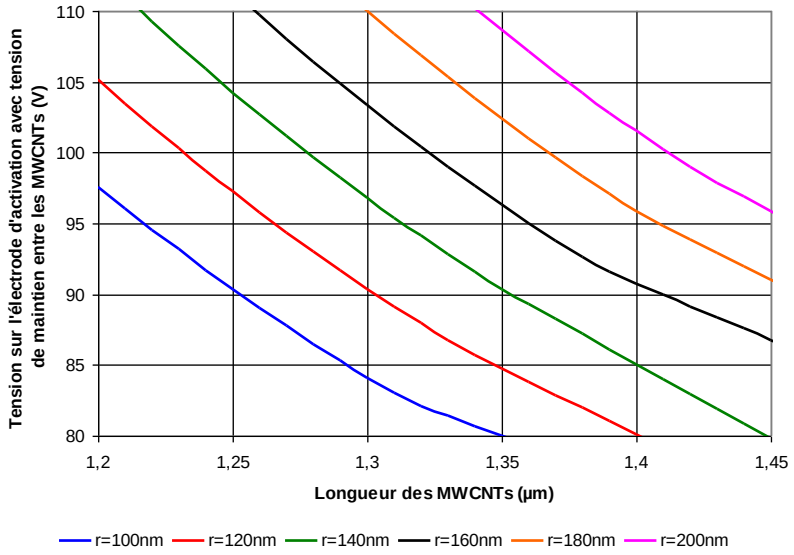
Distance r	100 nm	140 nm	200 nm
Longueur des MWCNTs	1,3 µm	1,35 µm	1,4 µm
Tension d'activation sur l'électrode	99 V	105 V	118 V

Figure 75 : Tension d'activation sur l'électrode d'activation en fonction de la longueur des MWCNTs.

Dans le cas précédemment étudié, la tension de quelques dizaines de millivolts appliquée entre les MWCNTs ne permet pas à elle seule le maintien en commutation. Cette donnée oblige à conserver la tension d'activation au niveau de l'électrode si l'on désire garder en contact les nanotubes de carbone. Afin de pallier à ce problème, on peut envisager une tension de maintien entre les MWCNTs qui permettrait de couper l'alimentation au niveau de l'électrode d'activation une fois que les nanotubes seraient en contact. La Figure 76a illustre cette tension de maintien entre les MWCNTs dont le niveau est défini pour permettre au NEMS DC de revenir à l'état "OFF" une fois cette tension coupée.



(a)



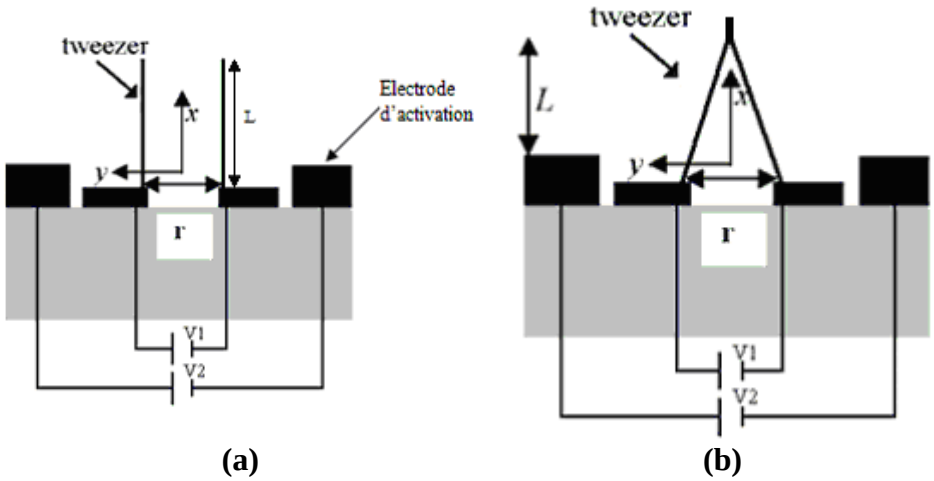
(b)

Distance r	100 nm	140 nm	200 nm
Longueur des MWCNTs	1,3 µm	1,35 µm	1,4 µm
Tension de maintien (a)	0,6 V	0,6 V	0,7 V
Tension d'activation sur l'électrode (b)	84 V	90 V	102 V

Figure 76 : (a) Tension de maintien et (b) tension sur l'électrode d'activation en fonction de la longueur des MWCNTs.

De l'analyse des résultats présentés à la Figure 76a, on constate que la tension de maintien entre les MWCNTs permet de conserver le NEMS DC commutés avec une polarisation inférieure à 1 V. Ce résultat permet d'envisager la circulation d'un courant entre les MWCNTs commutés de quelques centaines de pico-ampères sans risquer la destruction du NEMS DC en puissance. La Figure 76b présente aussi un résultat intéressant comparé à la Figure 75, illustrant le fait que la présence de la tension de maintien entre les nanotubes de carbone contribue à diminuer de 14 % la tension nécessaire à appliquer sur l'électrode d'activation pour permettre la commutation.

3.2.4.2 Deux électrodes d'activation

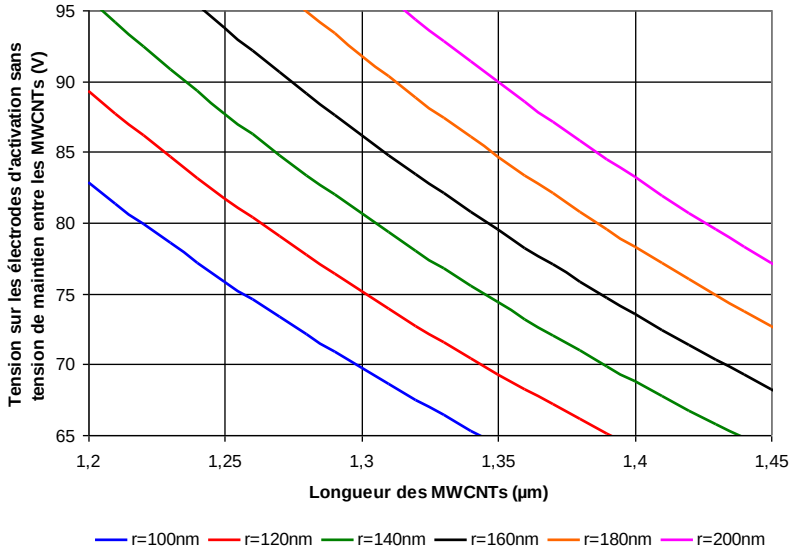


(a) **(b)**

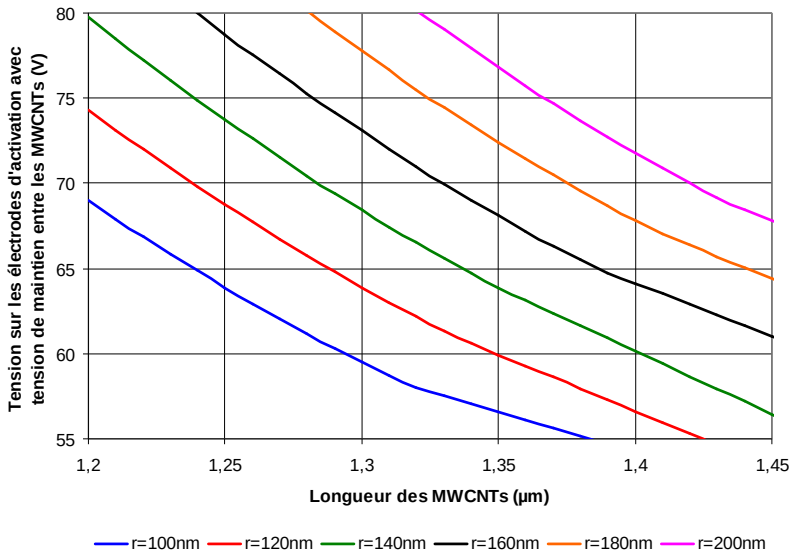
Figure 77 : Topologie du NEMS DC ohmique pince à contact carbone-carbone avec deux électrodes d'activation, (a) au repos et (b) en commutation

Une seconde topologie est possible concernant la fabrication d'un NEMS DC à contact ohmique carbone-carbone. Cette géométrie met en avant deux électrodes d'activation (Figure 77), chacune affectée au déplacement de l'un des deux MWCNTs. Cette configuration permet de diminuer considérablement la tension appliquée aux bornes de chacune des électrodes d'activation par rapport à la configuration n'en comportant qu'une seule (Figure 72 page 98).

Le graphique illustrant le rapport de la force élastique sur la force de van der Waals de cette structure est parfaitement identique à celui défini à la Figure 73 pour une électrode d'activation. Cette affirmation est également vérifiée pour la tension d'activation entre les 2 MWCNTs de la Figure 74, ainsi que pour la tension de maintien entre les nanotubes de carbone commutés à la Figure 76a. Seules les tensions d'activation aux bornes des deux électrodes se différentient de celle de la topologie précédente.



(a)



(b)

Distance r	100 nm	140 nm	200 nm
Longueur des MWCNTs	1,3 µm	1,35 µm	1,4 µm
Tension d'activation sur les électrodes sans tension de maintien (a)	70 V	74 V	83 V
Tension d'activation sur les électrodes avec tension de maintien (b)	59 V	64 V	72 V

Figure 78 : (a) Tension sur les électrodes d'activation, sans tension de maintien et (b) avec tension de maintien, en fonction de la longueur des MWCNTs.

3.2.5 Commutateur ohmique à contact carbone-platine

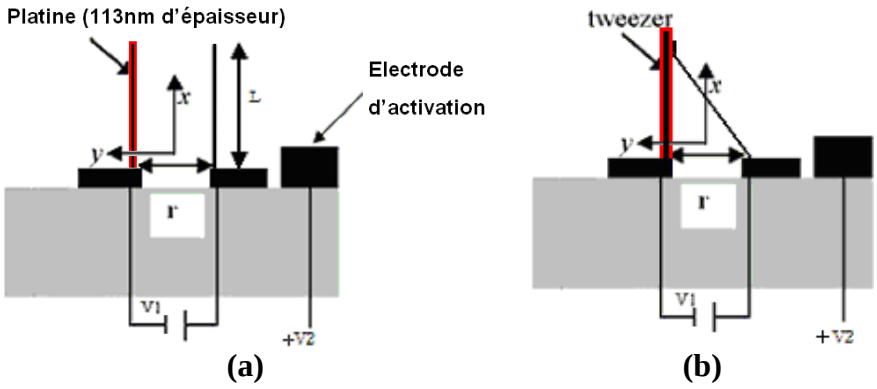
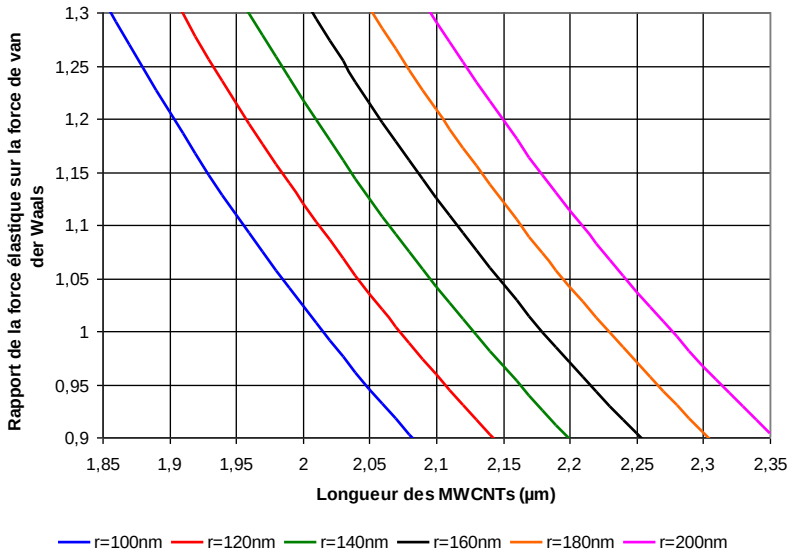


Figure 79 : Topologie du NEMS DC ohmique pince à contact carbone-platine avec une électrode d'activation, (a) au repos et (b) en commutation.

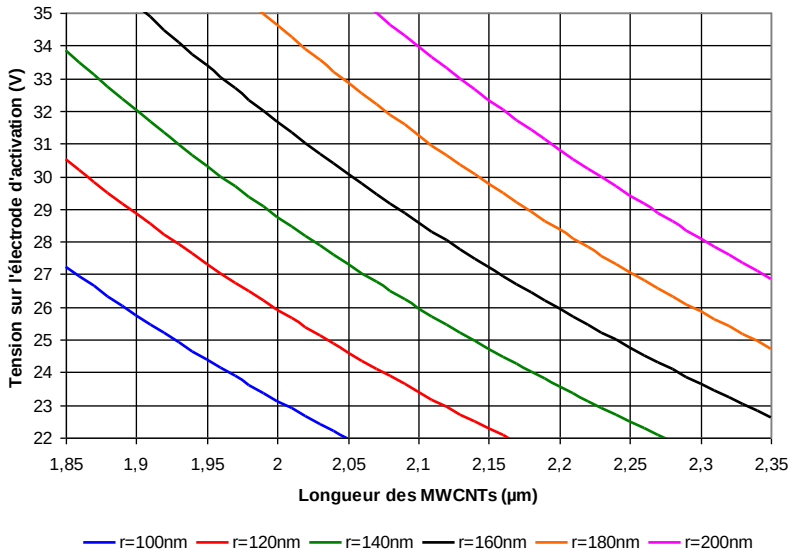
Comme pour le NEMS DC à contact carbone-carbone, les diverses dimensions du NEMS DC à contact carbone-platine doivent être définies en considérant l'incidence de la force de van der Waals lorsque le commutateur est activé. On observe de ce fait sur la Figure 80, le rapport de la force élastique sur la force de van der Waals en fonction de la longueur des MWCNTs pour différentes distances r entre les électrodes de molybdène.



Distance r	100 nm	140 nm	200 nm
Distance de contact	213 nm	253 nm	313 nm

Figure 80 : Rapport de la force élastique sur la force de van der Waals en fonction de la longueur des MWCNTs.

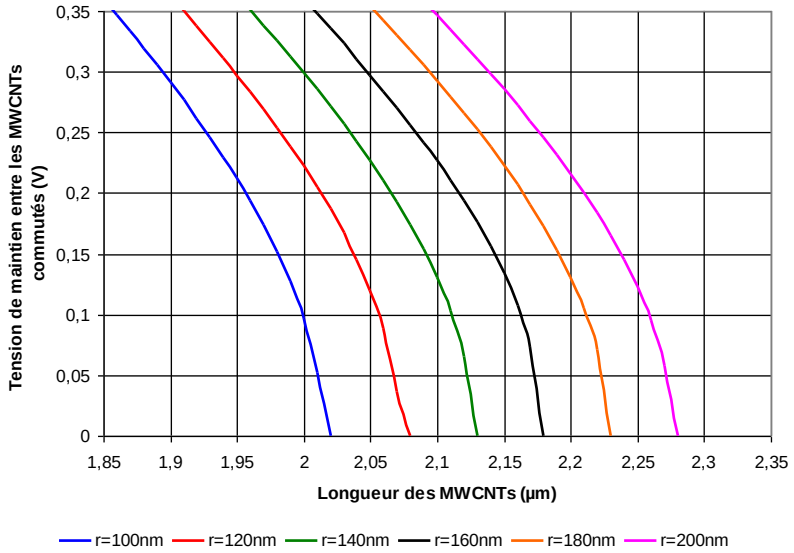
Pour l'étude de cette topologie, la caractérisation de la tension d'activation entre les MWCNTs n'a pas de sens si l'on considère que l'un des deux MWCNTs est enrobé de platine et qu'un mouvement trop important de ce dernier endommagerait le dépôt. Seule l'utilisation d'une électrode d'activation (Figure 79) peut donc permettre la réalisation du NEMS DC. La Figure 81 illustre la tension d'activation nécessaire et suffisante à appliquer à cette électrode pour obtenir le contact ohmique carbone-platine.



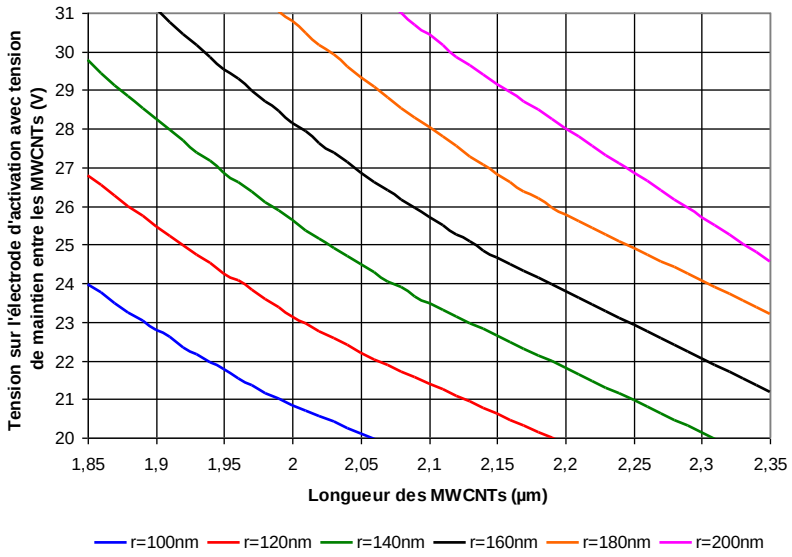
Distance r	100 nm	140 nm	200 nm
Longueur des MWCNTs	1,95 µm	2,05 µm	2,2 µm
Tension d'activation sur l'électrode	25 V	28 V	31 V

Figure 81 : Tension d'activation sur l'électrode d'activation en fonction de la longueur des MWCNTs.

Comme pour le NEMS DC à contact carbone-carbone, la tension de quelques dizaines de millivolts appliquée entre les MWCNTs ne permet pas à elle seule le maintien en commutation. Si l'on souhaite couper l'alimentation sur l'électrode d'activation une fois le contact établi, il est nécessaire de définir une tension de maintien entre les nanotubes de carbone à l'état "ON" du NEMS DC. La Figure 82a illustre cette tension de maintien dont le niveau est défini pour permettre au NEMS DC de revenir à son état initial une fois cette tension coupée.



(a)



(b)

Distance r	100 nm	140 nm	200 nm
Longueur des MWCNTs	1,95 µm	2,05 µm	2,2 µm
Tension de maintien (a)	0,2 V	0,25 V	0,25 V
Tension d'activation sur l'électrode (b)	22 V	25 V	28 V

Figure 82 : (a) Tension de maintien et (b) tension sur l'électrode d'activation en fonction de la longueur des MWCNTs.

Les résultats présentés à la Figure 82a montrent que la tension de maintien permet de conserver le NEMS DC commuté avec une polarisation inférieure à 1 V. Comme pour le contact carbone-carbone précédemment étudié, on remarque que la présence de la tension de maintien entre les MWCNTs contribue à diminuer de 11 % la tension nécessaire à appliquer sur l'électrode d'activation pour permettre la commutation (Figure 82b).

3.2.6 Commutateur ohmique contact carbone-tungstène

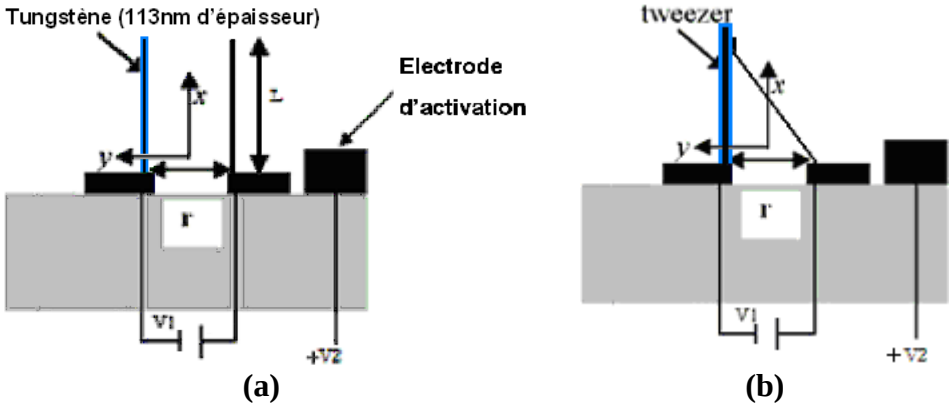
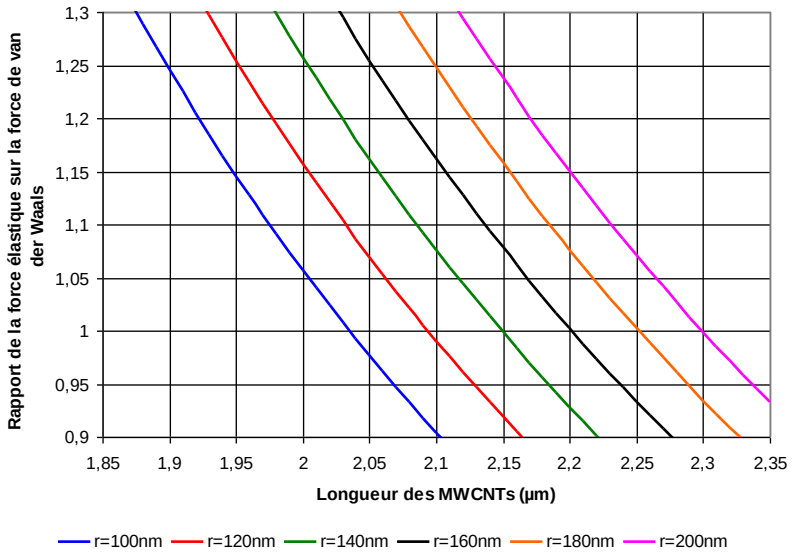


Figure 83 : Topologie du NEMS DC ohmique pince à contact carbone-tungstène avec une électrode d'activation, (a) au repos et (b) en commutation.

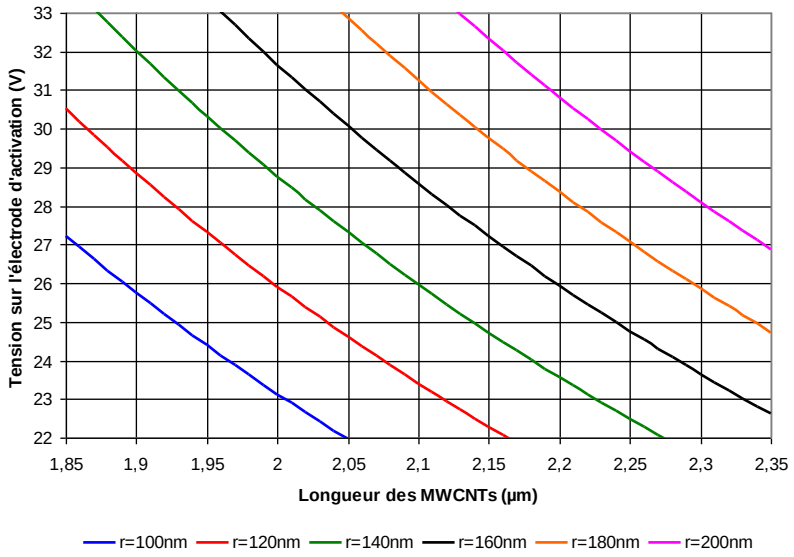
Comme pour les topologies définies précédemment, les diverses dimensions du NEMS DC à contact carbone-tungstène doivent être définies en considérant l'incidence de la force de van der Waals lorsque le commutateur est activé. On observe donc sur la Figure 84, le rapport de la force élastique sur la force de van der Waals en fonction de la longueur des MWCNTs pour différentes distances r entre les électrodes de molybdène.



Distance r	100 nm	140 nm	200 nm
Distance de contact	213 nm	253 nm	313 nm

Figure 84 : Rapport de la force élastique sur la force de van der Waals en fonction de la longueur des MWCNTs.

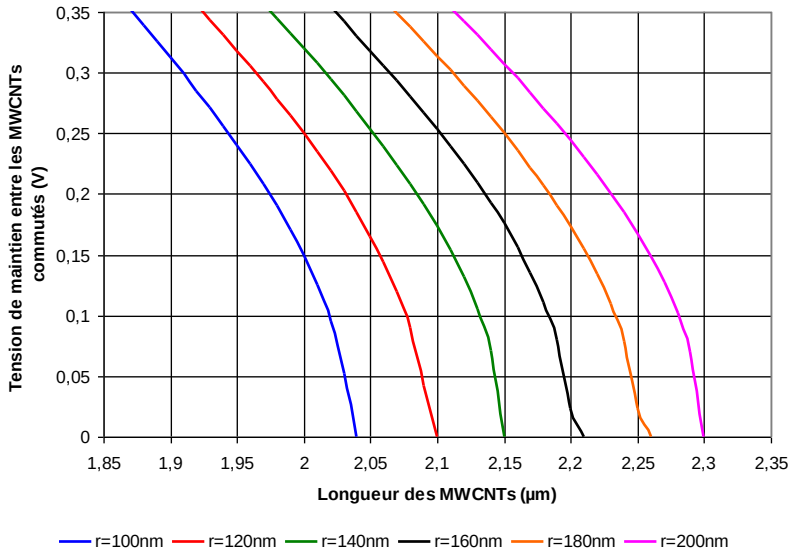
Comme pour la configuration ohmique à contact carbone-platine, la caractérisation de la tension d'activation entre les MWCNTs de cette structure n'a pas de sens si l'on considère que l'un des deux MWCNTs est enrobé de tungstène et qu'un mouvement trop important de ce dernier endommagerait le dépôt. La Figure 85 illustre la tension nécessaire et suffisante à appliquer sur l'électrode d'activation pour obtenir le contact ohmique carbone-tungstène.



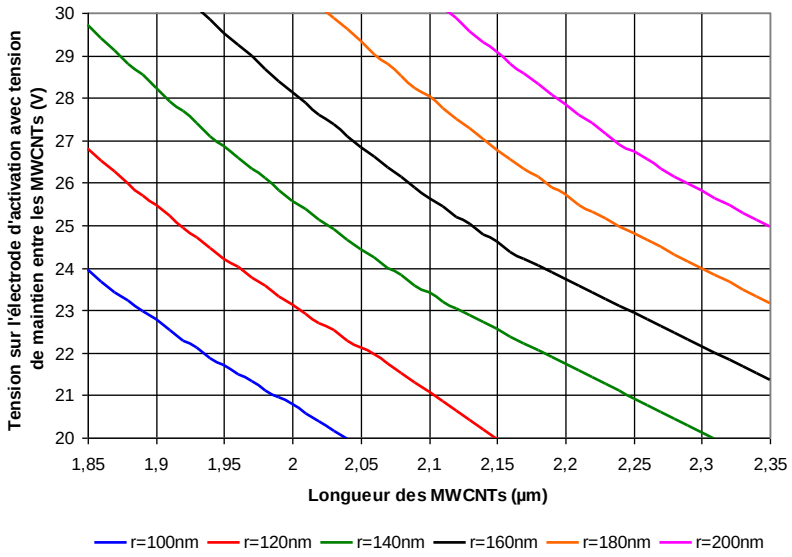
Distance r	100 nm	140 nm	200 nm
Longueur des MWCNTs	1,95 µm	2,05 µm	2,2 µm
Tension d'activation sur l'électrode	25 V	28 V	31 V

Figure 85 : Tension d'activation sur l'électrode d'activation en fonction de la longueur des MWCNTs.

Comme pour les NEMS DC à contact ohmique précédemment étudiés, la tension de quelques dizaines de millivolts appliquée entre les MWCNTs ne permet pas à elle seule le maintien en commutation. Si l'on souhaite couper l'alimentation sur l'électrode d'activation une fois le contact établi, il est nécessaire de définir une tension de maintien à l'état "ON" du NEMS DC. La Figure 86a illustre cette tension de maintien dont le niveau est défini pour permettre au NEMS DC de revenir en son état initial une fois cette tension coupée.



(a)



(b)

Distance r	100 nm	140 nm	200 nm
Longueur des MWCNTs	1,95 µm	2,05 µm	2,2 µm
Tension de maintien (a)	0,15 V	0,15 V	0,2 V
Tension d'activation sur l'électrode (b)	22 V	25 V	28 V

Figure 86 : (a) Tension de maintien et (b) tension sur l'électrode d'activation en fonction de la longueur des MWCNTs.

Les résultats présentés à la Figure 86a montrent que la tension de maintien permet de conserver le NEMS DC commuté avec une polarisation inférieure à 1 V. Comme pour les contacts ohmiques précédemment étudiés, on remarque que la présence de la tension de maintien entre les MWCNTs contribue à diminuer de 11 % la tension nécessaire à appliquer sur l'électrode d'activation pour permettre la commutation (Figure 86b).

3.2.7 Commutateur capacitif contact carbone–silice

Avant d'expliciter en détail les résultats de cette étude, il est important de souligner que le manque d'informations dans la littérature concernant les interactions de van der Waals entre le carbone et la silice oblige à considérer les données résultantes de l'interaction entre le carbone et le silicium (Tableau 10 page 86).

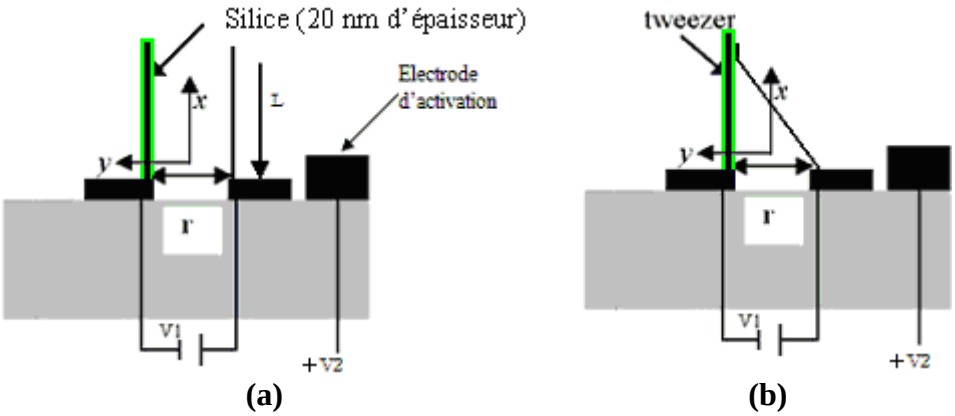
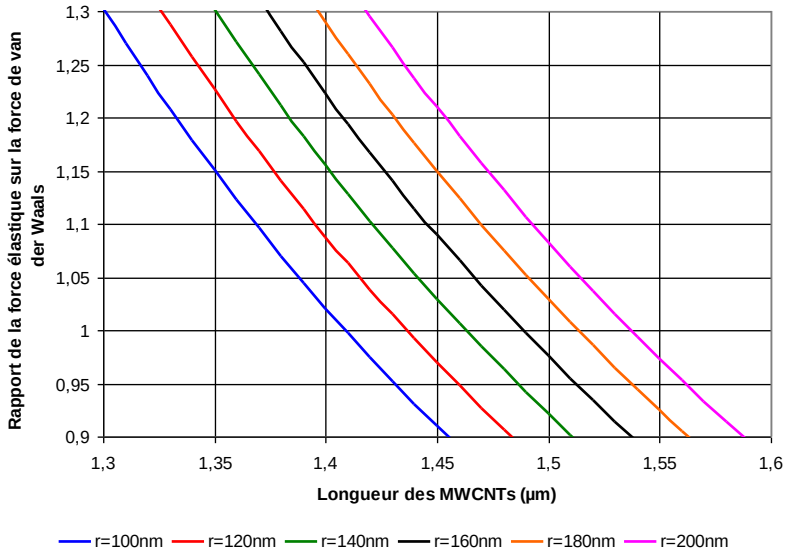


Figure 87 : Topologie du NEMS DC capacitif pince à contact carbone-silice avec une électrode d'activation, (a) au repos et (b) en commutation.

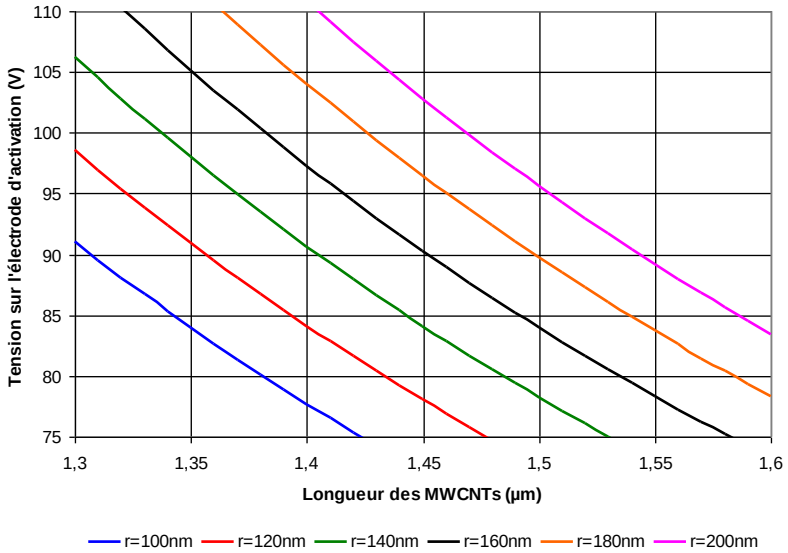
De même que les structures à contact ohmique, les diverses dimensions du NEMS DC à contact capacitif carbone-SiO_2 doivent être définies en considérant l'incidence de la force de van der Waals lorsque le commutateur est activé. La Figure 88, montre le rapport de la force élastique sur la force de van der Waals en fonction de la longueur des MWCNTs pour différentes distances r entre les électrodes de molybdène.



Distance r	100nm	140nm	200nm
Distance de contact	306nm	346nm	406nm

Figure 88 : Rapport de la force élastique sur la force de van der Waals en fonction de la longueur des MWCNTs.

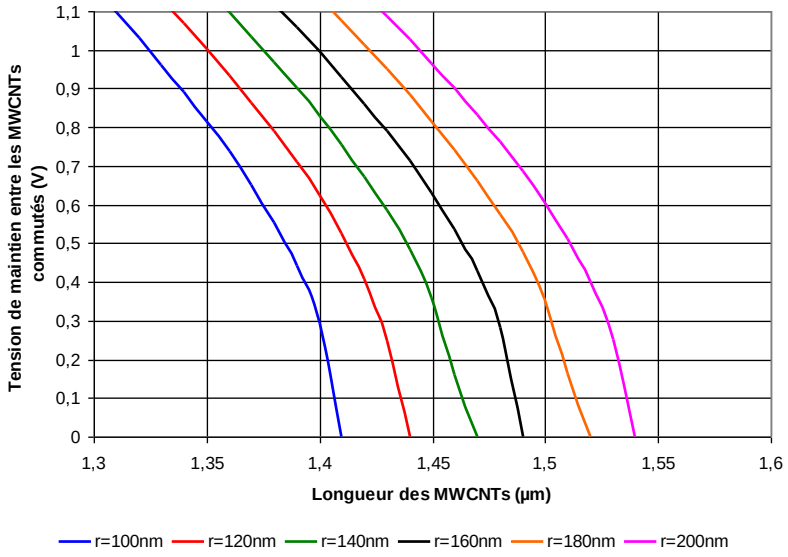
Comme pour les topologies ohmiques à contacts carbone-platine et carbone-tungstène, la caractérisation de la tension d'activation entre les MWCNTs de cette structure n'a pas de sens si l'on considère que l'un des deux MWCNTs est enrobé de SiO_2 et qu'un mouvement trop important de ce dernier endommagerai le dépôt. La Figure 89 rapporte la tension nécessaire et suffisante à appliquer à l'électrode d'activation pour obtenir le contact capacitif carbone-SiO_2.



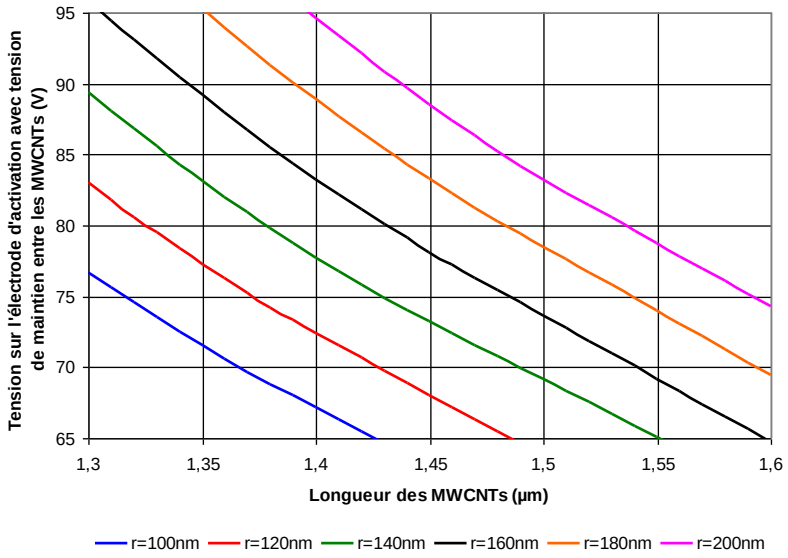
Distance r	100 nm	140 nm	200 nm
Longueur des MWCNTs	1,35 µm	1,4 µm	1,5 µm
Tension d'activation sur l'électrode	84 V	91 V	96 V

Figure 89 : Tension d'activation sur l'électrode d'activation en fonction de la longueur des MWCNTs.

Comme pour les NEMS DC à contact ohmique précédemment étudiés, la tension de quelques dizaines de millivolts appliquée entre les MWCNTs du contact capacitif ne permet pas à elle seule le maintien en commutation. Si l'on souhaite couper l'alimentation sur l'électrode d'activation une fois le contact établi, il est nécessaire de définir une tension de maintien à l'état "ON" du NEMS DC. La Figure 90a montre cette tension de maintien dont le niveau est défini pour permettre au NEMS DC de revenir à son état initial une fois cette tension coupée.



(a)



(b)

Distance r	100 nm	140 nm	200 nm
Longueur des MWCNTs	1,35 µm	1,4 µm	1,5 µm
Tension de maintien (a)	0,8 V	0,8 V	0,6 V
Tension d'activation sur l'électrode (b)	72 V	78 V	83 V

Figure 90 : (a) Tension de maintien et (b) tension sur l'électrode d'activation en fonction de la longueur des MWCNTs.

La Figure 90a montre que la tension de maintien permet de conserver le NEMS DC commuté avec une polarisation inférieure à 1 V. Comme pour les contacts ohmiques précédemment étudiés, on remarque que la présence de la tension de maintien entre les MWCNTs contribue à diminuer de 14 % la tension nécessaire à appliquer sur l'électrode d'activation pour permettre la commutation (Figure 90b).

3.2.8 Conclusions

L'approche mécanique présentée dans le chapitre a permis de définir théoriquement les topologies de quatre commutateurs NEMS DC à contacts différents par le biais d'un programme MATLAB prenant en considération toutes les phases de fonctionnement du NEMS DC. Le Tableau 11 récapitule les résultats obtenus à l'aide de ces différentes simulations et des paramètres suivants : un module de Young des MWCNTs égal à 115 GPa, une longueur de contact de 120 nm, un diamètre des MWCNTs de 75 nm et une distance r entre les électrodes de molybdène de 100 nm.

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de l'ensemble de ces résultats :

- Pour un contact carbone-carbone, la présence d'une seconde électrode d'activation permet de diminuer de 30 % la tension minimale nécessaire à appliquer sur chacune des deux électrodes.

- Enrober un des deux MWCNTs en contact permet de réduire la distance entre les deux éléments et permet ainsi de diminuer la tension d'activation sur l'électrode.

- Les plus faibles interactions inter-atomiques liées à la force de van der Waals pour des contacts ohmiques carbone-platine et carbone-tungstène permettent de diminuer considérablement la tension sur l'électrode d'activation, ainsi que la tension de maintien entre les MWCNTs en contact.

- Comparé au contact ohmique carbone-carbone, le contact carbone-SiO_2 n'a pas de réelle incidence sur les diverses tensions de la structure mais il laisse envisager la faisabilité d'un NEMS DC à contact capacitif.

	Distance de contact	Longueur des MWCNTs	Tension de maintien entre les MWCNTs	Tension d'activation sur une électrode
C-C 1 électrode	326 nm	1,3 µm	0,6 V	84 V
C-C 2 électrodes	326 nm	1,3 µm	0,6 V	59 V
C-Pt	213 nm	1,95 µm	0,2 V	22 V
C-W	213 nm	1,95 µm	0,15 V	22 V
C-SiO_2	306 nm	1,35 µm	0,8 V	72 V

Tableau 11 : Résumé des simulations MATLAB réalisées sur 4 contacts différents (trois ohmiques (C-C, C-Pt et C-W) et un capacitif (C-SiO_2)) avec les caractéristiques communes suivantes, le module de Young E = 115 GPa, la longueur de contact L_C = 120 nm, le diamètre D = 75 nm et la distance entre les électrodes de Mo r = 100 nm.

3.3 Conception expérimentale et caractérisation en tension

3.3.1 Procédé de fabrication

La croissance de nanotubes de carbone par la méthode PECVD n'étant pas optimale en présence de SiO_2 (2.2.2 page 53), il apparaît indispensable de considérer une structure dont la longueur des MWCNTs soit la plus faible possible tout en conservant de faibles tensions d'activation ainsi qu'une réversibilité de la commutation ($F_{elast} > F_{vdW}$). La distance entre les électrodes de molybdène est donc fixée à 100 nm, séparation en-dessous de laquelle existent les risques de contacts électriques inopinés entre les métallisations indépendantes au cours du dépôt de molybdène par évaporation (Figure 91).

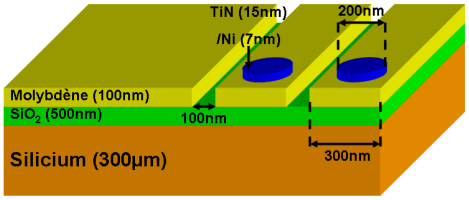


Figure 91 : Dimensions du NEMS DC avant croissance PECVD.

La première étape est une lithographie optique (Figure 92a) permettant de définir des plots de contacts aux dimensions adaptées à la réalisation de mesures sous pointes. C'est une technique relativement simple à mettre en œuvre et très reproductible mais limitée en termes de résolution (> 1µm).

La topologie issue des simulations a montré que les électrodes et les plots de catalyseur doivent avoir respectivement une largeur de 300 nm et un diamètre d'environ 200 nm (Figure 91). La suite rend nécessaire la mise en œuvre d'une lithographie électronique permettant d'affiner le premier niveau de molybdène réalisé par lithographie optique, et atteindre ainsi les dimensions et les séparations nanométriques souhaitées (Figure 92b en bleu). Notons que le premier niveau n'a pas été réalisé via une lithographie électronique car cette dernière nécessitait, compte tenu de la surface de dépôt, des temps d'écriture beaucoup trop longs pour ouvrir la résine.

Une dernière étape de lithographie électronique consiste à déposer au bout des électrodes les plots de catalyseur de 200 nm de diamètre indispensables pour la croissance des nanotubes de carbone (Figure 92b en vert). La difficulté de fabrication réside essentiellement dans l'alignement du niveau de masquage permettant la localisation des plots de catalyseur, car pour cette étape la marge d'erreur est très faible. Il faut en effet aligner un plot de 200 nm sur une largeur de 300 nm de molybdène.

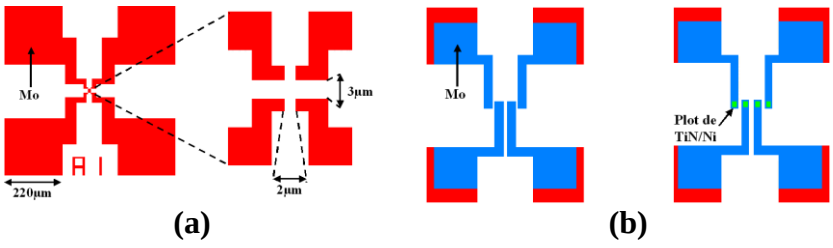


Figure 92 : (a) Masque lithographique optique et (b) Masques lithographiques électroniques, métallisation Mo et plots de TiN/Ni.

3.3.2 Les différentes étapes technologiques

3.3.2.1 1ère étape technologique réalisée via une lithographie optique pour un dépôt de molybdène par évaporation

La première étape de fabrication consiste à réaliser des plots de contacts en molybdène avec le premier niveau de masquage par lithographie optique. Le détail de ce procédé de fabrication est illustré dans la Figure 93.

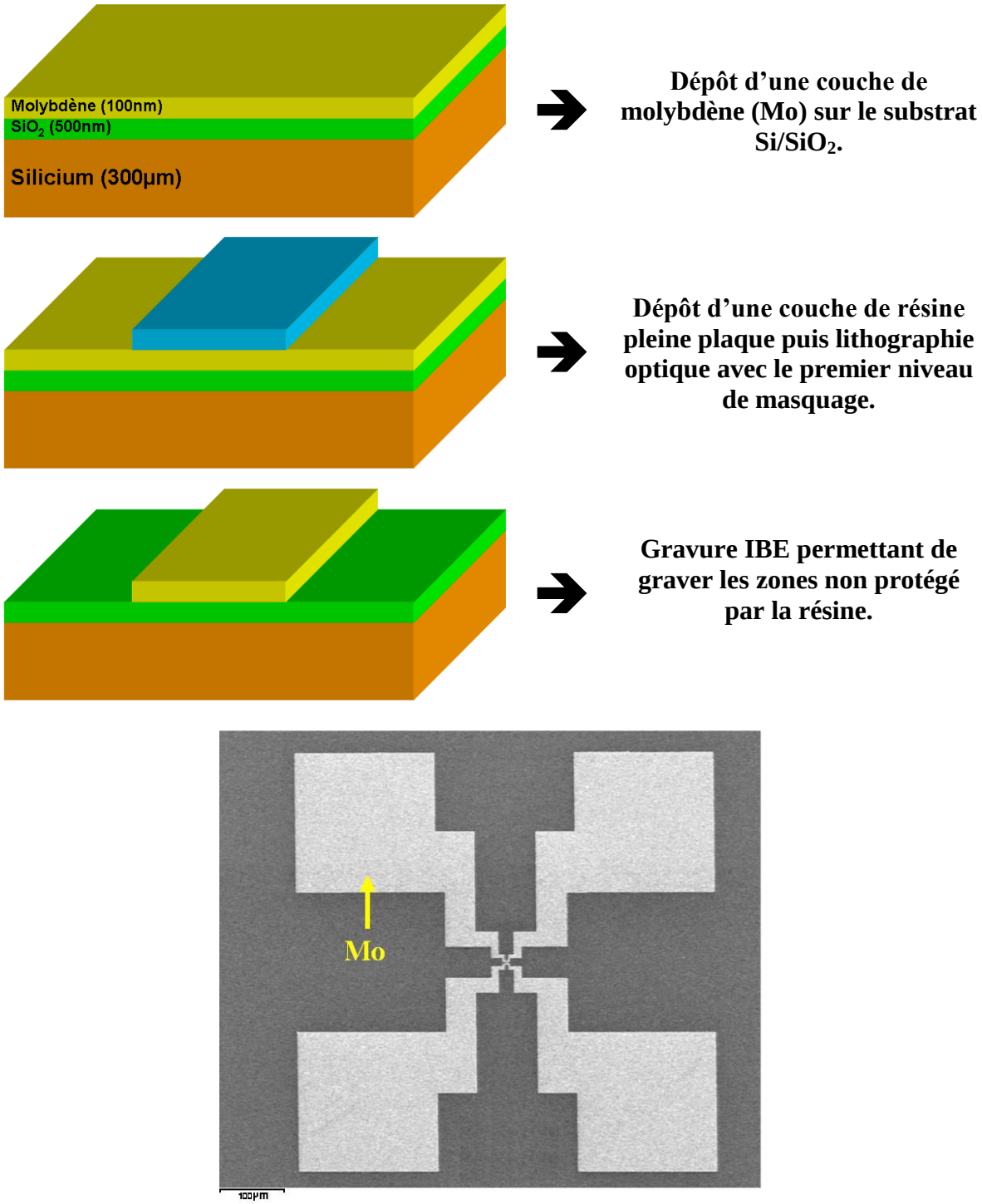


Figure 93 : Procédé de fabrication des plots de contacts par évaporation à l'aide du premier niveau de masquage en lithographie optique. Image MEB d'un des 81 dispositifs présents sur la puce de 1 cm^2.

3.3.2.2 2ème étape technologique réalisée via une lithographie électronique pour un dépôt de molybdène par évaporation

La deuxième étape de fabrication consiste à s'aligner sur le premier niveau de métallisation précédemment réalisé, afin de déposer par évaporation le molybdène permettant d'affiner le dépôt initialement débuté en lithographie optique. Tout d'abord, on dépose une couche de résine sur l'ensemble de la surface du substrat, puis par lithographie électronique on définit des ouvertures de 300 nm dans la résine en s'alignant avec le premier niveau de masquage. Après dépôt d'une épaisseur de 100 nm de molybdène par évaporation et opération de lift-off, on obtient des électrodes aux dimensions définies dans le procédé de fabrication (Figure 94).

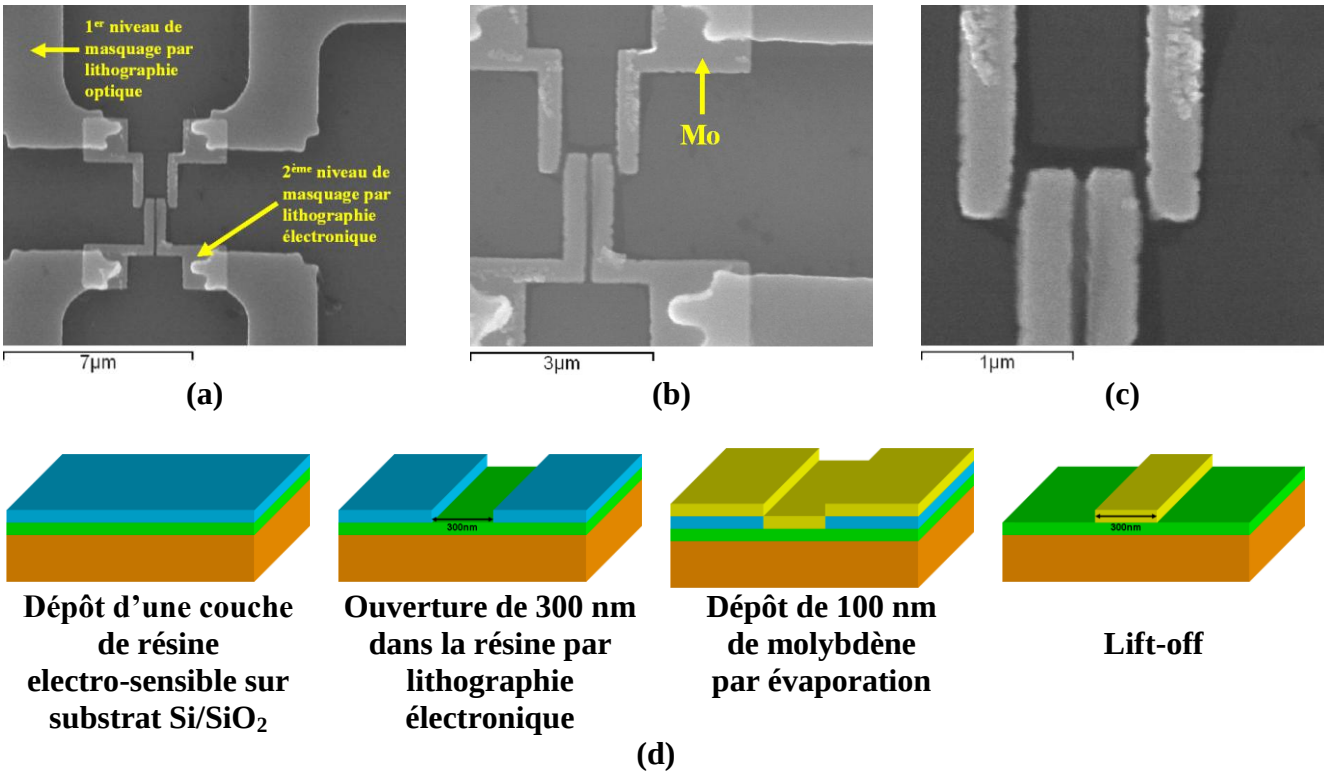


Figure 94 : Images MEB du dépôt de 100 nm de Mo par évaporation. (d) Procédé de dépôt.

3.3.2.3 3ème étape technologique réalisée via une lithographie électronique pour un dépôt de TiN par pulvérisation et de nickel par évaporation

Une dernière étape de lithographie électronique consiste à s'aligner sur le deuxième niveau de masquage (électrodes affinées) pour localement déposer les plots de catalyseur de TiN/Ni aux extrémités des lignes en molybdène (Figure 95).

Pour ce faire on dépose tout d'abord une bicouche de résine : une première de PMGI d'épaisseur 200 nm puis une couche de PMMA A4 d'épaisseur 170 nm. Par lithographie électronique on définit des ouvertures de 200nm dans la résine en s'alignant avec le second niveau de masquage. Après le dépôt de l'empilement de TiN (15 nm) par pulvérisation / Ni (7 nm) par évaporation et opération de lift-off, on obtient les plots de catalyseur aux extrémités des électrodes de molybdène (Figure 95e).

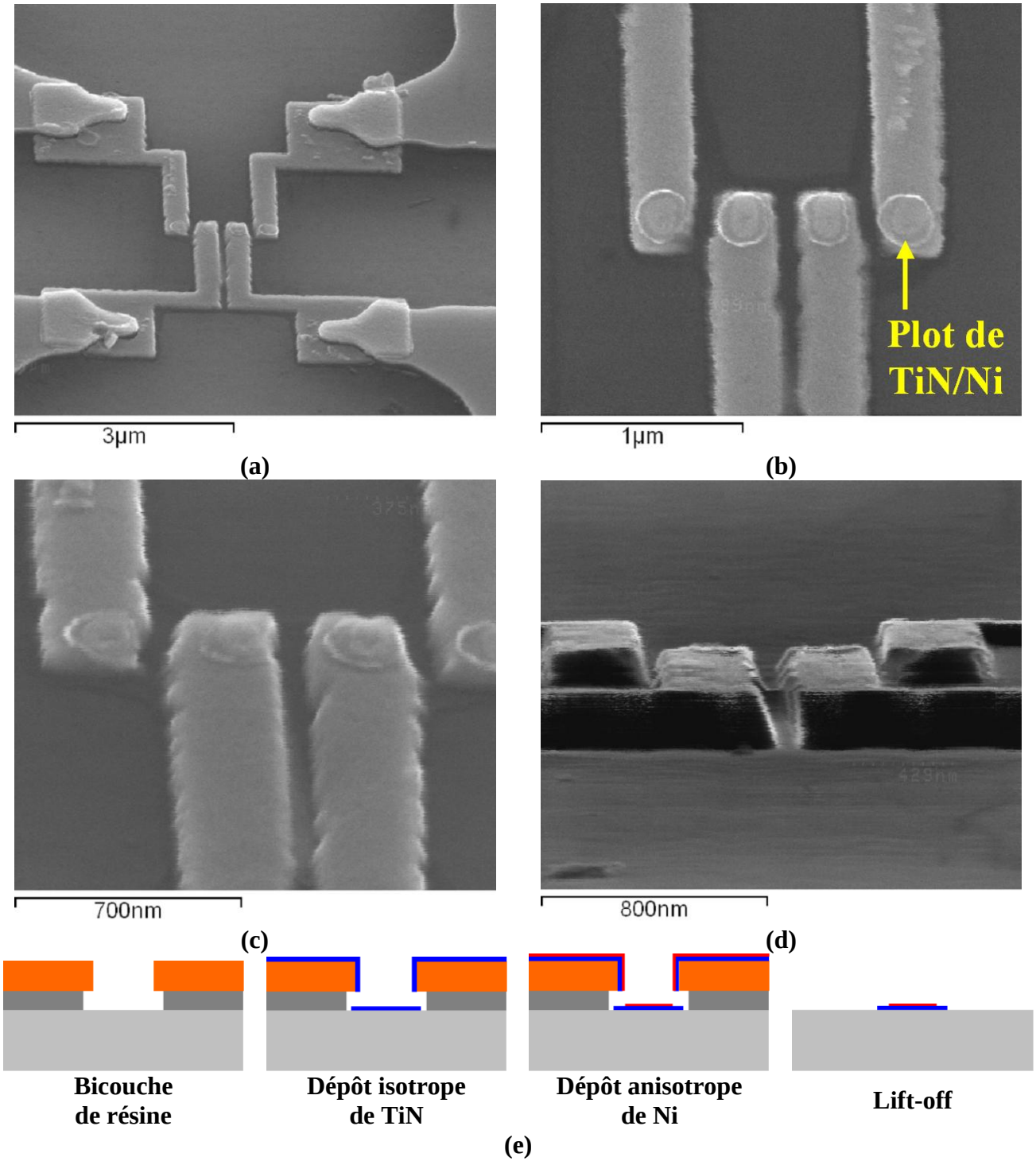


Figure 95 : Images MEB du dépôt de 15 nm de TiN par pulvérisation suivi de 7 nm de Ni par évaporation. (e) Procédé de dépôt du TiN/Ni par bicouche de résine [96].

3.3.3 NEMS DC après croissance PECVD des MWCNTs

Après croissance par PECVD IPA (37 %) + H_2O (43 %) + H_2 (20 %) à 700 °C sous une pression de 1,55 Torr sur molybdène (Figure 10d page 23), on obtient les résultats présentés à la Figure 96. Sur une puce de $1cm^2$ comportant 81 NEMS DC, on obtient en moyenne 1/3 de NEMS DC comportant les quatre MWCNTs. Le faible pourcentage de dispositifs exploitables (33 %) est essentiellement dû à la dispersion des charges qui ont tendance à se retrouver sur les bords de la puce durant la synthèse PECVD, perturbant la croissance des nanotubes de carbone situés dans ces zones. La présence importante de carbone amorphe issu de la synthèse a rendu indispensable l'utilisation du faisceau d'ions de la FIB (Focussed Ion Beam) pour isoler électriquement les quatre électrodes. Cette étape technologique supplémentaire et très agressive pour les nanotubes de carbone et réduit encore un peu plus la quantité de dispositifs exploitables. Afin de remédier à ce problème, la proportion du gaz réducteur (H_2O + H_2) sera augmentée par rapport au gaz précurseur (IPA) pour les prochaines croissances PECVD, ce qui devrait permettre de diminuer la présence de carbone amorphe.

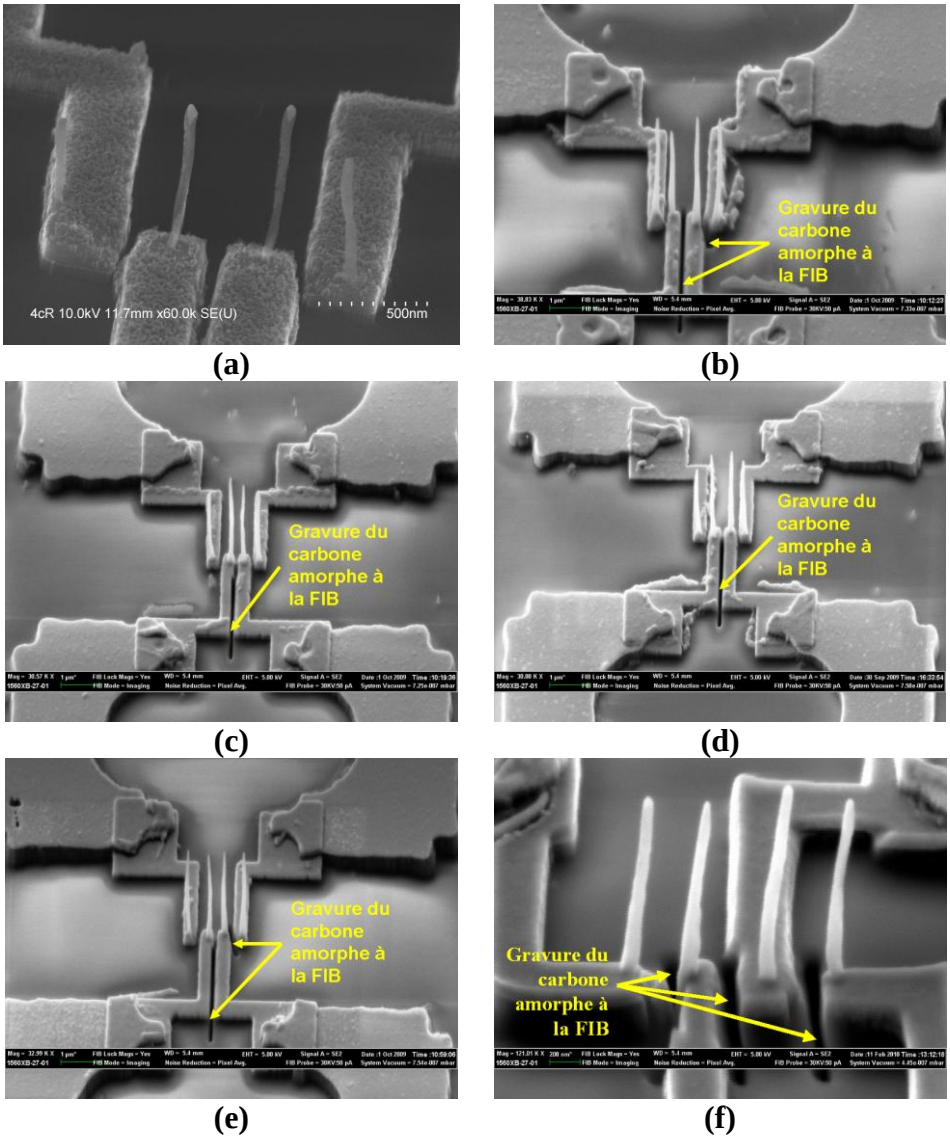


Figure 96 : Images MEB de NEMS DC réalisés dans l'ordre chronologique, après croissance de MWCNTs. (a) Dispositif n'ayant pas subi de gravure à la FIB. (de b à f) Dispositifs après passage à la FIB.

3.3.4 Caractérisations en tension

3.3.4.1 1er résultat : Commutation entre deux MWCNTs

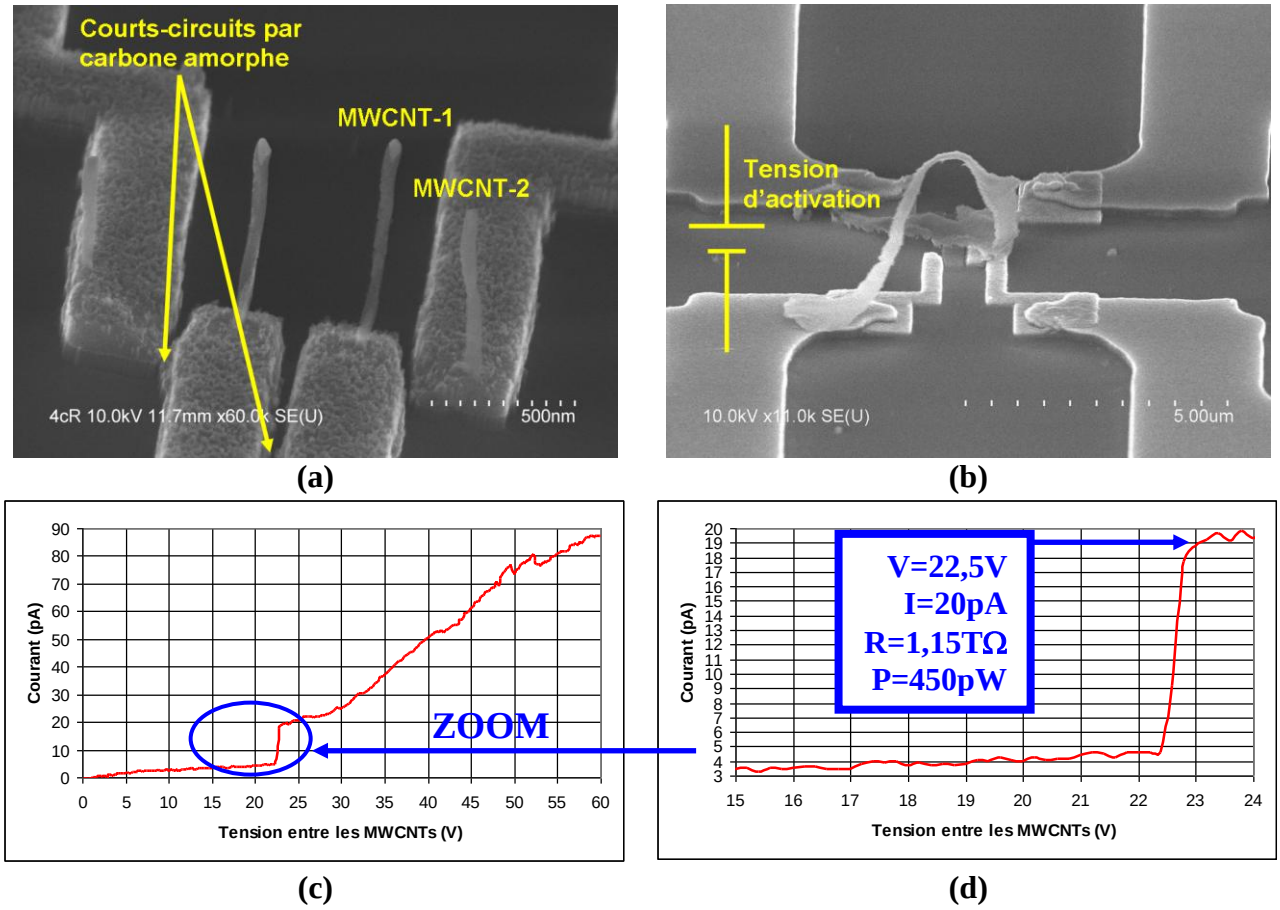


Figure 97 : (a) Images MEB du dispositif avant activation et (b) après activation. (c) Courbe du courant en fonction de la tension d'activation de 0 à 60V et (d) zoom sur l'activation entre 22 et 23V.

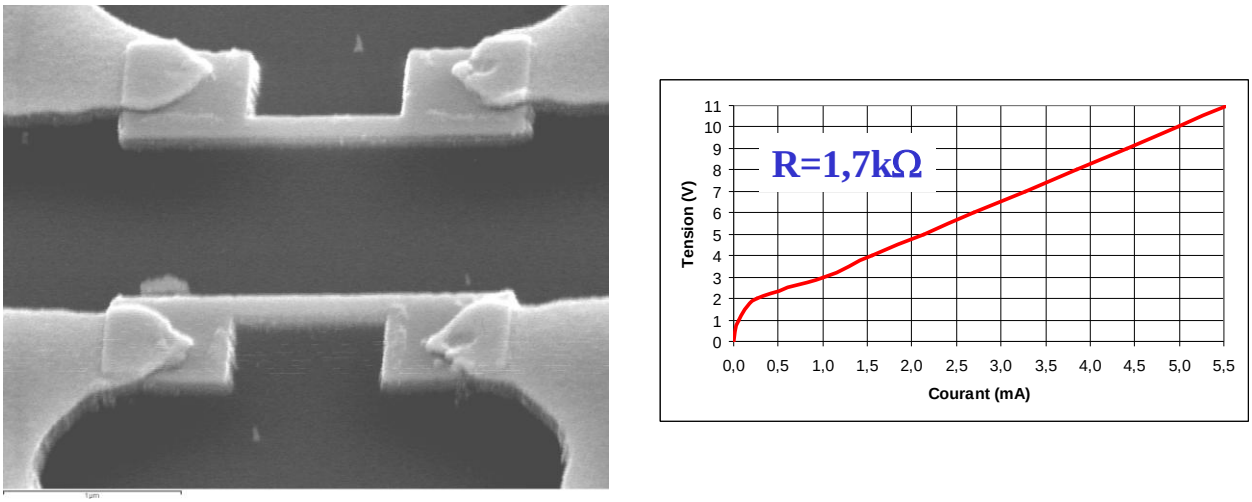
Le dispositif illustré par l'image MEB de la Figure 97a présente deux courts-circuits occasionnés par du carbone amorphe issu de la croissance PECVD, faisant que ce NEMS DC n'est exploitable que grâce à l'application d'une tension entre le MWCNT-1 et le MWCNT-2 séparés par 250 nm. Les dimensions de ces 2 nanotubes de carbone sont présentées dans le Tableau 12 suivant :

	MWCNT-1	MWCNT-2
Diamètre extérieur	50 nm	50 nm
Longueur	1,2 µm	870 nm

Tableau 12 : Dimensions des MWCNTs du dispositif.

En associant ces données au module de Young mesuré à 115 GPa ainsi qu'au rapport diamètre extérieur sur diamètre intérieur égal à 8, on détermine par le biais du programme MATLAB définit précédemment une tension d'activation entre le MWCNT-1 et le MWCNT-2 de 22,7 V.

En observant la Figure 97 (a et b), on constate qu'après la mise en tension jusqu'à 60 V la structure a été détruite. Néanmoins, lorsqu'on analyse les courbes de la Figure 97 (c et d) on remarque une brutale montée en courant de 4 pA à 20 pA à partir de 22,5 V, ce qui est caractéristique d'une commutation entre deux éléments conducteurs dans lesquels circulent un courant [79]. Ce résultat en tension confirme notre projection théorique qui avançait une tension d'activation de 22,7 V entre le MWCNT-1 et le MWCNT-2. Ces courbes permettent également de déduire, une puissance de 450 pW entre les MWCNTs et une résistance en contact très élevée de l'ordre de 1,15 TΩ. Cette résistance étant globalement due aux trois contacts résistifs de la structure, à-savoir : les contacts de chacun des deux nanotubes de carbone avec la barrière de diffusion de TiN et le contact entre les MWCNTs en commutation. Ce résultat est confirmé par la résistance de 1,7 kΩ mesurée entre deux électrodes en molybdène reliées et sur lequel il n'y a pas de nanotubes de carbone (Figure 98). Si l'on considère que la résistance propre à un nanotube de carbone est de 6,45 kΩ/µm [44], on a donc une résistance globale due aux électrodes en molybdène et aux nanotubes de carbone de 15 kΩ, ce qui est parfaitement négligeable compte tenu des 1,15 TΩ des deux MWCNTs en contact.



(a) **(b)**

Figure 98 : Mesure de la résistance entre deux électrodes en molybdène reliées, sans nanotubes de carbone.

3.3.4.2 2nd résultat : NEMS DC ohmique avec une électrode d'activation

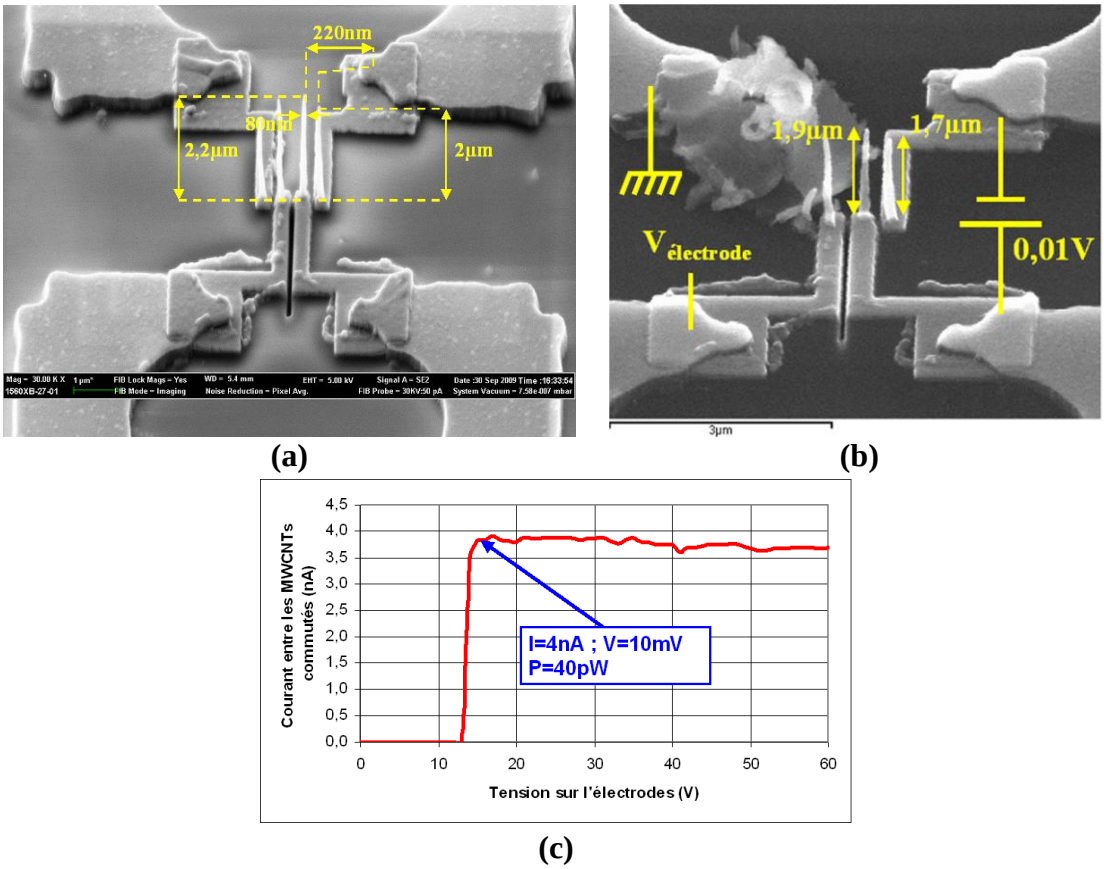


Figure 99 : (a) Dispositif avant caractérisation en tension. (b) Dispositif après caractérisation en tension et (c) mesure courant-tension.

Le dispositif de la Figure 99 illustre une commutation réalisée par le biais d'une électrode d'activation. Deux constatations laissent en effet présager un contact entre les MWCNTs alimentés par une différence de potentiel de 0,01 V (Figure 99b) :

- le brusque saut en courant de 0 nA à 4 nA avec 14 V sur l'électrode confirme ainsi la valeur théorique de 13 V issue du programme MATLAB.

- les MWCNTs qui ont commuté ont rétréci de 300 nm, laissant présager un contact qui a brûlé l'extrémité des nanotubes de carbone. Cela est probablement dû à une qualité cristalline insuffisante des MWCNT crus en PECVD. Des investigations portant sur le rôle des proportions de gaz réducteur (H_2O + H_2) et précurseur (IPA) pourraient permettre de pallier à ce problème.

Une interrogation cependant est posée au regard du claquage de l'électrode reliée à la masse. L'hypothèse la plus probable est un arc électrique occasionné par du carbone amorphe issu de la croissance PECVD. On peut également noter pour conclure sur ce dispositif, qu'une seconde caractérisation en tension a été réalisée, engendrant la destruction de la structure. Il semble donc que nos dispositifs ne puissent supporter plus d'une commutation, cela étant probablement occasionné par une qualité d'accrochage insuffisante du molybdène sur le SiO_2 durant le dépôt de la métallisation. Des expérimentations portant sur l'étude d'une fine

épaisseur d'un matériau (du titane par exemple) entre le molybdène et le SiO_2 permettraient de résoudre ce problème.

3.3.4.3 3ème résultat : NEMS DC ohmique avec deux électrodes d'activation

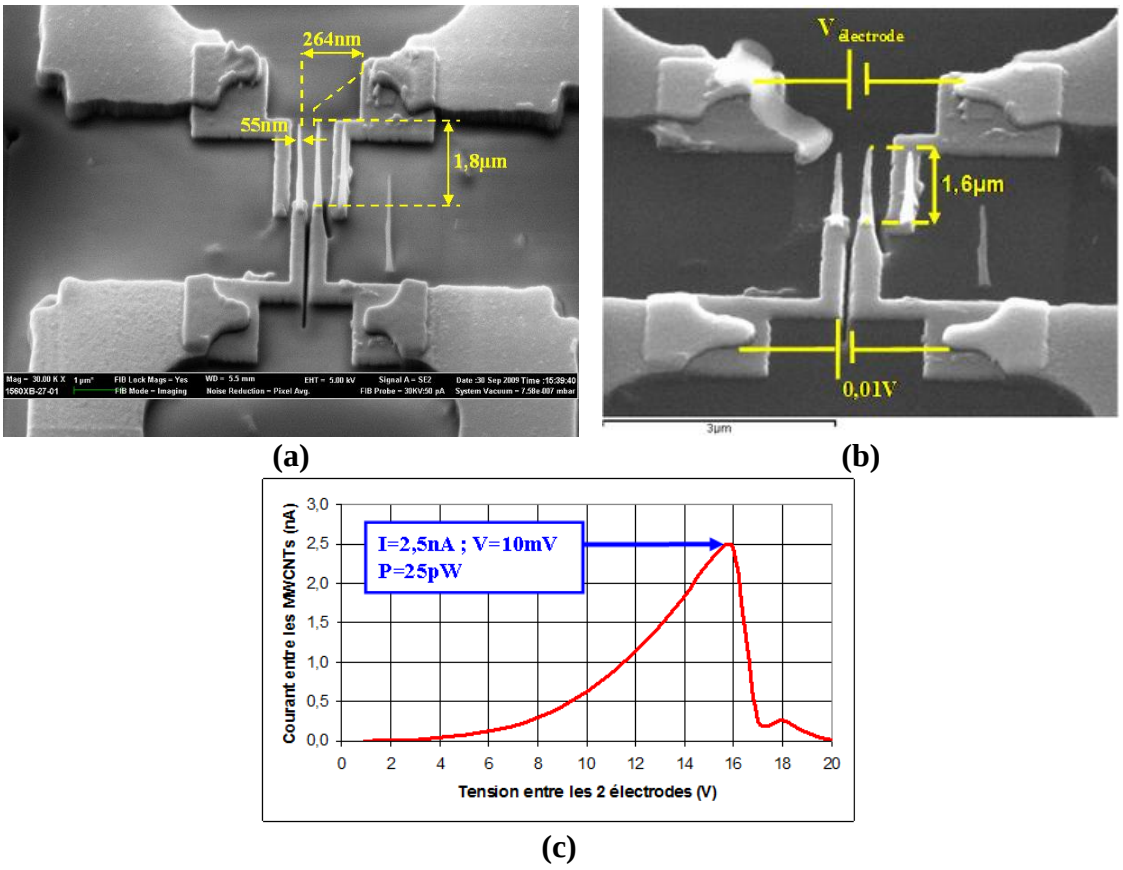


Figure 100 : (a) Dispositif avant caractérisation en tension. (b) Dispositif après caractérisation en tension et (c) mesure courant-tension.

Comme pour le dispositif précédent il semble y avoir eu un bref contact entre les MWCNTs polarisés à 0,01 V avec 16 V sur l'électrode, ce qui correspond exactement à la tension théorique issue du programme MATLAB. On constate comme précédemment que les MWCNTs ont perdu 200 nm sur leurs longueurs, ce qui justifie un brusque retour en l'état initial. En effet dans cette nouvelle configuration la force élastique a augmenté compensant de ce fait la force électrostatique générée par les 16 V appliquée sur les électrodes. On peut également noter de cette observation que les nanotubes de carbone ne sont pas restés collés lorsqu'ils sont rentrés en contact et que les forces de van der Waals on été compensées par la force élastique des MWCNTs devenus plus courts. L'observation laisse aussi entrevoir un claquage situé sur l'électrode du haut à gauche confirmant l'une des conclusions issues de l'étude du dispositif précédent, à-savoir que le dépôt de molybdène n'a pas un accrochage optimale sur le SiO_2. Pour conclure, une seconde caractérisation en tension a été réalisée engendrant la destruction de la structure pour des raisons sans nuls doutes similaires aux conclusions de l'étude du NEMS DC précédent.

3.3.4.4 4ème résultat : NEMS DC capacitif avec une électrode d'activation

Une seconde étape de nos manipulations a consisté à enrober de silice un des nanotubes de carbone d'un NEMS DC via l'EBID (2.6 page 75), afin de réaliser un contact capacitif carbone-SiO_2 en commutation. D'autres manipulations de ce type n'ont pu être faites avec du platine et du tungstène, car la surface de SiO_2 isolante présente sur la totalité de la puce étant trop importante, la charge accumulée durant la visualisation MEB empêchait une stabilité optimale et indispensable de l'image compte tenu des dimensions nanométriques de la fenêtre de dépôt EBID. Seul un des bords de la puce n'a fortuitement posé aucune difficulté dans la stabilisation de l'image.

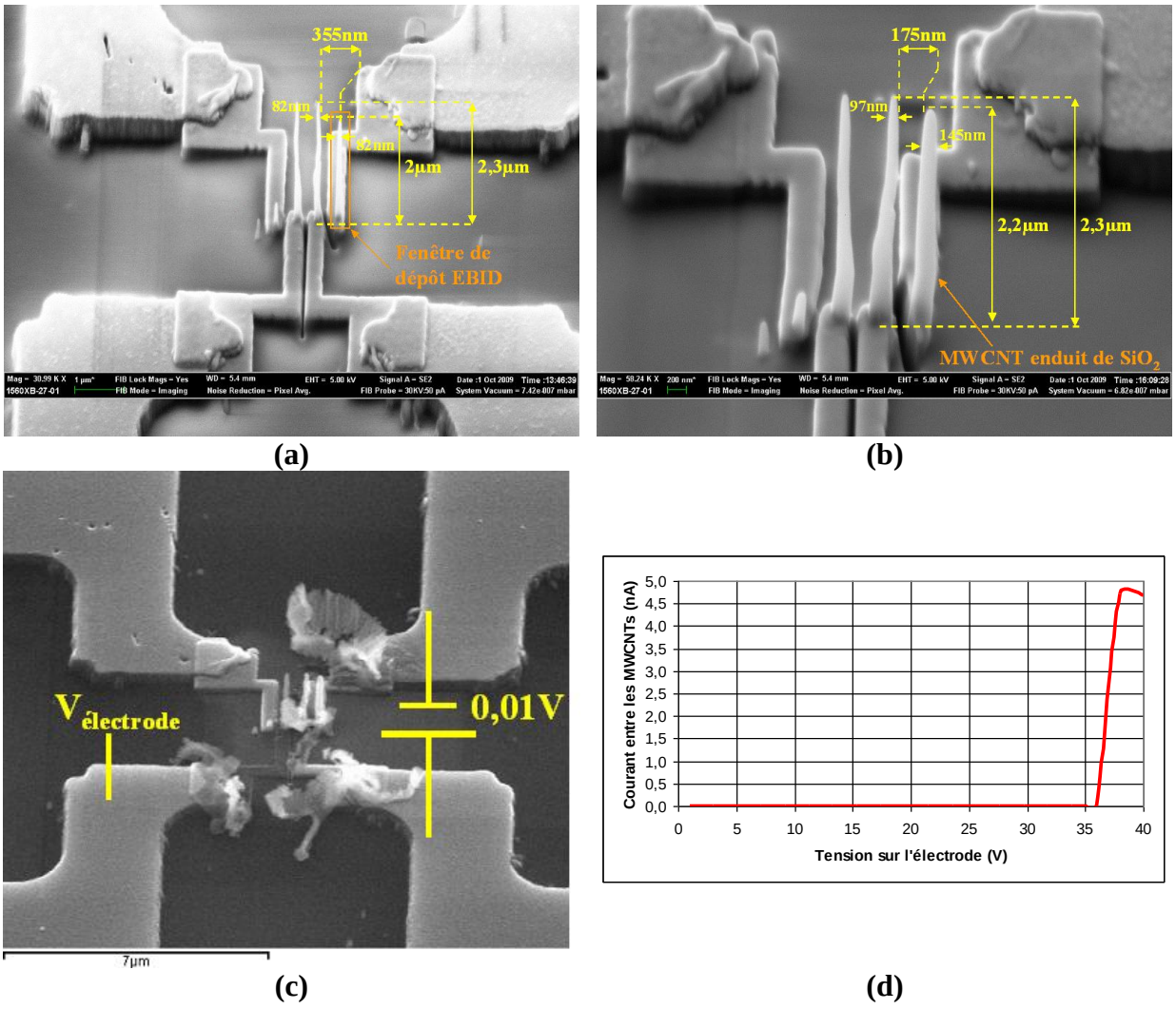


Figure 101 : (a) Images MEB du NEMS DC avant dépôt de SiO_2 et (b) après dépôt de SiO_2. (c) Image MEB du dispositif après caractérisation en tension et (d) mesure courant-tension.

Pour ce dispositif, l'objectif est d'enrober de SiO_2 le nanotube de carbone se trouvant le plus à droite sur l'image MEB (Figure 101a) en définissant une fenêtre de dépôt aux dimensions du MWCNT. Il est à noter qu'avec un diamètre en-dessous de la centaine de nanomètre, on atteint la limite basse des dimensions de la fenêtre de dépôt. Après manipulation, une augmentation du diamètre du nanotube enrobé est constatée en comparaison avec ces dimensions avant dépôt (Figure 101a et b). Mais il semble que les deux autres MWCNTs ont dans une moindre mesure, vu également augmenter leur volume respectif, il y a donc eu un

dépôt parasite de silice qui s'est opéré au-delà de la fenêtre de dépôt. Pour de prochaines expérimentations, il sera nécessaire de réfléchir sur une position judicieuse de la fenêtre de dépôt, afin de n'enrober que le nanotube de carbone ciblé, sans déborder donc sur les autres.

Un essai en commutation a malgré tout était réalisé dans l'espoir d'établir un contact SiO_2-SiO_2. L'image MEB de la Figure 101c illustre les conséquences de cette tentative dont la conclusion est la destruction de la structure. Théoriquement la commutation devait se faire en appliquant sur l'électrode d'activation une tension $V_{électrode}$ = 20 V. La courbe de la Figure 101d représente le courant circulant entre les tubes où est appliquée la différence de potentiel de 0,01 V en fonction de la tension définie sur l'électrode. Deux remarques peuvent être tirées de l'analyse de ce graphique :

- Il n'y a pas de saut en courant à 20 V sur l'électrode. Ce qui signifie que la valeur théorique d'activation n'entraine pas la commutation.

- On observe un saut en courant de 0 nA à 4,5 nA pour 36 V appliquée sur l'électrode, ce qui est bien au-dessus de la valeur théorique de 20 V calculée.

Compte tenu de ces constatations, on peut aisément supposer qu'il n'y a pas eu contact entre les tubes. La principale hypothèse expliquant ce non-résultat est que le nanotube que l'on souhaitait en mouvement (au milieu des trois MWCNTs) était recouvert de SiO_2, rendant de ce fait impossible la commutation. En ce qui concerne le saut en courant observé à 36 V sur l'électrode, il provient probablement du claquage en tension (engendrant la destruction du NEMS DC) et des contacts inopinés qui ont dû s'opérer à cet instant.

3.3.4.5 5ème résultat : NEMS DC ohmique avec une électrode d'activation

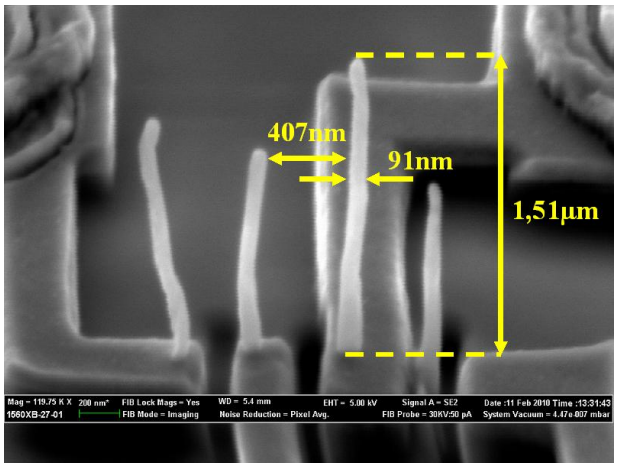
Les expérimentations sur les quatre dispositifs précédents ont mis en lumière des imperfections similaires, à-savoir une qualité cristalline insuffisante des MWCNTs synthétisés, une faible adhérence du molybdène sur le SiO_2 et une présence symptomatique de carbone amorphe entre les électrodes nécessitant l'utilisation de la FIB. Pour pallier à ces caractéristiques contraignantes, nous avons apporté les modifications suivantes :

- Une augmentation du diamètre du plot de Ni (250 nm au lieu de 200 nm, Figure 38 page 61), permettant la croissance de MWCNTs avec des diamètres plus importants (85 nm au lieu de 75 nm, Figure 39 page 62) et plus homogénes sur leurs longueurs.

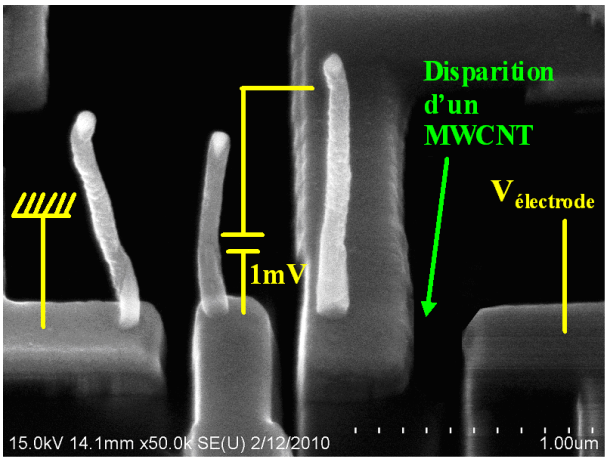
- L'ajout d'une fine épaisseur de titane (10 nm) entre le molybdène et le SiO_2, afin d'obtenir une meilleure adhérence des électrodes sur la structure.

- Une modification des paramètres de croissance PECVD avec une légère diminution de la proportion du gaz précurseur IPA (36 % au lieu de 37 %), contribuant à baisser la présence de carbone amorphe.

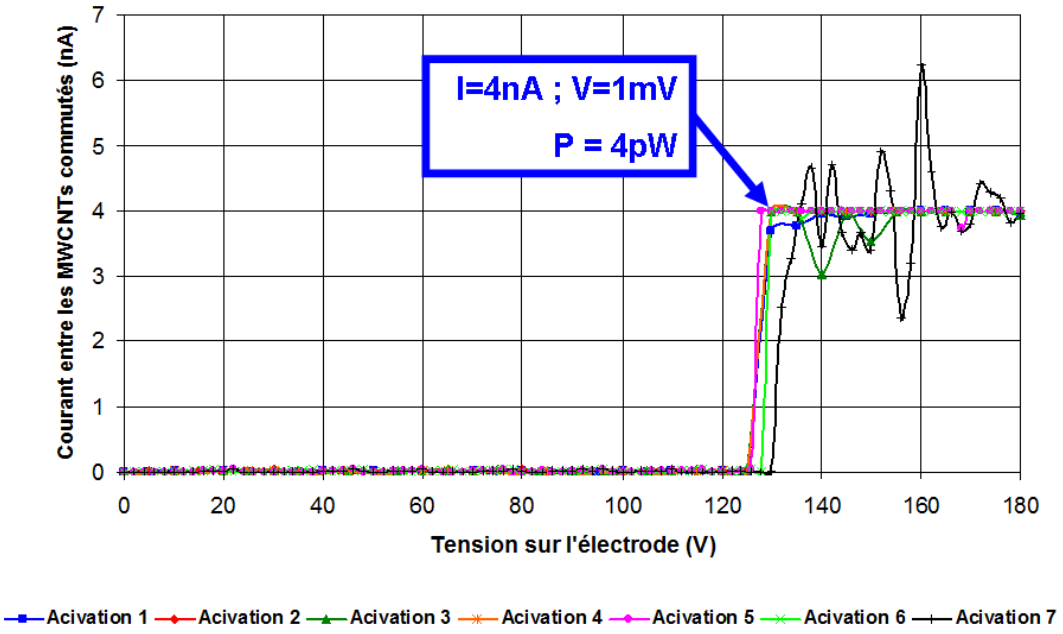
- Une modification de la géométrie du second niveau du dépôt de molybdène pour diminuer les surfaces en vis-à-vis entre les électrodes afin de minimiser les risques de court-circuits occasionnés par la présence de carbone amorphe au cours de la synthèse PECVD.



(a)



(b)



(c)

Figure 102 : (a) Dispositif avant caractérisation en tension. (b) Dispositif après caractérisation en tension et (c) mesure courant-tension.

On constate après croissance PECVD que la présence de carbone amorphe entre les élecrodes en molybdène a necessité l'utilisation de la gravure FIB afin d'isoler les électrodes entre elles (Figure 102a). Une diminution de la proportion du gaz précurseur hydrocarboné (IPA) et une modification de la géométrie du second niveau de molybdène n'auront pas permis de s'affranchir d'utiliser la gravure FIB. Le dispositif de la Figure 102c illustre sept commutations réalisées par le biais d'une électrode d'activation. Les forces de van der Waals en contact ont donc été compensées 7 fois de suite par la force élastique du MWCNT actionné sans destruction du NEMS. Le brusque saut en courant de 0 nA à 4 nA avec 130 V sur l'électrode confirme ainsi la valeur théorique de 135,3V issue du programme MATLAB. On observe à la septième commutation des fluctuations en courant de 3,5 nA qui suggère une probable fragilisation du NEMS DC. Pour conclure on constate que la fine couche d'accrochage en titane (10nm) entre le molybdène et le SiO_2 a contribué à l'adhérence des électrodes sur la structure.

3.4 Conclusion de la troisième partie

Cette troisième partie aura présenté dans un premier temps les différentes forces en présences au sein d'un commutateur à base de nanotubes de carbone verticaux. La réalisation d'un programme MATLAB prenant en considération les divers impacts de l'ensemble de ces forces aura contribué au dimensionnement du NEMS DC en fonction des types de contacts en commutation : carbone-carbone, carbone-platine, carbone-tungstène et carbone-SiO_2. Les résulats obtenus suggèrent des performances supérieures au MEMS avec un temps de commutation de l'ordre de la nanoseconde et une tension d'actionnement de 22 V. Cette troisième partie décrit également l'ensemble des étapes technologiques de conception des NEMS DC jusqu'à la croissance PECVD des nanotubes de carbone. Ce chapitre conclut sur différentes mesures significatives en commutation, obtenues sur nos dispositifs pour des contacts carbone-carbone, mettant ainsi en lumière la validité des hypothèses du modèle théorique et la faisabilité de ces composants.

4 : Modélisation, conception et mesures d’un NEMS RF

4.1 Introduction de la quatrième partie

Ce quatrième chapitre décrit étape par étape la conception, jusqu'à la fabrication du NEMS RF dont les dimensions sont définies à partir des résultats du chapitre 3 et à partir des exigences hyperfréquences théoriques caractérisées au chapitre 1. Des simulations hyperfréquences réalisées par le biais du logiciel de simulation électromagnétique 3D HFSS permettent d'affiner les dimensions du NEMS RF afin d'obtenir un comportement en hyperfréquence qui soit le plus probant dans ses deux états (passant et bloquant). Ce chapitre conclut par le descriptif détaillé de l'ensemble des étapes technologiques de réalisation de la structure jusqu'à la croissance PECVD des nanotubes de carbone. Durant cette dernière partie le NEMS RF sera étudié dans sa configuration parallèle, c'est-à-dire un signal hyperfréquence passant de l'entrée vers la sortie lorsque les nanotubes de carbone n'ont pas commuté (état passant du NEMS RF) et passant de l'entrée à la masse lorsque la commutation est effective (état bloquant du NEMS RF). Un second fonctionnement existe cependant, il s'agit de la configuration série dont le comportement est l'inverse de la configuration parallèle, c'est-à-dire un signal hyperfréquence passant de l'entrée vers la sortie lorsque les nanotubes de carbone ont commuté (état passant du NEMS RF) et étant réfléchi sur l'entrée en l'absence de commutation (état bloquant du NEMS RF). Le fonctionnement parallèle aura cependant été privilégié sur le série, car d'un point de vue technologique il semble plus simple de réaliser un NEMS RF parallèle par une exploitation plus importante de la surface du dispositif. De plus sur le plan de la simulation hyperfréquence par éléments finis, la présence importante d'éléments dont les dimensions n'ont pas le même ordre de grandeur rend difficile voir impossible l'obtention de résultats. Seule une géométrie parallèle du NEMS RF permet de pallier à cette difficulté par une exploitation des théories matricielles (4.2.4.1 page 136).

4.2 Modélisation théorique

4.2.1 Dimensions d'une ligne coplanaire en molybdène adaptée 50 Ω sur la gamme en fréquence 40 GHz et 60 GHz

La topologie du NEMS RF décrit dans cette partie s'articule sur la base d'une ligne coplanaire hyperfréquence (Figure 103). Il est donc indispensable de définir au préalable les dimensions de cette structure afin que cette dernière soit adaptée à 50 Ω sur une gamme en fréquences permettant le passage d'un maximum du signal hyperfréquence dans un MWCNT.

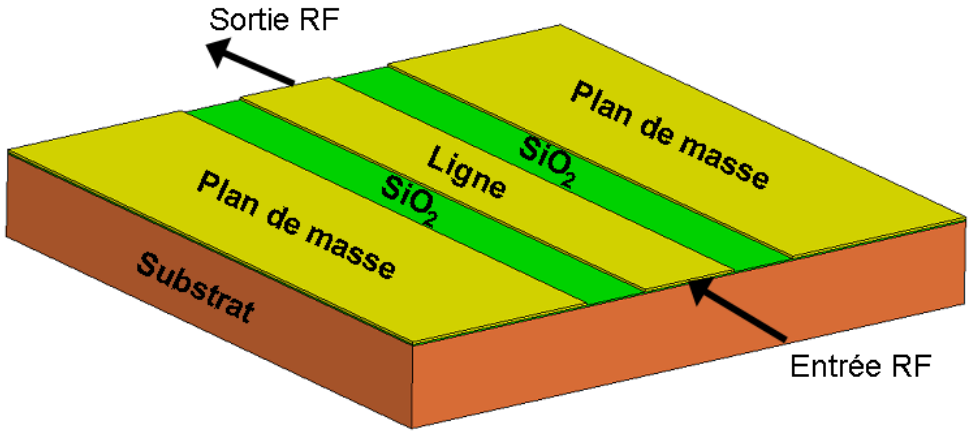


Figure 103 : Ligne coplanaire hyperfréquence.

Si l'on observe les résultats hyperfréquences obtenus par S.C. Jun *et al.* [57] sur un MWCNT (Figure 21 page 39), on constate que ce dernier suggère des caractéristiques optimales entre 40 GHz et 60 GHz.

La plus grande conductivité électrique de la métallisation constituant le NEMS RF est nécessaire, cette donnée s'appuie sur la notion d'effet de peau induisant l'épaisseur de métal minimale indispensable à la transmission d'un signal à haute fréquence. L'effet de peau est un phénomène électromagnétique faisant qu'à fréquence élevée le courant a tendance à ne circuler qu'en surface des conducteurs et l'épaisseur de peau détermine la largeur de la zone où se concentre le courant dans ces conducteurs. Cette épaisseur minimale nécessaire est définie par l'Équation 35 suivante [134]:

Équation 35 :

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi \cdot f \cdot \mu_r \cdot \mu_0 \cdot \sigma}}$$

Avec f la fréquence, μ_r la perméabilité magnétique relative du matériau, $\mu_0 = 4\pi.10^{-7}$ H/m et σ la conductivité électrique du matériau.

En observant l'Équation 35 on constate que pour une fréquence de travail fixe, seules la perméabilité et la conductivité électrique peuvent induire une variation de l'épaisseur de peau. La métallisation choisit pour les différentes réalisations des démonstrateurs de cette thèse est le molybdène tant pour ses caractéristiques thermiques qu'électriques explicitées partie 2.2.3 page 54. L'épaisseur minimale pour ce métal entre 40 GHz et 60 GHz est de 600 nm compte

tenu de sa perméabilité relative de 1 et de sa conductivité électrique de $1{,}89.10^7$ S/m. L'épaisseur minimale de molybdène correspondra à l'épaisseur déposée dans le cadre de la fabrication de nos démonstrateurs NEMS RF. En effet, le molybdène se déposant par évaporation, il est difficile d'en déposer une épaisseur importante compte tenu des temps de dépôts. Généralement on dépose au maximum 100 nm d'un matériau par évaporation, mais les exigences physiques du dispositif obligent à aller au-delà de cette limite.

L'épaisseur de molybdène étant désormais fixée, il faut maintenant définir la largeur de la ligne coplanaire ainsi que la distance entre cette dernière et les plans de masse (Figure 104a). Ces deux dimensions doivent être déterminées pour obtenir les plus faibles pertes d'insertion possibles à 50 GHZ, tout en adaptant le guide d'onde coplanaire à 50 Ω pour cette fréquence.

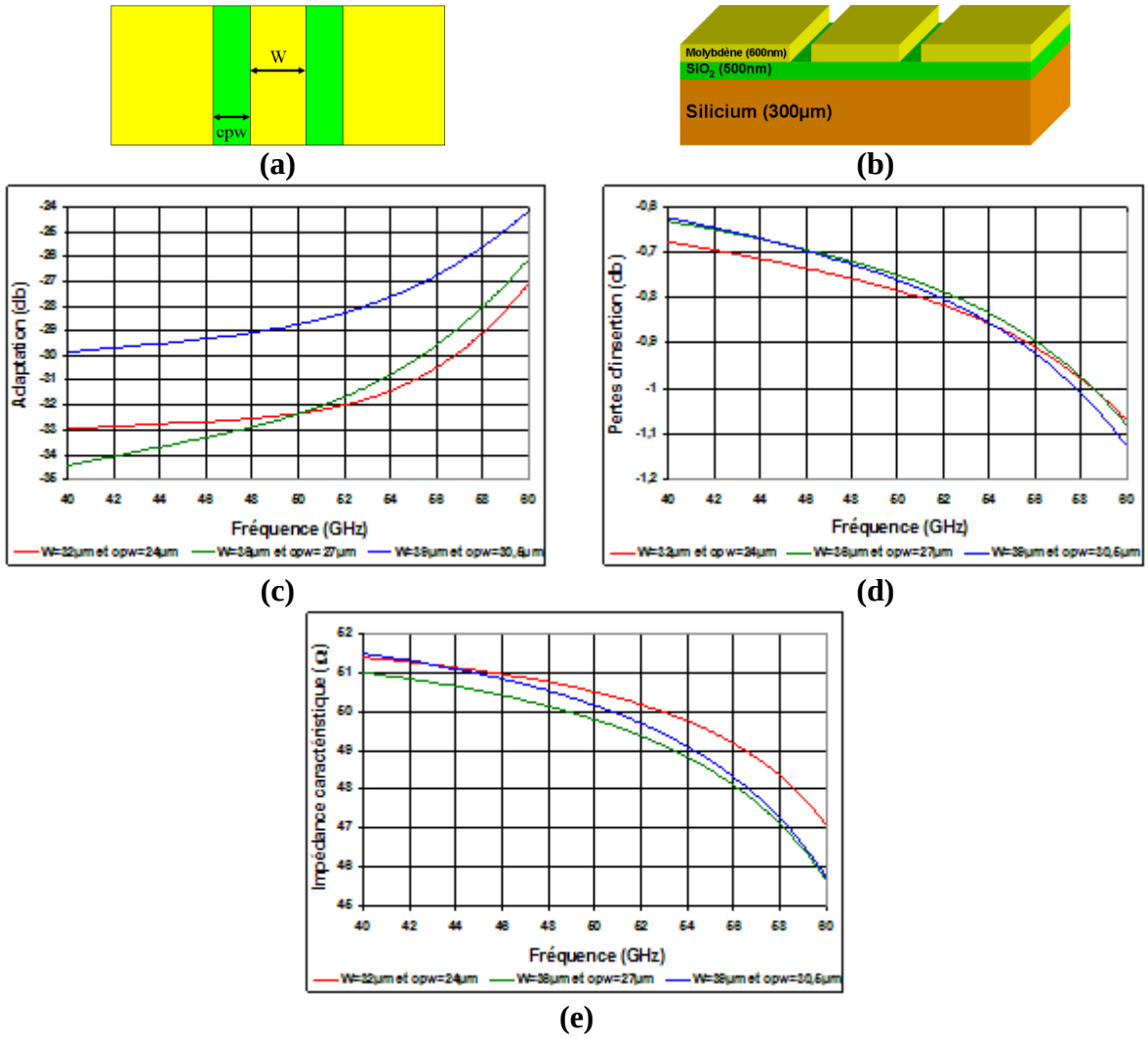


Figure 104 : (a et b) Topologie de la ligne coplanaire en molybdène. Résultats sur la gamme de fréquence allant de 40 GHZ à 60 GHz, (c) en adaptation, (d) en pertes d'insertion et (e) impédance caractéristique.

Les courbes illustrées dans la Figure 104e présentent trois dimensions de lignes coplanaires adaptées à 50 Ω sur l'intervalle en fréquence 40 GHZ – 60 GHz. On constate pour ces trois modèles que les plus faibles pertes d'insertion (Figure 104d) sont obtenues à 50 GHz pour une largeur de ligne et un espace entre ligne et masse de W = 36 µm et cpw = 27 µm. Ces deux dimensions seront conservées pour l'ensemble des topologies des NEMS hyperfréquences caractérisés au long de ce quatrième chapitre.

4.2.2 Topologie et principe de fonctionnement du NEMS RF parallèle

Comme explicité précédemment, le NEMS RF développé se décline sur la base d'une ligne coplanaire en molybdène sur substrat Si/SiO_2 (silicium/silice). Les adaptations géométriques liées aux dimensions nanométriques des nanotubes de carbone sont illustrées dans la Figure 105.

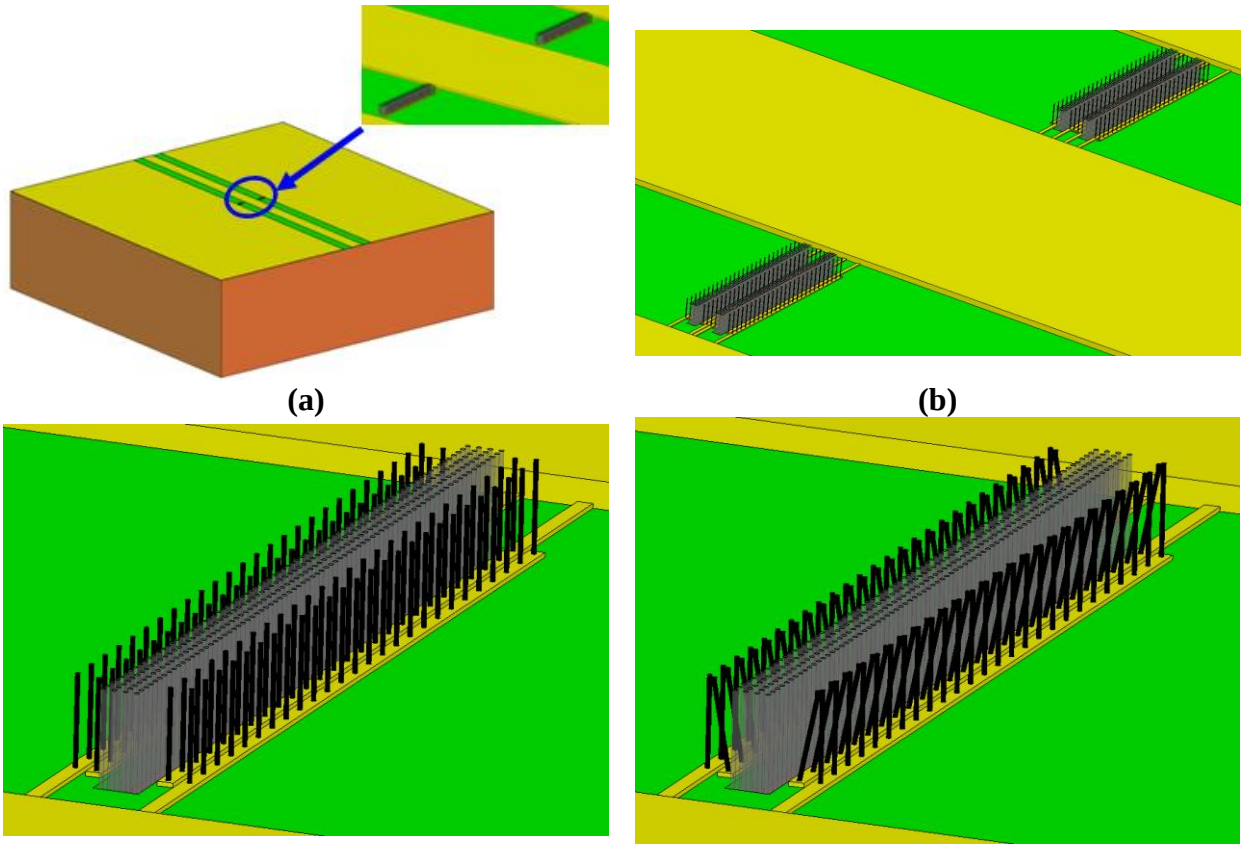


Figure 105 : (a) Topologie de la structure d'un NEMS RF parallèle, (b) illustration de deux couples de NEMS RF en parallèle, (c) NEMS RF à l'état « off » ou passant et (d) NEMS RF à l'état « on » ou bloquant.

La Figure 105a illustre un visuel de notre topologie pour un couple de NEMS RF à base de MWCNTs. Chaque couple est composé de deux structures, chaque structure de deux réseaux de MWCNTs et chaque réseau de 26 commutateurs de 52 MWCNTs (Figure 105c). On obtient donc par couple 104 commutateurs en parallèle à 2 MWCNTs sur une épaisseur de 100 nm de molybdène. Afin d'optimiser les performances hyperfréquences du NEMS RF à l'état passant (Figure 105c) et à l'état bloquant (Figure 105d), on peut analyser plusieurs dispositifs en mettant en parallèle plusieurs couples de NEMS RF. Plus le nombre de couples est important plus les pertes d'insertion à l'état passant seront élevées, mais plus l'isolation à l'état bloquant sera importante. Inversement, moins il y a de ces couples, moins il y aura de pertes d'insertion à l'état passant, mais à l'état bloquant l'isolation sera faible (Figure 105b : deux couples de NEMS RF à base de MWCNTs). L'une des finalités de cette partie consiste à définir la quantité maximale de couples afin d'être en dessous de 2 dB de pertes d'insertion en transmission à 50 GHz à l'état passant, c'est-à-dire au moins 80 % du signal transmis (Équation 36), tout en ayant une différence en transmission du signal entre l'état passant et bloquant qui soit la plus élevée possible.

Équation 36 :

$$\left|20 \cdot \log\left(\frac{b_2}{a_1}\right)\right| < 2db \Rightarrow \frac{b_2}{a_1} > 0{,}8$$

Avec b_2 et a_1 respectivement l'onde sortante et l'onde entrante (annexe 5.4.1 page 167).

On constate sur les Figure 105c et Figure 105d la présence d'une croissance de nanotubes de carbone en forêt sur silicium, croissance obtenue après avoir creusée la silice (4.3.1 page 149). L'objectif étant d'utiliser ces forêts de CNTs comme électrodes d'activation par une polarisation du substrat de silicium schématiquement illustré dans la Figure 106a et Figure 106b.

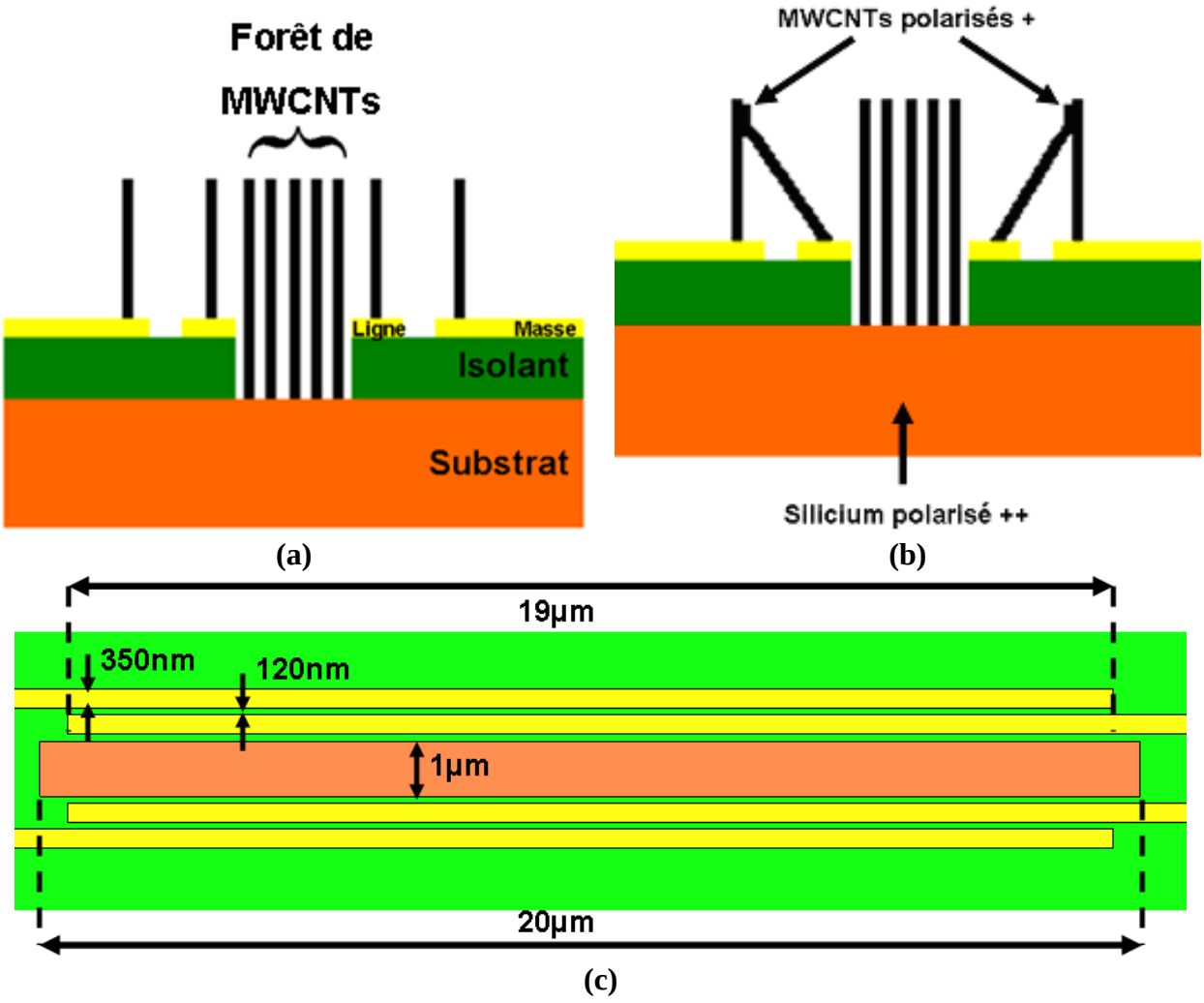


Figure 106 : (a) Illustration schématique du NEMS RF parallèle à l'état passant et (b) à l'état bloquant. (c) Topologie et dimensions de la structure coplanaire au niveau du NEMS RF à base de MWCNTs.

De nouvelles dimensions sont définies pour le NEMS hyperfréquence par rapport à celles explicitées pour le commutateur NEMS DC au cours du chapitre 3 (Figure 106c). Compte tenu de la longueur en vis-à vis des électrodes en molybdène (19 µm), il apparaît nécessaire de définir l'espace entre ces éléments à 120 nm afin d'éviter des contacts indésirables entre la ligne et les masses durant la réalisation technologique et/ou la croissance PECVD des nanotubes de carbone. Pour améliorer le comportement métallique des MWCNTs « chiraux »

et « zigzag », la largeur des électrodes en molybdène est fixée à 350 nm, ce qui permet de déposer des plots de TiN/Ni de 250 nm qui donneront des MWCNTs de 85 nm en moyenne. Ainsi, le diamètre des nanotubes de carbone augmente de 10 nm par rapport à ceux exploités au chapitre 3, diminuant un peu plus la bande d'énergie interdite Eg des MWCNTs « chiraux » et « zigzag », améliorant ainsi leur comportement métallique et les rendant de fait plus propices à une exploitation en hyperfréquences (1.2.3.2.1 page 28). Les plots de catalyseur n'excéderont pas 250 nm pour ne pas risquer d'avoir plus d'un nanotube de carbone par plot (Figure 38 page 61).

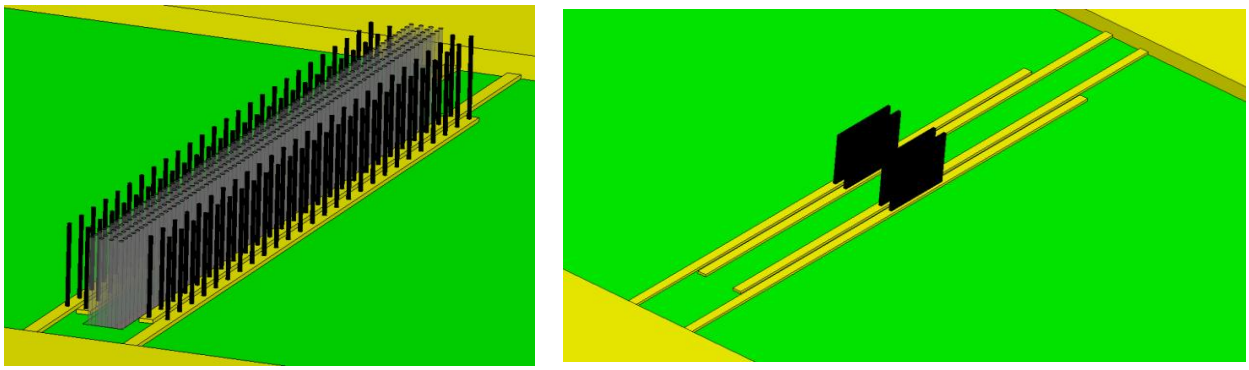
4.2.3 Modèles équivalents des MWCNTs du NEMS RF parallèle aux états passant (off) et bloquant (on)

Le logiciel utilisé pour simuler la structure NEMS RF parallèle est le logiciel de simulation électromagnétique 3D dans le domaine fréquentiel HFSS développé par Ansoft. Le principe de résolution est un calcul par éléments finis, c'est-à-dire un découpage en un certain nombre de mailles de chacun des volumes de la structure. Plus le nombre de mailles est important, plus le temps de calcul sera long voir impossible car au-delà des limites du logiciel. Une manière de limiter au maximum le nombre de mailles d'une structure est de considérer des volumes à base rectangulaire dont les rapports d'une dimension sur l'autre se rapproche le plus de 1. Les nanotubes de carbone sont à base circulaire avec un rapport « épaisseur de paroi » sur « longueur » bien au-delà de la simple valeur unitaire. De plus si on considère la totalité des CNTs présents sur la structure, cela rend impossible la simulation hyperfréquence. Il apparaît de ce fait indispensable de définir un modèle « cubique » équivalent aux MWCNTs pour les états passant et bloquant, afin de rendre possible l'obtention de résultats simulés et ainsi permettre la définition d'un premier démonstrateur à fabriquer.

4.2.3.1 Etat passant

Afin de limiter au maximum la quantité de mailles et permettre ainsi la résolution des simulations, les éléments qui n'influeront pas sur les résultats hyperfréquences sont supprimés du modèle équivalent. Ainsi les forêts de nanotubes de carbone n'étant nécessaires que du point de vue de la commutation en tension, elles peuvent être ignorées sur les modèles équivalents RF.

Une rangée de MWCNTs contient 26 nanotubes de carbone (Figure 107a) séparés par 660 nm (4.3.1 page 149) dont les diamètres sont en moyennes de 85 nm comme définit au paragraphe précédent. On peut cependant considérer que pour l'état passant, un MWCNT a une base carrée dont chaque côté est égal à son diamètre. Comme sur une rangée il y a 26 nanotubes de carbone, on peut faire l'approximation du modèle équivalent correspondant à la Figure 107b, à-savoir un mur de 85 nm de large, 85 x 26 = 2,21 µm de long et de hauteur correspondant à la longueur des MWCNTs.



(a) **(b)**

Figure 107 : (a) Commutateur NEMS RF parallèle à l'état passant (b) et son modèle équivalent.

4.2.3.2 Etat bloquant

A l'état boquant une partie du signal circule dans les nanotubes de carbone de la ligne vers les masses du guide d'onde coplanaire. Les constatations effectuées précédemment à partir de la Figure 15 à la page 31 ont permis de conclure que seules les parois extérieures des MWCNTs conduisent le signal hyperfréquence entre des nanotubes de carbone en contact. De plus on observe à la Figure 13a page 30 que plus le CNT est long, plus sa résistance est importante. Le corollaire permet de considérer à l'état bloquant que dans le calcul du volume équivalent d'un MWCNT, la longueur équivaut à $(1\ \mu m)^2 / L$.

Déterminons dans un premier temps le volume de la paroi extérieure d'un MWCNT :

Équation 37 :

$$A = \pi \cdot \left(R_{ext}^2 - \left(R_{ext} - a_{C-C} \right)^2 \right) \text{ et } V = \frac{A \cdot (1\mu m)^2}{L}$$

Avec A l'aire de la base circulaire de la paroi extérieure du MWCNT, R_{ext} le rayon extérieur du MWCNT, $a_{C\text{-}C}$ = 0,142 nm l'épaisseur d'une paroi, V le volume de la paroi extérieure du MWCNT et L la longueur du MWCNT.

Considérons que l'aire A est assimilable à un carré de côté $C_1 = C_2 = \sqrt{A}$ correspondant à l'aire du contact sur l'électrode en molybdène (Figure 108b). Admettons que la longueur de contact définie à la Figure 66a page 92 corresponde à l'épaisseur du modèle équivalent, à-savoir L_C = 120 nm (Figure 108b). On obtient alors au niveau du contact un volume $v1 = A \cdot L_C < V$.

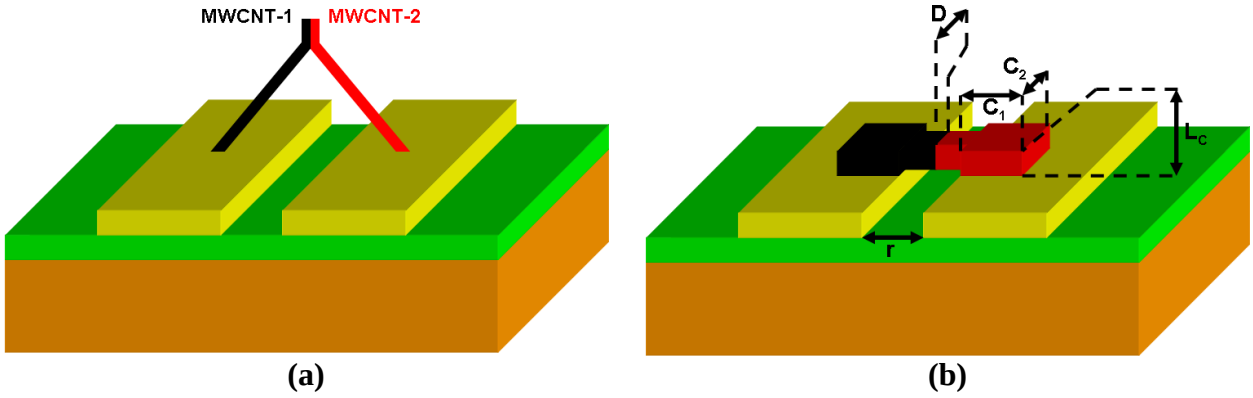


Figure 108 : (a) Schéma de 2 MWCNTs en contact et (b) modèle équivalent.

La Figure 108b illustre le modèle équivalent de deux MWCNTs en contact. On peut y observer le second volume v2 d'un MWCNT correspondant au volume V-v1, permettant ainsi de créer le contact entre les deux MWCNTs. Ce volume est caractérisé par l'équation suivante :

Équation 38 :

$$v2 = V - v1 = L_C \cdot \frac{r}{2} \cdot D \Rightarrow D = \frac{2 \cdot (V - v1)}{r \cdot L_C}$$

Avec r la distance entre les électrodes en molybdène.

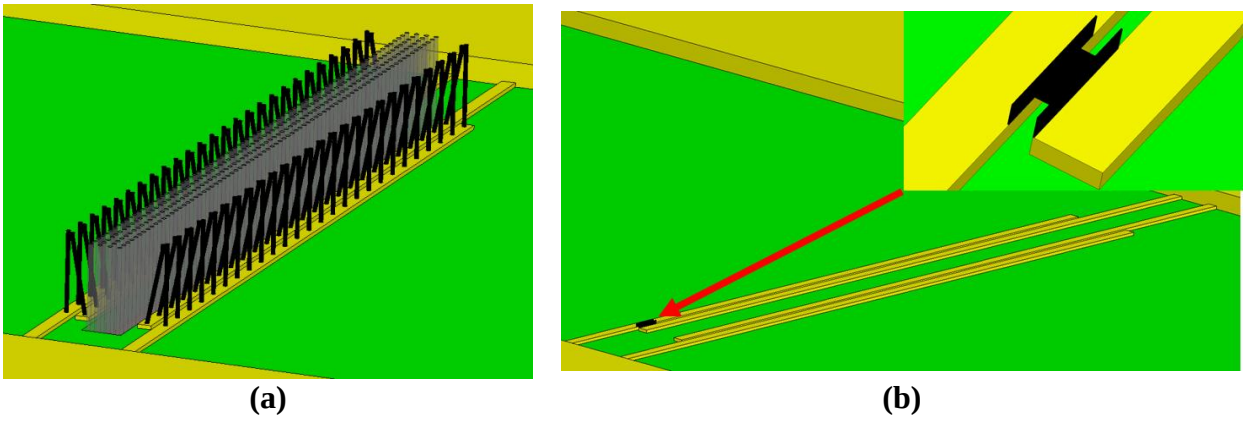


Figure 109 : (a) Commutateur NEMS RF parallèle à l'état bloquant (b) et son modèle équivalent.

Un couple de NEMS RF (Figure 105a) correspond à 4 rangées de 26 commutateurs (2xFigure 109a), il y a donc par couple 104 commutateurs. Il faut de ce fait considérer pour l'état bloquant $104 \cdot C_2$ et $104 \cdot D$, pour ainsi obtenir le bloc de graphite équivalent illustré dans la Figure 109b.

4.2.4 Simulations hyperfréquences du NEMS RF parallèle

4.2.4.1 Méthode de résolution via la matrice chaîne T

La différence d'échelle trop importante entre les volumes les plus imposants (exemple : substrat) et les plus réduits du NEMS hyperfréquence (exemple : modèle équivalent de l'ensemble des commutateurs NEMS DC de la structure coplanaire), génère une quantité de mailles disproportionnée. La simulation avec un seul et unique couple de NEMS RF est cependant réalisable avec des temps de calculs raisonnables. Afin de déterminer le comportement hyperfréquence du dispositif avec plusieurs couples de NEMS RF en parallèles (Figure 105b page 131), on utilise le principe de la matrice chaîne T (annexe 5.4.2 page 168), dont la singularité permet de cascader en série l'ensemble des tronçons d'une même structure dans le sens de l'orientation de l'onde le long de la ligne du guide coplanaire par une simple multiplication matricielle [135]. Pour ce faire, on simule le NEMS hyperfréquence avec un seul couple de NEMS RF et on détermine les matrices T des trois tronçons illustrés dans la Figure 110.

Les matrices $T_{ligne_entrée}$ et T_{ligne_sortie} sont définies grâce à leurs constantes de propagation γ, aux longueurs et aux impédances caractéristiques de chacun des deux tronçons. Ces éléments étant extraits des résultats de simulation obtenus de la structure (annexe 5.4.5 page 172). On peut également affiner cette démarche en considérant que l'ajout d'un couple de NEMS RF fait diminuer la longueur de chacun des deux tronçons ($T_{ligne_entrée}$ et T_{ligne_sortie}) de la moitié de la longueur de cet ajout.

Pour déterminer la matrice T_{couple}, on extrait des résultats de simulation les paramètres S (annexe 5.4.1 page 167) correspondant au tronçon en question. Ensuite par le biais de la matrice de passage de S à T (annexe 5.4.4 page 170), on définit la matrice T_{couple} de la structure. A partir de là, il suffit de cascader les matrices T en fonction du nombre N de couples de NEMS RF (Équation 39).

Équation 39 :

$$T_{total} = T_{ligne_entrée} \cdot T_{couple}^{N} \cdot T_{ligne_sortie}$$

Pour conclure, on détermine la matrice S_{total} par le biais de la matrice de passage de T à S (annexe 5.4.3 page 168).

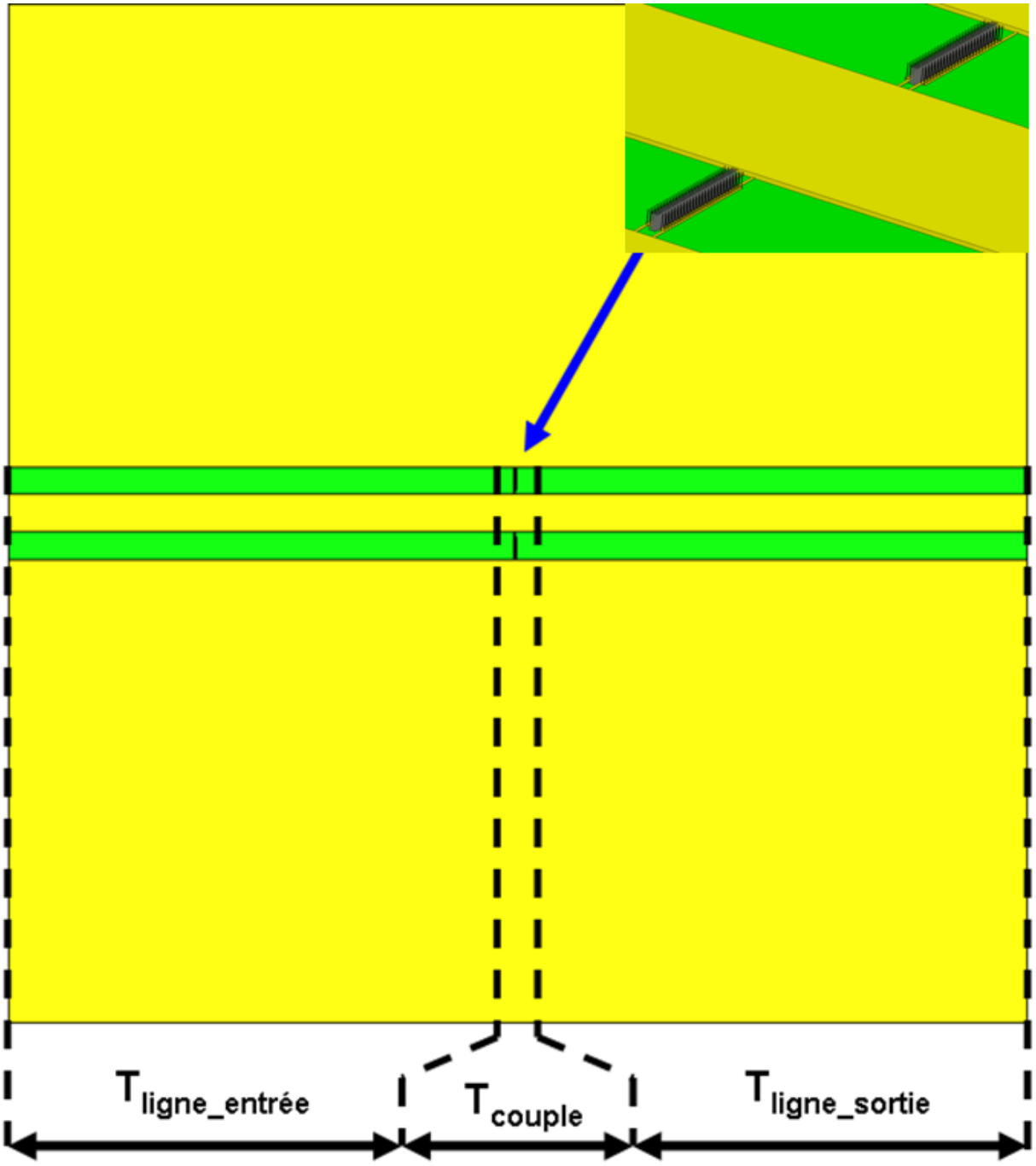


Figure 110 : Division en trois matrices de chaîne T du NEMS RF.

4.2.4.2 Contact carbone-carbone

La longueur des nanotubes de carbone considérée pour l'étude du NEMS hyperfréquence à contact ohmique carbone-carbone est définie par le programme MATLAB dont les spécificités sont détaillées au chapitre 3. Ainsi pour obtenir en commutation un rapport de la force élastique sur la force de van der Waals égal à 1,1 compte tenu des dimensions définies précédemment (MWCNTs et structure coplanaire), on considère des nanotubes de carbone de 1,6 µm de long.

Diamètre des MWCNTs	Longueur des MWCNTs	Distance de contact	Tension d'activation sur la forêt de MWCNTs	Tension de maintien entre les MWCNTs commutés
85 nm	1,6 µm	385 nm	88,5 V	0,7 V

Tableau 13 : Principales dimensions du NEMS RF parallèle à contact ohmique carbone-carbone.

4.2.4.2.1 Etat passant

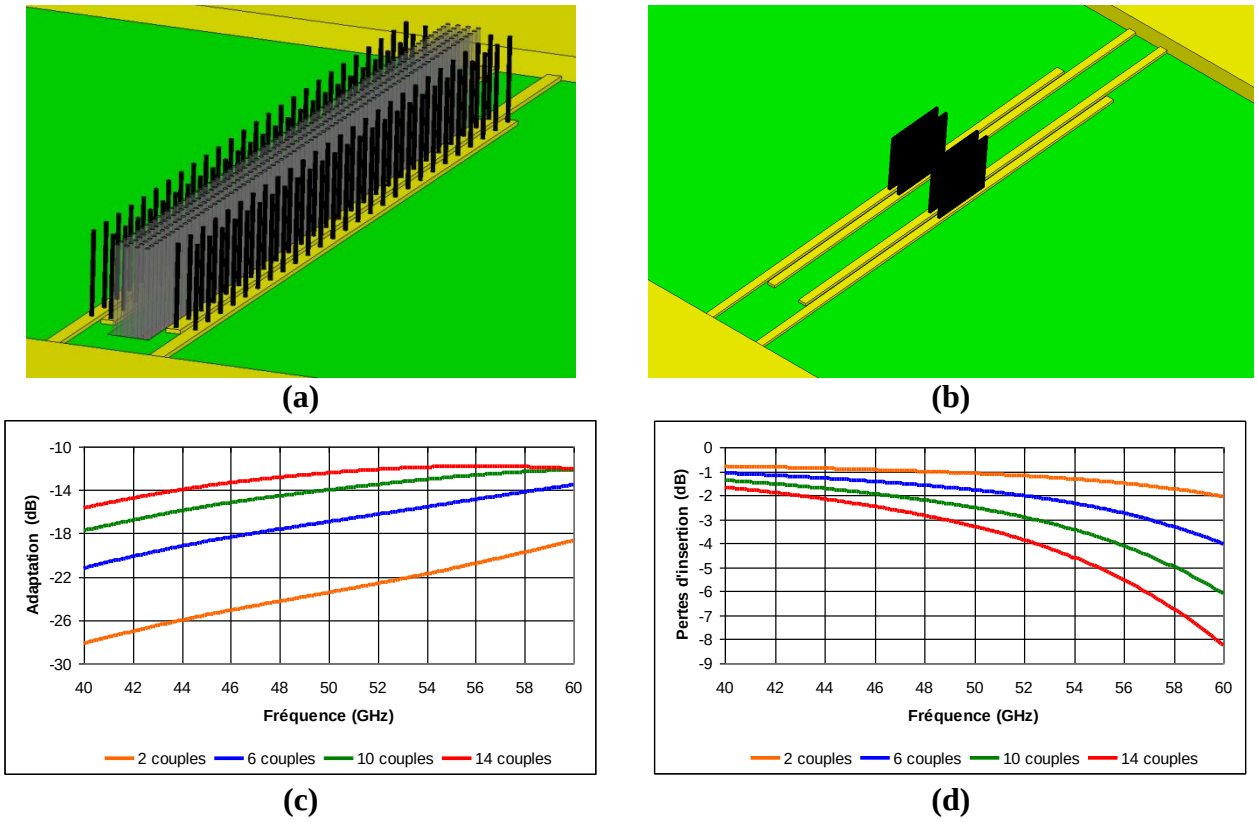


Figure 111 : (a) NEMS RF à contact ohmique carbone-carbone parallèle à l'état passant et (b) son modèle équivalent. (c) Paramètres en adaptation ($20\log(S_{11})$) et (d) en pertes d'insertion ($20\log(S_{21})$).

On constate à la Figure 111 que plus le nombre de couples de NEMS RF augmente plus les pertes en transmission sont importantes. Ce phénomène étant lié aux effets de couplage capacitif entre la ligne et les masses dus à la faible distance séparant les électrodes en molybdène (120 nm). Précédemment nous avions défini un maximum de pertes d'insertion en transmission ne pouvant excéder 2 dB à 50 GHz (page 132). Compte tenu des résultats de la Figure 111d on ne peut excéder 6 couples de NEMS RF si l'on veut conserver cette limite. Pour conclure on remarque que la présence de deux couples de NEMS RF a engendré 0,25 dB de pertes d'insertion supplémentaires à 50 GHz par rapport à la simple ligne coplanaire dont les résultats hyperfréquences sont rapportés à la page 130.

4.2.4.2.2 Etat bloquant

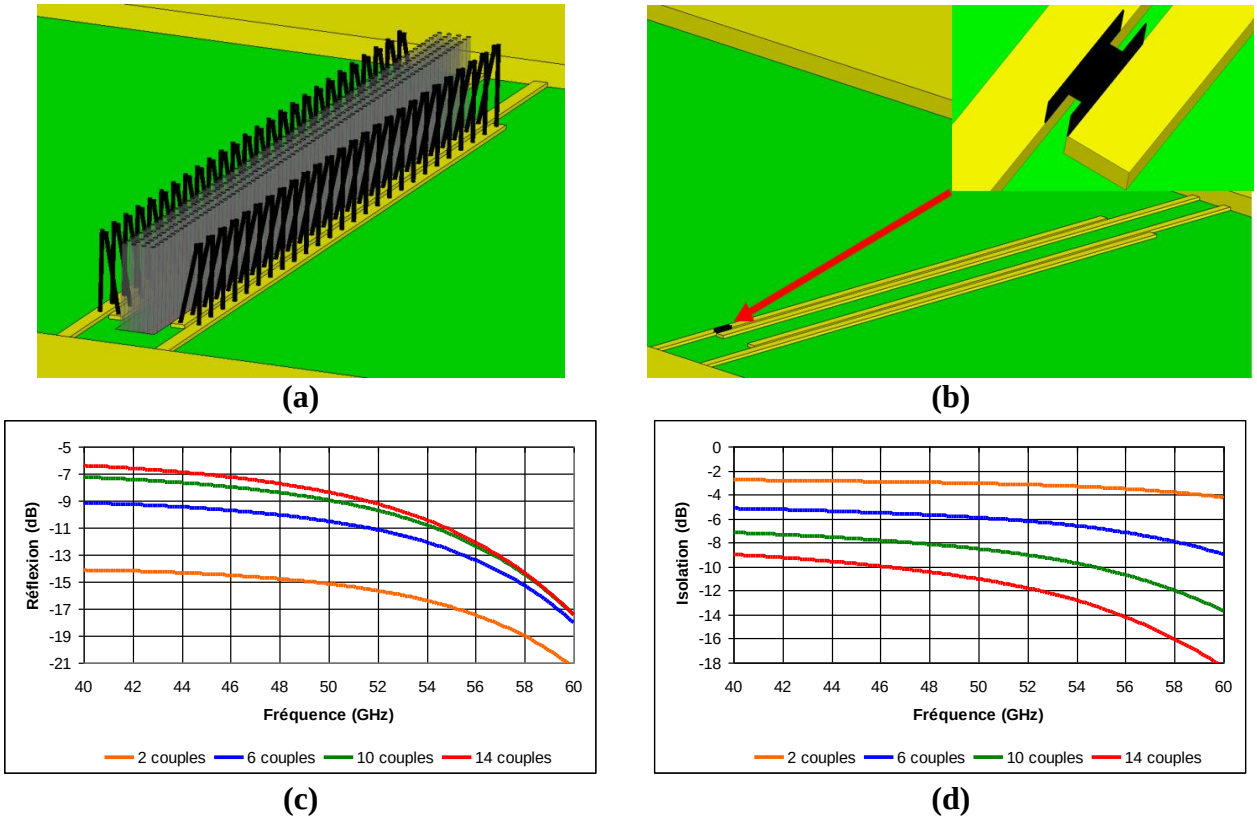


Figure 112 : (a) NEMS RF à contact ohmique carbone-carbone parallèle à l'état bloquant et (b) son modèle équivalent. (c) Paramètres en réflexion (20log(S_{11})) et (d) en isolation (20log(S_{21})).

A la différence de l'état passant, on conclut pour l'état bloquant que plus le nombre des couples de NEMS RF augmente, meilleur est l'isolation. Ce constat n'est en rien surprenant, car plus il y a de couples de NEMS RF, plus il y a de commutateurs à nanotubes de carbone contribuant à l'état bloquant et plus il y a de couplages capacitifs entre les électrodes en molybdène comme explicité précédemment pour l'état passant. L'analyse de l'état passant a fixé à 6 couples de NEMS RF le seuil maximale à ne pas dépasser pour ne pas excéder 2 dB de pertes d'insertion en transmission à 50 GHz. On constate sur la Figure 112d que pour 6 couples de NEMS RF on obtient -6 dB en isolation, soit une différence de 4 dB en transmission entre l'état passant et l'état bloquant.

4.2.4.2.3 Conclusion

De l'étude en simulation hyperfréquence de ce premier contact ohmique, plusieurs constatations peuvent être faites. Premièrement, les effets de couplages capacitifs entre les électrodes en molybdène à 50 GHz sont trop importants, cela étant due à la proximité de ces électrodes (120 nm), distance cependant nécessaire si l'on souhaite conserver des tensions de commutation physiquement cohérentes (< 100 V sur l'électrode d'activation). Deuxièmement, le comportement métallique des MWCNTs ne leur confère pas une conductivité électrique exceptionnelle (77800 S/m), ce qui nuit en partie à l'isolation du NEMS RF à l'état bloquant. Ce dernier point peut cependant être amélioré en recouvrant le MWCNT statique de chacun des commutateurs d'une métallisation (platine ou tungstène) électriquement plus conductrice.

4.2.4.3 Contact carbone-platine

La longueur des nanotubes de carbone considérée pour l'étude du NEMS hyperfréquence à contact ohmique carbone-platine est définie par le programme MATLAB dont les spécificités sont détaillées au chapitre 3. Ainsi pour obtenir en commutation un rapport de la force élastique sur la force de van der Waals égal à 1,1 compte tenu des dimensions définies précédemment (MWCNTs et structure coplanaire), on considère des nanotubes de carbone de 2,4 µm de long.

Diamètre des MWCNTs	Longueur des MWCNTs	Epaisseur de la métallisation	Distance de contact	Tension d'activation sur la forêt de MWCNTs	Tension de maintien entre les MWCNTs commutés
85 nm	2,4 µm	132 nm	254 nm	23 V	0,25 V

Tableau 14 : Principales dimensions du NEMS RF parallèle à contact ohmique carbone-platine.

4.2.4.3.1 Etat passant

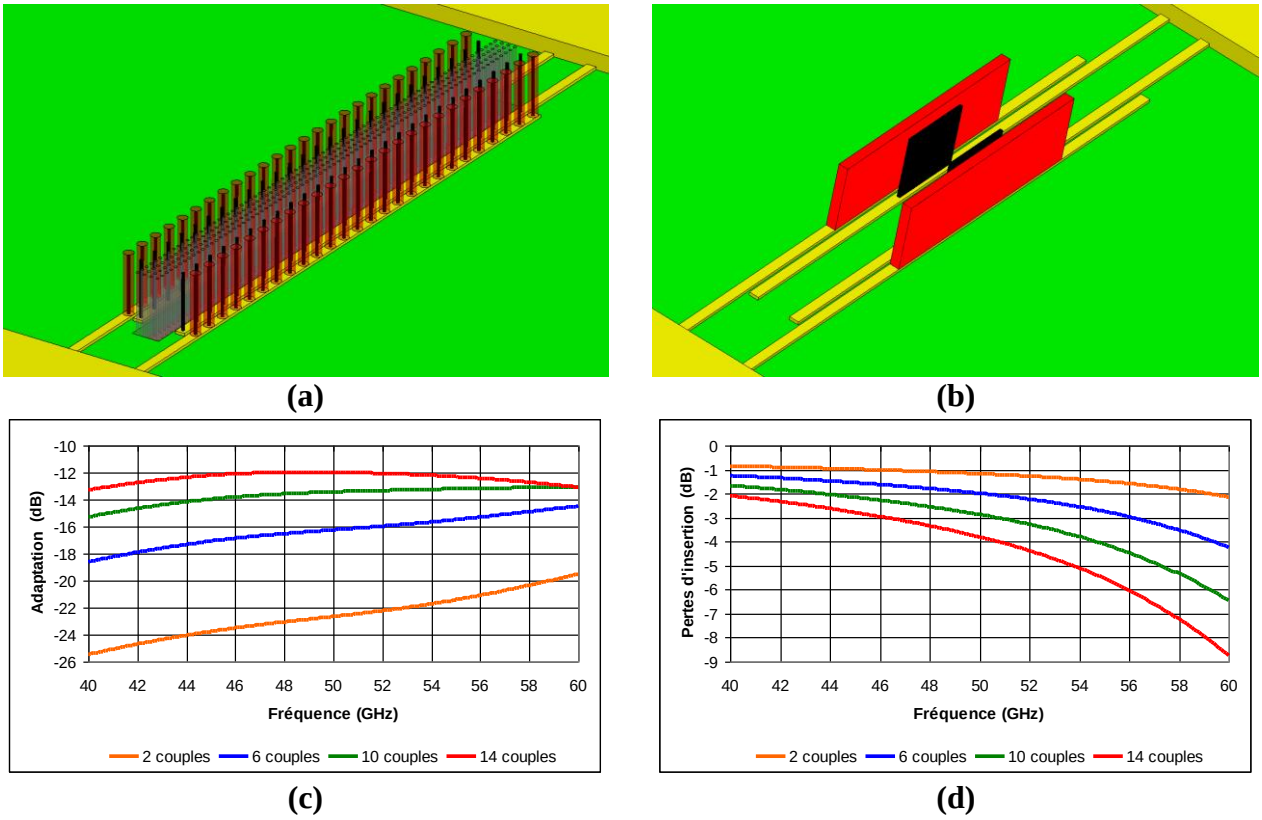


Figure 113 : (a) NEMS RF à contact ohmique carbone-platine parallèle à l'état passant et (b) son modèle équivalent. (c) Paramètres en adaptation ($20\log(S_{11})$) et (d) en pertes d'insertion ($20\log(S_{21})$).

Comme pour l'étude du NEMS RF à contact ohmique carbone-carbone, on constate que :

- plus le nombre des couples de NEMS RF augmente plus les pertes en transmission sont importantes.

- au-delà de 6 couples de NEMS RF on dépasse les 2 dB de pertes d'insertion en transmission (Figure 113d).

- la présence de deux couples de NEMS RF a engendré 0,25 dB de pertes d'insertion supplémentaires à 50 GHz par rapport à la simple ligne coplanaire dont les résultats hyperfréquences sont caractérisés à la page 130.

A l'état passant, il n'y a donc pas de réelles différences entre le NEMS RF à contact carbone-carbone et le NEMS RF à contact carbone-platine.

4.2.4.3.2 Etat bloquant

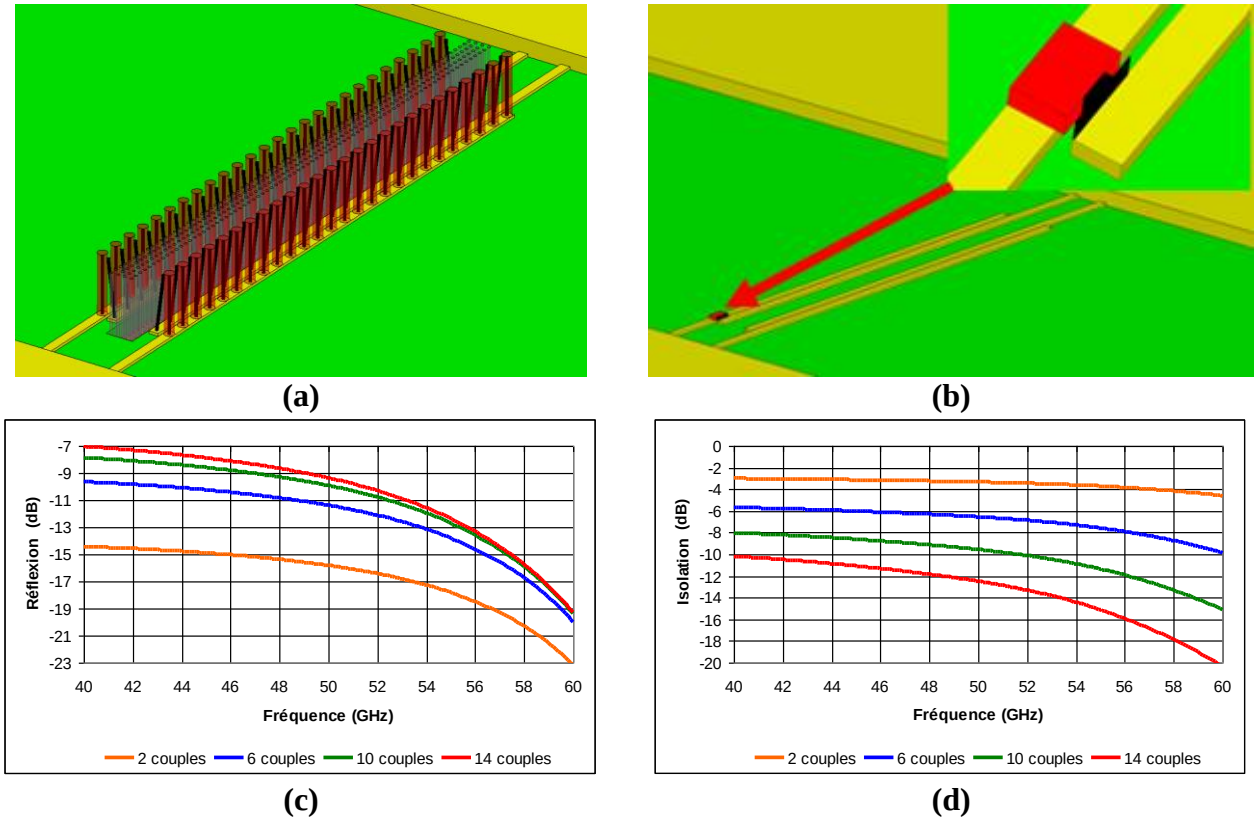


Figure 114 : (a) NEMS RF à contact ohmique carbone-platine parallèle à l'état bloquant et (b) son modèle équivalent. (c) Paramètres en réflexion (20log(S_{11})) et (d) en isolation (20log(S_{21})).

Comme pour le contact carbone-carbone, on conclut pour l'état bloquant, que plus le nombre de couple de NEMS RF augmente, meilleure est l'isolation. L'analyse de l'état passant fixe à 6 couples de NEMS RF le seuil maximal à ne pas dépasser pour ne pas aller au-delà des 2 dB de pertes d'insertion en transmission à 50 GHz. On constate sur la Figure 114d que pour 6 couples de NEMS RF on obtient -7 dB en isolation, soit une différence de 5 dB en transmission entre l'état passant et l'état bloquant.

4.2.4.3.3 Conclusion

L'étude du NEMS RF à contact ohmique carbone-platine met en lumière la possibilité d'augmenter la longueur des MWCNTs tout en conservant un rapport force élastique sur force de van der Waals égal à 1,1, du fait des plus faibles interactions de van der Waals pour ce contact en comparaison du contact carbone-carbone. Ce fait permettant de diminuer considérablement la tension d'activation sur la forêt de MWCNTs, passant ainsi de 88,5 V pour un contact carbone-carbone à 23 V pour un contact carbone-platine. Le comportement hyperfréquence suggère des performances légèrement plus satisfaisantes que pour un contact ohmique carbone-carbone. En effet on distingue pour un dispositif comportant 6 couples de NEMS RF une différence de 5 dB à 50 GHz entre l'état passant et bloquant, soit 1 dB de mieux que pour le contact carbone-carbone. Cette faible amélioration étant liée à la conductivité électrique plus importante du platine (9,66E+06 S/m) par rapport à celle du graphène (77800 S/m) et aux MWCNTs dont les longueurs ont été accrues (ce qui engendre une augmentation de la résistance propre des nanotubes de carbone (Figure 13a page 30)).

4.2.4.4 Contact carbone-tungstène

La longueur des nanotubes de carbone considérée pour l'étude du NEMS hyperfréquence à contact ohmique carbone-tungstène est définie par le programme MATLAB dont les spécificités sont détaillées au chapitre 3. Ainsi pour obtenir en commutation un rapport de la force élastique sur la force de van der Waals égal à 1,1 compte tenu des dimensions définies précédemment (MWCNTs et structure coplanaire), on considère des nanotubes de carbone de 2,45 µm de long.

Diamètre des MWCNTs	Longueur des MWCNTs	Epaisseur de la métallisation	Distance de contact	Tension d'activation sur la forêt de MWCNTs	Tension de maintien entre les MWCNTs commutés
85nm	2,45µm	132nm	254nm	22V	0,2V

Tableau 15 : Principales dimensions du NEMS RF parallèle à contact ohmique carbone-tungstène.

4.2.4.4.1 Etat passant

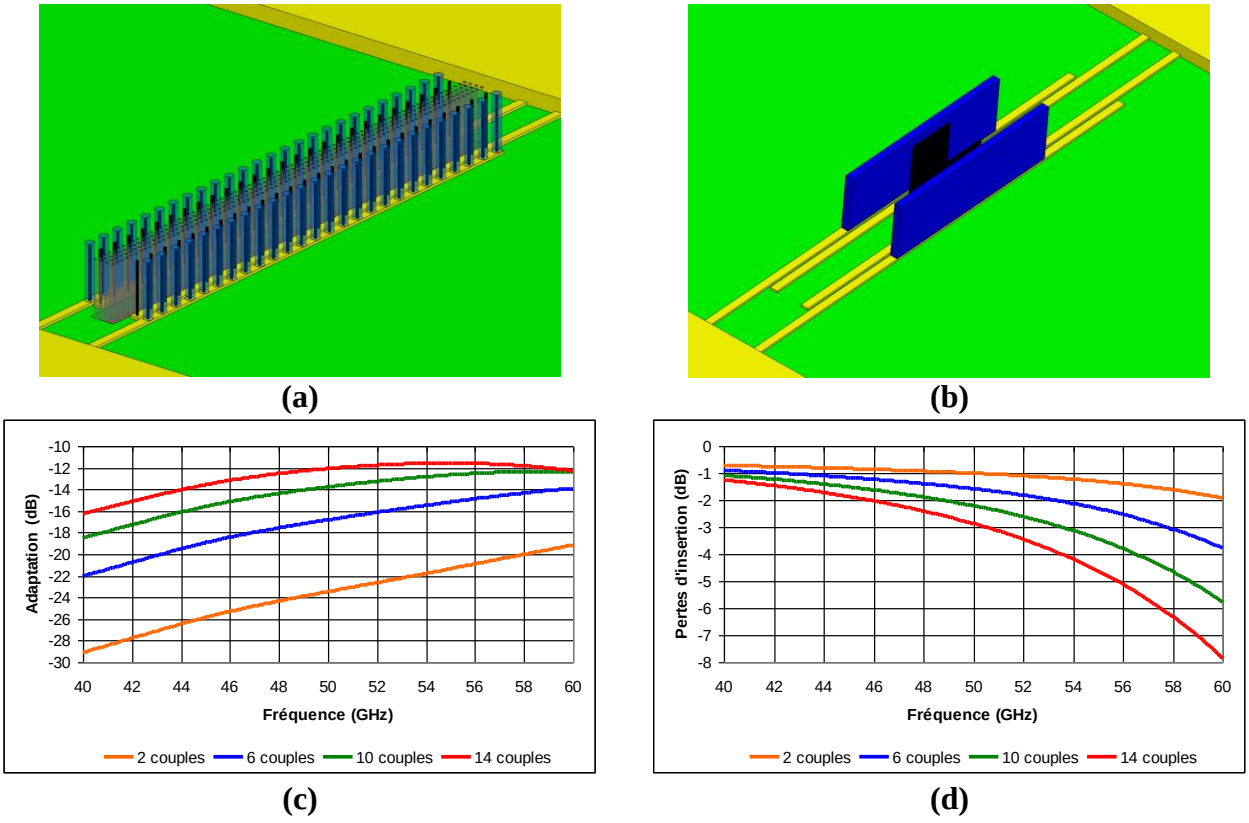


Figure 115 : (a) NEMS RF à contact ohmique carbone-tungstène parallèle à l'état passant et (b) son modèle équivalent. (c) Paramètres en adaptation (20log(S_{11})) et (d) en pertes d'insertion (20log(S_{21})).

Comme pour l'étude des contacts ohmiques précédents, on constate que :

- plus le nombre des couples de NEMS RF augmente plus les pertes en transmission sont importantes.

- au-delà de 6 couples de NEMS RF on dépasse les 2 dB de pertes d'insertion en transmission (Figure 115d).

- la présence de deux couples de NEMS RF a engendré 0,25 dB de pertes d'insertion supplémentaires à 50 GHz par rapport à la simple ligne coplanaire dont les résultats hyperfréquences sont caractérisés à la page 130.

A l'état passant, il n'y a donc pas de réelles différences entre les NEMS RF à contact ohmiques.

4.2.4.4.2 Etat bloquant

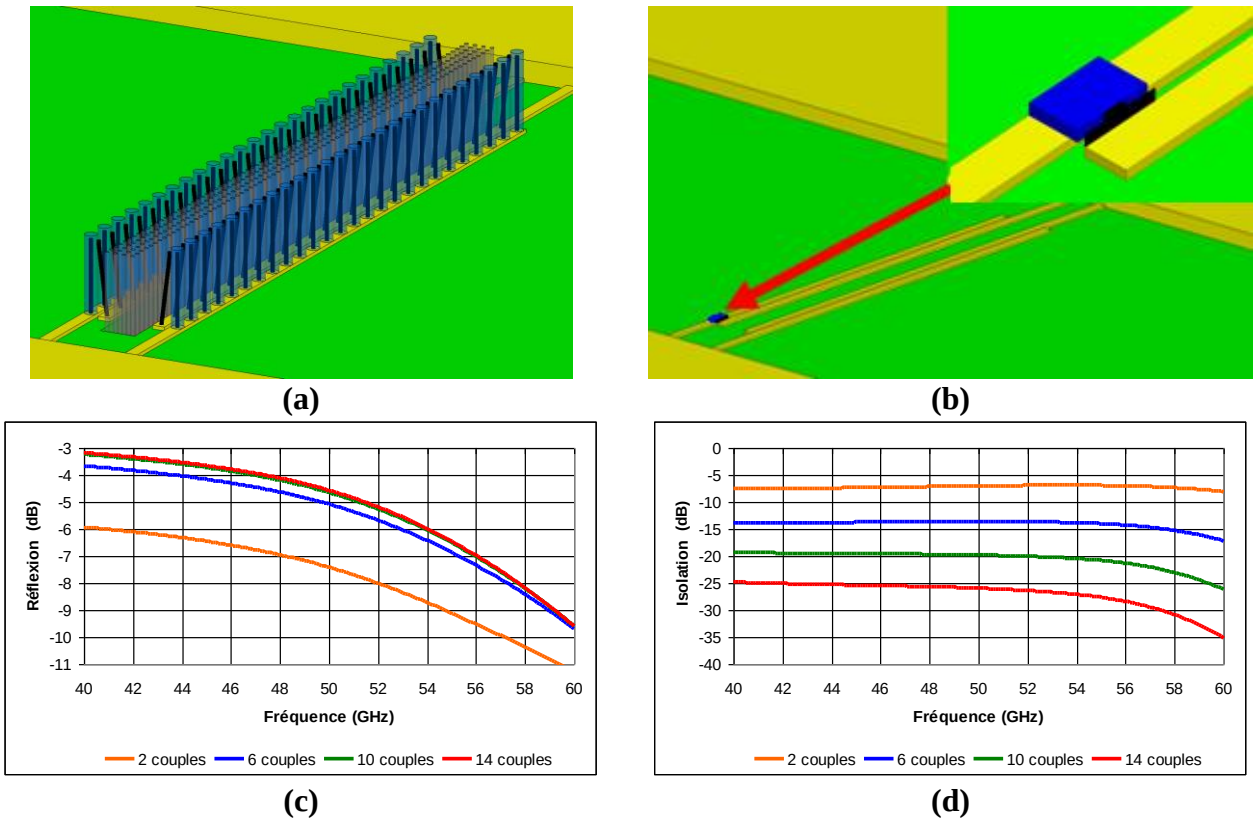


Figure 116 : (a) NEMS RF à contact ohmique carbone-tungstène parallèle à l'état bloquant et (b) son modèle équivalent. (c) Paramètres en réflexion (20log(S_{11})) et (d) en isolation (20log(S_{21})).

Comme pour l'étude des NEMS RF à contact ohmique carbone-carbone et carbone-platine, l'analyse de l'état passant a fixé à 6 couples de NEMS RF le seuil maximal à ne pas dépasser pour ne pas aller au-delà des 2 dB de pertes d'insertion en transmission à 50 GHz. On constate sur la Figure 116d que pour 6 couples de NEMS RF on obtient -13 dB en isolation, soit une différence de 11 dB en transmission entre l'état passant et l'état bloquant.

4.2.4.4.3 Conclusion

Ce dernier contact ohmique étudié confirme l'impact de la conductivité électrique de la métallisation choisie sur les performances. Avec une conductivité électrique plus importante, le tungstène (1,89E+07 S/m) laisse entrevoir des performances hyperfréquences du NEMS RF bien plus probantes que celles des deux autres contacts ohmiques étudiés. Avec une différence en transmission entre l'état passant et bloquant de 11 dB à 50 GHz pour 6 couples de NEMS RF, ce contact permet non seulement d'obtenir des caractéristiques hyperfréquences exploitables, mais également une tension d'activation raisonnable (22 V). Néanmoins un inconvénient réside dans la fabrication de ce dispositif, à-savoir le temps de dépôt par la méthode EBID pour recouvrir les 624 MWCNTs concernés du dispositif à 6 couples de NEMS RF. Il est supérieur à 30 heures et non automatisé : Figure 57 page 78. C'est pour cette raison que cette étude restera pour l'heure simplement théorique.

4.2.4.5 Contact carbone-SiO_2

La longueur des nanotubes de carbone considérée pour l'étude du NEMS hyperfréquence à contact capacitif carbone-SiO_2 est définie par le programme MATLAB dont les spécificités sont détaillées au chapitre 3. Ainsi pour obtenir en commutation un rapport de la force élastique sur la force de van der Waals égal à 1,1 compte tenu des dimensions définies précédemment (MWCNTs et structure coplanaire), on considère des nanotubes de carbone de 1,65 µm de long. L'épaisseur de diélectrique étant fixée à 20 nm, ce qui correspond à la limite technologique du logiciel de simulation d'électromagnétisme HFSS générant le maillage hyperfréquence. Les dimensions de cette structure et la permittivité de la silice permettent d'obtenir théoriquement un rapport de la capacité à l'état « on » (état bloquant) sur la capacité à l'état « off » (état passant) de 74,6 (Équation 40). Plus ce rapport est important, meilleures sont les performances hyperfréquences du commutateur, ainsi les meilleurs MEMS capacitif atteignent un rapport C_{on} / C_{off} de l'ordre de 600 [136].

Équation 40 :

$$\frac{C_{on}}{C_{off}} = 1 + g\frac{\varepsilon_r}{e_d} = 74{,}6$$

Avec g la distance de contact, e_d l'épaisseur de SiO_2 et $\varepsilon_r = 4$ la permittivité du SiO_2.

Diamètre des MWCNTs	Longueur des MWCNTs	Epaisseur du diélectrique	Distance de contact	Tension d'activation sur la forêt de MWCNTs	Tension de maintien entre les MWCNTs commutés
85 nm	1,65 µm	20 nm	368 nm	77,6 V	0,7 V

Tableau 16 : Principales dimensions du NEMS RF parallèle à contact capacitif carbone-SiO_2.

4.2.4.5.1 Etat passant

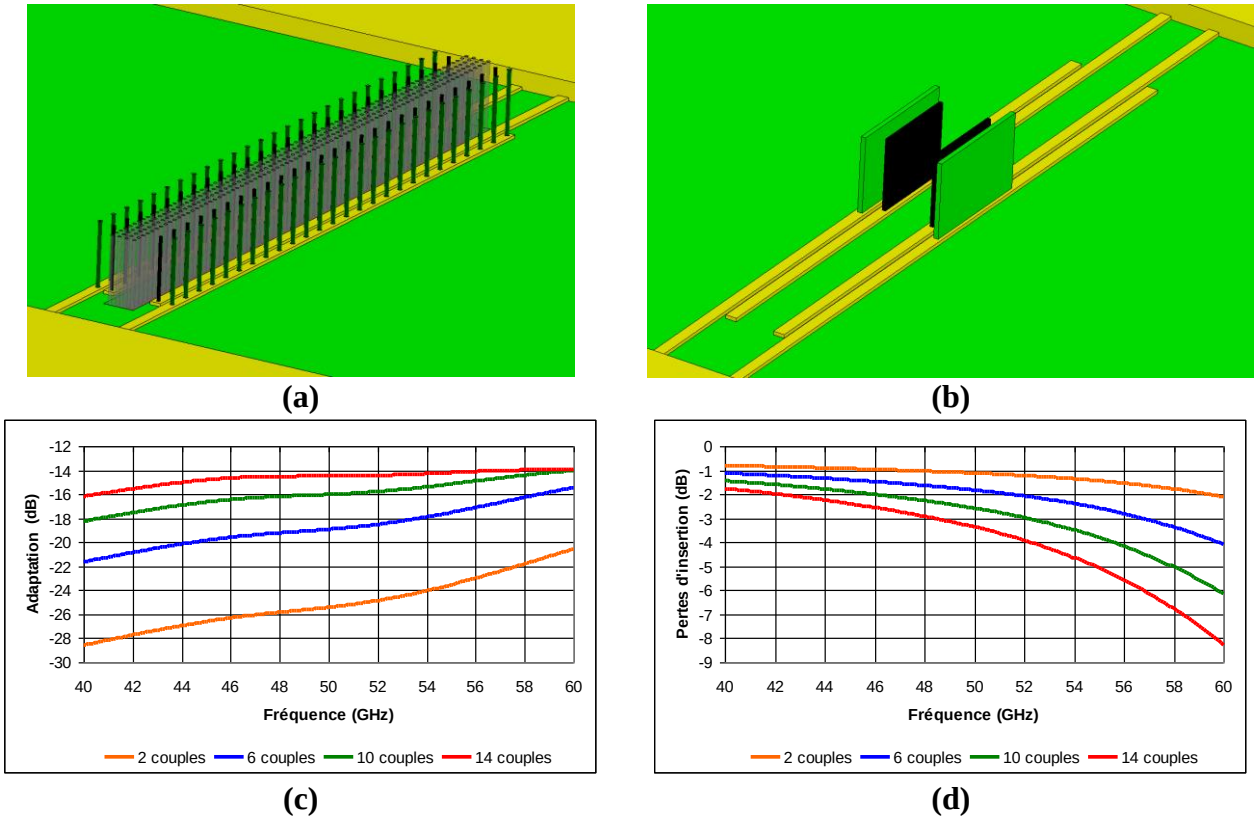


Figure 117 : (a) NEMS RF à contact capacitif carbone-SiO_2 parallèle à l'état passant et (b) son modèle équivalent. (c) Paramètres en adaptation (20log(S_{11})) et (d) en pertes d'insertion (20log(S_{21})).

Comme pour les études précédentes à contact ohmique, on constate que :

- plus le nombre des couples de NEMS RF augmente plus les pertes en transmission sont importantes.

- au-delà de 6 couples de NEMS RF on dépasse les 2 dB de pertes d'insertion en transmission (Figure 117d).

- comme pour les contacts ohmiques à l'état passant, la présence de deux couples de NEMS RF a engendré 0,25 dB de pertes d'insertion supplémentaires à 50 GHz par rapport à la simple ligne coplanaire dont les résultats hyperfréquences sont caractérisés à la page 130.

A l'état passant, il n'y a donc pas de réelles différences entre les NEMS RF à contact ohmique et le NEMS RF à contact capacitif carbone-silice. On peut conclure compte tenu des quatre types de contacts étudiés, que pour l'état passant les couplages hyperfréquences induits par les nanotubes de carbones recouverts ou non de matériaux sont parfaitement négligeables au niveau des pertes d'insertion en transmission.

4.2.4.5.2 Etat bloquant

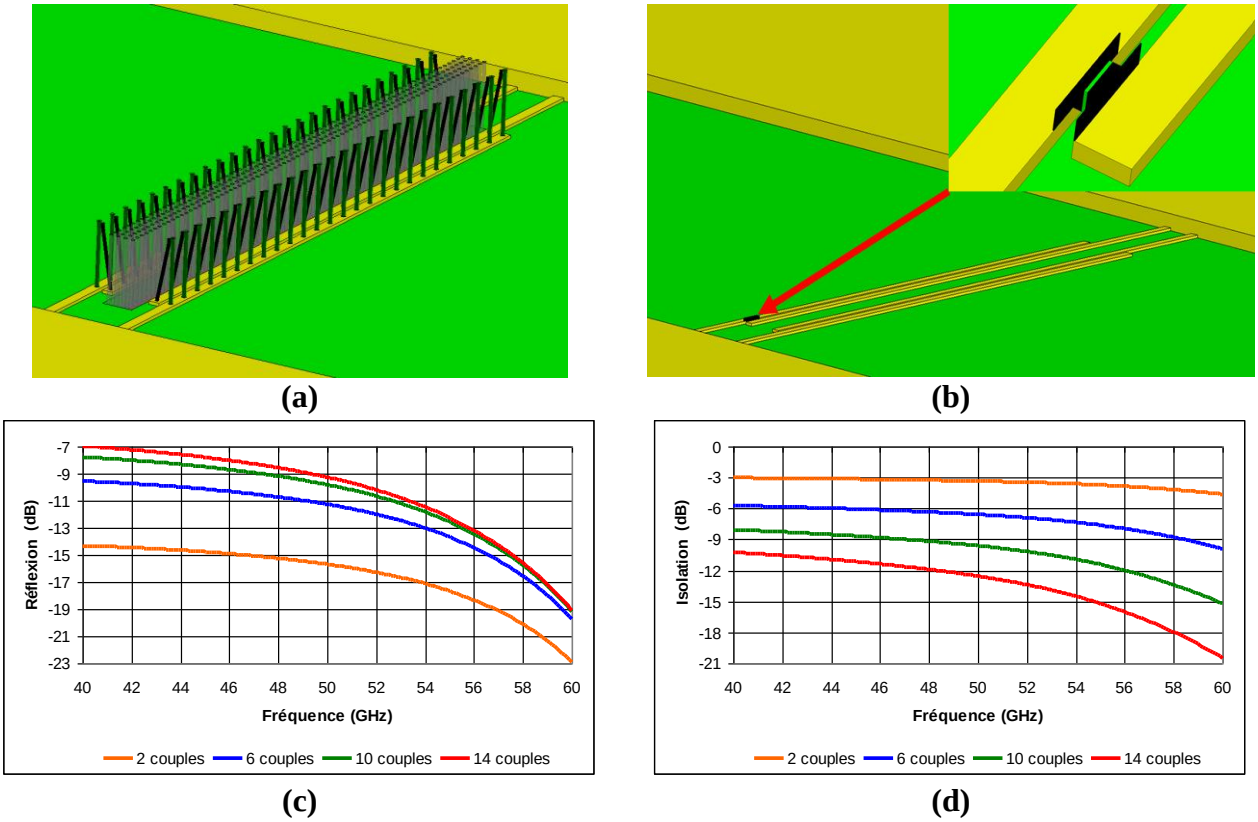


Figure 118 : (a) NEMS RF à contact capacitif carbone-SiO_2 parallèle à l'état bloquant et (b) son modèle équivalent. (c) Paramètres en réflexion (20log(S_{11})) et (d) en isolation (20log(S_{21})).

Comme pour l'étude des NEMS RF à contact ohmique, l'analyse de l'état passant du contact capacitif carbone-SiO_2 a fixé à 6 couples de NEMS RF le seuil maximal à ne pas dépasser pour ne pas aller au-delà des 2 dB de pertes d'insertion en transmission à 50 GHz. On constate sur la Figure 118d que pour 6 couples de NEMS RF on obtient -6 dB en isolation, soit une différence de 4 dB en transmission entre l'état passant et l'état bloquant.

4.2.4.5.3 Conclusion

La présence d'un diélectrique de type SiO_2 au niveau des contacts ne semble pas induire de réelles différences sur les performances hyperfréquences en comparaison du contact ohmique carbone-carbone. Avec une différence de 4 dB en transmission entre l'état passant et bloquant à 50 GHz, le NEMS RF à contact capacitif carbone-SiO_2 présente des caractéristiques similaires au contact ohmique carbone-carbone. De plus les interactions de van der Waals étant plus faibles entre le carbone et la silice qu'entre deux atomes de carbone, la longueur des MWCNTs est donc plus importante et de ce fait la tension d'activation appliquée sur les forêts de CNTs diminue, passant de 88,5 V pour un contact ohmique carbone-carbone à 77,6 V pour un contact capacitif carbone-SiO_2. Néanmoins, les temps de dépôts non automatisés pour enrober l'ensemble des MWCNTs concernés sur le dispositif étant prohibitifs, cette étude restera donc pour l'heure théorique.

4.2.4.6 Conclusion

Contact	Pertes d'insertion	Isolation	Différence
carbone-carbone	2 dB	6 dB	4 dB
carbone-platine	2 dB	7 dB	5 dB
carbone-tungstène	2 dB	13 dB	11 dB
carbone-silice	2 dB	6 dB	4 dB

Tableau 17 : Récapitulatif des résultats en simulation hyperfréquences des quatre types de contacts étudiés à 50 GHz et pour 6 couples de NEMS RF.

Le Tableau 17 présente la synthèse des résultats hyperfréquences obtenus en simulation pour les quatre types de contacts étudiés à 50 GHZ et pour 6 couples de NEMS RF. On constate que le meilleur des trois contacts ohmiques (carbone-carbone, carbone-platine et carbone-tungstène) s'avère être le contact carbone-tungstène avec 2 dB de pertes d'insertion, une différence de 11 dB en transmission entre l'état passant et bloquant. On remarque également la bonne tenue du contact capacitif carbone-SiO_2 avec 2 dB de pertes d'insertion et une différence de 4 dB en transmission entre les deux états du NEMS RF. Malheureusement pour des raisons de temps de fabrication prohibitif, seul le NEMS RF à contact carbone-carbone a été réalisé au cours de ce travail.

4.3 Fabrication et caractérisations hyperfréquences du NEMS RF

4.3.1 Procédé de fabrication

Dans un premier temps, on met en œuvre une étape de lithographie électronique (Figure 94d page 116) pour déposer sur le substrat Si (300 µm) / SiO_2 (500 nm) le molybdène formant les électrodes sur lesquelles il y aura croissance localisée de nanotubes de carbone (Figure 119). A la différence de la topologie modélisée pour la simulation (4.2.4 page 136), on ne dépose qu'une épaisseur de 50 nm de molybdène au lieu de 100 nm. Bien que pour obtenir des résultats en simulation, une épaisseur de 100 nm représente une limite basse indispensable facilitant le maillage hyperfréquence de la structure, pour la conception une considération technologique doit aussi être prise en compte. En effet l'étape de lift-off impose une épaisseur maximale de 50 nm de molybdène compte tenu du fait que 120 nm séparent les électrodes sur une longueur de 19 µm. Si cette épaisseur est supérieure à 50 nm, l'étape de suppression de la résine risquerait de ne pas être complète avec des résidus de résines sur certaines zones, ce qui engendrerait des pertes inopinées du signal hyperfréquence. Cette disconcordance entre le modèle simulé et le démonstrateur réalisé n'induira pas de problèmes majeurs concernant le bon fonctionnement du dispositif. Il sera peut-être nécessaire d'augmenter seulement le nombre de couples de NEMS RF le long de la ligne coplanaire (4.2.2 page 131).

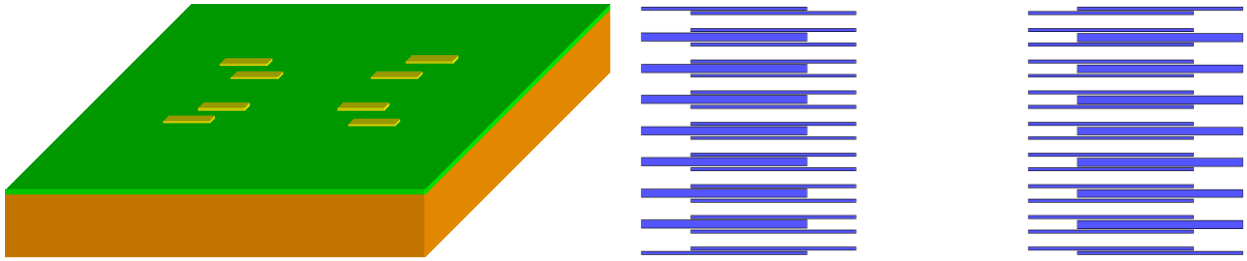


Figure 119 : Dépôt des électrodes en molybdène par évaporation. (a) illustration et (b) visuel du masque.

Une seconde étape lithographie électronique (Figure 95e page 117) permet de localiser les plots de TiN (15 nm) / Ni (7 nm) alignés sur le niveau de métallisation précédemment réalisé. Après croissance des MWCNTs on obtient les commutateurs de l'ensemble du NEMS RF (Figure 120).

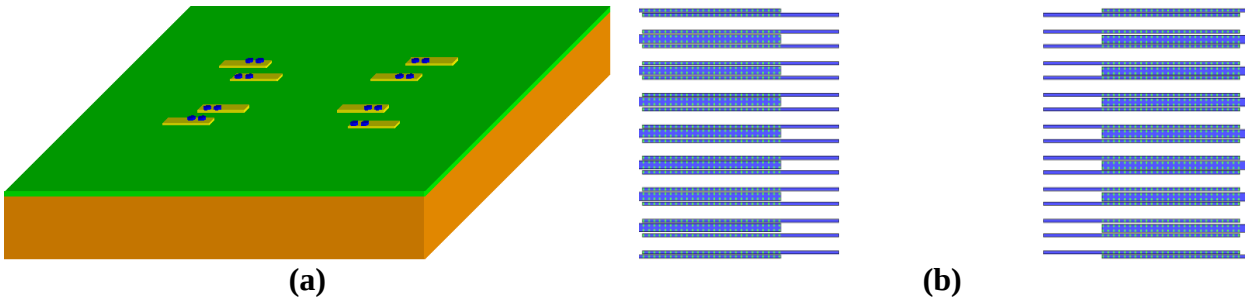


Figure 120 : Dépôt des plots de TiN (pulvérisation)/Ni (évaporation). (a) illustration et (b) visuel du masque.

La troisième étape consiste à localiser le dépôt de catalyseur permettant la croissance d'une forêt de nanotubes de carbone sevant d'électrode d'activation au NEMS RF. Pour cela un alignement précis (erreur maximum ≈ 120 nm) en lithographie électronique permet de définir les ouvertures dans la résine de 1µm de large sur 20 µm de long. Par RIE (Reaction Ion Etching) on grave 500 nm de SiO_2 jusqu'au silicium, puis on réalise un dépôt de TiN/Ni et enfin une opération de lift-off. On obtient ainsi un dépôt localisé de catalyseur en contact avec le silicium (Figure 121).

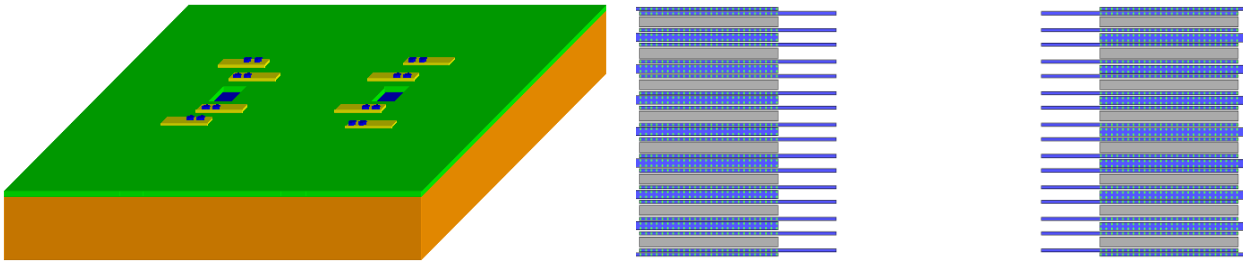


Figure 121 : SiO_2 creusée par faisceau e-beam jusqu'au silicium et dépôt de TiN/Ni. (a) illustration et (b) visuel du masque.

La quatrième étape de fabrication technologique consiste à définir par lithographie optique la ligne et les masses du guide coplanaire, puis à déposer par évaporation 600 nm de molybdène et terminer par une opération de lift-off afin d'obtenir les motifs souhaités (Figure 122).

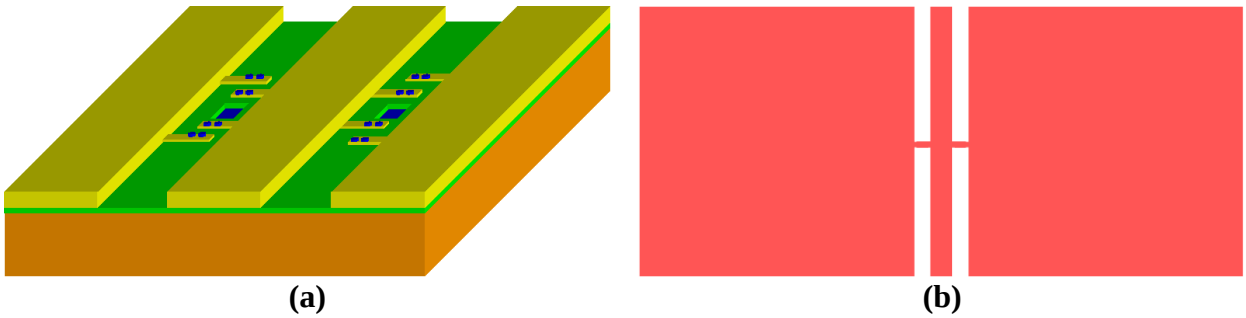


Figure 122 : Dépôt de 600 nm de molybdène formant la ligne et les masse du guide coplanaire. (a) illustration et (b) visuel du masque.

Enfin, nous réalisons une croissance de nanotubes de carbone par la méthode PECVD pour obtenir le commutateur NEMS RF à contact carbone-carbone (Figure 123).

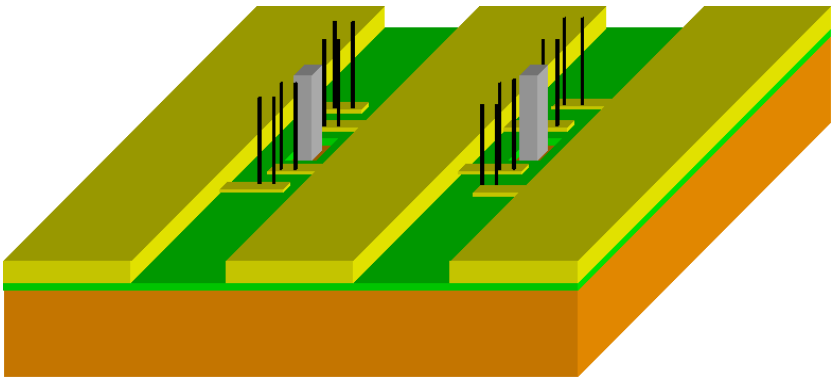
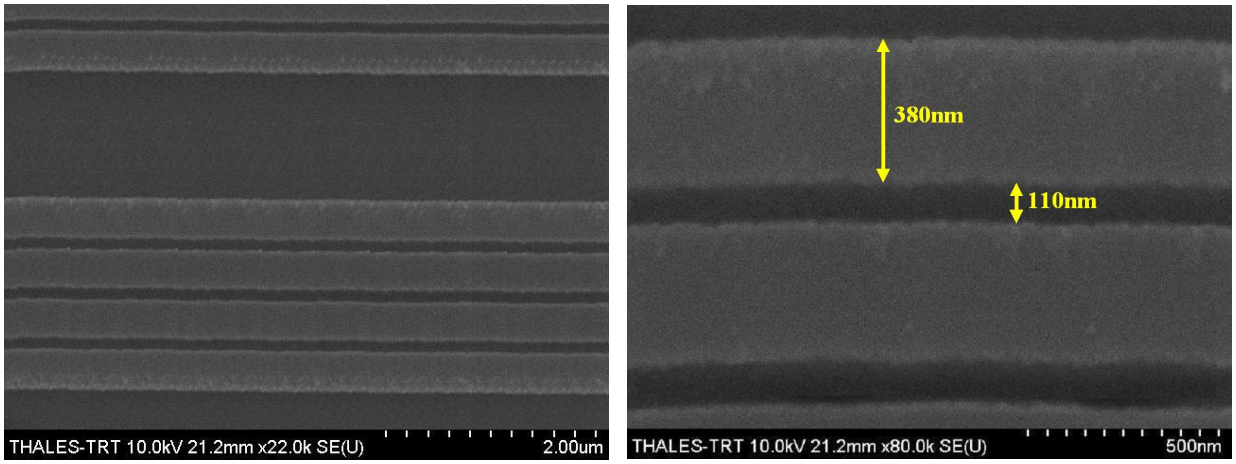


Figure 123 : Croissance des MWCNTs du commutateur NEMS RF

4.3.2 Les différentes étapes technologiques

4.3.2.1 1ère étape technologique : réalisation des électrodes en molybdène

La première étape de fabrication consiste à déposer par évaporation les électrodes en molybdène constituant les extensions de la ligne et des masses du guide coplanaire du commutateur NEMS RF. Pour ce faire, on dépose dans un premier temps une épaisseur de résine sur la totalité de la surface du substrat, puis par lithographie électronique on définit des ouvertures de 350 nm dans la résine. Après dépôt d'une épaisseur de 50 nm de molybdène on procède à un lift-off pour obtenir le premier niveau de métallisation défini dans le procédé de fabrication (Figure 119 page 149).



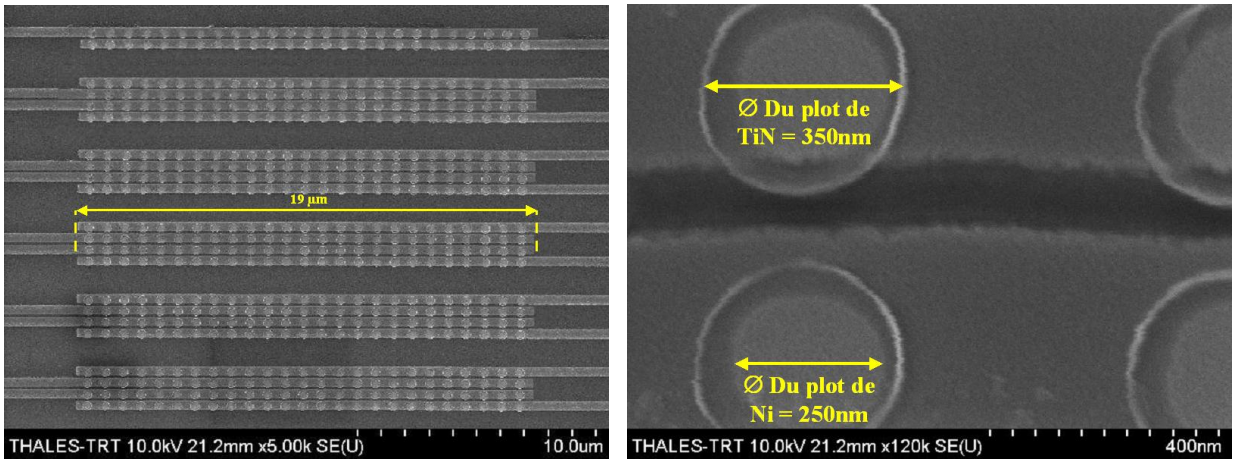
(a) **(b)**

Figure 124 : Images MEB du dépôt de 50 nm de Mo par évaporation.

4.3.2.2 2ème étape technologique : réalisation des plots de TiN/Ni

La seconde étape de fabrication consiste à s'aligner sur le premier niveau de métallisation précédemment réalisé, afin de déposer localement les plots de catalyseur de TiN/Ni le long des électrodes en molybdène (Figure 125).

Pour ce faire on dépose tout d'abord une bicouche de résine, une première épaisseur de PMGI puis une couche de PMMA A4. Par lithographie électronique on définit des ouvertures de 250 nm dans la résine en s'alignant avec le premier niveau de masquage. Après le dépôt de l'empilement de : TiN (15 nm) par pulvérisation puis Ni (7 nm) par évaporation et opération de lift-off, on obtient les plots de catalyseur le long des électrodes en molybdène (Figure 95e page 117).



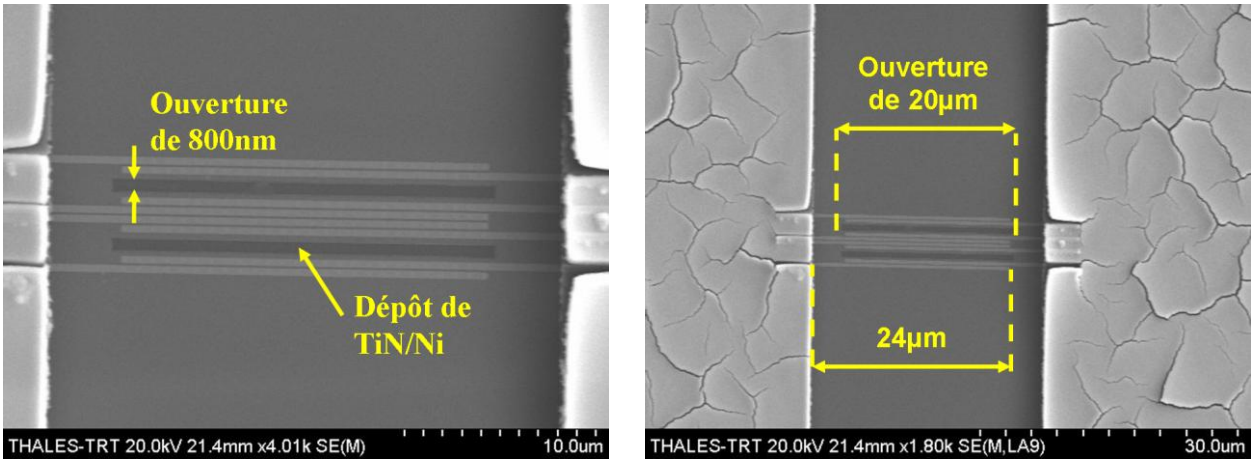
(a) **(b)**

Figure 125 : Images MEB du dépôt de 15 nm de TiN par pulvérisation suivi de 7 nm de Ni par évaporation.

4.3.2.3 3ème étape technologique : gravure du SiO_2 et dépôt de TiN/Ni

La troisième étape de fabrication consiste à s'aligner sur le premier niveau de métallisation pour graver le SiO_2 par Reaction Ion Etching (RIE) jusqu'au silicium sur les zones où l'on veut faire croître les forêts de nanotubes de carbone servant d'électrode d'activation. Lorsque le silicium est atteint, on y dépose une épaisseur de TiN/Ni équivalente à celle des plots (Figure 126).

Pour ce faire, on dépose une épaisseur de résine superieure à 500 nm sur la totalité de la surface, puis par lithographie électronique on définit des ouvertures de 800 nm de large (et non 1 µm pour faciliter l'alignement) sur 20µm de long. Par RIE on grave le SiO_2 jusqu'au silicium, puis on dépose un empilement de TiN (15 nm) par pulvérisation / Ni (7 nm) par évaporation. Une opération de lift-off permet de supprimer la résine afin d'obtenir un dépôt localisé.



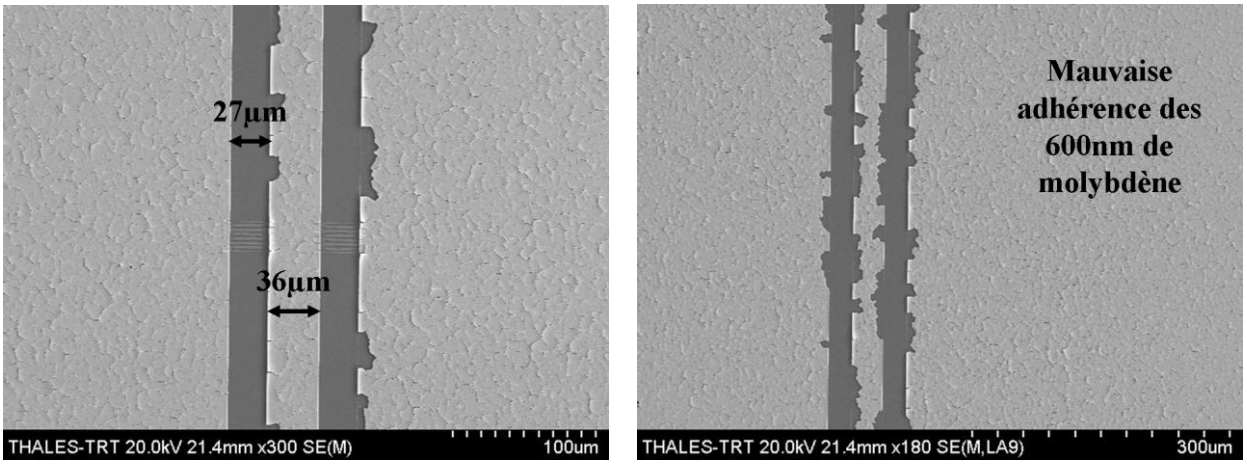
(a) **(b)**

Figure 126 : Images MEB du SiO_2 gravé, puis du dépôt de TiN/Ni sur silicium

4.3.2.4 4ème étape technologique : réalisation du guide coplanaire

La quatrième étape de fabrication consiste à déposer 600 nm de molybdène pour définir la ligne et les masses du guide coplanaire.

Pour ce faire, on dépose une épaisseur de résine sur la totalité de la surface. Par lithographie optique on s'aligne sur le précédent niveau réalisé en lithographie électronique et on ouvre la résine aux dimensions du guide coplanaire. Après dépôt d'une fine couche d'accrochage en titane (10 nm), on dépose 600 nm de molybdène puis une opération de lift-off pemet d'obtenir le NEMS RF (Figure 127).

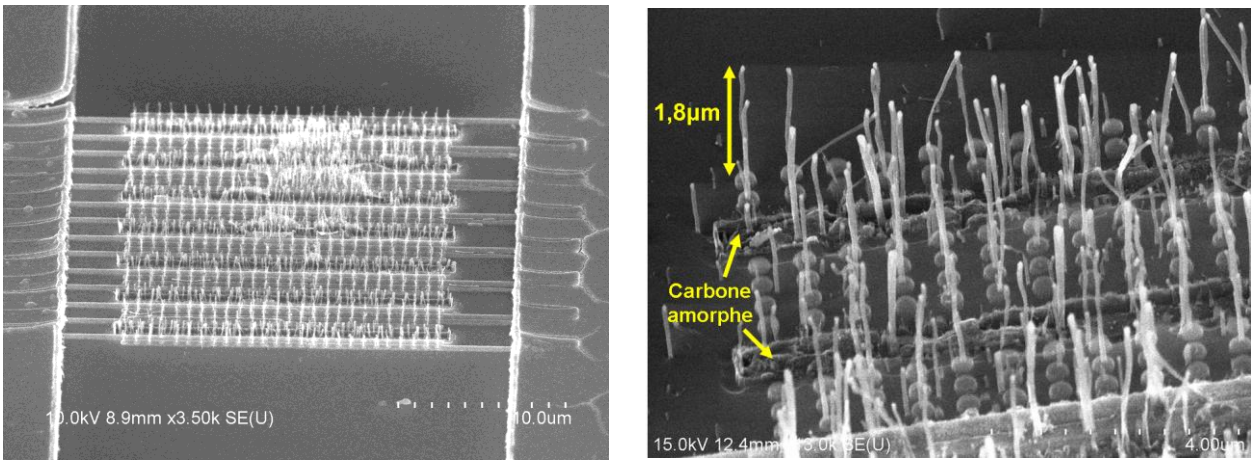


(a) **(b)**

Figure 127 : Images MEB du dépôt de 600nm de Mo par évaporation

On observe sur la Figure 127 que le molybdène déposé par évaporation avec une épaisseur de 600nm ne permet pas une bonne adhérence avec le substrat et ce malgré la couche d'accrochage en titane. Cependant on constate que le dépôt permet d'obtenir la ligne coplanaire avec les dimensions souhaitées. On peut supposer que le dépôt d'une épaisseur moins importante de molybdène permettrait d'améliorer l'adhérence. La perspective en fabrication de cette étape consistera donc à réaliser deux dépôts consécutifs de 300 nm de molybdène.

4.3.3 NEMS RF après croissance PECVD des nanotubes de carbone



(a) **(b)**

Figure 128 : Images MEB après croissance PECVD des MWCNTs sur un NEMS RF

Après croissance par PECVD IPA (37 %) + H_2O (43 %) + H_2(20 %) à 700 °C sous une pression de 1,55 Torr, on obtient les résultats présentés à la Figure 128. On observe une croissance localisée de nanotubes de carbone à l'endroit des plots de TiN/Ni déposés sur les électrodes en molybdène. Cependant l'observation MEB permet de constater qu'il n'y a pas eu de croissance de forêts de nanotubes de carbone laissant apparaître la présence de carbone amorphe remplissant les creusés.

4.4 Conclusion de la quatrième partie

Dans cette quatrième partie nous avons montré toutes les étapes qui permettent d'aboutir à la géométrie d'un NEMS RF dont les résultats hyperfréquences restent inférieurs au MEMS RF mais sont encourageants. La première étape de modélisation a consisté à définir une ligne coplanaire en molybdène adaptée à 50 Ω avec des dimensions fixées pour une utilisation des MWCNTs en hyperfréquence (40 GHz à 60 GHz). L'étape suivante a consisté à adapter la ligne coplanaire ainsi définie aux contraintes géométriques d'un commutateur NEMS DC (dimensions nanométriques) dont les différents aspects ont été développés au chapitre trois. Des simulations hyperfréquences réalisées via le logiciel électromagnétique 3D HFSS ont ainsi validé la pertinence de cette topologie et ce pour les différents contacts étudiés, trois ohmiques (carbone-carbone, carbone-platine et carbone-tungstène) et un capacitif (carbone-SiO_2). Enfin, la description détaillée des étapes du procédé de fabrication du NEMS RF permet d'envisager la réalisation d'un tel dispositif. Cependant certaines étapes de fabrication devront être améliorées afin d'obtenir des dispositifs NEMS RF caractérisables.

Conclusions

Les travaux constituant cette thèse ont de ce fait été consacrés à la modélisation, à la conception, à la réalisation et à la caractérisation d'un commutateur NEMS RF.

Tout au long de ce manuscrit, nous avons étudié l'ensemble des étapes permettant la conception et la réalisation d'un commutateur hyperfréquence à base de nanotubes de carbone verticaux (NEMS RF). Les principales motivations de ces travaux ont été de pallier aux caractéristiques contraignantes des MEMS RF, tels que : des tensions d'activation trop élevées entre les éléments commutés et des temps de commutation supérieurs à 1 µs. Nous avons voulu aussi en conserver les aspects positifs, notamment une différence quantifiable en transmission entre l'état passant et l'état bloquant. Ce mémoire présente donc la géométrie d'un NEMS RF parallèle pouvant fonctionner en hyperfréquences et dont les résultats sont encourageants : des tensions d'activation inférieures à 30 V et des temps de commutation inférieurs à 10 ns.

Dans une première partie, notre axe de recherche s'est focalisé sur l'étude des divers caractéristiques physiques des nanotubes de carbone en fonction de différents paramètres, tels que la méthode de croissance et les différences comportementales entre les nanotubes de carbone monofeuillets (SWCNTs) et les nanotubes de carbone multifeuillets (MWCNTs). Ainsi, la fabrication d'un NEMS RF à base de CNTs verticaux a imposé des multifeuillets aux comportements métalliques synthétisés par une croissance de type PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) permettant d'obtenir des nanotubes de carbone localisés et parfaitement orientés perpendiculairement au substrat.

La première étape de la seconde partie avait pour objectif de définir et de justifier l'ensemble des matériaux utilisés à la réalisation de notre dispositif. Le silicium (Si) a été choisi comme substrat pour ses propriétésde conduction électrique. La silice (SiO_2) a été retenue comme couche isolante entre le substrat et les éléments métallisés du commutateur. Les métallisations induisant la circulation du signal hyperfréquence ont été réalisées en molybdène (Mo). Ce métal allie une excellente conductivité électrique à une bonne résistance aux températures de croissance PECVD (de 600 °C à 800 °C). Enfin, des plots de catalyseur ont été réalisés à l'aide d'une bicouche de nitrure de titane (TiN) et de Nickel (Ni). Le TiN pour éviter que le nickel ne diffuse dans le molybdène au cours de la montée en température du procédé de croissance PECVD, et le nickel comme particule catalytique permettant de synthétiser des MWCNTs de diamètres importants ayant des caractéristiques métalliques accrues.

La deuxième étape de cette seconde partie rapporte des mesures expérimentales effectuées sur nos MWCNTs synthétisés par PECVD avec une chimie IPA + H_2O + H_2 à 700 °C sur un substrat comportant l'ensemble des épaisseurs des matériaux constituant notre NEMS. Une première expérimentation a contribué à déterminer le module de Young des MWCNTs par une mesure fréquentielle en oscillation, paramètre indispensable à l'établissement des dimensions précises du NEMS. Une seconde a consisté à déterminer la densité de courant pouvant circuler dans ces MWCNTs par une mesure en émission de champ. Et enfin, une dernière a eu pour ambition de démontrer la faisabilité de recouvrir intégralement un nanotube de carbone d'un matériau (SiO_2, tungstène ou platine) via la méthode EBID (Electron Beam Induced Deposition) afin de démontrer la faisabilité du NEMS à contact capacitif de type carbone-SiO_2.

La troisième partie de ce manuscrit a consisté à établir un algorithme (sous MATLAB) permettant de définir la géométrie du NEMS DC avec des tensions d'activation minimales et un rétablissement à l'état initial qui soit purement mécanique, c'est-à-dire des forces élastiques compensant les forces de van der Waals en commutation. Cet algorithme a pris en considération, les résultats des mesures effectuées dans la seconde partie et les expressions des différentes forces en présence lors de l'activation et de la réinitialisation. Nous avons ainsi déterminé le temps de commutation et la tension d'activation d'un NEMS DC pour quatre types de contact, trois ohmiques (carbone-carbone, carbone-platine et carbone-tungstène) et un capacitif (carbone-silice). Les résultats obtenus en simulation mécanique sont supérieurs au MEMS avec un temps de commutation de l'ordre de la nanoseconde et une tension d'actionnement de 22 V (Tableau 18). Cette troisième partie fait également état des étapes de fabrication du NEMS DC et des mesures en commutation effectuées sur plusieurs dispositifs dont les résultats ont confirmé la validité de l'algorithme théorique développé sous MATLAB.

Enfin la quatrième partie a présenté une géométrie d'un NEMS RF parallèle adapté à 50Ω dans la gamme en fréquence correspondant aux performances RF optimales des MWCNTs (40 GHz à 60 GHz). La pertinence de cette topologie a été validée par des simulations électromagnétiques 3D réalisées sous le logiciel HFSS pour quatres types de contact à l'état bloquant, trois ohmiques (carbone-carbone, carbone-platine et carbone-tungstène) et un capacitif (carbone-silice). Les résultats obtenus en simulation hyperfréquence pour ces quatres types de contact restent inférieurs au MEMS RF mais sont encourageants (Tableau 18). La validité de cette géométie a également été confirmée par la faisabilité technologique de tels dispositifs, avec néanmoins des difficultés rencontrées au cours de certaines étapes de fabrication rendant inexploitables les NEMS RF obtenus.

Paramètres	RF MEMS	RF NEMS
Pertes d'insertion	0,2 dB (10 GHz)	2 dB (50 GHz)
Isolation	35 dB (10 Ghz)	13 dB (50 GHz)
Consommation en puissance	≈ 0 mW	≈ 0 mW
Tension d'activation	30 V	22 V
Courant	≈ 0 mA	≈ 0 mA
Temps de commutation	≈ µs	≈ ns

Tableau 18 : Comparaison entre les résultats en simulation d'un MEMS RF et d'un NEMS RF

***In fine*, ce manuscrit a montré l'intérêt, la faisabilité et la possibilité d'utiliser des nanotubes de carbone au sein de commutateurs RF, tant pour leurs propriétés électriques et mécaniques, que pour leurs comportements en hyperfréquence. Nous avons également fait état des contraintes, sur le plan du choix des matériaux, liées à la température de croissance des nanotubes de carbone pour la fabrication de dispositifs à CNTs verticaux. Nous avons proposé des solutions adéquates en tenant compte des objectifs liés aux performances du NEMS RF. Finalement, cette thèse aura mis en**

lumière la possibilité de fabriquer des commutateurs NEMS à contact capacitif par un dépôt de diélectrique enrobant, via la méthode EBID, l'un des deux MWCNTs en contact.

La suite de ces travaux s'oriente sur quatre points distincts :

- **L'optimisation des conditions de croissance PECVD des nanotubes de carbone à 700°C pour obtenir une qualité cristalline plus importante des MWCNTs avec moins de dépôt de carbone amorphe. Une étude portant sur la mise en œuvre de plusieurs chimies de croissance PECVD mettant en avant plusieurs associations de gaz précurseurs (IPA, C_2H_2, …) et de gaz réducteurs (H_2O, H_2, NH_3, …) dans différentes proportions, serait susceptible d'apporter des résultats concluants.**

- **L'améliorartion des étapes de fabrication du NEMS RF qui se sont montrées défaillantes tel que la mauvaise adhérence au substrat du dépôt de 600nm de molybdène constituant le guide coplanaire rendant inutilisable le NEMS RF après croissance PECVD des nanotubes de carbone.**

- **Dans un troisième temps, les futurs travaux devraient s'orienter vers une amélioration de la précision du dépôt de matériau par EBID et permettre ainsi d'enrober localement un unique nanotube de carbone sans déborder à sa périphérie. Une idée consisterait à positionner la fenêtre de dépôt de façon pertinente.**

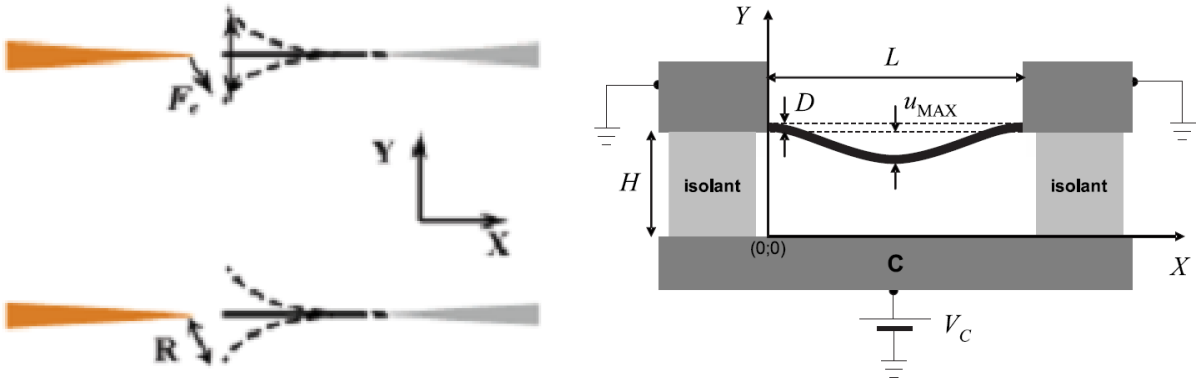
- **Pour conclure, nos recherches devront se tourner vers le développement de la topologie pince du dispositif NEMS RF série afin d'élargir le fonctionement hyperfréquence aux deux comportements caractéristiques d'un commutateur RF.**

Les futurs travaux devront également porter sur l'étude de dispositifs NEMS RF avec une configuration des commutateurs autre que la pince, comme les géométries poutre et pont présentés dans le chapitre 1 de ce manuscrit. Le principal avantage que présenterait cette orientation est que dans ces deux configurations les nanotubes de carbone sont déposés sur la structure après croissance, ce qui supprime la contrainte liée aux températures de synthèse. On pourrait alors remplacer le molybdène par de l'or au niveau de la métallisation des électrodes et de ce fait augmenter la conductivité électrique globale de la structure, améliorant ainsi la transmission du signal hyperfréquence. Cependant, par rapport au commutateur NEMS pince ces deux géométries présentent un inconvénient sur la reproductibilité en fabrication, à-savoir la difficulté d'un alignement parallèle parfait des nanotubes de carbone déposés sur le substrat. C'est cet inconvénient majeur dans la conception technologique de dispositifs pont ou poutre qui a privilégié la topologie pince au cours des travaux de cette thèse. En effet le choix s'est porté sur une géométrie de commutateur NEMS dont la faisabilité présentait le moins de difficulté, afin de valider par des mesures expérimentales les projections de nos modèles théoriques.

5 : Annexes

5.1 Les fréquences de résonances d'un nanotube de carbone

Afin de déterminer expérimentalement le module de Young d'un nanotube de carbone, il faut également déterminer les éléments permettant la caractérisation des fréquences de vibrations du MWCNT selon les différents degrés de liberté de ce dernier (Figure 129).



(a) **(b)**

Figure 129 : (a) Illustration schématique de nanotubes de carbone en résonance en configuration encastré - libre et (b) en configuration encastré - encastré [15].

Pour ce faire il faut résoudre l'Équation 41 différentielle suivante :

Équation 41 :

$$EI\frac{d^4Y}{dx^4} = -\rho\frac{d^2Y}{dt^2}$$

Les solutions du déplacement en fonction du temps sont de la forme suivante :

Équation 42 :

$$Y(x,t) = y(x)e^{j\omega t}$$

En associant les Équation 41 et Équation 42 on obtient l'Équation 43 permettant la définition du déplacement y(x) :

Équation 43 :

$$\frac{d^4y}{dx^4} = \beta^4 y \text{ avec } \beta^4 = \frac{\rho\omega^2}{EI}$$

$$y(x) = A\cos(\beta x) + B\sin(\beta x) + Cch(\beta x) + Dsh(\beta x) \text{ avec } [A,B,C,D] \in \Re$$

Afin de déterminer les constante A, B, C et D, il est nécessaire de considérer les conditions limites pour chacune des structures afin d'en extraire l'équation de la résonance.

5.1.1 Configuration encastré - libre

En configuration encastré - libre les conditions aux limites sont définies dans l'Équation 43 de la façon suivante :

$$\begin{aligned} &y(x=0)=0 \ \ (déplacement=0)\\ &y'(x=0)=0 \ \ (angle\ \ de\ \ rotation=0)\\ &y''(x=L)=0 \ \ (Moment=0)\\ &y'''(x=L)=0 \ \ (Force=0) \end{aligned} \Rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0\\ 0 & 1 & 0 & 1\\ -\cos(\beta L) & -\sin(\beta L) & ch(\beta L) & sh(\beta L)\\ \sin(\beta L) & -\cos(\beta L) & sh(\beta L) & ch(\beta L) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A\\ B\\ C\\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0\\ 0\\ 0\\ 0 \end{pmatrix}$$

En posant le déterminant égal à 0, on détermine l'Équation 44 caractéristique suivante :

Équation 44 :

$$\cos(\chi)ch(\chi)=-1 \Rightarrow \cos(\chi)=-\frac{1}{ch(\chi)} \ \text{ avec } \ \chi=\beta L$$

L'Équation 44 engendre une infinité de solutions illustrées par les points d'intersections entre les deux courbes de la Figure 130 suivante :

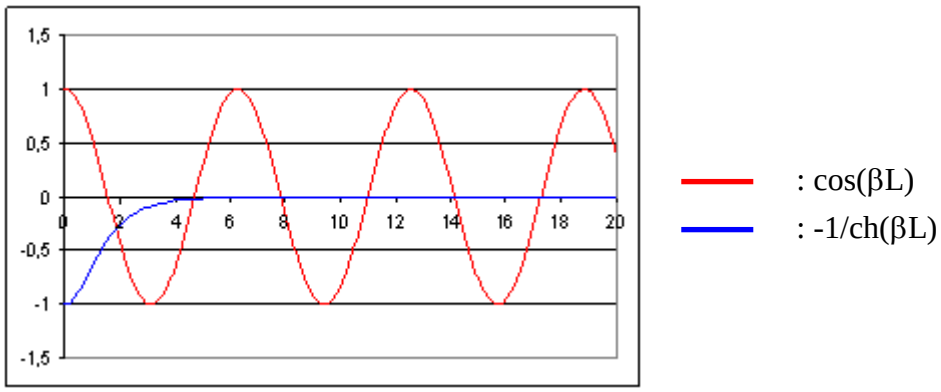


Figure 130 : résolution graphique.

On peut donc déterminer l'Équation 45 fréquentielle de tous les modes de résonances d'une structure encastré - libre [30] :

Équation 45 :

$$f_i=\frac{\chi_i^2}{8\pi}\frac{1}{L^2}\sqrt{\frac{(D_{out}^2+D_{in}^2)E}{\rho}} \ \text{ avec } \ \chi_1=1{,}87\,,\ \chi_2=4{,}69\,,\ \chi_3=7{,}85$$

Où ρ = 2100 kg/m^3 la densité d'un MWCNT, E le module de Young, D_{out} et D_{in} respectivement les diamètres extérieur et intérieur du MWCNT et L la longueur du MWCNT.

5.1.2 Configuration encastré – encastré

En configuration encastré - encastré les conditions aux limites sont définies dans l'Équation 43 de la façon suivante :

$$\begin{array}{l} y(x=0)=0 \ \ (déplacement=0) \\ y'(x=0)=0 \ \ (angle\ \ de\ \ rotation=0) \\ y(x=L)=0 \ \ (déplacement=0) \\ y'(x=L)=0 \ \ (angle\ \ de\ \ rotation=0) \end{array} \Rightarrow \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ \cos(\beta L) & \sin(\beta L) & ch(\beta L) & sh(\beta L) \\ -\sin(\beta L) & \cos(\beta L) & sh(\beta L) & ch(\beta L) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ B \\ C \\ D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

En posant le déterminant égal à 0, on détermine l'Équation 46 caractéristique suivante :

Équation 46 :

$$\cos(\chi)ch(\chi)=1 \Rightarrow \cos(\chi)=\frac{1}{ch(\chi)} \text{ avec } \chi=\beta L$$

L'Équation 44 engendre une infinité de solutions illustrées par les points d'intersections entre les deux courbes de la Figure 131 suivante :

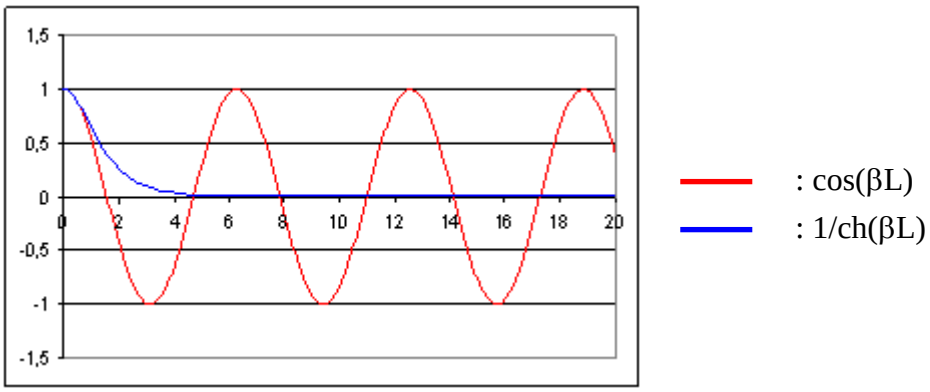


Figure 131 : résolution graphique.

On peut donc déterminer l'Équation 47 fréquentielle de tous les modes de résonances d'une structure poutre (ou pince) :

Équation 47 :

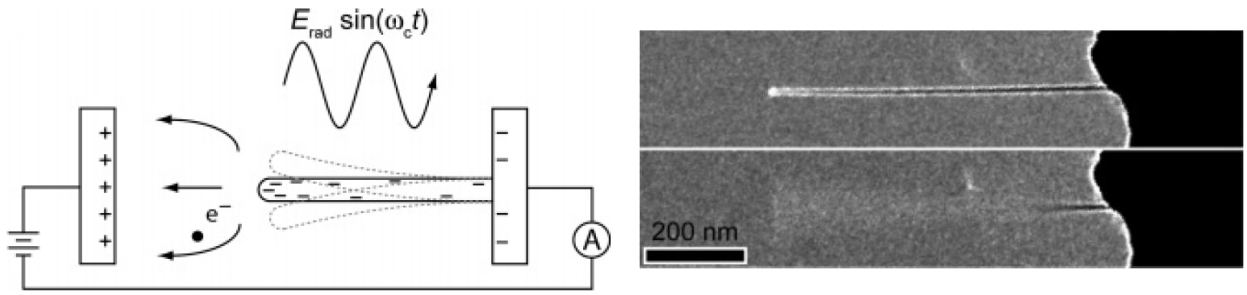
$$f_i=\frac{\chi_i^2}{8\pi}\frac{1}{L^2}\sqrt{\frac{(D_{out}^2+D_{in}^2)E}{\rho}} \text{ avec } \chi_1=4{,}73,\ \chi_2=7{,}85,\ \chi_3=10{,}99$$

Où ρ = 2100 kg/m^3 la densité d'un MWCNT, E le module de Young, D_{out} et D_{in} respectivement les diamètres extérieur et intérieur du MWCNT et L la longueur du MWCNT.

5.2 Oscillation d'un nanotube de carbone

5.2.1 Oscillation via un champ électrostatique AC

L'étude en vibration d'un nanotube de carbone via un champ électrostatique consiste à créer un champ électrostatique entre le nanotube polarisé positivement sous faible tension et une cathode métallique polarisée négativement sous haute tension. Ce champ permet d'accorder le nanotube un peu comme une corde de guitare, le rendant ainsi plus sensible aux variations en fréquences qui lui sont appliquées, permettant l'observation au TEM des différents modes de vibrations du nanotube (Figure 132).



(a) **(b)**

Figure 132 : (a) Schéma illustrant le principe de fonctionnement de l'oscillation d'un nanotube via un champ électrostatique AC et, (b haut) image TEM sans potentiel et (b bas) avec potentiel [137].

Une fois les différentes fréquences des différents modes de vibrations déterminées (Figure 133), il est possible de caractériser le module de Young via l'Équation 48 suivante :

Équation 48 :

$$E = \left(\frac{8\pi f_j L^2}{\beta_j^2} \right)^2 \frac{\rho}{\left(D_{ext}^2 - D_{\text{int}}^2 \right)}$$

avec E le module de Young, L la longueur du nanotube, f_j la fréquence de vibration du $j^{ième}$ mode, D_{ext} le diamètre extérieur du nanotube, D_{int} le diamètre intérieur du nanotube, ρ = 2,24 g/cm^3 la densité volumique du carbone et $\beta_j = j + 0{,}5$ la constante du mode de vibration j.

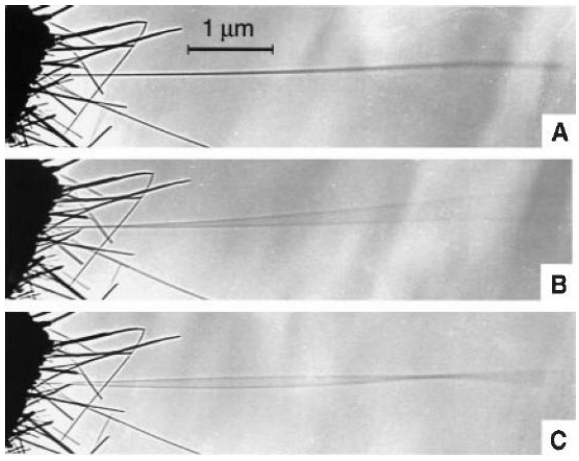


Figure 133 : Image TEM de la réponse dynamique d'un MWCNT, (A) sans potentiel, (B) mode de résonance fondamentale et (C) deuxième mode de résonance [29].

5.2.2 Oscillation thermique

L'étude en vibration d'un nanotube de carbone via des conditions de températures consiste en l'observation au TEM des oscillations de ce dernier lorsqu'il est encastré à l'une de ses extrémités et libre à l'autre. Plus la température augmente, plus l'amplitude des oscillations est importante (Figure 134) et de ce fait quantifiable et exploitable par l'Équation 49 suivante permettant de déterminer le module de Young du nanotube étudié [29].

Équation 49 :

$$E = \frac{16L^3 k_B T}{\pi\delta^2\left(D_{ext}^4 - D_{\text{int}}^4\right)}\sum_j \beta_j^{-4} \approx 0{,}4243\frac{16L^3 k_B T}{\delta^2\left(D_{ext}^4 - D_{\text{int}}^4\right)}$$

Avec E le module de Young, L la longueur du nanotube, T la température, D_{ext} le diamètre extérieur du nanotube, D_{int} le diamètre intérieur du nanotube, δ l'amplitude des oscillations, k_B = 1,3806004.10^{-23} J/K la constante de Boltzmann et β_n = n + 0,5 la constante du mode de vibration n.

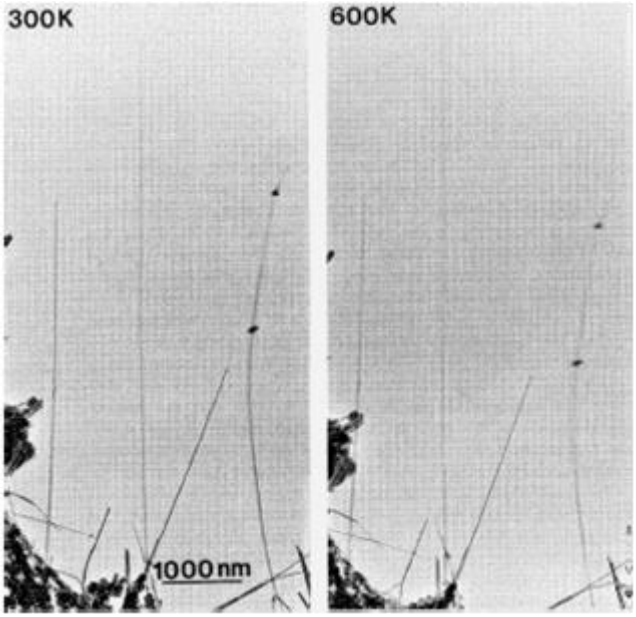


Figure 134 : Image TEM illustrant les oscillations thermiques de l'extrémité libre d'un nanotube à 300 K et 600 K.

5.2.3 En commutation via les forces élastique et électrostatique

L'étude en commutation de deux nanotubes de carbone en configuration pince via un champ électrostatique compensant la force élastique propre de chacun des MWCNTS, consiste en la détermination de la tension nécessaire et suffisante à appliquer entres les nanotubes afin d'obtenir une déflexion quantifiables des MWCNTs. De cette tension et des dimensions des tubes, on détermine le module de Young des nanotubes de carbone en faisant le bilan des forces en présence et en appliquant pour la tension de commutation l'égalité $F_{élastique}$ = $F_{électrostatique}$ (Figure 135) [26].

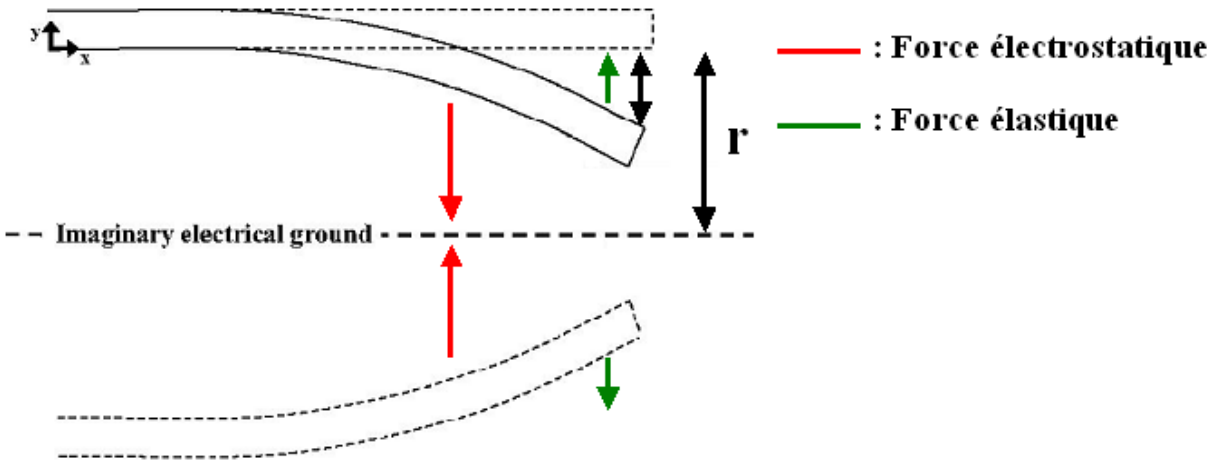


Figure 135 : Schéma illustratif de commutation de deux MWCNTs en configuration pince.

On obtient ainsi le module de Young déterminé par l'Équation 50 suivante :

Équation 50 :

$$E = \frac{V^2 L^4 \pi \varepsilon_0}{32 \cdot I \cdot v \cdot \sqrt{(r-v)(r-v+2R_{ext})} \cdot \ln^2\left(1 + \frac{r-v}{R_{ext}} + \sqrt{\frac{(r-v)(r-v+2R_{ext})}{R_{ext}^2}}\right)} \text{ avec}$$

$$I = \frac{\pi}{4}\left(R_{ext}^4 - R_{\text{int}}^4\right)$$

Avec V la tension d'activation, L la longueur des MWCNTs, I le moment d'inertie, v la déflexion obtenue des MWCNTs, r la distance entre un MWCNT et le plan de masse imaginaire (Figure 135) et (R_{ext},R_{int}) respectivement le rayon extérieur et intérieur des MWCNTs.

5.3 Alignement diélectrophorèse

Le principe d'alignement de nanotubes de carbone entre deux électrodes métalliques est communément appelé AC électrophorèse. Ce phénomène repose sur le concept que des particules neutres subissent un mouvement mécanique à l'intérieur d'un champ électrique AC non-uniforme [138] [139].

Cette force AC électrophorèse peut-être définie théoriquement de la façon suivante :

Équation 51 :

$$\vec{F}_{DEP} = \frac{1}{2}\vec{\alpha}V\nabla\left|\vec{E}\right|^2$$

Avec α la polarisabilité attractive ou répulsive des particules dépendantes en fréquence, V le volume des particules, $\nabla = \vec{i}\frac{\partial}{\partial x} + \vec{j}\frac{\partial}{\partial y} + \vec{k}\frac{\partial}{\partial z}$ l'opérateur gradient et $\left|\vec{E}\right|$ le module du champ électrique.

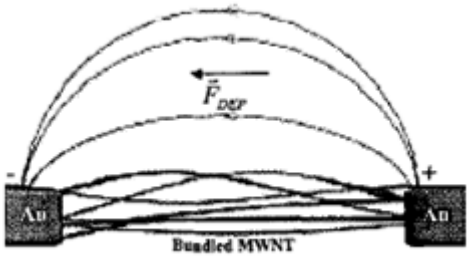


Figure 136 : Force AC électrophorèse sous un champ électrique AC non uniforme alignant un paquet de MWCNTs entre les deux électrodes en or.

5.4 Les paramètres et les matrices S et T

5.4.1 Les paramètres S

Les paramètres S relient les ondes incidentes avec les ondes réfléchies par les ports d'un dispositif.

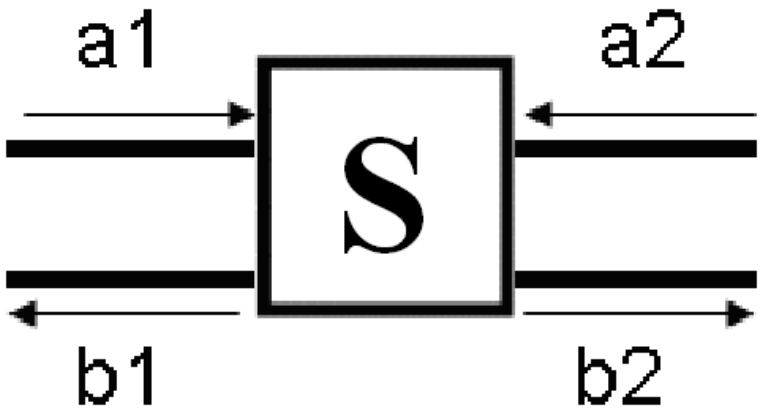


Figure 137 : Ondes incidentes (a1 et a2) et réfléchies (b1 et b2) en entrée-sortie d'un dispositif quadripôle.

L'utilisation la plus fréquente des paramètres S concerne les dispositifs quadripôles (Figure 137). Dans cette configuration, les relations entre les ondes incidentes et réfléchies sont décrites par l'Équation 52 :

Équation 52 :

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = [S] \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \rightarrow \begin{cases} b_1 = S_{11}a_1 + S_{12}a_2 \\ b_2 = S_{21}a_1 + S_{22}a_2 \end{cases}$$

La signification des paramètres S est la suivante :

- S11 = b1 / a1 pour a2 = 0 est le facteur de réflexion à l'entrée, la sortie étant adaptée.
- S21 = b2 / a1 pour a2 = 0 est le facteur de transmission entrée avec sortie adaptée.
- S22 = b2 / a2 pour a1 = 0 est le facteur de réflexion en sortie, l'entrée étant adaptée.
- S12 = b1 / a2 pour a1 = 0 est le facteur de transmission sortie avec entrée adaptée.

Remarque :

Pour un quadripôle symétrique, on a toujours S11 = S22 et S12 = S21.
Pour un quadripôle réciproque on a uniquement S12 = S21.

5.4.2 Les paramètres T

Les paramètres T relient les couples tension-courant en entrée et en sortie par les ports d'un dispositif (Figure 138).



Figure 138 : Couples tension-courant en entrée (V_1,I_1) et en sortie (V_2,I_2) d'un dispositif quadripôle.

Pour ce type de quadripôle, on a les relations suivantes :

Équation 53 :

$$\begin{matrix} V_1 = a_1 + b_1 \\ V_2 = a_2 + b_2 \end{matrix} \text{ et } \begin{matrix} I_1 = a_1 - b_1 \\ I_2 = b_2 - a_2 \end{matrix}$$

Avec a_1, b_1, a_2 et b_2 les paramètres d'ondes incidentes et réfléchies caractérisés précédemment.

La matrice reliant (V_1, I_1) à (V_2, I_2) est une matrice de chaîne illustrée à l'Équation 54.

Équation 54 :

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = [T] \cdot \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix}$$

5.4.3 Théorie de passage de la matrice T à la matrice S

Définition des relations reliant les paramètres d'ondes (a,b) aux paramètres tension-courant (V,I) :

$$\begin{cases} V_1 = a_1 + b_1 & V_2 = a_2 + b_2 \\ I_1 = a_1 - b_1 & I_2 = b_2 - a_2 \end{cases}$$

On déduit de ces deux équations les relations suivantes :

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \end{cases}$$

On rappel que :

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = [T] \cdot \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix}$$

On peut donc écrire :

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \cdot \left[\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \right]$$

Après simplification, on obtient :

$$\begin{pmatrix} 1 & -T_{11} - T_{12} \\ -1 & -T_{21} - T_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & T_{11} - T_{12} \\ -1 & T_{21} - T_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Posons $K = \begin{pmatrix} 1 & -T_{11} - T_{12} \\ -1 & -T_{21} - T_{22} \end{pmatrix}$ *et calculons* K^{-1} :

$$\det(K) = -\left(T_{11} + T_{12} + T_{21} + T_{22}\right) \Rightarrow comat(K)^T = \begin{pmatrix} -T_{21} - T_{22} & T_{11} + T_{12} \\ 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$K^{-1} = \frac{comat(K)^T}{\det(K)} \Rightarrow K^{-1} = \begin{pmatrix} \dfrac{T_{21} + T_{22}}{T_{11} + T_{12} + T_{21} + T_{22}} & \dfrac{-T_{11} - T_{12}}{T_{11} + T_{12} + T_{21} + T_{22}} \\ \dfrac{-1}{T_{11} + T_{12} + T_{21} + T_{22}} & \dfrac{-1}{T_{11} + T_{12} + T_{21} + T_{22}} \end{pmatrix}$$

En utilisant ce résultat dans l'équation (1), on obtient :

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = K^{-1} \cdot \begin{pmatrix} -1 & T_{11} - T_{12} \\ -1 & T_{21} - T_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{T_{21} + T_{22}}{T_{11} + T_{12} + T_{21} + T_{22}} & \dfrac{-T_{11} - T_{12}}{T_{11} + T_{12} + T_{21} + T_{22}} \\ \dfrac{-1}{T_{11} + T_{12} + T_{21} + T_{22}} & \dfrac{-1}{T_{11} + T_{12} + T_{21} + T_{22}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -1 & T_{11} - T_{12} \\ -1 & T_{21} - T_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{-T_{21} - T_{22} + T_{11} + T_{12}}{T_{11} + T_{12} + T_{21} + T_{22}} & \dfrac{2 \cdot (T_{11}T_{22} - T_{12}T_{21})}{T_{11} + T_{12} + T_{21} + T_{22}} \\ \dfrac{2}{T_{11} + T_{12} + T_{21} + T_{22}} & \dfrac{-T_{21} + T_{22} - T_{11} + T_{12}}{T_{11} + T_{12} + T_{21} + T_{22}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$

On rappel que :

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = [S] \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & A_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$

La matrice de passage de T à S est en finalité définie par l'Équation 55.

Équation 55 :

$$S = \begin{pmatrix} \dfrac{-T_{21} - T_{22} + T_{11} + T_{12}}{T_{11} + T_{12} + T_{21} + T_{22}} & \dfrac{2 \cdot (T_{11}T_{22} - T_{12}T_{21})}{T_{11} + T_{12} + T_{21} + T_{22}} \\ \dfrac{2}{T_{11} + T_{12} + T_{21} + T_{22}} & \dfrac{-T_{21} + T_{22} - T_{11} + T_{12}}{T_{11} + T_{12} + T_{21} + T_{22}} \end{pmatrix}$$

5.4.4 Théorie de passage de la matrice S à la matrice T

Définition des relations reliant les paramètres tension-courant (V,I) aux paramètres d'ondes (a,b) :

$$\begin{cases} a_1 = \dfrac{V_1 + I_1}{2} & a_2 = \dfrac{V_2 - I_2}{2} \\ b_1 = \dfrac{V_1 - I_1}{2} & b_2 = \dfrac{V_2 + I_2}{2} \end{cases}$$

On déduit de ces 2 équations les relations suivantes :

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix} \end{cases}$$

On rappel que :

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \end{pmatrix} = [S] \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \end{pmatrix}$$

On peut donc écrire :

$$\begin{pmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{pmatrix} \cdot \left[\begin{pmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix} \right]$$

Après simplification, on obtient :

$$\begin{pmatrix} \frac{1-S_{11}}{2} & \frac{-1-S_{11}}{2} \\ -\frac{S_{21}}{2} & -\frac{S_{21}}{2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{S_{12}}{2} & -\frac{S_{12}}{2} \\ \frac{-1+S_{22}}{2} & \frac{-1-S_{22}}{2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Posons $K = \begin{pmatrix} \frac{1-S_{11}}{2} & \frac{-1-S_{11}}{2} \\ -\frac{S_{21}}{2} & -\frac{S_{21}}{2} \end{pmatrix}$ *et calculons* K^{-1} :

$$\det(K) = -\frac{S_{21}}{2} \Rightarrow comat(K)^T = \begin{pmatrix} \frac{-S_{21}}{2} & \frac{1+S_{11}}{2} \\ \frac{S_{21}}{2} & \frac{1-S_{11}}{2} \end{pmatrix}$$

$$K^{-1} = \frac{comat(K)^T}{\det(K)} \Rightarrow K^{-1} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{-1-S_{11}}{S_{21}} \\ -1 & \frac{-1+S_{11}}{S_{21}} \end{pmatrix}$$

En utilisant ce résultat dans l'équation (1), on obtient :

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = K^{-1} \cdot \begin{pmatrix} \frac{S_{12}}{2} & -\frac{S_{12}}{2} \\ \frac{-1+S_{22}}{2} & \frac{-1-S_{22}}{2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \frac{-1-S_{11}}{S_{21}} \\ -1 & \frac{-1+S_{11}}{S_{21}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{S_{12}}{2} & -\frac{S_{12}}{2} \\ \frac{-1+S_{22}}{2} & \frac{-1-S_{22}}{2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{S_{12} \cdot S_{21} - (S_{11}+1) \cdot (S_{22}-1)}{2 \cdot S_{21}} & \frac{-S_{12} \cdot S_{21} + (S_{11}+1) \cdot (S_{22}+1)}{2 \cdot S_{21}} \\ \frac{-S_{12} \cdot S_{21} + (S_{11}-1) \cdot (S_{22}-1)}{2 \cdot S_{21}} & \frac{S_{12} \cdot S_{21} - (S_{11}-1) \cdot (S_{22}+1)}{2 \cdot S_{21}} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix}$$

On rappel que :

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = [T] \cdot \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix}$$

La matrice de passage de S à T est en finalité définie par l'Équation 56.

Équation 56 :

$$T = \begin{pmatrix} \dfrac{S_{12}\cdot S_{21} - (S_{11}+1)\cdot(S_{22}-1)}{2\cdot S_{21}} & \dfrac{-S_{12}\cdot S_{21} + (S_{11}+1)\cdot(S_{22}+1)}{2\cdot S_{21}} \\ \dfrac{-S_{12}\cdot S_{21} + (S_{11}-1)\cdot(S_{22}-1)}{2\cdot S_{21}} & \dfrac{S_{12}\cdot S_{21} - (S_{11}-1)\cdot(S_{22}+1)}{2\cdot S_{21}} \end{pmatrix}$$

5.4.5 Modèle électrique équivalent d'un tronçon de ligne hyperfréquence

Considérons une section de ligne schématisée à la Figure 139.

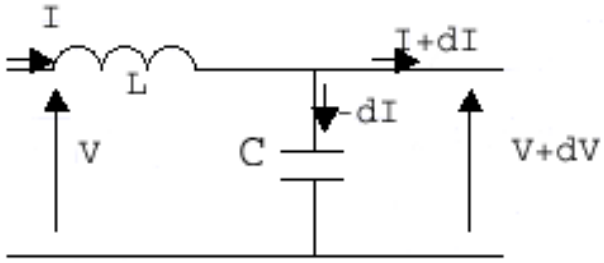


Figure 139 : Modèle électrique équivalent d'une section de ligne.

La matrice T caractérisant un tronçon de ligne définit par l'Équation 57.

Équation 57 :

$$\begin{pmatrix} V_1 \\ I_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} ch(\gamma l) & Zsh(\gamma l) \\ \dfrac{sh(\gamma l)}{Z} & ch(\gamma l) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} V_2 \\ I_2 \end{pmatrix} \quad avec \quad \begin{cases} ch(\gamma l) = \dfrac{e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}}{2} \\ sh(\gamma l) = \dfrac{e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}}{2} \end{cases}$$

Avec l la longueur de la ligne, γ la constante de propagation de la ligne et Z l'impédance caractéristique de la ligne normalisée.

5.5 La force élastique

5.5.1 Configuration poutre

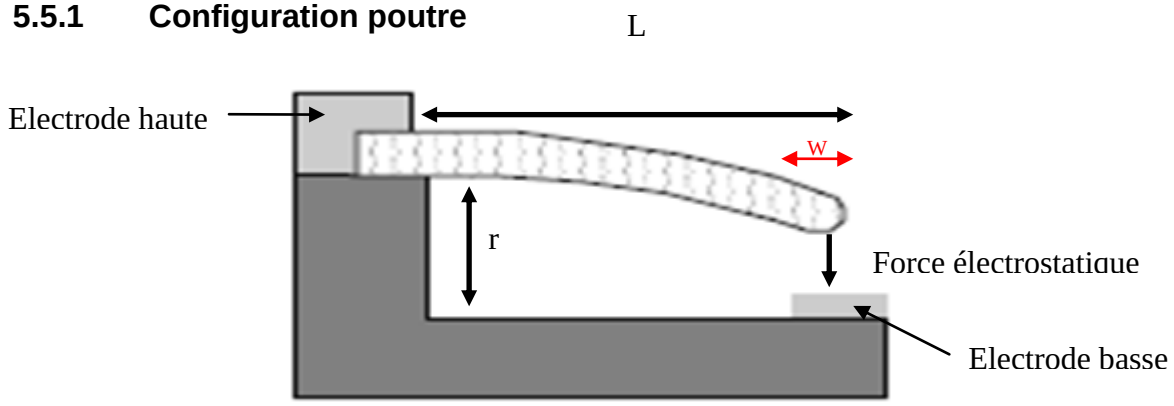


Figure 140 : Illustration d'un commutateur NEMS DC en configuration poutre.

En configuration poutre, l'équation du déplacement ainsi que les conditions aux limites sont similaires à celles définies en configuration pince (page 84).

Afin de déterminer la force élastique, il faut considérer le déplacement induit par la force électrostatique appliquée. Dans le cas d'une configuration poutre (Figure 140), cette force est appliquée à l'extrémité libre du MWCNT entre le nanotube et l'électrode basse. Le déplacement dans ce cas est définit de la façon suivante :

Équation 58 :

$$r(x) = \frac{F_{elast}(3L-x)x^2}{6EI} \Rightarrow r(L) = r_{\max} = \frac{F_{elast}L^3}{3EI}$$

Nous pouvons également considérer plus précisément cette équation en incluant le fait que le champ électrostatique entre le nanotube et l'électrode basse est créé en vis-à-vis sur une longueur W :

Équation 59 :

$$r = \frac{1}{W}\int_{L-W}^{L} \frac{E_{elast}(3L-x)x^2}{6EI}dx = \frac{F_{elast}}{6EI}\left(2L^3 - 1{,}5L^2W + 0{,}25W^3\right)$$

Pour la géométrie poutre, la force élastique peut donc s'écrire de deux façons selon la configuration de l'électrode basse [140] :

Équation 60 :

$$\left.\begin{array}{l} \text{Équation 58 : } F_{elast} = \dfrac{3EI}{L^3}r \\ \text{Équation 59 : } F_{elast} = \dfrac{6EI}{2L^3 - 1{,}5L^2W + 0{,}25W^3}r \end{array}\right\} \text{ avec } I = \frac{\pi}{4}\left(\left(\frac{D_{ext}}{2}\right)^4 - \left(\frac{D_{\text{int}}}{2}\right)^4\right)$$

Où E est le module de Young, I le moment d'inertie, r la distance entre les MWCNTs et L la longueur du MWCNT.

5.5.2 Configuration pont

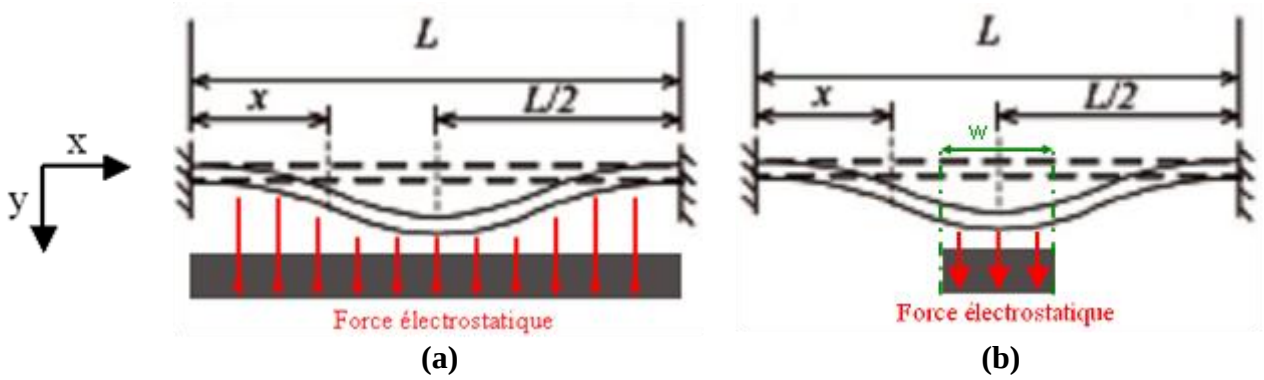


Figure 141 : Illustration d'un commutateur NEMS DC en configuration pont.

En configuration pont, l'équation de déplacement est similaire à celle définie précédemment pour les configurations pince et poutre (page 84).

Dans notre cas le MWCNT est en configuration encastrée-encastrée, les conditions aux limites sont donc définies comme :

$$\begin{array}{lll} y(x=0)=0 & A=F_{elast}L/4EI & \\ y'(x=0)=0 \Rightarrow & B=0 & \Rightarrow\ y=\dfrac{F_{elast}}{24EI}x^2(3L-4x) \\ y'(x=L/2)=0 & C=0 & \end{array}$$

Afin de déterminer la force élastique, il faut considérer le déplacement induit par la force électrostatique appliquée. Dans le cas d'une configuration pont (Figure 141a), cette force est appliquée tous le long du MWCNT entre le nanotube et l'électrode basse. Le déplacement maximal est dans ce cas défini au centre du tube ce qui engendre l'équation suivante :

Équation 61 :

$$r=\frac{1}{L}\int_0^{\frac{L}{2}}\frac{F_{elast}(3L-4x)x^2}{24EI}dx=\frac{F_{elast}L^3}{384EI}$$

On peut également considérer une force électrostatique localisée au point de déformation principal (au centre du MWCNT) un peu comme pour la configuration poutre :

Équation 62 :

$$r(x)=\frac{F_{elast}}{24EI}x^2(3L-4x)\Rightarrow r\left(L/2\right)=r_{\max}=\frac{F_{elast}L^3}{96EI}$$

Pour finir on peut également considérer une électrode basse de largeur W (Figure 141b) au lieu d'une électrode basse ayant pour largeur la longueur du tube comme définie à l'Équation 61. On obtient dans ce cas l'équation de déplacement suivante :

Équation 63 :

$$r = \frac{1}{W}\int_{\frac{L}{2}-W}^{\frac{L}{2}} \frac{F_{elast}}{24EI} x^2\left(3L-4x^2\right)dx = \frac{F_{elast}}{24EI}\left(\frac{L^3}{4} - LW^2 + W^3\right)$$

Pour la géométrie pont, la force élastique peut donc s'écrire des trois façons selon la configuration de l'électrode basse [115] :

Équation 64 :

$$\left.\begin{array}{ll} \text{Équation 62 :} & F_{elast} = \dfrac{384EI}{L^3} r \\ \text{Équation 63 :} & F_{elast} = \dfrac{96EI}{L^3} r \\ \text{Équation 64 :} & F_{elast} = \dfrac{24EI}{\left(\dfrac{L^3}{4} - LW^2 + W^3\right)} r \end{array}\right\} \textbf{avec } I = \frac{\pi}{4}\left(\left(\frac{D_{ext}}{2}\right)^4 - \left(\frac{D_{\text{int}}}{2}\right)^4\right)$$

5.6 La force électrostatique en configuration poutre et pont

Dans les configurations poutre et pont, la force électrostatique engendrant la déflexion est crée par la différence de potentiel entre le nanotube de carbone et une électrode. A partir d'un certain seuil, le CNT devient instable et rentre brutalement en contact avec l'électrode, car la force élastique du nanotube de carbone ne compense plus à cet instant la force électrostatique [115].

Dans les configurations illustrées aux Figure 140 et Figure 141, la largeur du champ électrostatique induit par la différence de potentiel appliquée correspond à la longueur en vis-à-vis entre le nanotube de carbone et l'électrode basse (W).

La force électrostatique d'un NEMS en configuration poutre ou pont est donc définie de la façon suivante [117, 38] :

Équation 65 :

$$\frac{F_{elect}}{W} = -\frac{d\left(E_{elect}/W\right)}{dr} = -\frac{\pi\varepsilon_0 V^2}{\sqrt{r\left(r+2R\right)}\ln^2\left(1+\frac{r}{R}+\sqrt{\frac{r\left(r+2R\right)}{R^2}}\right)}$$

Où V est la tension d'activation, ε_0 la permittivité du vide, W la largeur du champ électrostatique, C(r) la capacité de couplage entre le MWCNT et l'électrode, R le diamètre du nanotube de carbone et r la distance séparant le CNT et l'électrode avant l'application du potentiel.

5.7 La force de van der Waals en configuration poutre et pont

En configuration poutre et pont, la force de van der Waals entre une structure cylindrique et un plan métallique est définie par l'Équation 65 suivante [34] :

Équation 66 :

$$F_{vdW} = -\frac{\pi^2 C_{A-B}\rho_1\rho_2\sqrt{R}}{8\sqrt{2}r^{5/2}} \times L_C \text{ avec } \rho = \frac{M_V}{M_A}$$

Où ρ correspond a la densité volumique d'un matériau, M_V la masse volumique d'un matériau, M_A la masse atomique d'un matériau, R le rayon du MWCNT, r la distance séparant le MWCNT du plan métallique, $C_{A\text{-}B}$ l'attraction entre deux atomes des deux matériaux en vis-à-vis et L_C la longueur du contact lorsque le NEMS commute (Tableau 10 page 86).

La force de van der Waals est uniquement considérée lorsque le NEMS a commuté, car au repos la distance entre les deux MWCNTs est suffisamment grande pour que la force de van der Waals devienne négligeable devant la force élastique de ces derniers.

Afin de définir la géométrie du NEMS on prend en compte la longueur du contact en commutation et on dimensionne les nanotubes de carbone afin que $F_{elast} / F_{vdW} > 1$. Avec cette condition les CNTs retrouvent mécaniquement leurs positions initiales dés lors que l'alimentation est éteinte.

Publication des résultats de ce travail

Review sur l'état de l'art des nanotubes de carbone

Author's personal copy

Available online at www.sciencedirect.com
ScienceDirect
C. R. Physique 9 (2008) 53–66
COMPTES RENDUS PHYSIQUE
http://france.elsevier.com/direct/COMREN/

New concepts for nanophotonics and nano-electronics

Review of two microwave applications of carbon nanotubes: nano-antennas and nano-switches

Sébastien Demoustier *, Eric Minoux, Matthieu Le Baillif, Michael Charles, Afshin Ziaei

Thales Research & Technology, route départementale 128, 91767 Palaiseau cedex, France

Available online 14 February 2008

Abstract

This paper provides an overview of two potential applications of carbon nanotube devices in microwave technology. Firstly, the main structural, mechanical, thermal and electronic properties of carbon nanotubes are briefly reviewed. Then, the possibilities offered by metallic carbon nanotubes as nano-antennas in the E- and W-bands and further are investigated: comparison with macroscopic wire antennas is made, the major advantages brought by nanotubes but also technical issues to be addressed are discussed. Finally, the integration of carbon nanotubes in nano-electro-mechanical-systems (NEMS) is studied through nano-switches: the contribution of carbon nanotubes is detailed, state-of-the-art is described, as well as our future approaches for such nano-devices. ***To cite this article: S. Demoustier et al., C. R. Physique 9 (2008).***
© 2008 Académie des sciences. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Résumé

Revue d'applications des nanotubes de carbone aux micro-ondes : nano-antennes et nano-commutateurs. Ce papier présente une vue d'ensemble de deux applications potentielles des nanotubes de carbone pour les technologies micro-onde. Les principales propriétés structurelles, mécaniques, thermiques et électroniques des nanotubes de carbone sont d'abord brièvement rappelées. Puis, les possibilités offertes par les nanotubes de carbone métalliques utilisés comme nano-antennes entre 60 et 110 GHz et au-delà sont examinées : nous effectuons une comparaison avec les antennes filaires classiques puis nous discutons des avantages apportés par les nanotubes mais aussi des problèmes à lever. Enfin, nous évoquons l'intégration des nanotubes de carbone dans les systèmes nano-électro-mécaniques (NEMS) par le biais des nano-commutateurs : l'apport des nanotubes dans ces systèmes est suivi d'une revue de l'état de l'art ainsi que de la description de l'orientation de nos travaux pour la réalisation de ces futurs nano-systèmes. ***Pour citer cet article : S. Demoustier et al., C. R. Physique 9 (2008).***
© 2008 Académie des sciences. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.

Keywords: Carbon nanotube; Nanotechnology; Microwave; Dipole antenna; Switch; NEMS

Mots-clés : Nanotube de carbone ; Nanotechnologie ; Micro-onde ; Antenne dipolaire ; Commutateur ; NEMS

1. Introduction

Microelectronics have already fulfilled many expectations for daily use in the fields of mobile phones, the automotive industry, inertial sensors, etc. This has been achieved thanks to the size reduction from macroscopic to microscopic

* Corresponding author.
E-mail address: Sebastien.Demoustier@thalesgroup.com (S. Demoustier).

1631-0705/$ – see front matter © 2008 Académie des sciences. Published by Elsevier Masson SAS. All rights reserved.
doi:10.1016/j.crhy.2008.01.001

Author's personal copy

scales of chips and transmitting devices, as well as to their constantly increasing frequency range. However, the need for faster, more portable and discreet systems, able to communicate between themselves at high rates, is greater than ever and requires that we continue shrinking the size of the electronic devices down to nano scales. State-of-the-art micro-electronic designs are now confronted with the issue of decreasing the size of devices like antenna, while keeping working at the usual frequencies.

Since their discovery in 1991 [1], the fundamental electrical properties of carbon nanotubes are well understood and are promising for further electronic developments. Along with their thermal and mechanical properties, carbon nanotubes are attractive for a wide range of application fields: they will be used as nano-scale transmission lines, active and passive nano-components such as transistors or switches in high density circuits or in biotechnologies, for instance. One of the technical issues that scientists have to face to bring nanotechnologies to reality is communication and data exchange at high rates between the nano-sized devices or organisms and the macro-world. Nano-antennas based on nanotubes for wireless communications could solve this issue.

In telecommunication networks, RF switches are key parts for realizing the following sub-functions: (i) Transmit/receive switching, band switching (such as handset phones); (ii) Phase shifters in electronic beam steering antennas (satellite antennas, airborne radar, car antennas tracking satellites such as the Inmarsat ones); (iii) Switching matrix to provide redundancy capabilities for critical functions (such as satellite antennas); (iv) Tunable filtering (such as VCO).

Today, the introduction of NEMS (Nano-Electro-Mechanical-Systems) technology into the field of microwaves presents a considerable interest for circuit designers, because it allows the realization of very high performances switches with electrostatic command. Performance is expected as follows: low insertion loss and high isolation, a switching time below 0.1 µs, which is one order of magnitude lower than the state of the art for MEMS switches, an operating voltage below 1 V, high power RF signals handling capability, very low current consumption, low cost and high integration density.

NEMS are characterized by small dimensions, which are relevant for the function of the devices. Critical feature sizes may be from hundreds to a few nanometers. New physical properties, resulting from these small dimensions, may dominate the operation of the devices, and new fabrication approaches may be required to make them. The introduction of carbon nanotubes in NEMS is particularly interesting due to their exceptional electrical and mechanical properties.

Firstly, we will present fundamental properties of carbon nanotubes (Section 2), then we will show their potential use as nano-antennas (Section 3) and then as nano-switches (Section 4).

2. Carbon nanotube properties

2.1. Structural and mechanical properties

Carbon nanotubes (CNTs) are allotropes of carbon. A Single Wall Carbon Nanotube (SWCNT, see Fig. 1(b)) can be roughly approximated by a rolled-up graphene sheet (i.e. mono-atomic layer of graphite whose structure is honeycombed, see Fig. 1(a)) with at least one end like a half-sphere composed of hexagonal and pentagonal carbon groups (Fullerene structure) in order to allow the graphene sheet to roll-up. Multi-walled nanotubes (MWCNT, see Fig. 1(c)) consist in concentric multiple layers of graphite rolled in on themselves to form a tube shape. The spacing between shells in a MWCNT is given by the van der Waals distance between grapheme layers in graphite, and can be approximated to $\delta = 0.34$ nm.

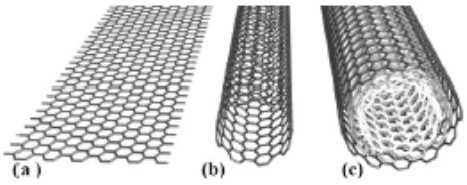


Fig. 1. (a) Graphene sheet, (b) SWCNT, (c) MWCNT.

Author's personal copy

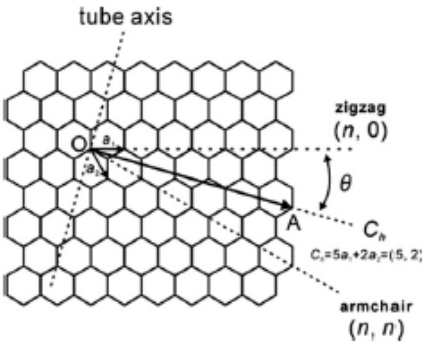


Fig. 2. Lattice basis vectors for CNT.

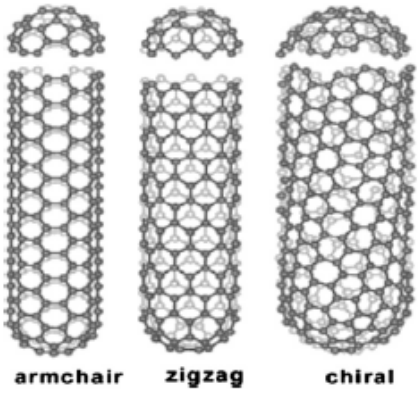


Fig. 3. CNT structural orientation.

Table 1
Comparative Young modulus and elastic range of CNTs and common materials

	SWCNT	MWCNT	Steel	Aluminium	Copper	Gold	Tungsten
Young modulus	1.06 Tpa	4 Tpa	210 Gpa	70 Gpa	124 Gpa	78 Gpa	406 Gpa
Elastic range	130 Gpa		200–800 Mpa	70 Mpa	60 Mpa	124 Mpa	1 Gpa

Table 2
Comparison of thermal conductivities between carbon nanotubes and bulk materials [6]

Bulk materials	Germanium	Silicon	Aluminium	Gold	Copper	Diamond	MWCNT	SWCNT
Thermal conductivity ($W\,m^{-1}\,K^{-1}$)	60	148	237	317	485	1000	2000–3000	2500–6600

The structural orientation of the SWCNT, determined by the lattice basis vector (Fig. 2), is split up into three groups presented on Fig. 3: armchair, zigzag or chiral. Electrical and mechanical properties are directly dependent on the SWCNT orientation: armchair SWCNTs are metallic while zigzag and chiral SWCNTs can exhibit both semiconducting or metallic behaviours [2]. MWCNT all exhibit metallic electrical properties.

Moreover, due to these structures, SWCNT and MWCNT present exceptional mechanical properties. First their Young Modulus is over a TeraPascal, which is far bigger other known material value, as shown in Table 1. This gives the CNT a very wide elastic range and once again far over other known materials before bending becomes permanent.

These exceptional mechanical properties are obtained through a CNT particularity: the carbon group recombination [3]. When a stress is applied with enough strength, by bending, twisting or elongating the CNT, the hexagonal structure breaks up and recombines into groups of pentagonal, hexagonal and heptagonal carbon in order to obtain a new structure as stress-less as possible, but unstable, and will recombine to the original hexagonal structure once stress is no longer applied.

2.2. *Thermal properties*

The thermal properties of carbon nanotubes ares essentially marked by their outstanding thermal conductivity, which is between 600 and 3000 $W\,m^{-1}\,K^{-1}$ for MWCNTs, between 2500 and 6600 $W\,m^{-1}\,K^{-1}$ for SWCNTs, and between 15 and 250 $W\,m^{-1}\,K^{-1}$ for a bulk CNT films, for temperatures higher than 100 K [4,5]. These values are among the highest ever measured, compared to other bulk materials, as shown in Table 2.

This thermal conductivity increases with temperature (Fig. 4), which is a classical behaviour of semiconductor materials. Fig. 5, extracted from [7], shows experimental results on the thermal conductance variation as a function of temperature for an individual MWCNT (diameter: 14 nm, length: a few μm).

Author's personal copy

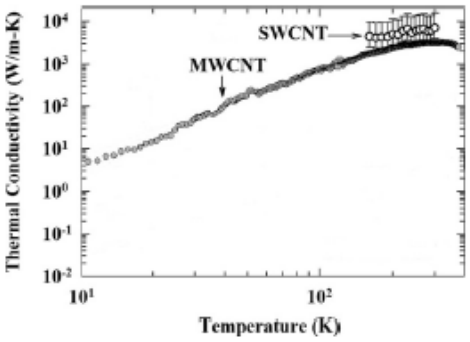


Fig. 4. Thermal conductivity of a SWNT and MWNT alone and in bundle in function of the temperature [8].

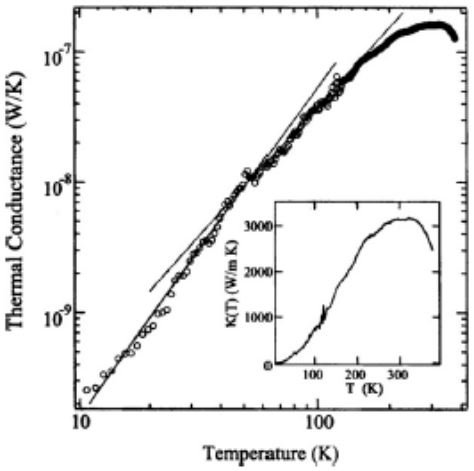


Fig. 5. Temperature variation of thermal conductance of an individual multi-wall carbon nanotube (diameter: 14 nm, length: a few μm). Insert: thermal conductivity [7].

It is also noticeable that the electrical resistance linearly decreases when the nanotube temperature increases, with a thermal-resistance coefficient varying from a few hundredth of 1% to a few % per degree, according to different experiment configurations and nanotubes [9,10]. Finally, a temperature gradient along the nanotube can cause a potential difference, due to the charge carrier scattering from hot to cold. This gives rise to the diffusion thermoelectric power, increasing with temperature and equal to 80 $\mu V\,K^{-1}$ at room temperature for the same 14-nm-diameter multi-wall nanotube as in Fig. 5.

2.3. *Electrical properties*

Size reduction toward nanometric scale changes the electromagnetic properties of the conducting elements. When a wire is fabricated whose cross-sectional dimension is comparable to the quantum mechanical (Fermi) wavelength of the electron, the wire forms essentially a single-mode waveguide for the electron waves. Then, in a one-dimensional conductor such as a nanotube, the electrons are only free to move along the length of the wire, and not in the transverse direction. Therefore the current distribution is effectively one-dimensional.

In addition to electron transport in only one dimension, two more important effects appear: a larger resistance and a larger inductance. While copper is typically used in applications where high conductivity is required, it does not maintain its bulk conductivity when scaled to nanometric dimensions [11]. In contrast, nanotubes have better conductivity than copper when scaled to their diameter. It has recently been showed that the dc resistance per unit length of a single-walled carbon nanotube at room temperature is about 6 $k\Omega\,\mu m^{-1}$ [12]. Moreover, it can be seen from Fig. 6 that the conductivity of CNTs (bundle of SWCNTs and MWCNT) increases with the length of nanotube, whereas the conductivity of a copper wire does not increase with the length, but with its diameter [13]. This resistance per unit length is quite large compared to the characteristic impedance of free space, as well as typical radiation resistances in traditional antennas. Therefore, it cannot be neglected. Recently it has been proven that the ac and dc resistances are similar for a nanotube up to about 10 GHz [14].

The distributed magnetic inductance and electrostatic capacitance on a two-wire transmission line give rise to a wave-velocity that is typically in the of order of the speed of light. However, in a carbon nanotube, there is another inductance, due to the kinetic energy of the electrons. Numerically, this inductance is typically 10 000 larger than the magnetic inductance, and so it dominates [15,16]. This large inductance causes the nanotube to behave as a quantum transmission line for RF voltages. The characteristic impedance of this line is in several kΩ order. In addition,

Author's personal copy

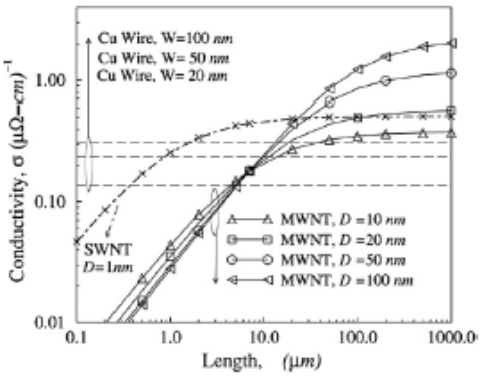


Fig. 6. Conductivity of MWCNTs with various diameters and bundles of densely packed SWCNTs versus length [12].

the wavelength is about 50–100 times smaller than the free space wavelength for a given frequency [17,18]. This dramatically changes the current distribution compared to a thin-wire macro antenna, and must be accounted for.

The conductivities of nanotubes and metallic wires are different because in a metallic wire the charges are relatively free of movement. This flux of charge is concentrated on the surface of the conductor in what is called the 'conductivity skin depth'. Due to nanotube special structures, there is very little possibility for an electron to move in the same manner as in a macro metal wire. In case of short nanotubes, the electron movement is made by ballistic transport through the nanotubes with path length of about 100 nm in the tubular structure [3] or via tunnelling across gaps [19] with an associated high tunnelling resistance.

Following these particular electrical properties of the nanotubes are the quantum and electrostatic capacitances. For a macro metal wire an electrostatic capacitance can be defined between the wire and a ground plane, and can be approximated by a 1-D model when the distance between the wire and the ground is larger than the length of the wire. This approximated value is 50 aF μm^{-1} [15]. A carbon nanotube can be assimilated to a quantum 1-D electron gas, and, due to quantum physics properties, an electron can only be added under specific conditions, leading to an average 1-D quantum capacitance of $C_Q \approx 100$ aF μm^{-1} [15].

Next we consider the wave velocity in a carbon nanotube, as previously mentioned. This wave velocity is lower than in a macro wire antenna. Experiment and theoretical calculations have shown that this wave velocity was in the order of the Fermi velocity (v_f) rather than the speed of light. For a carbon nanotube the propagation velocity is about $6.2v_f = 0.02c$ [17].

Lastly the characteristic impedance and the damping mechanisms associated with the carbon nano-tube are discussed. Considering the kinetic inductance $L_K \approx 16$ nH μm^{-1} and the quantum capacitance, the characteristic impedance is equal to the quantum resistance which is $\sqrt{L_K/C_Q} \cong 12.6$ kΩ. Due to the small size of the structures, damping needs to be considered as well and is so far represented as a distributed resistance per unit of length.

3. Nano-antennas

3.1. Introduction

The feasibility of using a carbon nanotube as an antenna is now being studied by a few research groups over the world which has already given us an insight of the possibilities opening of such nano-sized communicating devices. Nanotubes exhibit particular electrical properties compared with a copper wire of same length and diameter. The first relevant point is the nanotube conductivity that has been measured approximately equal to twice the one of the copper: 10^8 S m^{-1} for a carbon nanotube diameter of 1.5 nm and 5.8×10^7 S m^{-1} for the bulk conductivity of copper [20]. The second point is the displayed wave propagation speed in carbon nanotubes that starts around 1/50th of the light speed and seams to decrease to 1/100th as the frequency excitation approaches resonance [17].

Author's personal copy

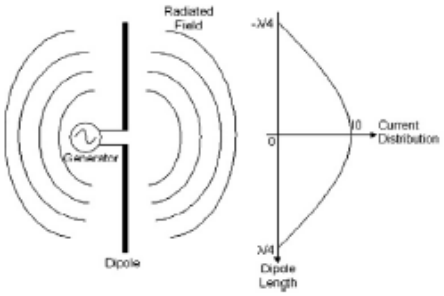


Fig. 7. Current distribution and free-space radiated field of a half-wavelength dipole [18].

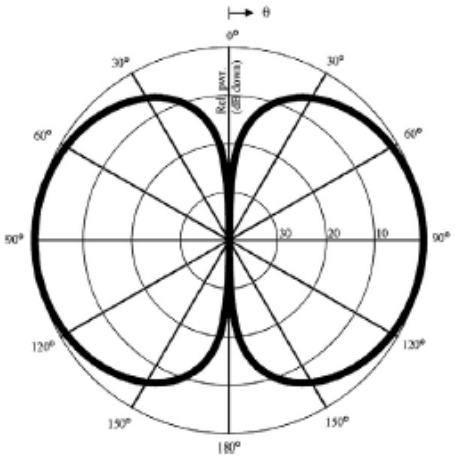


Fig. 8. E-plane typical wire antenna pattern [23].

The typical length of nanotubes enables to consider realistically THz and GHz antennas for wireless communication between the macro-world on the one hand and the nano-devices on the other hand. This section is focused on the feasibility of GHz antennas using nanotubes as resonant dipoles. Already several theoretical studies of the fundamental electrical properties of carbon nanotubes have been made and some have raised major technical issues that might strongly limit the potential efficiency of such antenna. These technical issues are mainly the ohmic losses and the high relaxation frequency of the electron [17,18,21,22]. Nevertheless, no experimental demonstration of nano-antennas have ever been realized to confirm or invalidate these theoretical studies.

Before going through the physics of nano-antenna, we briefly introduce separately the basics of antennas and then of nanotubes. Thus, we will go from the macro wire antenna model to the nano wire antenna model and review the similar and different parameters between the both scales.

3.2. *Basics of linear wire antenna theory*

Wire antennas are the oldest and most versatile antennas suited for various applications. It is a simple device to understand most of the radiation mechanism and the dipole structure simplification of radiating elements. The typical configuration is made up of two conductor wires, with a length of $\lambda/2$, as shown in Fig. 7.

The current distribution in the conductor wire can be considered in one dimension, and its time variation will generate a radiated electromagnetic field in the surrounding space. Maxwell's equations lead to the classical relation between the current variation $I(z)$ and the radiated field E_θ in the far field space [23]:

$$E_\theta = \mathrm{i}\eta \frac{k\mathrm{e}^{-\mathrm{i}kr}}{4\pi r} \sin\theta \left[\int_{-l/2}^{+l/2} I(z)\mathrm{e}^{\mathrm{i}kz\cos\theta}\,\mathrm{d}z \right]$$

where η is the characteristic impedance of free space, k the constant propagation, l the dipole length, r and θ the radius and elevation angle coordinates. The 3-D emission pattern is said to be omni-directional because it only depends on θ. Fig. 8 shows the typical radiation pattern of a wire antenna in a plane containing the z axis.

Along with the radiation pattern is a set of other key parameters that are used to quantify an antenna and its performances [23]:

Author's personal copy

- the input impedance is the impedance the power input circuit will have to match in order to transmit the maximum power to the radiating device;
- the gain is the ratio of intensity, in a given direction, to the radiation intensity that would be obtained if the power accepted by the antenna was radiated isotropically. The radiation intensity corresponding to the isotropically radiated power is equal to the input power accepted by the antenna divided by 4π;
- the directivity is the ratio of the radiation intensity in a given direction from the antenna to the radiation intensity average over all directions;
- the radiation efficiency which is the ratio of the radiated power over the accepted power and is a dimensionless combined factor of both the conduction efficiency (losses through metal conduction) and dielectric efficiency (losses through propagation in dielectric space).

3.3. Toward carbon nanotube based nano-antennas

It ensues from the electrical transport properties described in Section 2 the theoretical behaviour of a nano-tube antenna. These characteristics are the same ones we acknowledge for a macro antenna but with very different values. To illustrate the impact of the difference of size between a traditional macroscopic wire antenna and a nanometric antenna, we have made a preliminary simulation of the radiation of a nanometric diameter wire antenna (diameter = 30 nm), made of a virtual material having the same conductivity of carbon nanotubes (10^8 S m^{-1}). The dipole length has been adjusted to fit a resonant frequency around 100 GHz. The simulation results are presented in Fig. 9. It is worth noting that the gain and radiation efficiency obtained with this nano-sized antenna are far below the typical values obtained with a macro-sized wire. The matching impedance is also far higher.

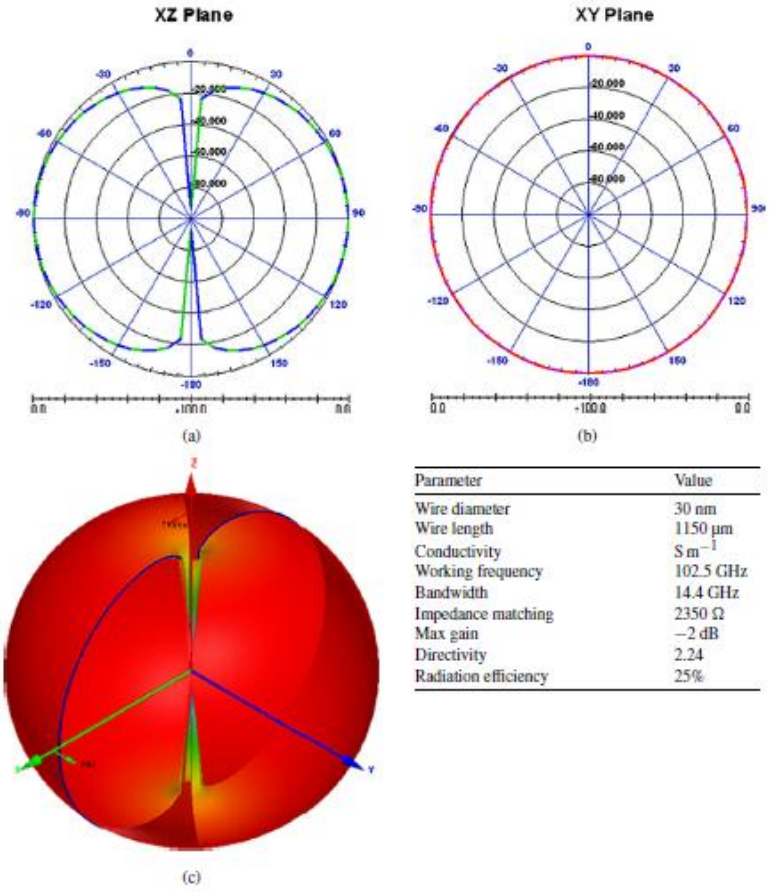
One of the most apparent changes in characteristics is the wave propagation velocity and the resonance frequency. In a macro model, the resonance wave velocity is equal to the speed of light whereas it goes otherwise for a nanotube antenna. As was stated earlier, the wave propagation velocity in a nano-tube transmission line is around 0.02c. When used as a resonant dipole, the wave resonance in the nanotube can be associated with plasmons by the transmission line developed in [18], where the propagation velocity of the antenna was found to be $v_p = 3v_f = 0.01c$ [17]. However, this is only a theoretical rough approximation of the reality. Further calculation and experiment give value around $0.015c$ and $0.017c$ [17]. Consequently, the length of a nanotube antenna should be in the order of 10 to 25 μm for a 100 GHz resonant frequency.

Another characteristic to be considered is the input impedance. As a macro antenna, this impedance was around $50\Omega \pm 50\%$; as a nanotube antenna, it is at least equivalent to the quantum resistance of the carbon nano-tube, around 12.6 kΩ. This is a basic characteristic impedance that will characterize all nano-sized transmitting devices, whether a transmission line or an antenna or any other component. Apart from the size matching between a nanotube and the feeding microscopic lines, the impedance matching between them is a key issue to be solved to make the nanotube antenna a reality.

Another severe issue to be addressed in the route toward a carbon nanotube antenna is its low predicted radiation efficiency. Indeed, a carbon nanotube antenna will show a very low gain and radiation efficiency compared to macro antennas [17]: the author of reference [18] predicts a gain as low as −60 to −70 dB for a nanotube antenna working around 100 GHz. This is due to a strong damping at this nanometric dimension, to be directly connected to the relaxation frequency of the electrons in the carbon nanotube, which can vary from 50 GHz to 1 THz [22]. Thus, it is now unbelievable that carbon nanotube could work at frequencies lower than 50 GHz. However, at higher frequencies, many applications can be considered, as mentioned in the conclusion.

One of the major worldwide objectives is to achieve antennas able to communicate with nanometric components or bodies, by wireless means. Indeed, the potential high-density nano-electronics possible with nanowires and nanotubes will loose their interests if they are contacted with the microscopic, lithographically, for instance. One potential solution to this problem is to use nano-antennas, which can be densely packed. If each interconnect is connected to a nanotube of a different length (hence different resonant frequency), then the problem of multiplexing input/output signals can be translated from the spatial domain to the frequency domain, hence overcoming inherent limitations to make electrical contact to nano-systems. Another application is in the area of sensing. For example, nano-devices could be use as chemical and biological sensors or activators. This would be an RFID technique, where each component of the wireless systems was made of a nanodevice, including the antenna. Such devices even potentially could be implanted into living organisms to monitor biological activity in real time in vivo.

Author's personal copy



Parameter	Value
Wire diameter	30 nm
Wire length	1150 μm
Conductivity	S m^{-1}
Working frequency	102.5 GHz
Bandwidth	14.4 GHz
Impedance matching	2350 Ω
Max gain	−2 dB
Directivity	2.24
Radiation efficiency	25%

Fig. 9. Simulation of a nanometric diameter wire antenna. (a)–(c) Radiation patterns in the XZ plan, XY plan and in 3-D; (d) table of the key parameters.

4. Carbon nanotube based Nano Electro Mechanical Systems (NEMS)

4.1. Introduction

Over the past several years, developments in Micro Electro Mechanical Systems (MEMS) have promoted exciting advancements in the field of microwave switching. Micromechanical switches were first demonstrated in 1979 [24] as electrostatically actuated cantilever arms used to switch low-frequency electrical signals. Since then, these switches have demonstrated useful performance at microwave frequencies. MEMS technology introduction in the range of microwaves presents a considerable interest for the circuit designers, because it allows the realization of switches with electrostatic command. Performance is as follows: (i) Cost and size are similar to those based on PIN diodes or FET; (ii) Insertion losses are very low compared to diodes or FET devices and compete with ferrite (<-0.1dB @10 GHz); (iii) Current consumption is negligible (<1 μW).

Author's personal copy

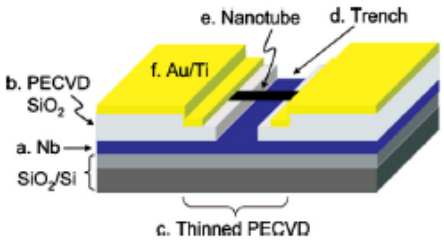


Fig. 10. Schematic of the CNT based switch [34].

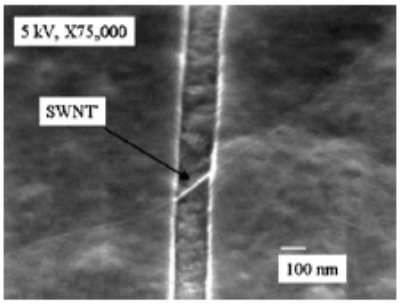


Fig. 11. High-magnification SEM micrograph shows a single nanotube bridging the 130 nm wide trench [34].

As microfabrication is pushed into the nano regime, MEMS research has transitioned into nano-electro-mechanical systems (NEMS). A NEMS switch can offer several advantages over traditional microelectronic switches and newer technologies such as ferroelectric, magnetoresistive and phase change switches, including low power operation, negligible off-state leakage and scalability. For defence and space exploration applications, resistance to radiation and electromagnetic disturbances are particularly important advantages realized by a NEMS switch. In particular, NEMS switches are seen as key devices for fast switching of microwave signals since they can be operated at much higher frequencies than their micrometric counterparts.

Several technical realizations and application perspectives have been reported in the recent literature, and it is noticeable that a majority of them are based on carbon nanotube. They are indeed ideal candidates for the bottom-up fabrication of NEMS devices due to their well-characterized chemical and physical structures, and exceptional mechanical and electrical properties (see Section 1).

First, the size property of carbon nanotubes allows one to decrease both the actuation voltage and the switching time. Secondly, the exceptional electrical and mechanical properties allow one to sustain high RF power. Moreover, it is possible to increase the integration density of such devices. Decreasing the actuation voltage will also permit a decrease in size and prize of control circuit. It has to be pointed out that some prototype of carbon nanotube based NEMS have already been demonstrated such as nano-tweezers [25], random access memory [26], actuators [27], nano-relay [28] and switches (see Section 4.2).

4.2. Carbon nanotube based switches – a review

Several teams have already achieved carbon nanotube based switches with low actuation voltage. Most structures are based on a suspended CNT between two electrodes [29–34] and reported actuation voltages are in the range 1–10 V. Figs. 10 and 11 show an example of a switch based on a CNT suspended between two electrodes realized by A.B. Kaul and co-workers [34]. In this particular case, the pull voltage is less than 5 V.

Switches based on vertically aligned CNTs (Fig. 12) have also been reported [35,36] with actuation voltage around 20 V (Fig. 13). The actual values reached by these NEMS switches in terms of actuation voltage and switching time are nowadays comparable to those of MEMS, but we expect that they will dramatically decrease in the upcoming years respectively down to less than 1 V and below 50 ns.

However, these devices were never related to microwave switching. It is important to notice that the reversible state of such CNT NEMS has been demonstrated in these papers. A careful control of the forces involved is necessary to design a switch with a volatile behaviour. Only one paper reports the switching time of a carbon nanotube based switch, down to a few nanoseconds [34]. Compared to state of the art MEMS devices, the switching time of such CNT switches (air bridge) is several orders of magnitude smaller. In fact, the ultra low mass, exceptionally high spring constant and extremely low capacitance of the CNT all contribute to the small response and rise time in the CNT switch.

Concerning the high power handling capability of such carbon nanotube based switches, it is defined as the power at which the MEMS device fails to operate properly. The two types of failures are RF latching and RF self-actuation. RF

Author's personal copy

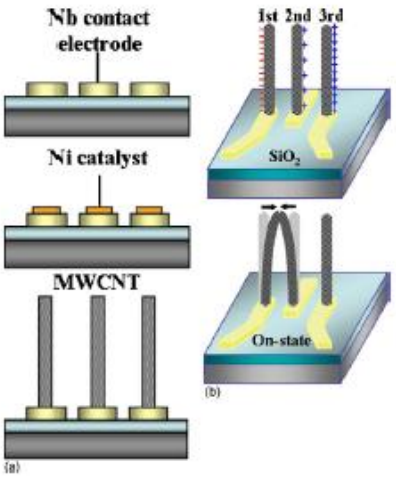


Fig. 12. A schematic illustration of the CNT-based electromechanical switch device. (a) Schematic of fabrication process: Three Nb electrodes were patterned by electron-beam lithography, sputtering, and lift off. Similarly, Ni catalyst dots were also formed on the predefined locations for the growth of MWCNTs. The MWCNTs were then vertically grown from the Ni catalyst dots using dc-PECVD. (b) Illustration of CNT-based electromechanical switch action [35].

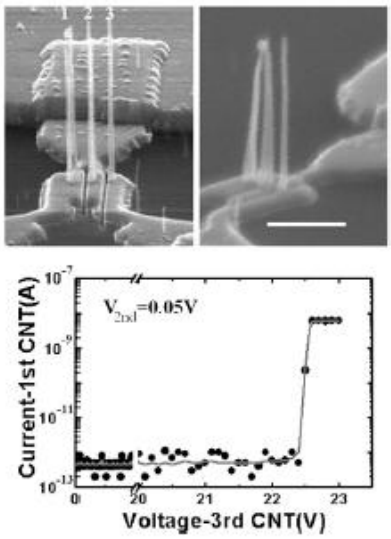


Fig. 13. Electromechanical switch devices consisting of three MWCNTs. (a) SEM image of the device: The length and diameter of the MWCNTs are about 2 μm and 70 nm, respectively. (b) Current-voltage characteristics of switching action in an ambient environment; the electromechanical movement of MWCNTs provides the on and off states. The scale bar corresponds to 1 μm [35].

latching is a situation by which the applied RF power provides enough force on the membrane to hold the switch down when it should have released (i.e. when DC bias is removed). This situation occurs when RF power is continuously (CW) applied to the MEMS circuit. Such a failure means that once a device is actuated, it will not release until the RF power level is lowered below its threshold point. Once the power is lowered, the device is no longer in a failure mode and will continue to operate normally. RF self-actuation is a situation in which the high RF power actually creates enough potential to pull the membrane down into the actuated position without applying a DC bias across the switch. In this case, as soon as the RF power is turned on, all RF MEMS switches in the signal path will be actuated regardless of the intended state. As with the latching failure, if the RF power level is reduced, the switch will behave normally with no ill effects caused by the self-actuation. Another problem is the stiction that occurs when the membrane is stuck irreversibly to the substrate. Here with CNTs we believe that this will no longer be a problem because the contact surfaces are dramatically reduced and charging effects (in the dielectric) will be dramatically reduced.

4.3. Carbon nanotube based switches – our approach

Our approach at Thales Research and Technology is to develop the fabrication process of a RF nano switch based on vertically aligned carbon nanotubes. This kind of switch will consist of CNTs perpendicular to the substrate. The goal is to develop a reproducible technology to fabricate in parallel identical CNT switches on the same substrate and with high integration density.

We are already working on the design of RF nano switches based on carbon nanotubes. Two different architectures, which have already demonstrated efficiency for MEMS component at the micro scale, are imaginable to be studied: a series NEMS switches using ohmic contact between CNTs and a capacitive CNTs based switches implemented in shunt configuration.

Author's personal copy

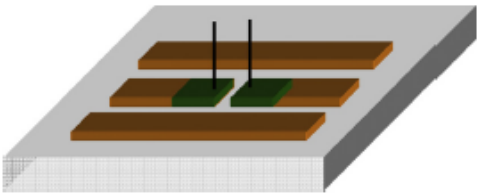


Fig. 14. Proposed NEMS ohmic switch architecture in isolation state.

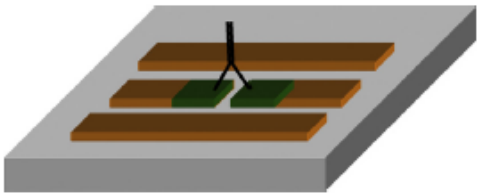


Fig. 15. Proposed NEMS ohmic switch architecture in transmission state.

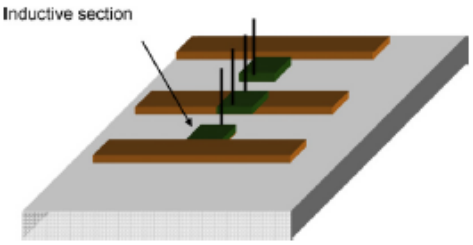


Fig. 16. Proposed NEMS shunt switch architecture in transmission state.

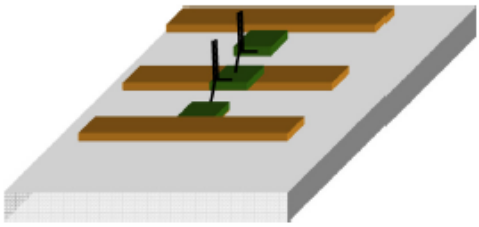


Fig. 17. Proposed NEMS shunt switch architecture in isolation state.

RF NEMS ohmic switch can be simply designed implementing CNTs in both extremity of a coplanar waveguide RF line discontinuity, as shown on Fig. 14. The ohmic contact between each or group of nanotube will allow closing the switch and transmitting the RF signal across the component (see Fig. 15).

For RF NEMS shunt switch architecture, capacitive contact between carbon nanotubes can be considered (Fig. 16). In this case a simple approach will be to symmetrically load a coplanar waveguide RF line using couples of CNTs in so far as to reflect the propagating RF signal by capacitively shunting the component when carbon nanotubes are actuated (see Fig. 17).

Electromagnetic FEM (Finite Element Method) and MOL (Method Of Lines) simulations with the constraint of CNTs actuation requirement (proximity, biasing network needed...) are investigated. To achieve the expected performance in the frequency band, the design solution will be envisaged as the introduction of high inductive section in series with nanotube to perform an LC resonance in or close to the targeted frequency band allowing it to reach higher isolation level in the switch isolation state. The thermal behaviour of design switches will be especially studied based on thermal (REBECCA, ANSYS) models and coupled Electromagnetic/Thermal simulations.

All of that coupled with MEMS fabrication experience developed at Thales [37] will allow us to design and then to fabricate high performance RF switches.

We have already demonstrated that very homogeneous carbon nanotube arrays can be grown by DC plasma enhanced chemical vapour deposition (DC-PECVD) [38]. Fig. 18 shows an array composed of 5 µm height and 50 nm diameter multiwall CNTs spaced by 10 µm [39]. This array shows a very good homogeneity with a standard deviation of 4% on CNT diameter and 7% on CNT length. Thus, this growth process will allow the parallel fabrication of identical CNT switches, with the same characteristics, on the same substrate.

Due to strong C–C covalent bonds, CNTs are much less sensitive to electromigration than metallic nanowires and are able to carry very high currents. Due to this unique property, each CNT of the array shown on Fig. 18 can carry a high current density of 10^8 A cm^{-2} (2 mA for a 50 nm diameter CNT). We have measured this on such carbon nanotubes [40].

We are at the beginning of this activity based on carbon nanotubes but we have already achieved some realizations as the design of such RF NEMS and the fabrication of vertically aligned carbon nanotubes. In the future, we will demonstrate the fabrication of CNT switches and the switching of microwave signals.

Author's personal copy



Fig. 18. SEM picture of an array of 5 µm height and 50 nm diameter vertically aligned carbon nanotubes spaced by 10 µm.

5. Conclusion

In summary, we have reviewed the main physical properties of CNTs and two of their potential microwave applications as nano-antennas and nano-switches. These kinds of applications can be enabling elements for communication networks and other applications requiring ultraminiaturized, lightweight components that operate at low voltage, low power, and high speed. Switching has been demonstrated with pull voltages of a few volts, and speed measurements have revealed switching times of a few nanoseconds. Nevertheless, transmission of microwave signals through this type of device still has to be assessed. Concerning the antenna prospects, an excess inductance of the order 10 time of the inductance of a thin-wire antenna has been observed. This provides to CNT antennas this unique property to require a wavelength of current excitation 100 times smaller than the wavelength of the far-field radiation. However, the issue of impedance matching between the nanotube and free space or microelectronics devices still has to be addressed, as well as the poor predicted radiation efficiency. With future, higher mobility nanotubes, better performance would be possible; although, prospects of approaching efficiencies of the order of unity seem dim with the simple thin-wire geometry. For this, alternative geometries may be required.

For industrial research laboratories such as Thales Research & Technology, this kind of long-term research based on new concepts are of high risk but high pay off, by leading to breakthroughs in electronics. There is actually a need for alternative technologies for the realization of a new generation of communication architectures. These technologies present many key features such as high working frequencies, low power consumption and miniaturization which will lead to an overall low cost operation in onboard or mobile applications. They are anticipated to be used in applications concerning fields like mobile and satellite telecommunications and transports, as illustrated by the following examples:

- In the perspective of new standards for mobile phone, data rates much higher than 100 Mb s^{-1} at frequencies as high as 66 GHz (WiMax 802.16c norm) will be needed and CNT based devices are of high potential interest as low cost, very efficient and miniaturized broadband devices for future generations of mobile phones;
- On board entertainment (V-Band) would benefit from wireless high data rate distribution in order to reduce the need for existing electrical cables in such systems. Miniaturized nanoscale components could hence greatly diminish the weight and size of the whole system;

Author's personal copy

– In the field of automotive cruise control (E-Band), strategy analysis predicts that short and long-range distance warning systems will become increasingly common features on passenger vehicles. Two types of sensor, infrared sensors and long-range radar sensors, are particularly well suited to automotive cruise control. However, radar sensors are almost entirely unaffected by weather conditions as opposed to infrared sensors. Moreover, they can be mounted concealed in the front of the vehicle. Radar systems in E-band allow very small antenna sizes, permitting them to be installed almost anywhere;
– Security systems (W-Band) are necessary in air transport to increase safety during night and/or in poor weather and low visibility conditions. In addition to existing infrared systems, microwave radar systems, in which nanoscale components will play a crucial role, allow to extend enhanced situation awareness to 'all-weather' conditions. In the future, these new microwave systems could permit the evaluation of the potential obstacles in the approach path and weigh their priority in order to realize an autonomous approach and landing.

References

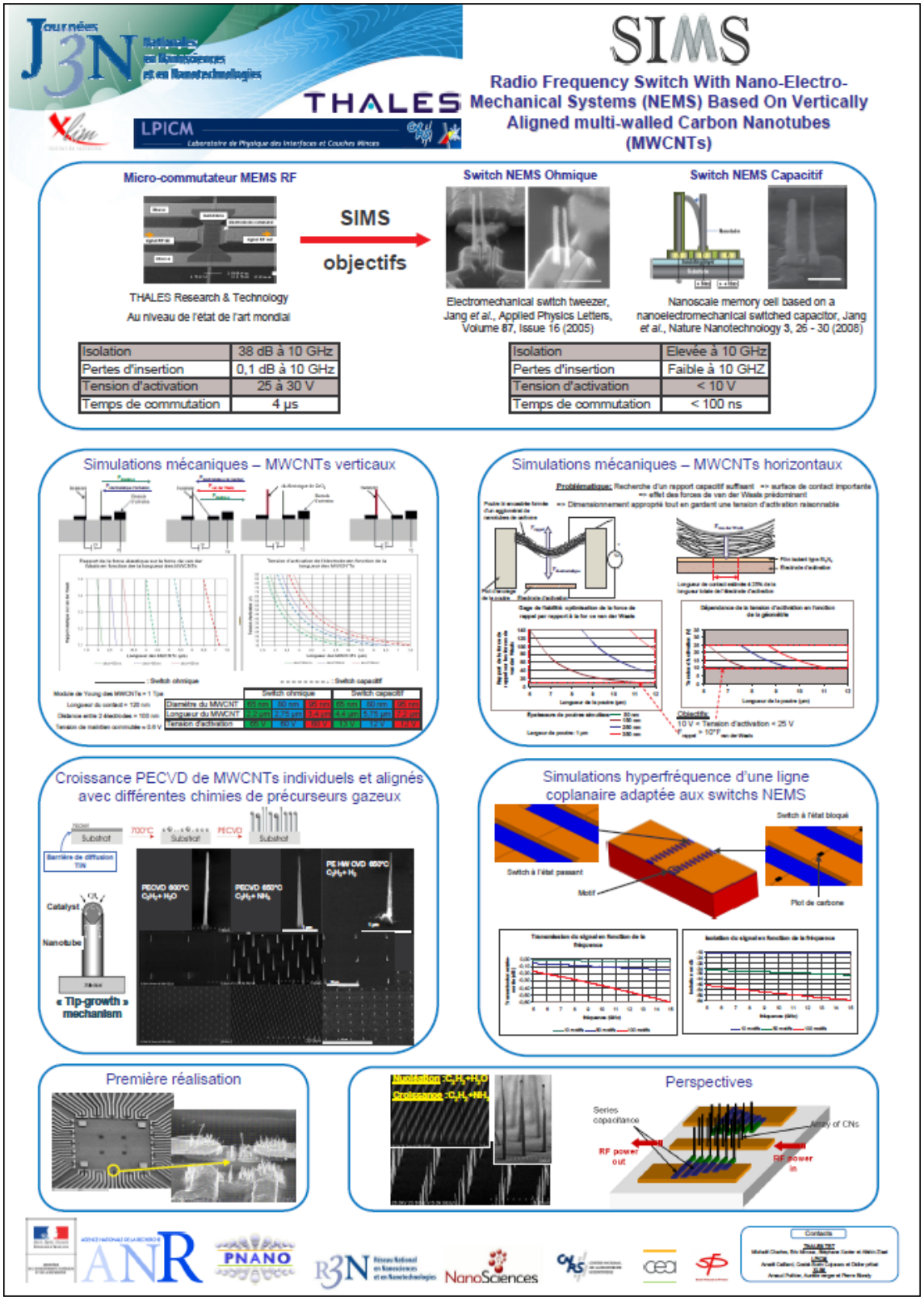
[1] S. Iijima, Helical microtubules of graphitic carbon, Nature 354 (1991) 56–58.
[2] A. Raychowdhury, K. Roy, Modeling of metallic carbon-nanotube interconnects for circuit simulations and a comparison with Cu interconnects for scaled technologies, IEEE T. Comp. Aided Design 25 (1) (2006) 58–65.
[3] J. Bernholc, D. Brenner, M. Buongiorno Nardelli, V. Meunier, C. Roland, Mechanical and electrical properties of nanotubes, Annu. Rev. Mater. Res. 32 (2002) 347–375.
[4] F. Arai, C. Ng, P. Liu, L. Dong, Y. Imaizumi, K. Maeda, H. Maruyama, A. Ichikawa, T. Fukuda, Ultra-small site temperature sensing, by carbon nanotube thermal probes, in: 2004 4th IEEE Conference on Nanotechnology.
[5] K. Zhang, M.M.F. Yuen, N. Wang, J.Y. Miao, D.G.W. Xiao, H.B. Fan, Thermal interface material with aligned CNT and its application in HB-LED packaging, in: Electronic Components and Technology Conference, 2006. Proceedings. 56th, 30 May–2 June 2006, pp. 177–182.
[6] E. Pop, S. Sinha, K.E. Goodson, Heat generation and transport in nanometer-scale transistors, Proc. IEEE 94 (8) (2006) 1587–1601.
[7] A. Loiseau, P. Launois, P. Petit, S. Roche, P. Salvetat (Eds.), Understanding Carbon Nanotubes From Basic to Application, Springer, 2006, pp. 428–432.
[8] A. Shakouri, Nanoscale thermal transport and microrefrigerators on a chip, Proc. IEEE 94 (8) (2006).
[9] D.-A. Borca-Tasciuc, L. Pietruszka, T. Borca-Tasciuc, R. Vajtai, P.M. Ajayan, Thermal transport measurements in multi-wall carbon nanotube strands using the 3w method, in: IEEE 21st IEEE SEMI-THERM Symposium, 2005.
[10] C.K.M. Fung, W.I. Li, Ultra-low-power and high-frequency-response carbon, nanotube based MEMS thermal sensors, in: Proceedings of the 2003 IEEE/RSJ Inter. Conference on Intelligent Robots and Systems, Las Vegas, NV, October 2003.
[11] W. Steinhogl, G. Schindler, G. Steinlesberger, M. Traving, M. Engelhardt, Comprehensive study of the resistivity of copper wires with lateral dimensions of 100 nm and smaller, J. Appl. Phys. 97 (2) (2005).
[12] S. Li, Z. Yu, P.J. Burke, Electrical properties of 0.4 cm long single walled carbon nanotubes, Nano Lett. 4 (10) (2004) 2003–2007.
[13] A. Naeemi, G. Huang, J.D. Meindl, Performance modelling for carbon nanotube interconnects in on-chip power distribution, in: Electronic Component and Technology Conference, 2007. ECTC '07. Proceedings. 57th, May 29 2007–June 1 2007, pp. 420–428.
[14] Z. Yu, P.J. Burke, Microwave transport in metallic single-walled carbon nanotubes, Nano Lett. 5 (7) (2005) 1403–1406.
[15] P.J. Burke, An RF circuit model for carbon nanotubes, IEEE T. Nanotechnologies 2 (1) (January 2003) 55–58; With erratum in IEEE T. Nanotechnologies 3 (2) (March 2004) 331.
[16] P.J. Burke, Luttinger liquid theory as a model of the gigahertz electrical properties of carbon nanotubes, IEEE T. Nanotechnologies 1 (3) (May 2002) 129–144; With erratum in IEEE T. Nanotechnologies 3 (2) (March 2004) 331.
[17] G.W. Hanson, Fundamental transmitting properties of carbon nanotube antennas, IEEE T. Antennas Propagation 53 (11) (November 2005).
[18] P.J. Burke, S. Li, Z. Yu, Quantitative theory of nanowire and nanotube antenna performance, IEEE T. Nanotechnology 5 (4) (July 2006).
[19] D.K. Ferry, S.M. Goodnick, Transport in Nanostructures, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1999.
[20] P.J. Burke, Z. Yu, C. Rutherglen, Carbon nanotubes for RF and microwaves, in: 13th GAAS@Symposium – Paris, 2005.
[21] N. Fichtner, P. Russer, On the possibility of nanowire antennas, in: Proc. of the 36th European Microwave Conference, Manchester, 2006.
[22] G.Y. Slepyan, S.A. Makismenko, Electrodynamics of carbon nanotubes: Dynamic conductivity, impedance boundary conditions and surface wave propagation, Phys. Rev. 2 (1) (15 December 1999).
[23] C.A. Balanis, Antenna Theory, Analysis and Design, third ed., Wiley-Interscience, 2005.
[24] K.E. Petersen, Micromechanical switches on silicon, IBM J. Res. Develop. 23 (4) (1979) 376.
[25] P. Kim, C.M. Lieber, Nanotubes nanotweezers, Science 286 (1999) 2148.
[26] T. Rueckes, et al., Carbon nanotube-based nonvolatile random access memory for molecular computing, Science 289 (2000) 94.
[27] R.H. Baughman, et al., Carbon nanotube actuators, Science 284 (1999) 1340.
[28] L.M. Jonsson, et al., High frequency properties of a CNT based nanorelay, Nanotechnology 15 (2004) 1497.
[29] S.W. Lee, et al., A three-terminal carbon nanorelay, Nano Lett. 4 (2004) 2027.
[30] S.N. Cha, et al., Fabrication of a nanoelectromechanical switch using a suspended carbon nanotube, Appl. Phys. Lett. 86 (2005) 083105.
[31] S. Bhunia, et al., Complimentary nano-electromechanical carbon nanotube switches, ECS Trans. 3 (10) (2006) 375.
[32] E. Dujardin, et al., Self-assembled switches based on electroactuated multiwall nanotubes, Appl. Phys. Lett. 87 (2005) 193107.
[33] R. Lefèvre, et al., Scaling law in carbon nanotube electromechanical devices, Phys. Rev. Lett. 95 (2005) 185504.
[34] A.B. Kaul, et al., Electromechanical carbon nanotube switches for high-frequency applications, Nano Lett. 6 (2006) 942.

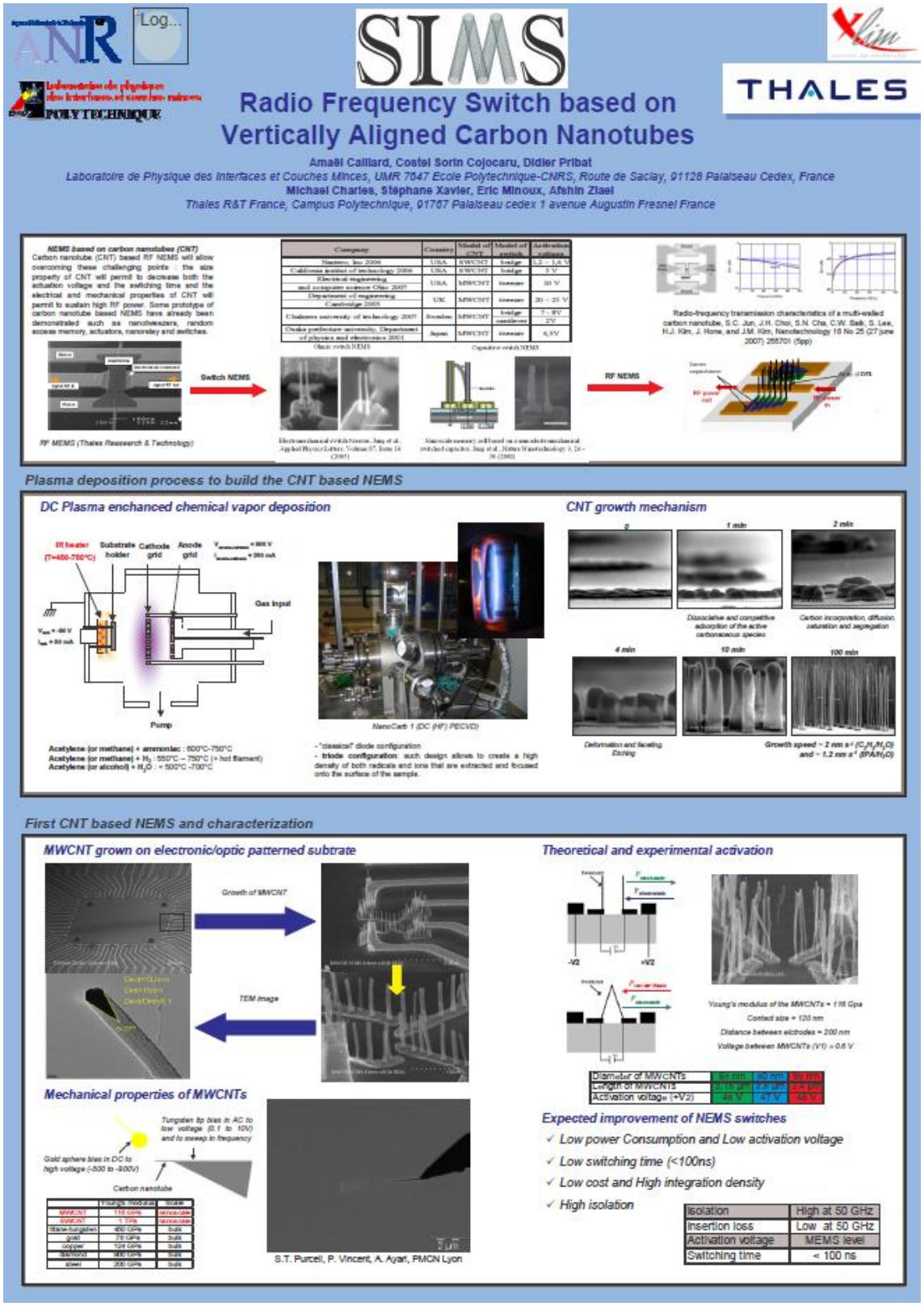
Author's personal copy

[35] J.E. Jang, et al., Nanoelectromechanical switches with vertically aligned carbon nanotubes, Appl. Phys. Lett. 87 (2005) 163114.
[36] B.A. Cruden, et al., Vertically oriented carbon nanofiber based nanoelectromechanical switch, IEEE Trans. Nanotech. 5 (2006) 1536.
[37] A. Ziaei, RF-MEMS switches and application (invited), in: IEEE International Microwave Symposium MTT-S 2005.
[38] M. Chhowalla, J. Appl. Phys. 90 (2001) 5308.
[39] K.B.K. Teo, Nanotechnology 14 (2003) 204.
[40] E. Minoux, O. Groening, K.B.K. Teo, S.H. Dalal, L. Gangloff, J.-P. Schnell, L. Hudanski, I.Y.Y. Bu, P. Vincent, P. Legagneux, G.A.J. Amaratunga, W.I. Milne, Achieving high-current carbon nanotube emitters, Nano Lett. 5 (11) (2005) 2135.

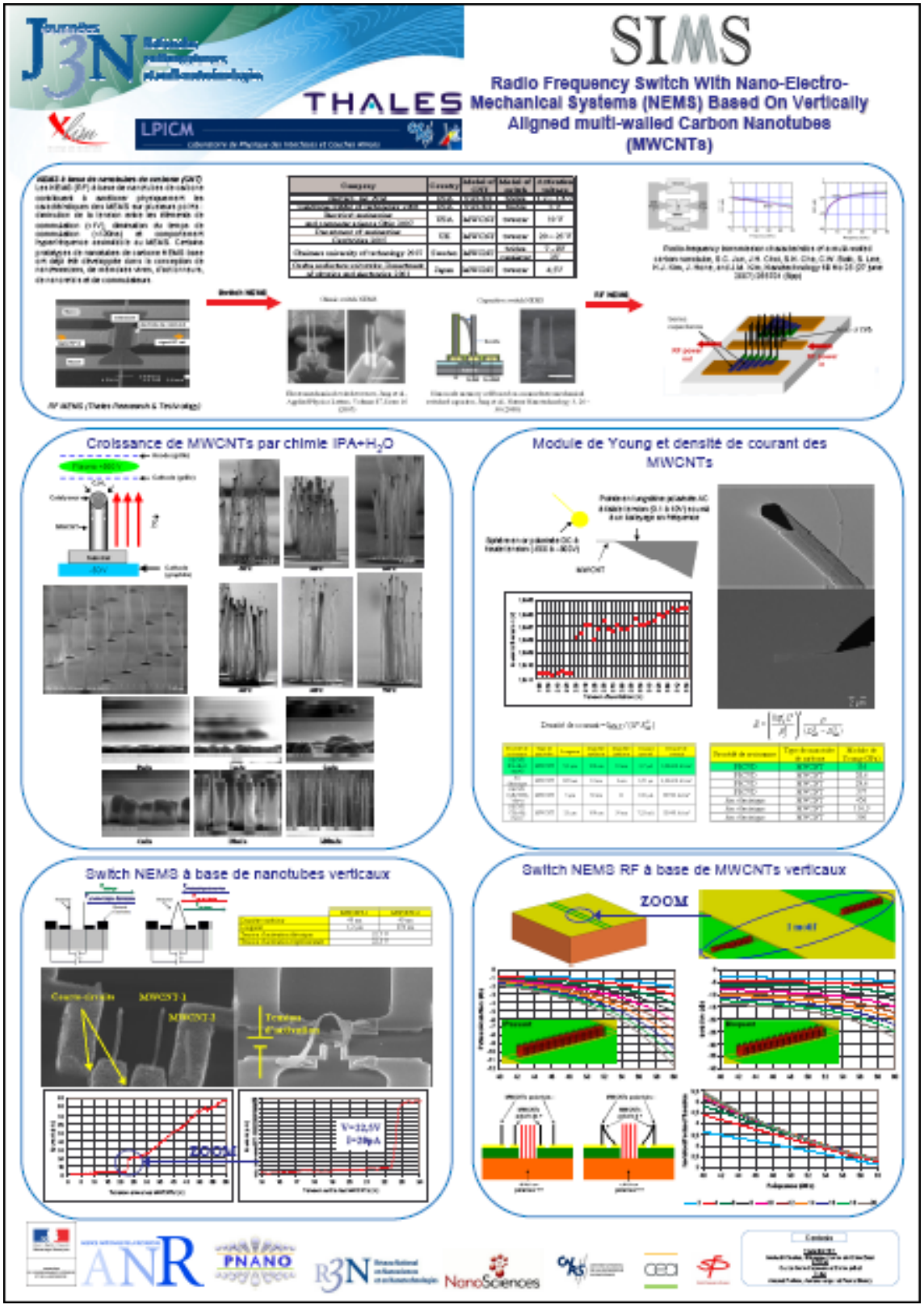
Posters et conférences

J3N Grenoble 2008




SIMS
Radio Frequency Switch based on Vertically Aligned Carbon Nanotubes
THALES
Amaël Caillard, Costel Sorin Cojocaru, Didier Pribat
Laboratoire de Physique des Interfaces et Couches Minces, UMR 7647 Ecole Polytechnique-CNRS, Route de Saclay, 91128 Palaiseau Cedex, France
Michael Charles, Stéphane Xavier, Eric Minoux, Afshin Ziaei
Thales R&T France, Campus Polytechnique, 91767 Palaiseau cedex 1 avenue Augustin Fresnel France
NEMS based on carbon nanotubes (CNT)
Switch NEMS
RF NEMS
RF MEMS (Thales Reasearch & Technology)
Plasma deposition process to build the CNT based NEMS
DC Plasma enchanced chemical vapor deposition
IR heater
Substrate holder
Cathode grid
Anode grid
Gas input
Pump
NanoCarb 1 (DC (HF) PECVD)
CNT growth mechanism
First CNT based NEMS and characterization
MWCNT grown on electronic/optic patterned subtrate
Growth of MWCNT
TEM image
Theoretical and experimental activation
Mechanical properties of MWCNTs
Tungsten tip bias in AC to low voltage (0.1 to 10V) and to sweep in frequency
Gold sphere bias in DC to high voltage (-500 to -900V)
Carbon nanotube
S.T. Purcell, P. Vincent, A. Ayari, PMCN Lyon
Expected improvement of NEMS switches
✓ Low power Consumption and Low activation voltage
✓ Low switching time (<100ns)
✓ Low cost and High integration density
✓ High isolation
Isolation High at 50 GHz
Insertion loss Low at 50 GHz
Activation voltage MEMS level
Switching time < 100 ns

J3N Toulouse 2009



Brevet

Référence interne Thales: TRT2923
Date du dépôt : 15 décembre 2009
Numéro d'enregistrement national : 09 06065
Au nom de : THALES
Référence M&C : 66353 (Réf provisoire : 11165)
Titre : Composant RF comprenant un commutateur à base de nanotubes
Invention de : A. ZIAEI, M. CHARLES
Rédaction de : S. ESSELIN

Liste des figures

Figure 1 : Carbone sous 4 formes allotropiques : (a) graphite, (b) diamant, (c) fullerène et (d) amorphe. 15
Figure 2: Représentation d'un nanotube de carbone monoparoi (SWCNT) et multiparoi (MWCNT) []. Image TEM de MWCNTs, (a) 5 feuillets, (b) 2 feuillets, (c) 7 feuillets [2] et illustration de la distance de van der Waals entre deux feuillets de graphène []. 16
Figure 3 : (a et b) MWCNT dont les plans graphitiques sont configurés en une structure dite « bambou ». (c et d) MWCNT dont les plans graphitiques sont configurés en une structure dite « poupées russes ». [10] sauf Figure 3d (Image TEM Thales TRT Palaiseau France). 17
Figure 4 : (a) Structure d'un plan de graphène, le réseau hexagonal est décrit à partir des deux vecteurs de bases $\overrightarrow{a_1}$ et $\overrightarrow{a_2}$ []. (b) Les trois différentes hélices d'un nanotube de carbone []. . 18
Figure 5 : (a) Procédé de croissance de nanotubes de carbone par arc électrique [] et (b) image TEM []. 19
Figure 6 : (a) Procédé de croissance de nanotubes de carbone par ablation laser [17] et (b) image TEM []. 20
Figure 7 : Images TEM de la particule catalytique agglomérée au bout du MWCNT et de la qualité graphitique des parois. 21
Figure 8 : (a) Procédé de croissance de nanotubes de carbone par CVD [15] et (b) image MEB. 22
Figure 9 : Modes de croissance CVD par le bout et par la base des CNTs [17]. 22
Figure 10 : (a) Procédé de croissance de nanotubes de carbone par PECVD. (b) Image MEB de nanotubes de carbone après synthèse PECVD. (c) Longueur du nanotube de carbone en fonction de la proportion du gaz précurseur C_2H_2 par rapport au gaz réducteur []. (d) Longueur du nanotube de carbone en fonction de la pression des gaz dans le réacteur de croissance PECVD [21]. 23
Figure 11 : (a) Variation du module de Young de MWCNTs en fonction de leur diamètre [30], (b) Image TEM d'un MWCNT en résonance [24]. 26
Figure 12 : (a) Largeur de la bande d'énergie interdite Eg d'un CNT semi-conducteur et métallique []. (b) Comportement métallique ou semi-conducteur d'un CNT en fonction de son vecteur chiral (n,m) et son diamètre []. (c) Largeur de la bande d'énergie interdite Eg d'un CNT semi-conducteur en fonction de son diamètre. (d) Résistance d'un CNT en fonction de son diamètre (le trait plein correspondant au résultat théorique et les points noirs à des valeurs expérimentales) []. 28
Figure 13 : (a) Conduction du courant dans un CNT en fonction de la tension appliquée pour différentes longueurs de circulation de courant []. (b) Conduction du courant dans un CNT en fonction de la tension appliquée pour différents diamètres []. (c) Résistance d'un CNT en fonction de son diamètre []. 30
Figure 14 : Destruction paroi par paroi d'un MWCNT. (a) Graphique illustrant la chute du courant par pas de 13.5 µA traversant le MWCNT au fur et à mesure que ces dernières sont détruites. (b) Image TEM montrant la destruction paroi par paroi. 31
Figure 15 : (a et c) Conduction électrique d'un nanotube disposé entre deux électrodes avec deux parois et (b et c) une paroi [48]. 31
Figure 16 : (a) Mesure du courant de saturation d'un MWCNT sous tension entre deux électrodes. (b) Mesure du courant de saturation d'un MWCNT sous atmosphere d'argon jusqu'à destruction de ce dernier. (c) Mesure en puissance du point de rupture d'un MWCNT dans le vide (400 µW courbe A) et à air ambiant (320 µW courbe B). (In c) Graphique illustrant la décroissance du courant maximal circulant dans le MWCNT à air ambiant au fur et à mesure que ses parois sont détruites au cours du temps [11] [50] [51]. 32

Figure 17 : (a) Visuel d'un nanotube de carbone monoparoi au dessus d'un plan de masse et (b) circuit RLC équivalent. (c) Visuel d'un MWCNT et (d) circuit RLC équivalent. (e) Visuel de deux MWCNTs en vis-à-vis et (f) circuit RLC équivalent []. 33
Figure 18 : Spectre de la permittivité d'un MWCNT en fonction de la fréquence. (a) La partie réelle étant liée à la propagation du signal hyperfréquence et (b) la partie imaginaire aux pertes. 36
Figure 19 : (a) Schéma illustrant la mesure sous pointes HF d'une ligne coplanaire ouverte fermée via un MWCNT. (b) Image MEB de la longueur du MWCNT et de la distance séparant les deux moitiés de la ligne. (c) Circuit RLCG équivalent à la structure. 37
Figure 20 : Variations des paramètres RLCG du circuit équivalent à une ligne coplanaire ouverte reliée via un MWCNT en fonction de la fréquence (Figure 19). (a) Résistance par unité de longueur. (b) Inductance par unité de longueur. (c) Capacité par unité de longueur. (d) Conductance par unité de longueur. 38
Figure 21 : Schémas illustrant la mesure sous pointes HF de trois guides coplanaires, (a) une fermée connectée via un MWCNT, (b) une ouverte et (c) une fermée. (d) Mesures en adaptation et (e) en transmission de la structure coplanaire pour les trois cas explicités à (a), (b) et (c). 39
Figure 22 : (a) Evolution de la structure atomique d'un SWCNT et (b) d'un MWCNT, en fonction de la température. 41
Figure 23: (a) Commutateur NEMS DC en configuration pince [], (b) en configuration poutre [] et (c) en configuration pont []. 42
Figure 24 : Topologie à 3 électrodes d'un commutateur NEMS DC. (a) au repos et (b) en commutation. 42
Figure 25 : (a et b) Schémas et (c et d) images MEB de la structure NEMS RF proposée par S. Ghatnekar-Nilsson *et al.* au repos (a et c) et commutée (b et d). 45
Figure 26 : Commutateurs NEMS DC en configuration pince, (a) contact ohmique à une électrode d'activation, (b) contact ohmique à deux électrodes d'activation et (c) contact capacitif. 46
Figure 27 : (a) images MEB du concept de J.E. Jang *et al.* [79]. (b) Caractéristique du courant circulant dans les MWCNTs commutés en fonction de la tension appliquée sur l'électrode d'activation. 47
Figure 28 : Procédé de fabrication de notre commutateur NEMS DC en configuration pince en 3 étapes et procédé de fabrication de J.E. Jang *et al.* en 4 étapes. 48
Figure 29 : Illustration d'un NEMS RF. 49
Figure 30 : (a) Illustration schématique du champ E généré par une croissance PECVD. (b) Image MEB d'une croissance PECVD [17]. 53
Figure 31 : (a) Image MEB d'une croissance PECVD sur de l'or. (b) Image MEB d'une croissance PECVD sur du palladium. 54
Figure 32 : Croissance PECVD $C_2H_2 + H_2O + H_2$ sur lithographie 1µm TiN/Ni pendant 40 minutes à différentes températures. 55
Figure 33 : Graphiques illustrants, (a) les températures de fusion en °C et (b) les conductivités électriques en S/m, des métaux de transition « bulk » qui sont supérieures à celles du Niobium []. 56
Figure 34 : Variation de susceptibilité magnétique des métaux en fonction de la température. 57
Figure 35 : (a) Schéma et (b) image MEB d'une croissance de nanotube par la base sans barrière de diffusion. (c) Schéma et (d) image MEB d'une synthèse par la tête avec barrière de diffusion [7] []. 58
Figure 36 : Caractéristique I-V. Le trait plein indique l'électrode avec Ni/Ti et le trait en pointillés indique l'électrode avec Ni et sans Ti. 59

Figure 37 : (a) Qualité de croissance de nanotubes de carbone en PECVD en fonction du couple catalyseur/barrière de diffusion. (b) Images MEB de croissances PECVD pour différents couples catalyseur/barrière de diffusion. 60
Figure 38 : (a) Croissance de nanotubes de carbone par PECVD sur des plots de catalyseur de tailles variable entre 100 nm et 800 nm. (b) Graphiques statistiques sur le nombre de CNTs sur un plot de Ni de différents diamètres [96]. 61
Figure 39 : Les différentes géométries du catalyseur de nickel durant la croissance. (a) le plot avant début de la synthèse. (b) bille de catalyseur liquide peu après le début en croissance. (c) Croissance du nanotube de carbone par la tête. 62
Figure 40 : Diamètre du nanotube en fonction du diamètre du plot de catalyseur. Mesures et approximations théoriques [96]. 63
Figure 41 : Schéma illustrant le fonctionnement du réacteur de croissance PECVD du LPICM Polytechnique. 64
Figure 42 : Image MEB d'une croissance PECVD IPA + H_2O + H_2 à 600 °C sur lithographie TiN/Ni 1 µm de diamètre. 65
Figure 43 : Image MEB d'une croissance PECVD IPA + H_2O + H_2 à 600 °C sur e-beam TiN/Ni 300 nm de diamètre. 65
Figure 44 : Etude de la cinétique de croissance aux cours du temps à 600°C en PECVD IPA + H_20 + H_2. 66
Figure 45 : Etude de la cinétique de croissance en fonction de la température en PECVD C_2H_2 + H_20 + H_2 pendant 40 minutes. 67
Figure 46 : Les différentes étapes de conception technologique avant croissance. 67
Figure 47 : (a) Images MEB d'une forêt de MWCNTs synthétisés à 700 °C IPA + H_2O + H_2 et (b) TEM des MWCNTs obtenus sur Molybdène/TiN/Ni. 68
Figure 48 : (a) Dispositif de mesure TEM en vibration et en émission de champs d'un nanotube de carbone développé par P. Poncharal et D. Guillot []. (b) Schéma illustrant le principe de fonctionnement de l'oscillation d'un nanotube encastré-libre via un champ électrostatique AC. 69
Figure 49 : Images TEM de l'étude en oscillation sur un MWCNT issu d'une croissance PECVD sur Molybdène/TiN/Ni, (a) longueur du MWCNT, (b) diamètre du MWCNT et (c) vibration du MWCNT à sa fréquence fondamentale. 69
Figure 50 : Images TEM de l'étude en oscillation sur un MWCNT issu d'une croissance PECVD sur TiW/TiN/Ni, (a) longueur du MWCNT, (b) diamètre du MWCNT et (c) vibration du MWCNT à sa fréquence fondamentale. 70
Figure 51 : Images TEM de l'étude en oscillation sur un MWCNT issu d'une croissance par arc électrique, (a) longueur du MWCNT, (b) diamètre du MWCNT et (c) vibration du MWCNT à sa fréquence fondamentale. 71
Figure 52: Courant d'émission d'un MWCNT issu d'une croissance PECVD en fonction de la tension d'excitation. 72
Figure 53: Courant d'émission d'un MWCNT issu d'une croissance par arc électrique en fonction de la tension d'excitation. 73
Figure 54 : (a) Schéma de la méthode EBID. (b) Réalisation d'un fil de silice (SiO_2) []. (c) et (d) Dépôt de platine au pied de MWCNTs pour améliorer le contact électrique avec le substrat [96]. 75
Figure 55 : Image MEB des buses d'injection de gaz permettant le dépôt de Pt, W et SiO_2... 76
Figure 56 : (a et c) Image MEB d'un MWCNT avant dépôt de platine et (b et d) après dépôt de platine d'une minute par EBID. 77
Figure 57 : (a et c) Image MEB d'un MWCNT avant dépôt de tungstène et (b et d) après dépôt de tungstène de trois minutes par EBID. 78

Figure 58 : (a et c) Image MEB d'un MWCNT avant dépôt de silice et (b et d) après dépôt de silice de trois minutes par EBID. 79
Figure 59 : Forces en présences sur un NEMS DC dans le cadre de l'approximation de la poutre de Bernoulli, (a) à V = 0, (b) à V ≠ 0. 83
Figure 60 : Illustration d'un commutateur NEMS DC en configuration pince dans le cadre de l'approximation de la poutre de Bernoulli. 84
Figure 61 : Potentiel de Lennard-Jones []. 86
Figure 62 : Illustration de la commutation des MWCNTs en configuration pince. 88
Figure 63 : Cycle d'hysterisis du déplacement des nanotubes de carbone en fonction de la tension entre ces derniers ((a) déplacement en échelle linéaire et (b) déplacement en échelle logarithmique). 89
Figure 64 : (a) Image MEB d'un NEMS DC en configuration pont. (b) Caractéristique I-V du MWCNT suspendu (à l'état haut). (c) Caractéristique I-V du MWCNT en contact (à l'état bas). 90
Figure 65 : Image MEB de la commutation de 2 MWCNTs de 2 µm de long et graphique du courant en fonction de la tension appliquée sur l'électrode d'activation avec 0,05 V appliquée entre les MWCNTs. 90
Figure 66 : (a) Résistance de contact entre 2 MWCNTs en fonction de la longueur du contact. (b) Force de van der Waals entre 2 MWCNTs en fonction de la longueur du contact. 92
Figure 67 : Caractéristique I=f(V) d'une jonction entre 2 MWCNTs et illustration de l'écrasement au contact lié à la force appliquée. 92
Figure 68 : Déflexion des MWCNTs d'un NEMS en configuration pince en fonction du temps ((a) déflexion en échelle linéaire et (b) déflexion en échelle logarithmique). 94
Figure 69 : (a) Image MEB du NEMS DC de J.E. Jang *et al.* [79] et (b) tension sur l'électrode permettant l'activation. 95
Figure 70 : (a) Illustration d'un NEMS DC en configuration poutre [] et (b) tensions d'abaissement en fonction du rayon du MWCNT pour trois longueurs différentes obtenues, par simulation sous Ansys et par le programme Matlab. 96
Figure 71 : (a) Schémas de la structure NEMS DC avant et (b) après croissance de nanotubes de carbone. 96
Figure 72 : Topologie du NEMS DC ohmique pince à contact carbone-carbone avec une électrode d'activation, (a) au repos et (b) en commutation. 98
Figure 73 : Rapport de la force élastique sur la force de van der Waals en fonction de la longueur des MWCNTs. 98
Figure 74 : Tension d'activation entre les MWCNTs en fonction de leur longueur. 99
Figure 75 : Tension d'activation sur l'électrode d'activation en fonction de la longueur des MWCNTs. 100
Figure 76 : (a) Tension de maintien et (b) tension sur l'électrode d'activation en fonction de la longueur des MWCNTs. 101
Figure 77 : Topologie du NEMS DC ohmique pince à contact carbone-carbone avec deux électrodes d'activation, (a) au repos et (b) en commutation 102
Figure 78 : (a) Tension sur les électrodes d'activation, sans tension de maintien et (b) avec tension de maintien, en fonction de la longueur des MWCNTs. 103
Figure 79 : Topologie du NEMS DC ohmique pince à contact carbone-platine avec une électrode d'activation, (a) au repos et (b) en commutation. 104
Figure 80 : Rapport de la force élastique sur la force de van der Waals en fonction de la longueur des MWCNTs. 104
Figure 81 : Tension d'activation sur l'électrode d'activation en fonction de la longueur des MWCNTs. 105

Figure 82 : (a) Tension de maintien et (b) tension sur l'électrode d'activation en fonction de la longueur des MWCNTs. 106
Figure 83 : Topologie du NEMS DC ohmique pince à contact carbone-tungstène avec une électrode d'activation, (a) au repos et (b) en commutation. 107
Figure 84 : Rapport de la force élastique sur la force de van der Waals en fonction de la longueur des MWCNTs. 107
Figure 85 : Tension d'activation sur l'électrode d'activation en fonction de la longueur des MWCNTs. 108
Figure 86 : (a) Tension de maintien et (b) tension sur l'électrode d'activation en fonction de la longueur des MWCNTs. 109
Figure 87 : Topologie du NEMS DC capacitif pince à contact carbone-silice avec une électrode d'activation, (a) au repos et (b) en commutation. 110
Figure 88 : Rapport de la force élastique sur la force de van der Waals en fonction de la longueur des MWCNTs. 110
Figure 89 : Tension d'activation sur l'électrode d'activation en fonction de la longueur des MWCNTs. 111
Figure 90 : (a) Tension de maintien et (b) tension sur l'électrode d'activation en fonction de la longueur des MWCNTs. 112
Figure 91 : Dimensions du NEMS DC avant croissance PECVD. 114
Figure 92 : (a) Masque lithographique optique et (b) Masques lithographiques électroniques, métallisation Mo et plots de TiN/Ni. 114
Figure 93 : Procédé de fabrication des plots de contacts par évaporation à l'aide du premier niveau de masquage en lithographie optique. Image MEB d'un des 81 dispositifs présents sur la puce de 1 cm^2. 115
Figure 94 : Images MEB du dépôt de 100 nm de Mo par évaporation. (d) Procédé de dépôt. 116
Figure 95 : Images MEB du dépôt de 15 nm de TiN par pulvérisation suivi de 7 nm de Ni par évaporation. (e) Procédé de dépôt du TiN/Ni par bicouche de résine [96]. 117
Figure 96 : Images MEB de NEMS DC réalisés dans l'ordre chronologique, après croissance de MWCNTs. (a) Dispositif n'ayant pas subi de gravure à la FIB. (de b à f) Dispositifs après passage à la FIB. 118
Figure 97 : (a) Images MEB du dispositif avant activation et (b) après activation. (c) Courbe du courant en fonction de la tension d'activation de 0 à 60V et (d) zoom sur l'activation entre 22 et 23V. 119
Figure 98 : Mesure de la résistance entre deux électrodes en molybdène reliées, sans nanotubes de carbone. 120
Figure 99 : (a) Dispositif avant caractérisation en tension. (b) Dispositif après caractérisation en tension et (c) mesure courant-tension. 121
Figure 100 : (a) Dispositif avant caractérisation en tension. (b) Dispositif après caractérisation en tension et (c) mesure courant-tension. 122
Figure 101 : (a) Images MEB du NEMS DC avant dépôt de SiO_2 et (b) après dépôt de SiO_2. (c) Image MEB du dispositif après caractérisation en tension et (d) mesure courant-tension. 123
Figure 102 : (a) Dispositif avant caractérisation en tension. (b) Dispositif après caractérisation en tension et (c) mesure courant-tension. 125
Figure 103 : Ligne coplanaire hyperfréquence. 129
Figure 104 : (a et b) Topologie de la ligne coplanaire en molybdène. Résultats sur la gamme de fréquence allant de 40 GHZ à 60 GHz, (c) en adaptation, (d) en pertes d'insertion et (e) impédance caractéristique. 130

Figure 105 : (a) Topologie de la structure d'un NEMS RF parallèle, (b) illustration de deux couples de NEMS RF en parallèle, (c) NEMS RF à l'état « off » ou passant et (d) NEMS RF à l'état « on » ou bloquant. 131
Figure 106 : (a) Illustration schématique du NEMS RF parallèle à l'état passant et (b) à l'état bloquant. (c) Topologie et dimensions de la structure coplanaire au niveau du NEMS RF à base de MWCNTs. 132
Figure 107 : (a) Commutateur NEMS RF parallèle à l'état passant (b) et son modèle équivalent. 134
Figure 108 : (a) Schéma de 2 MWCNTs en contact et (b) modèle équivalent. 135
Figure 109 : (a) Commutateur NEMS RF parallèle à l'état bloquant (b) et son modèle équivalent. 135
Figure 110 : Division en trois matrices de chaîne T du NEMS RF. 137
Figure 111 : (a) NEMS RF à contact ohmique carbone-carbone parallèle à l'état passant et (b) son modèle équivalent. (c) Paramètres en adaptation ($20\log(S_{11})$) et (d) en pertes d'insertion ($20\log(S_{21})$). 138
Figure 112 : (a) NEMS RF à contact ohmique carbone-carbone parallèle à l'état bloquant et (b) son modèle équivalent. (c) Paramètres en réflexion ($20\log(S_{11})$) et (d) en isolation ($20\log(S_{21})$). 139
Figure 113 : (a) NEMS RF à contact ohmique carbone-platine parallèle à l'état passant et (b) son modèle équivalent. (c) Paramètres en adaptation ($20\log(S_{11})$) et (d) en pertes d'insertion ($20\log(S_{21})$). 141
Figure 114 : (a) NEMS RF à contact ohmique carbone-platine parallèle à l'état bloquant et (b) son modèle équivalent. (c) Paramètres en réflexion ($20\log(S_{11})$) et (d) en isolation ($20\log(S_{21})$). 142
Figure 115 : (a) NEMS RF à contact ohmique carbone-tungstène parallèle à l'état passant et (b) son modèle équivalent. (c) Paramètres en adaptation ($20\log(S_{11})$) et (d) en pertes d'insertion ($20\log(S_{21})$). 143
Figure 116 : (a) NEMS RF à contact ohmique carbone-tungstène parallèle à l'état bloquant et (b) son modèle équivalent. (c) Paramètres en réflexion ($20\log(S_{11})$) et (d) en isolation ($20\log(S_{21})$). 144
Figure 117 : (a) NEMS RF à contact capacitif carbone-SiO_2 parallèle à l'état passant et (b) son modèle équivalent. (c) Paramètres en adaptation ($20\log(S_{11})$) et (d) en pertes d'insertion ($20\log(S_{21})$). 146
Figure 118 : (a) NEMS RF à contact capacitif carbone-SiO_2 parallèle à l'état bloquant et (b) son modèle équivalent. (c) Paramètres en réflexion ($20\log(S_{11})$) et (d) en isolation ($20\log(S_{21})$). 147
Figure 119 : Dépôt des électrodes en molybdène par évaporation. (a) illustration et (b) visuel du masque. 149
Figure 120 : Dépôt des plots de TiN (pulvérisation)/Ni (évaporation). (a) illustration et (b) visuel du masque. 149
Figure 121 : SiO_2 creusée par faisceau e-beam jusqu'au silicium et dépôt de TiN/Ni. (a) illustration et (b) visuel du masque. 150
Figure 122 : Dépôt de 600 nm de molybdène formant la ligne et les masse du guide coplanaire. (a) illustration et (b) visuel du masque. 150
Figure 123 : Croissance des MWCNTs du commutateur NEMS RF 150
Figure 124 : Images MEB du dépôt de 50 nm de Mo par évaporation. 151
Figure 125 : Images MEB du dépôt de 15 nm de TiN par pulvérisation suivi de 7 nm de Ni par évaporation. 152
Figure 126 : Images MEB du SiO_2 gravé, puis du dépôt de TiN/Ni sur silicium 152
Figure 127 : Images MEB du dépôt de 600nm de Mo par évaporation 153

Figure 128 : Images MEB après croissance PECVD des MWCNTs sur un NEMS RF 154
Figure 129 : (a) Illustration schématique de nanotubes de carbone en résonance en configuration encastré - libre et (b) en configuration encastré - encastré [15] 160
Figure 130 : résolution graphique. 161
Figure 131 : résolution graphique. 162
Figure 132 : (a) Schéma illustrant le principe de fonctionnement de l'oscillation d'un nanotube via un champ électrostatique AC et, (b haut) image TEM sans potentiel et (b bas) avec potentiel []. 163
Figure 133 : Image TEM de la réponse dynamique d'un MWCNT, (A) sans potentiel, (B) mode de résonance fondamentale et (C) deuxième mode de résonance [29]. 163
Figure 134 : Image TEM illustrant les oscillations thermiques de l'extrémité libre d'un nanotube à 300 K et 600 K. 164
Figure 135 : Schéma illustratif de commutation de deux MWCNTs en configuration pince. 165
Figure 136 : Force AC électrophorèse sous un champ électrique AC non uniforme alignant un paquet de MWCNTs entre les deux électrodes en or. 166
Figure 137 : Ondes incidentes (a1 et a2) et réfléchies (b1 et b2) en entrée-sortie d'un dispositif quadripôle. 167
Figure 138 : Couples tension-courant en entrée (V_1,I_1) et en sortie (V_2,I_2) d'un dispositif quadripôle. 168
Figure 139 : Modèle électrique équivalent d'une section de ligne. 172
Figure 140 : Illustration d'un commutateur NEMS DC en configuration poutre. 173
Figure 141 : Illustration d'un commutateur NEMS DC en configuration pont. 174

Liste des tableaux

Tableau 1 : Tableau comparatif du module de Young des nanotubes de carbone avec d'autres matériaux [] [] []. 25
Tableau 2 : Etat de l'art des études mécaniques sur les nanotubes de carbone (voir annexes 5.2 à 5.2.3). 27
Tableau 3 : Conductivité électrique et permittivité du graphite et d'un MWCNT. 36
Tableau 4 : Comparaison de la conductivité thermique des CNTs avec celle d'autres matériaux [] [] 40
Tableau 5 : Tableau comparatif de NEMS DC issus de la littérature. 44
Tableau 6 : Température d'eutectisme entre les 3 différents ferromagnétiques et le carbone. 60
Tableau 7 : Récapitulatif des résultats expérimentaux obtenus. 71
Tableau 8 : Récapitulatif des résultats de mesures issus de nos expérimentations et de l'état de l'art. 74
Tableau 9 : Tableau comparatif de la conductivité électrique du platine et du tungstène avec le graphène. 76
Tableau 10 : (a) Caractéristiques physiques d'un groupe de matériaux. (b) Caractéristiques physiques des liaisons atomiques entre le carbone et d'autres matériaux [116] [] [] [] []. 86
Tableau 11 : Résumé des simulations MATLAB réalisées sur 4 contacts différents (trois ohmiques (C-C, C-Pt et C-W) et un capacitif (C-SiO_2)) avec les caractéristiques communes suivantes, le module de Young E = 115 GPa, la longueur de contact L_C = 120 nm, le diamètre D = 75 nm et la distance entre les électrodes de Mo r = 100 nm. 113
Tableau 12 : Dimensions des MWCNTs du dispositif. 119
Tableau 13 : Principales dimensions du NEMS RF parallèle à contact ohmique carbone-carbone. 138
Tableau 14 : Principales dimensions du NEMS RF parallèle à contact ohmique carbone-platine. 140
Tableau 15 : Principales dimensions du NEMS RF parallèle à contact ohmique carbone-tungstène. 143
Tableau 16 : Principales dimensions du NEMS RF parallèle à contact capacitif carbone-SiO_2. 145
Tableau 17 : Récapitulatif des résultats en simulation hyperfréquences des quatre types de contacts étudiés à 50 GHz et pour 6 couples de NEMS RF. 148
Tableau 18 : Comparaison entre les résultats en simulation d'un MEMS RF et d'un NEMS RF 157

Références bibliographiques

1 K.E. Petersen, “Micromechanical switches on silicon”, IBM J. Res. Develop. **23**(4), 376 (1979).

2 S. Ijima, “Helical microtubules of graphitic carbon”, Nature **354**, 56 (1991).

3 S. Ijima, T. Ichihashi, “Single-shell carbon nanotubes of 1-nm diameter”, Nature **363**, 603 (1993).

4 D. S. Bethune, C. H. Kiang, M. S. De Vries, G. Gorman, R. Savoy, J. Vazquez, R. Beyers, “Cobalt catalysed growth of carbon nanotubes with single atomic layer walls”, Nature **363**, 6O5 (1993).

5 C. Bernard, “Propriétés mécaniques des nanotubes de carbone en tant que nano sonde et leur fonctionnalisation par bio-nanoparticules”, Thèse, Octobre 2007.

6 R. Arenal, O. Stephan, M. Kociak, D. Taverna, A. Loiseau, C. Colliex, “Transmission electron microscopy of nanotubes – 1”, P.R.L. 2005 in press.

7 M.S. Bakir, and J.D. Meindl, “Integrated interconnect technologies for 3D nanoelectronic systems”, Artech house 2009 pages 359-382.

8 Institut de biologie moléculaire et céllulaire de Strasbourg, www-ibmc.u-strasbg.fr/ict/vectorisation/nanotubes.shtml.

9 A. Loiseau, “Transmission electron microscopy of nanotube – 1”, présentation ONERA.

10 A.V. Melechko, V.I. Merkulov, T.E. McKnight, M.A. Guillorn, K.L. Klein, D.H. Lowndes, and M.L. Simpson, “Vertically aligned carbon nanofibers and related structures: Controlled synthesis and directed assembly”, J. Appl. Phys. (2005) **97**. 041301 (39 pp.).

11 Y.X. Liang, Q.H. Li, and T.H. Wang, “Current saturation in multiwalled carbon nanotubes by large bias“, Applied Physics Letters, Volume **84**, Issue 17, id. 3379 (2004).

12 P. Beebe, A. Lal, and A. Yu, “A study of carbon nanotubes and their applications in transistors”, (2004).

13 J.E. Fisher, “Nanotubes and Nanofibers”, CRC Taylor & Francis Group (2006).

14 J.P. Lu, “Elastic properties of carbon nanotubes and nanoropes”, Phys. Rev. Lett. **79** (7) (1997) 1297–1300.

15 R. Lefèvre, « Propriétés électromécaniques des nanotubes de carbone multiparois », Thèse université Paris XI UFR scientifique d’Orsay 2005.

16 M. Gulàs, C.S. Cojocaru, F. Le Normand, and S. Farhat, “An investigation of the plasma composition in plasma-enhanced hot filament catalytic chemical vapor deposition of carbon nanotubes”, Springer science+business media, LLC 2007.

17 K.B.K. Teo, R.G. Lacerda, M.H. Yang, A.S. Teh, L.A.W. Robinson, S.H. Dalal, N.L. Rupesinghe, M. Chhowalla, S.B. Lee, D.A. Jefferson, D.G. Hasko, G.A.J. Amaratunga, W.L. Milne, P. Legagneux, L. Gangloff, E. Minoux, J.P. Schnell, and D. Pribat, « Carbon nanotube technology for solid state and vacuum electronics », IEEE PROCEEDINGS CIRCUITS DEVICES AND SYSTEMS 2004, VOL **151**; PART 5, pages 443-451.

18 R.T.K. Baker, “Catalytic growth of carbon filaments”, carbon **27**, 315 (1989).

19 A. Thess, R. Lee, P. Nikolaev, H. Dai, P. Petit, J. Robert, C. Xu, Y.H. Lee, S.G. Kim, A.G. Rinzler, D.T. Colbert, G.E. Scuseria, D. Tomanek, J.E. Fisher, and R.E. Smalley, “Crystalline ropes of metallic carbon nanotubes”, Science, **273**, 483 (1996).

20 L. Alvarez, “Mécanismes de croissance et étude vibrationelle par spectroscopie Raman des nanotubes de carbone produits par la méthode solaire”, Thèse Université de Montpellier II (2000).

21 M. Chhowalla, K.B.K. Teo, C. Ducati, N.L. Rupesinghe, G.A.J. Amaratunga, A.C. Ferrari, D. Roy, J. Robertson, and W.I. Milne, “Growth process conditions of vertically aligned carbon nanotubes using plasma enhanced chemical vapor deposition”, J. Appl. Phys. 90, 5308 (2001).

22 R. Martel *et al.*, « Ambipolar electrical transport in semiconducting single-wall carbon nanotubes », Physical review letters **87**, 256805 (2001).

23 Y. Zhang, “Heterostructures of single-walled carbon nanotubes and carbide nanorods”, Science **285**, 1719 (1999).

24 R. Gao, Z.L. Wang, Z. Bai, W.A. de Heer, L. Dai, and M. Gao, “Nanomechanics of individual carbon nanotubes from pyrolytically grown arrays”, Physical review letters vol. **85**, 622 (2000).

25 R.C. Haddon, and S.Y. Chow, “Hybridization as a metric for the reaction coordinate of the chemical reaction: concert in chemical reactions”, Pure Appl. Chem. **71**, 289-294 (1999).

26 J. Chang, J. Kim, B.K. Min, S.J. Lee, and L. Lin, “Electrostatically actuated nano tweezers fabricated on micro processed electrodes”, Nano/micro engineered and molecular systems, 2006. NEM ’06. 1st IEEE international conference.

27 M. Li, R.B. Bhiladvala, T.J. Morrow, J.A. Sioss, K.K. Lew, J.M. Redwing, C.D. Keating, and T.S. Mayer, “Bottom-up assembly of large-area nanowire resonator arrays”, Nature Nanotechnology, **3** 88-92 (2005).

28 M. Li, T.S. Mayer, J.A. Sioss, C.D. Keating, and R.B. Bhilavala, “Template-grown metal nanowires as resonators: Performance and characterization of dissipative and elastic properties”, Nano lett **7** 3281-3284 (2007).

29 M. M. J. Treacy, T. W. Ebbesen, and J. M. Gibson, “Exceptionally high young’s modulus observed for individual carbon nanotubes”, Nature **381**, 678 (1996).

30 P. Poncharal, Z.L. Wang, D. Ugarte, W.A. de Heer, “Electrostatic deflections and electromechanical resonances of carbon nanotubes”, Science 1999 **283** (5407):1513-6.

31 H.B. Peng, C.W. Chang, S. Aloni, T.D. Yuzvinsky, and A. Zettl, “Ultrahigh frequency nanotube resonators”, Physical review letters **97**, 087203 (2006).

32 A. Krishnan, E. Dujardin, T.W. Ebbesen, P.N. Yianilos, and M.M.J. Treacy, C.V. Nguyen, L. Dai, and L. Qu, “Young’s modulus of single-walled nanotubes”, Physical review B vol. **58**, 14013 (1998).

33 R. Ciocan, J. Gaillard, M.J. Skrove, and A.M. Rao, “Determination of the bending modulus of an individual multiwall carbon nanotube using an electric harmonic detection of resonance technique”, Nano lett 2005 2389-2393.

34 F. Arai, M. Nakajima, L. Dong, and T. Fukuda, “The pico-Newton order force measurement with a calibrated carbon nanotube probe”, Advanced intelligent mechatronics, 2003. AIM 2003. Proceedings. 2003 IEEE/ASME international conference on volume 2, 20-24 july 2003 pages(s):691 – 696 vol. **2**.

35 D. Garcia-Sanchez, A. San Paulo, M.J. Esplandiu, F. Perez-Murano, L. Forro, A. Aguasca, and A. Bachtold, “Mechanical detection of carbon nanotube resonator vibrations”, Physical Review Letters, vol. **99**, Issue 8, id. 085501 (2007).

36 S. Perisanu, V. Gouttenoire, P. Vincent, A. Ayari, M. Choueib, M. Bechelany, D. Cornu, and S.T. Purcell, « Mechanical properties of SiC nanowires determined by scanning electron and field emission microscopies », Physical review B **77**, 165434 (2008).

37 E.D. Minot, “Tuning the band structure of carbon nanotubes”, Thesis of the Cornell university (2004).

38 A. Raychowdhury, and K. Roy, “Modeling of metallic carbon-nanotube interconnects for circuit simulations and a comparaison with Cu interconnects for scaled technologies”, TCAD, Vol. **25**, No. 1, pp. 58--65, 2006.

39 D.E. Resasco, “Low-temperature synthesis of SWNT”, University of Oklahoma.

40 E. Olsson, L. de Knoop, H. Olin, H. Pettersson, and K. Svensson, “In-situ manipulation carbon nanotubes”, Chalmers university.

41 G. Pennington, and N. Goldsman, “Low-field semiclassical carrier transport in semiconducting carbon nanotubes”, Physical Review B, vol. 71, Issue 20, id. 205318 (c) 2005: The American Physical Society

42 A. Naeemi, R. Sarvari, and J.D. Meindl, “Performance modeling and optimization for single- and multi-wall carbon nanotube interconnects”, ACM Design Automation Conf., San Diego, CA, June 2007, pp. 568-573.

43 J. Li, Q. Ye, A. Cassell, H.T. Ng, R. Stevens, J. Han, and M. Meyyappan, “Bottom-up approach for carbon nanotube interconnects”, Appl. Phys. Lett., vol. **82**, no. 15, pp. 2491–2493, Apr. 2003.

44 J.Y. Park, S. Rosenblatt, Y. Yaish, V. Sazonova, H. Üstunel, “Electron-phonon scattering in metallic single-walled carbon nanotubes ”, Nano Letters, **4** (3), 517-520, 2004.

45 A. Svizhenko, and M.P. Anantram, “Effect of scattering and contacts on current and electrostatics in carbon nanotubes”, Physical review B **72**, 085430 (2005).

46 G.F. Close, and H.S.P. Wong, “Assembly and electrical characterization of multiwall carbon nanotube interconnects”, IEEE transactions on nanotechnology, vol. **7**, NO. 5, September 2008.

47 T.D. Yuzvinsky, W. Mickelson, S. Aloni, S.L. Konsek, A.M. Fennimore, G.E. Begtrup, A. Kis, B.C. Regan, and A. Zettl, “Imaging the life story of nanotube devices”, Appl. Phys. Lett., Vol. **87**, 083103 (2005).

48 Q. Yan, J. Wu, G. Zhou, W. Duan, and B.L. Gu, “Ab initio study of transport properties of multiwalled carbon nanotubes“,Physical Review B, vol. **72**, Issue 15, id. 155425 2005: The American Physical Society.

49 M. Ahlskog, O. Herranen, A. Johansson, J. Leppäniemi, and D. Mtsuko, « Electronic transport in intermediate sized carbon nanotubes », Physical review B **79**, 155408 (2009).

50 V.V. Deshpande, H.Y. Chiu, H.W. Postma, C. Miko, L. Forro, and M. Bockrath, “Carbon nanotube linear bearing nanoswitches”, Nano Letters, **6** (6), 1092-1095, 2006.

51 P.G. Collins, M. Hersam, M. Arnold, R. Martel, and Ph. Avouris, “Current saturation and electrical breakdown in multiwalled carbon nanotubes”, Phys. Rev. Lett. **86**, 3128 - 3131 (2001).

52 D. Rossi, J.M. Cazeaux, C. Metra, and F. Lombardi, “Modeling crosstalk effects in CNT bus architectures”, IEEE Transactions on nanotechnology, vol. **6**, no. 2, march 2007.

53 B. Bourlon, C. Miko, L. Forro, D.C. Glattli, and A. Bachtold, “Determination of the intershell conductance in multiwalled carbon nanotubes”, Physical Review Letters **93**, 176806 (2004).

54 P.J. Burke, “Lüttinger liquid theory as a model of the gigahertz electrical properties of carbon nanotubes”, Nanotechnology, IEEE transactions on volume 1, issue 3, sept. 2002 page(s):129 – 144.

55 E.R. Dobbs, Basic Electromagnetism. London, U.K.: Chapman and hall, 1993.

56 C.A. Grimes, E.C. Dickey, C. Mungle, K.G. Ong, and D. Qian, “Effect of purification of the electrical conductivity and complex permittivity of multiwall carbon nanotubes”, J. Appl. Phys. **90**, 4134 (2001).

57 S.C. Jun, J.H. Choi, S.N. Cha, C.W. Baik, S. Lee, H.J. Kim, J. Hone, and J.M. Kim, “Radio-frequency transmission characteristics of a multi-walled carbon nanotube”, Nanotechnology **18** No 25 (27 june 2007) 255701 (5pp).

58 J. Hone, M. Whitney, “Thermal conductivity of single-walled carbon nanotubes”, Synthetics Metals **103**, 2498 (1999).

59 P. Kim, L. Shi, A. Majumdar, P. L. McEuen, “Thermal transport measurements of individual multiwalled nanotubes”, Physical Review Letters **87**, 215502 (2001).

60 Fumihito Arai, Chinaik Ng, Pou Liu, Lixin Dong, Yoshiaki Imaizumi, Kazutoshi Maeda, Hisataka Maruyama, Akihiko Ichikawa and Toshio Fukuda, “ Ultra-Small Site Temperature Sensing, by Carbon Nanotube Thermal Probes”, 2004 4th IEEE Conference on Nanotechnology.

61 K. Zhang, M.M.F. Yuen, N. Wang, J.Y. Miao, D.G.W. Xiao, H.B. Fan, “Thermal interface material with aligned CNT and its application in HB-LED packaging”, Electronic components and technology conference, 2006. Proceedings. 56th 30 may-2 june 2006 page(s):177 – 182.

62 Eric Pop, Sanjiv Sinha, and Kenneth E. Goodson, “Heat Generation and Transport in Nanometer-Scale Transistors”, IEEE Vol. 94, No. 8, August 2006 Proceedings of the I.

63 D. Fabris, T. Saito, T. Yamada, X. Sun, P. Wilhite, and C.Y. Yang, “Current capacity and thermal transport in carbon nanofiber interconnects”, Proceedings of the 2009 4th IEEE International Conderence on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems (2009).

64 S.T. Purcell, P. Vincent, C. Journet, and V.T. Binh, “Hot nanotubes: Stable heating of individual multiwall carbon nanotubes to 2000 K induced by the field-emission current”, Physical Review Letters **88**, 105502 (2002).

65 P. Vincent, S.T. Purcell, C. Journet, and V.T. Binh, “Modelization of resistive heating of carbon nanotubes during field emission”, Physical Review B **66**, 075406 (2002).

66 K.M. Liew, C.H. Wong, X.Q. He, and M.J. Tan, “Thermal stability of single and multi-walled carbon nanotubes”, Physical Review B, vol. **71**, Issue 7, id. 075424 (c) 2005: The American Physical Society.

67 M. Kociak, A. Yu Kasumov, S. Guéron, B. Reulet, .I. Khodos, Yu. B. Gorbatov, V. T. Volkov, L. Vaccarini, H. Bouchiat, "Superconductivity in ropes of single-walled carbon nanotubes", Physical Review Letters **86**, 2416 (2001).

68 P. M. Ajayan, S. Ijita, "Capillarity-induced filling of carbon nanotubes", Nature **361**, 333 (1993).

69 K. Suenaga, M. Tencé, C. Mory, C. Colliex, H. Kato, T. Okazaki, H. Shinohara, K. Hirahara, S. Bandow, S. Ijima, "Element-selective single atom imaging", Science **290**, 2280 (2000).

70 M. Dragoman, A. Takacs, A.A. Muller, H. Hartnagel, R. Plana, K. Grenier, and D. Dubuc, "Nanoelectromechanical switches based on carbon nanotubes for microwave and millimeter waves", Appl. Phys. Lett. **90**, 113102 (2007).

71 M. Dequesnes, Z. Tang, and N.R. Aluru, "Static and dynamic analysis of carbon nanotube-based switches", J. Eng. Mater. Technol., Trans. ASME, vol. **126**, pp. 230-237, 2004.

72 C. Ke, H.D. Espinosa, and N. Pugno, "Numerical analysis of nanotube based NEMS devices – part II : Role of finite kinematics, stretching and charge concentrations", Journal of Applied Mechanics -- September 2005 -- Volume **72**, Issue 5, pp. 726-731.

73 J.W. Ward, M. Meinhold, B.M. Segal, J. Berg, R. Sen, R. Sivarajan, D.K. Brock, and T. Rueckes, "A Non-Volatile Nanoelectromechanical Memory Element Utilizing a Fabric of Carbon Nanotubes", Non-Volatile Memory Technology Symposium, 2004.

74 T. Rueckes, K. Kim, E. Joselevich, G. Y. Tseng, C.L. Cheung, C.M. Lieber, "Carbon Nanotube-Based Nonvolatile Random Access Memory for Molecular Computing", Science Mag 2000.

75 Q. Li, S.M. Koo, C.A. Richter, M.D. Edelstein, J.E. Bonevich, J.J. Kopanski, J.S. Suehle, and E.M. Vogel, "Precise Alignment of Single Nanowires and Fabrication of Nanoelectromechanical Switch and Other Test Structures", Nanotechnologie, IEEE Transactions on Volume 6 2007.

76 Anupama B. Kaul, Eric W. Wong, Larry Epp, and Brian D. Hunt, "Electromechanical Carbon Nanotube Switches for High-Frequency Applications", Nano Letter 2006.

77 A.B. Kaul, A.R. Khan, L. Bagge, K.G. Megerian, H.G. LeDuc, and L. Epp, "Interrogating vertically oriented carbon nanofibers with nanomanipulation for nanoelectromechanical switching applications", Applied Physics Letters **95**, 093103 (2009).

78 S. Bhunia, M. Talib-Azar, and D. Saab, "Ultralow-power reconfigurable computing with complementary nano-electromechanical carbon nanotube switches", Design automation conference, 2007. ASP-DAC '07. Asia and South Pacific 23-26 jan. 2007 page(s):86 – 91.

79 J.E. Jang, S.N. Cha, Y. Choi, G.A.J. Amaratunga, D.J. Kang, D.G. Hasko, J.E. Jung, and J.M. Kim, "Nanoelectromechanical switches with vertically aligned carbon nanotubes", Applied Physics Letters, Volume **87**, Issue 16, id. 163114 (3 pages) (2005).

80 J.E. Jang, S.N. Cha, Y. Choi, D.J. Kang, T.P. Butler, D.G. Hasko, J.E. Jung, J.M. Kim, and G.A.J. Amaratunga, "Nanotube based vertical nano-devices for high integration density", Emerging technologies – Nanoelectronics, 2006 IEEE conference on 10-13 jan. 2006 page(s):89 – 92.

81 P. Kim, and C.M. Lieber, "Nanotube nanotweezers", Science **286**, 2148 (1999).

82 S.N. Cha, J.E. Jang, Y. Choi, G.A.J. Amaratunga, D.J. Kang, D.G. Hasko, J.E. Jung, and J.M. Kim, "Fabrication of a nanoelectromechanical switch using a suspended carbon nanotube", Applied physics letters, volume **86**, 083105 (2005).

83 E. Dujardin, V. Derycke, M.F. Goffman, R. Lefèvre, and J.P. Bourgoin, "Self-assembled based on electroactuated multiwalled nanotubes", Applied physics letters **87** 2005.

84 S.W. Lee, D.S. Lee, R.E. Morjan, S.H. Jhang, M.S. Sveningsson, O.A. Nerushev, Y.W. Park, and E.B. Campbell, "A Three-Terminal Carbon Nanorelay", Nano Lett 2004.

85 S. Akita, Y. Nakayama, S. Mizooka, Y. Takano, T. Okawa, Y. Miyatake, S. Yamanaka, M. Tsuji, and T. Nosaka, "Nanotweezers consisting of carbon nanotubes operating in an atomic force microscope", Applied Physics Letters, Volume **79**, Number 11 (2001).

86 S. Ghatnekar-Nilsson, I. Karlsson, A. Kvennefors, G. Luo, V. Zela, M. Arlelid, T. Parker, L. Montelius, and A. Litwin, "A new multifunctional platform based on high ratio interdigitaded NEMS structures", Nanotechnology **20** (2009) 175502 (6pp).

87 J.B. Torrance, P. Lacorre, A.I. Nazzal, E.J. Ansaldo, and Ch. Niedermayer, "Systematic study of insulator-metal in perovskites $RNiO_3$ (R = Pr, Nd, Sm, Eu) due to closing of charge-transfer gap", Physical Review B **45**, 8209 (1992).

88 C. Kittel, "Physique de l'état solide", 5ème édition John Wiley & Sons, Inc., New York. (1976).

89 A. Javey, Q. Wang, A. Ural, Y. Li, and H. Dai, "Carbon nanotube transistor arrays for multistage complementary logic and ring oscillators", Nano Letters, 2 (9), 929 -932, 2002.

90 V.I. Merkulov, A.V. Melechko, M.A. Guillorn, D.H. Lowndes, and M.L. Simpson, "Alignment mechanism of carbon nanofibers produced by plasma-enhanced-chemical-vapor-deposition", Appl. Phys. Lett. **79** (18), 2970-2972 (2001).

91 M. Nihei, M. Horibe, A. Kawabata, and Y. Awano, “Carbon nanotube vias for future LSI interconnects”, IEEE international interconnect technology conference, San Francisco CA, ETATS-UNIS (07/06/2004), pp. 251-253.

92 K.B.K. Teo, M. Chhowalla, J. Amaratunga, W.I. Milne, D.G. Hasko, G. Pirio, P. Legagneux, F. Wyczisk, and D. Pribat, “Uniform patterned growth of carbon nanotubes without surface carbon”, Applied Physics Letters, Volume 79, Issue 10, id. 1534 (2001).

93 A.M. Rao, D. Jacques, R.C. Haddon, W. Zhu, C. Bower, and S. Jin, “In situ-grown carbon nanotube array with excellent field emission characteristics”, Appl. Phys. Lett. **76**, 3813 (2000).

94 W.Q. Deng, X. Xu, and W.A. Goddard, “A two-stage mechanism of bimetallic catalyzed growth of single-walled carbon nanotubes”, Nano Lett., **4** (12), 2331 -2335, 2004.

95 F. Ding, P. Larsson, R. Ahuja, H. Duan, a. Rosén, and K. Bolton, “The importance of strong carbon-metal adhesion for catalytic nucleation of single-walled carbon nanotubes”, Nano Lett., **8** (2), 463 -468, 2008.

96 E. Minoux, “ Etude et développement de sources électroniques à émission de champ à base de nanotube de carbone. Application aux tubes hyperfréquences.”, Ecole polytechnique (2006).

97 W.D.J. Callister, Materials Science and Engineering an Introduction, 6th ed. (Wiley, New York, 2003).

98 Binary Alloy Phase Diagrams, 2nd ed, edited by T.B. Massalski (ASM International, Metal Park, OH, 1990), Vol. **1** and **2.**

99 A.M. Cassell, Q. Ye, B.A. Cruden, J. Li, P.C. Sarrazin, H.T. Ng, J. Han, and M. Meyyappan, “Combinatorial chips for optimizing the growth and integration of carbon nanofibre based devices”, 2004 Nanotechnology **15** 9-15.

100 Mesures réalisées au PMCN de Lyon par P. Vincent, A. Ayari, P. Poncharal, and S. Purcell.

101 V. Gouttenoire, “Eploitation de nouveaux phénomènes dans les systèmes nanoélectromécaniques : Réalistaion d’un nanorésonnateur accordable”, Université de Lyon (2009).

102 Colle à base de carbone fabriquée par le LPMCN de Lyon et dévellopé par P. Vincent.

103 S. Frank, P. Poncharal, Z.L. Wang, and W.A. de Heer, “Carbon nanotube quantum resistors”, Science Vol. **280**, no0 5370, pp 1744-1746 (1998).

104 Lee *et al.* Characteristics of multiwalled carbon nanotube nanobridges fabricated by poly (methylmethacrylate) suspended dispersion. J Vac Sci Technol B (2002) vol. 20 pp. 2773-2776.

105 J.M. Bonard, H. Kind, T. Stöckli, and L.O. Nilsson, "Field emission from carbon nanotubes", Solid State Electronics, **45**, 893 (2001).

106 M.J. Fransen, T.L. van Rooy, and P. Kruit, Appl. Surf. Sci. **146**, 312 (1999), and J.L. Shaw, and D.Y.S. Hsu, Proceedings of the 14th Inter. Vac. Microelectronics Conf., Davis (2001).

107 P. Vincent, "Synthèse, caractérisation et etude des propriétés d'émission de champ de nanotubes de carbone", Thèse de l'université Claude Bernard – Lyon 1 (2002).

108 E. Minoux, O. Groening, K.B.K. Teo, S.H. Dalal, L. Gangloff, J.P. Schnell, L. Hudanski, I.Y.Y. Bu, P. Vincent, P. Legagneux, G.A.J. Amaratunga, and W.I. Milne, "Achieving High-Current Carbon Nanotube Emitters", Nano Letters, vol. **5**, pp. 2135-2138 (2005).

109 H.J. Li, W.G. Lu, J.J. Li, X.D. Bai, and C.Z. Gu, "Multichannel ballistic transport in multiwall carbon nanotubes", Physical review letters, **95**, 086601 (2005).

110 Expérimentation réalisée à Thales Research & Technology (TRT) Palaiseau par C. Collet.

111 N. Pugno, C.H. Ke, and H.D. Espinosa, "Analysis of doubly clamped nanotube devices in the finite deformation regime", Journal of applied mechanics 2005.

112 W.H. Lin, and Y.P. Zhao, "Stability and bifurcation behaviour of electrostatic torsional NEMS varactor influenced by dispersion forces", Journal of Physics D: Applied Physics, Volume **40**, Issue 6, pp. 1649-1654 (2007).

113 J. He, and C.M. Lilley, "Surface effect on the elastic behavior of static bending nanowires", Nano Lett., **8** (7), 1798–1802, 2008.

114 M. Dragoman, A. Takacs, H. Hartnagel, and R. Plana, "RF NEMS switch based on carbon nanotube vertical tweezers", International semiconductor conference 2006.

115 M. Dequesnes, S.V. Rotkin, and N.R. Aluru, "Parameterization of continuum theories for single wall carbon nanotube switches by molecular dynamics simulations", J. Comput. Electron., **1**(3), pp. 313-316 (2002).

116 M. Dequesnes, S.V. Rotkin, and N.R. Aluru, "Calculation of pull-in voltages for carbon nanotube based nano electromechanical switches", Nanotechnology 13 No **1** (February 2002) 120-131.

117 B.A. Cruden, and A.M. Cassell, "Verticaly oriented carbon nanofiber based nano-electromechanical switch", Nanotechnology, IEEE transactions on volume **5**, issue 4, july 2006 page(s):350 – 355.

118 C. Ke, and H.D. Espinosa, “Nanoelectromechanical systems and modeling”, handBook of theorical and computionnal nanotechnology, vol. **1** (2005).

119 C. Besse-Patin, “Recherche de conformation de molécules et apprentissage du potentiel de Lennard-Jones par systèmes multi-agents adaptatifs”, Institut de recherche informatique de Toulouse (2005).

120 S. Rols, Z. Benes, E. Anglaret, J.L. Sauvajol, P. Papanek, J.E. Fisher, G. Coddens, H. Schober, and A.J. Dianoux, “Phonon density of states of single-wall carbon nanotubes”, Physical Review Letters **85**, 5222 (2000).

121 L.A. Girifalco, M. Hodak, and S. Lee, “Carbon nanotubes, buckyballs, ropes, and a universal graphitic potential”, Phys. Rev. B **62** (19) (2000) 13104–13110.

122 J.W. Kang, and Q. Jiang, “Electrostatically telescoping nanotube nonvolatile memory device”, Nanotechnology, Volume **18**, Issue 9, pp. 095705 (2007).

123 F.A. Carey, R.J. SundBerg, and M. Mottet, “Chimie organique avancée, volume 1”, chapitre 3 page 126, DeBoeck université, Plenum Press (1990).

124 P. Hoffmann, “Cours de Chimie des Surfaces Microtechnique”, Ecole polytechnique fédérale de Lausanne 2006.

125 W.W. Jang, J.O. Lee, J.B. Yoon, M.S. Kim, J.M. Lee, S.M. Kim, K.H. Cho, D.W. Kim, D. Park, and W.S. Lee, “Fabrication and characterization of a nanoelectromechanical switch with 15-nm-thick suspension air gap”, Applied Physics Letters **92**, 103110 (2008).

126 A. Vijayaraghavan, S. Blatt, D. Weissenberger, M. Oron-Carl, F. Hennrich, D. Gerthsen, H. Hahn, and R. Krupke, “Ultra-large-scale directed assembly of single-walled carbon nanotube devices”, Nano Lett., **7** (6), 1556 -1560, 2007.

127 J. Li, R. Stevens, L. Delzeit, H.T. Ng, A. Cassell, J. Han, and M. Meyyappan, “Electronic properties multiwalled carbon nanotubes in an embedded vertical array”, Appl. Phys. Lett., Vol. **81**, No. 5, 29 july 2002.

128 C. Lan, P. Srisungsitthisunti, P.B. Amama, T.S. Fisher, X. Xu, and R.G. Reifenberger, “Measurement of metal/carbon nanotube contact resistance by adjusting contact length using laser ablation”, Nanotechnology **19** (2008) 125703 (7pp).

129 S. Pasricha, N. Dutt, and F.J. Kurdahi, “Exploring carbon nanotube bundle global interconnects for chip multiprocessor applications”, To appear IEEE VLSI Design Conference (VLSID), 2009.

130 A. Buldum, and J.P. Lu, “Contact resistance between carbon nanotubes”, Physical review B, volume **63**, 161403 (2001).

131 J. B. Muldavin and G. M. Rebeiz, “Nonlinear electro-mechanical modeling of MEMS switches”, IEEE Int. Microwave Theory and Techniques Symp., pp 2119 – 2122 (2001).

132 Simulation réalisée à Xlim Limoges par A. Verger et A. Pothier.

133 S. Axelsson *et al*., New journal of physics **7** (2005) 245.

134 Arthur von Hippel, “Dielectrics and waves”, Artech house Microwave Library p61 (1994).

135 P.F. Combes, “Micro-ondes. 2. Circuits passifs, propagation, antennes”, Dunod, Paris, 1997.

136 G.M. Rebeiz, and J.B. Muldavin, “RF MEMS switches and switch circuits”, IEEE microwave magazine (2001).

137 K. Jensen, J. Weldon, H. Garcia, and A. Zettl, “Nanotube radio”, Nano Lett. 2007.

138 V.T.S. Wong, and W.J. Li, “Bulk carbon nanotubes as sensing element for temperature and anemometry micro sensing”, Volume, Issue, **19**-23 Jan. 2003 Page(s): 41 – 44.

139 C.K.M. Fung, and W.J. Li, “Ultra-low-power and high-frequency-response carbon nanotube based MEMS thermal sensors”, IEEE Volume **3**, Issue, 27-31 Oct. 2003 Page(s): 2371 – 2376.

140 L.M. Jonsson, S. Axelsson, T. Nord, S. Viefers, and J.M. Kinaret, “High frequency properties of a CNT-based nanorelay”, Nanotechnology, volume **15**, 2004, pages 1497 – 1502.