

Etude et élaboration prédictive d'un nano-condensateur à base des nanotubes de carbone

Predictive study and elaboration of a nano-capacitor based on carbon nanotubes

Imane Lakbita¹, Khalil El-Hami¹

¹ Laboratoire des Nanosciences et Modélisations, Faculté Polydisciplinaire de Khouribga, Université Hassan 1er, Khouribga, Maroc, imanelakbitaaref2016@yahoo.com, khalil.elhami@uhp.ac.ma

RÉSUMÉ. Les propriétés électriques des nanotubes de carbone à mono-parois (SWCNT), qui peuvent être des matériaux conducteurs ou semi-conducteurs selon un certain nombre de paramètres clés, sont considérés comme de nouveaux matériaux différents des autres. Dans cette étude, nous allons prédire la faisabilité d'élaborer un nano-condensateur utilisant les SWCNTs. Un calcul de la limite de la capacité et des courbes seront présentées montrant la variation de la capacité en fonction de la tension électrique appliquée, la variation de la capacité en fonction de l'épaisseur du diélectrique et ainsi de suite. L'énergie électrique du nano-condensateur sera discutée et les courbes de la dépendance de la capacité par rapport à l'énergie stockée seront présentées dans cette étude. Les résultats de cette investigation pourront ouvrir de nouveaux domaines et donc conduire à des applications potentielles à l'échelle nanométrique.

ABSTRACT. The electrical properties of single-walled carbon nanotubes (SWCNTs), which might be conductive or semiconductive materials depending on a number of key parameters, are a radical different type of materials. In this study, we will predict the feasibility to elaborate a nano-capacitor using the SWCNTs material. A calculation of limit of the capacitance and curves will be presented according to the characteristics of the nano-capacitor such as capacitor vs applied voltage, capacitance vs thickness and so on. The electrical energy of the nano-capacitor will be discussed and curves of the dependence of the capacitance vs stored energy is presented in this study. These finding are hopefully expected to open new areas of investigation and might lead to potential applications in nanoscale science.

MOTS-CLÉS. Nanotubes de carbone, nano-condensateur, charge et décharge, énergie électrique.

KEYWORDS. Carbon nanotubes, nano-capacitor, loaded and unloaded, electrical energy.

1. Introduction

Les nanotubes de carbone et plus particulièrement les mono-parois des nanotubes de carbone (SWCNTs) peuvent être des métaux ou des semi-conducteurs et ainsi avoir des propriétés mécaniques similaires au diamant [ODO 98]. Ils ont attiré beaucoup d'attention de la communauté de recherche et ont dominé le développement des recherches scientifiques depuis leurs découvertes en 1991, cas des multi-parois et en 1993, cas des mono-parois [OUY 01]. Les chercheurs du monde entier travaillant sur le matériau de carbone ont prouvé que le SWCNT possède des caractéristiques attrayantes : la raideur mécanique, la résistance et l'élasticité, la très haute conductivité électrique et thermique, la stabilité chimique sont excellentes par rapport à d'autres matériaux. Ces propriétés suggèrent que les SWCNTs pourraient remplacer d'autres matériaux dans des applications existantes [BOC 97]. Cependant, la combinaison de la transparence, de la conductivité et de l'élasticité peut trouver une utilisation dans l'électronique flexible, tandis que la combinaison de la transparence, de l'imperméabilité et de la conductivité peut trouver une application dans les revêtements protecteurs transparents et les films barrières; et la liste de ces combinaisons ne cesse de croître [HUM 01].

Un SWCNT est une couche unique de graphite, nommé graphène, roulé dans un tube cylindrique d'un diamètre de 1,2 nm comme nous l'avons démontré en 2008 sur la figure 1 [ELH 08].

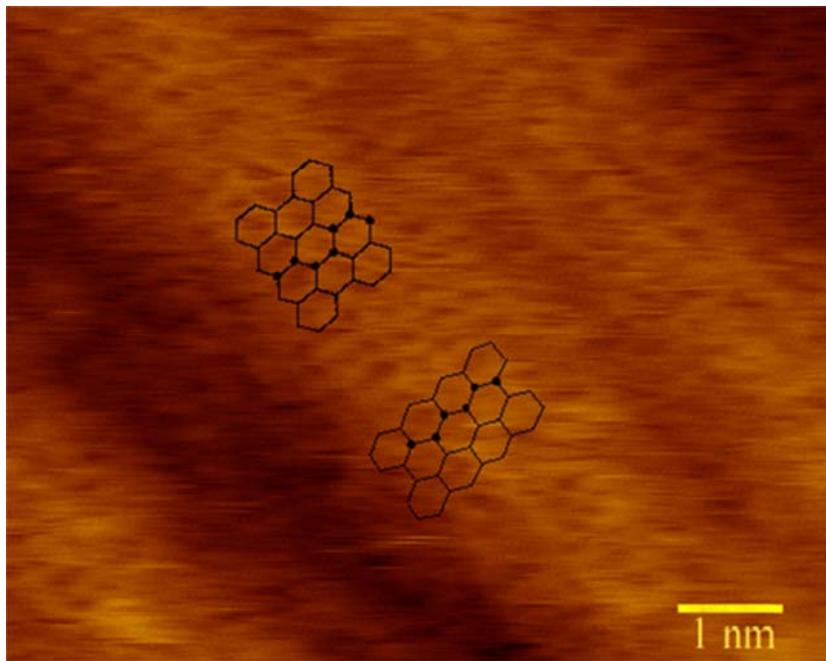


Figure 1. Microscopie à force atomique à haute résolution de quelques nanotubes de carbone mono-paroi (SWCNTs) montrant le réseau hexagonal des atomes de carbone [ELH 08]

La densité de courant et la mobilité des charges du SWCNT attirent les chercheurs et industriels pour les nombreuses applications dans le domaine électrique et la nanoélectronique [HOR 02]. Le but de cette investigation est d'étudier l'utilisation du SWCNT dans le domaine de l'électronique, et plus précisément l'étude d'un nano-condensateur plan (super-condensateur). Pour cela, nous entamons une étude générale de ces variables telles que la capacité, la densité de charge, la différence de potentiel, ainsi que le fonctionnement et le rendement énergétique (stockage d'énergie) de ce nano-condensateur.

Le condensateur, représenté sur la figure 2, est une composante capable de stocker des charges électriques opposées et de les restituer vers un circuit externe. Il est constitué de deux surfaces conductrices (armatures) séparées par un isolant (diélectrique) de faible épaisseur. Il est caractérisé par sa capacité électrique en farads (F) qui est d'autant plus grande que la surface des armatures et plus grande, que l'épaisseur du diélectrique est plus faible et que la permittivité du diélectrique est plus élevée.

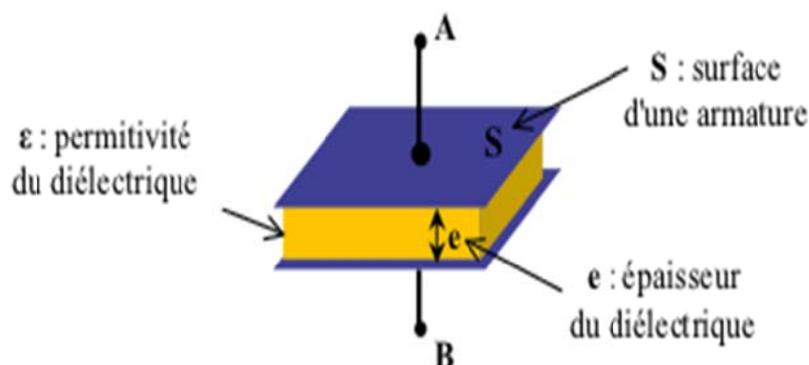


Figure 2. Model d'un condensateur plan

En négligeant l'effet de Bohr, les densités de charges surfaciques portées sur les deux armatures sont distribuées uniformément et ont des signes opposés, car les armatures portent aussi des charges opposées et ont la même surface. Le champ électrique est nul à l'extérieure d'un condensateur, mais à l'intérieur il est noté [ODE 97] :

$$\vec{E} = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \vec{u}_x$$

Le potentiel électrique d'un condensateur plan est donné par l'équation suivante :

$$V = \frac{Q e}{\epsilon S}$$

2. Elaboration prédictive du nano-condensateur à base des SWCNTs

L'utilisation des SWCNTs en électronique est idéale grâce à leurs propriétés à savoir une très haute mobilité et la capacité à stocker de l'énergie électrique.

Notre nano-condensateur peut-être élaboré par les deux armatures à base des SWCNTs séparées un film en quartz d'épaisseur e (figure 3). Une simulation d'un tel circuit électrique contenant un générateur de tension qui est branché avec le nano-condensateur plan.

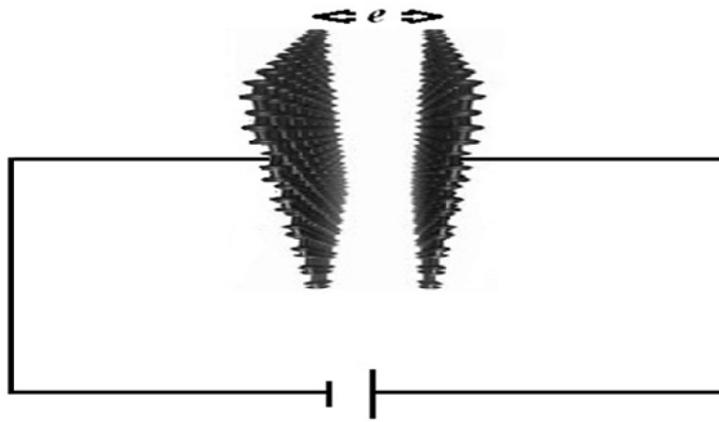


Figure 3. Circuit d'un nano-condensateur à base des SWCNTs

2.1. Etude de la variation de la capacité

Un nano-condensateur est caractérisé par le coefficient de proportionnalité entre la charge et la tension appelé capacité électrique et exprimée en farads (F). La capacité représente la quantité de charge électrique stockée pour un potentiel électrique donné. Elle est donnée par la relation suivante :

$$C = \epsilon_r \cdot C_{vid}$$

$$C_{vid} = \epsilon_0 \frac{S}{e}$$

avec C_{vid} : Capacité du condensateur plan dans le vide, S : Surface des deux armatures, e : Distance séparent les deux armatures, ϵ_0 : Permittivité du vide = $8,854187 \cdot 10^{-12}$ F/m, ϵ_r : Permittivité du diélectrique = à 4,5

Pour étudier l'évolution de la capacité d'un nano-condensateur en fonction de la surface des armatures et l'épaisseur entre elles, nous avons travaillé à l'échelle nanométrique. Ainsi, nous avons varié la surface de l'électrode en SWCNTs entre 100nm^2 et 2000nm^2 et la distance entre les deux armatures, e , entre 10nm et 100nm . Les résultats ainsi trouvés sont présentés sur le tableau 1 et la figure 4.

S(nm ²)	e(nm)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
100		4E-10	2E-10	1.33E-10	1E-10	8E-11	6.6E-11	6E-11	5E-11	4E-11	4E-11
200		8E-10	4E-10	2.66E-10	2E-10	2E-10	1.3E-10	1E-10	1E-10	9E-11	8E-11
300		1.2E-09	6E-10	3.98E-10	3E-10	2E-10	2E-10	2E-10	1.5E-10	1E-10	1E-10
400		1.6E-09	8E-10	5.31E-10	4E-10	3E-10	2.7E-10	2E-10	2E-10	2E-10	2E-10
500		2E-09	1E-09	6.64E-10	5E-10	4E-10	3.3E-10	3E-10	2.5E-10	2E-10	2E-10
600		2.4E-09	1E-09	7.97E-10	6E-10	5E-10	4E-10	3E-10	3E-10	3E-10	2E-10
700		2.8E-09	1E-09	9.3E-10	7E-10	6E-10	4.6E-10	4E-10	3.5E-10	3E-10	3E-10
800		3.2E-09	2E-09	1.06E-09	8E-10	6E-10	5.3E-10	5E-10	4E-10	4E-10	3E-10
900		3.6E-09	2E-09	1.2E-09	9E-10	7E-10	6E-10	5E-10	4.5E-10	4E-10	4E-10
1000		4E-09	2E-09	1.33E-09	1E-09	8E-10	6.6E-10	6E-10	5E-10	4E-10	4E-10
1100		4.4E-09	2E-09	1.46E-09	1E-09	9E-10	7.3E-10	6E-10	5.5E-10	5E-10	4E-10
1200		4.8E-09	2E-09	1.59E-09	1E-09	1E-09	8E-10	7E-10	6E-10	5E-10	5E-10
1300		5.2E-09	3E-09	1.73E-09	1E-09	1E-09	8.6E-10	7E-10	6.5E-10	6E-10	5E-10
1400		5.6E-09	3E-09	1.86E-09	1E-09	1E-09	9.3E-10	8E-10	7E-10	6E-10	6E-10
1500		6E-09	3E-09	1.99E-09	1E-09	1E-09	1E-09	9E-10	7.5E-10	7E-10	6E-10
1600		6.4E-09	3E-09	2.12E-09	2E-09	1E-09	1.1E-09	9E-10	8E-10	7E-10	6E-10
1700		6.8E-09	3E-09	2.26E-09	2E-09	1E-09	1.1E-09	1E-09	8.5E-10	8E-10	7E-10
1800		7.2E-09	4E-09	2.39E-09	2E-09	1E-09	1.2E-09	1E-09	9E-10	8E-10	7E-10
1900		7.6E-09	4E-09	2.52E-09	2E-09	2E-09	1.3E-09	1E-09	9.5E-10	8E-10	8E-10
2000		8E-09	4E-09	2.66E-09	2E-09	2E-09	1.3E-09	1E-09	1E-09	9E-10	8E-10

Tableau 1. Evolution de la capacité (nF) en fonction la surface et l'épaisseur

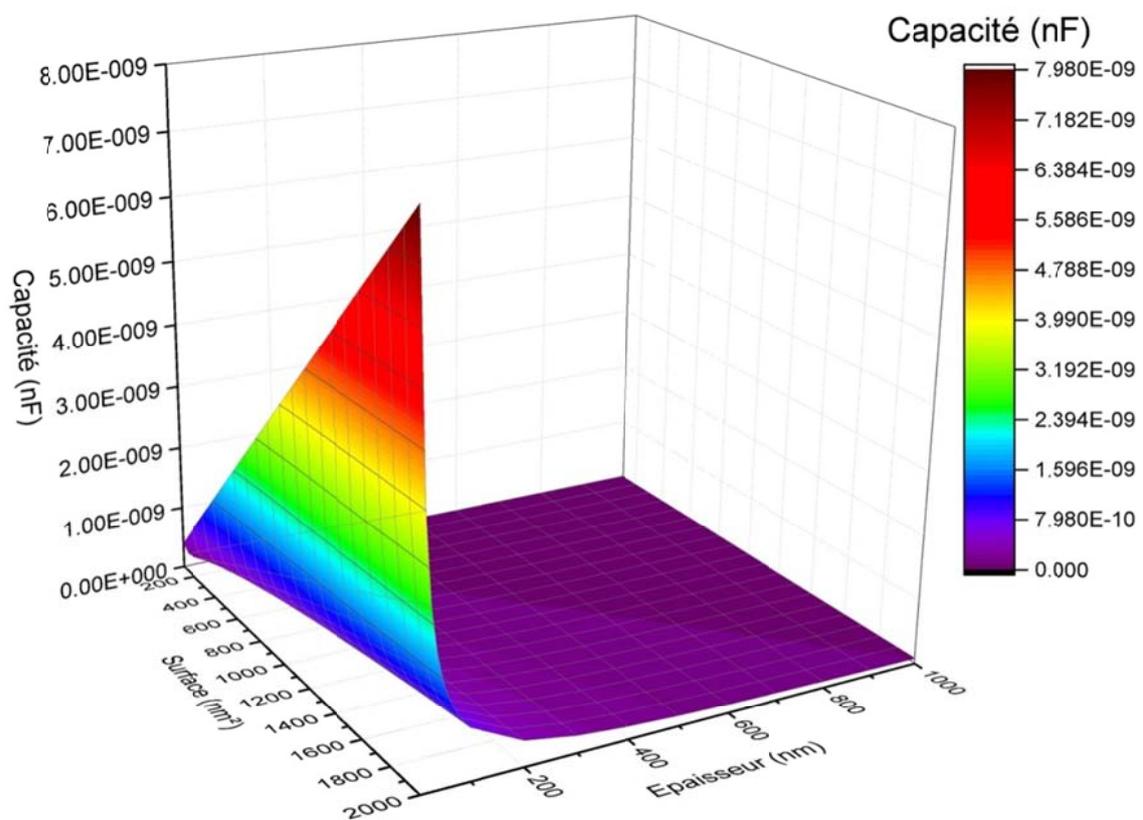


Figure 4. Courbe en 3D représentative de la variation de la capacité en fonction de la surface et l'épaisseur

En se référant à la figure 4, la capacité est proportionnelle à la surface des armatures et inversement proportionnelle à l'épaisseur qui les sépare. Ainsi, pour fabriquer un condensateur à l'échelle nanométrique, il faut développer l'ingénierie des matériaux et chercher une manière convenable pour augmenter la surface des armatures tout en gardant l'épaisseur le plus fin possible.

2.2. Variation de la densité de charge dans un nano-condensateur

Il est très connu que le piézoélectrique entre les deux armatures du nano-condensateur, feuilles de graphène, est un isolant, mais sous une certaine tension, ce piézoélectrique devient conducteur (les deux armatures se touchent). Si on applique une tension supérieure à la tension maximale ; c'est la tension de claquage, puisqu'on travaille à l'échelle nanométrique (épaisseur entre 10nm et 1µm). Alors, le nano-condensateur ne peut pas supporter une grande tension. Pour cela on applique une petite tension. Ainsi, la tension électrique appliquée peut varier entre 0 et 3V.

L'évolution de la densité de charge du nano-condensateur, calculée en utilisant la relation ci-dessous, en fonction du voltage appliqué entre les armatures et l'épaisseur entre celles-ci est donnée dans le tableau 2 et la figure 5.

$$V = \frac{\sigma e}{\varepsilon}$$

V	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3
e(nm)							
10	0.00E+00	1.99E-12	3.98E-12	5.98E-12	7.97E-12	9.96E-12	1.20E-11
20	0.00E+00	9.96E-13	1.99E-12	2.99E-12	3.98E-12	4.98E-12	5.98E-12
30	0.00E+00	6.64E-13	1.33E-12	1.99E-12	2.66E-12	3.32E-12	3.98E-12
40	0.00E+00	4.98E-13	9.96E-13	1.49E-12	1.99E-12	2.49E-12	2.99E-12
50	0.00E+00	3.98E-13	7.97E-13	1.20E-12	1.59E-12	1.99E-12	2.39E-12
60	0.00E+00	3.32E-13	6.64E-13	9.96E-13	1.33E-12	1.66E-12	1.99E-12
70	0.00E+00	2.85E-13	5.69E-13	8.54E-13	1.14E-12	1.42E-12	1.71E-12
80	0.00E+00	2.49E-13	4.98E-13	7.47E-13	9.96E-13	1.25E-12	1.49E-12
90	0.00E+00	2.21E-13	4.43E-13	6.64E-13	8.85E-13	1.11E-12	1.33E-12
100	0.00E+00	1.99E-13	3.98E-13	5.98E-13	7.97E-13	9.96E-13	1.20E-12
200	0.00E+00	9.96E-14	1.99E-13	2.99E-13	3.98E-13	4.98E-13	5.98E-13
300	0.00E+00	6.64E-14	1.33E-13	1.99E-13	2.66E-13	3.32E-13	3.98E-13
400	0.00E+00	4.98E-14	9.96E-14	1.49E-13	1.99E-13	2.49E-13	2.99E-13
500	0.00E+00	3.98E-14	7.97E-14	1.20E-13	1.59E-13	1.99E-13	2.39E-13
600	0.00E+00	3.32E-14	6.64E-14	9.96E-14	1.33E-13	1.66E-13	1.99E-13
700	0.00E+00	2.85E-14	5.69E-14	8.54E-14	1.14E-13	1.42E-13	1.71E-13
800	0.00E+00	2.49E-14	4.98E-14	7.47E-14	9.96E-14	1.25E-13	1.49E-13
900	0.00E+00	2.21E-14	4.43E-14	6.64E-14	8.85E-14	1.11E-13	1.33E-13
1000	0.00E+00	1.99E-14	3.98E-14	5.98E-14	7.97E-14	9.96E-14	1.20E-13

Tableau 2. Variation de la densité de charge en fonction du voltage et l'épaisseur

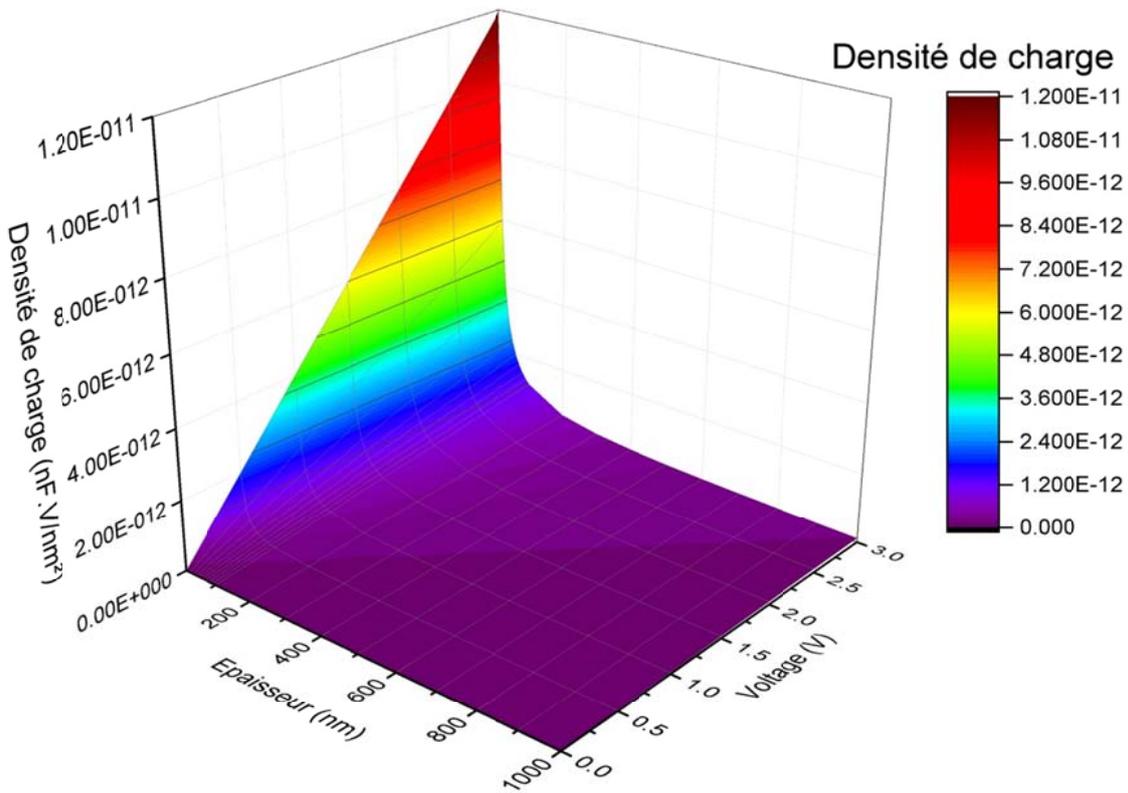


Figure 5. Variation de la densité de charge en fonction du voltage et de l'épaisseur

D'après la figure 5, il est noté que pour des épaisseurs supérieures à 200 nm, quelle que soit la tension électrique appliquée, la densité de charge varie très légèrement et reste faible. Par contre, pour des épaisseurs inférieures à 200 nm, plus la tension appliquée entre les armatures augmente, plus la densité de charge augmente. Cela montre que les armatures des nano-condensateurs ont une densité de charge très élevée qui peut influencer sa capacité.

La variation de la capacité en fonction du voltage déjà utilisée dans le tableau 2 a été évaluée en utilisant l'équation suivante :

$$C = \frac{\sigma S}{V}$$

Nous avons fixé la surface à la valeur 500nm² et la densité de charge $\sigma = 1.19529E-11$ C/nm². Ainsi, nous avons pu obtenir les résultats du tableau 3 et la figure 6.

Surface S=500nm ²	
Densité de charge $\sigma = 1.19529E-11$ C/nm ²	
Voltage (v)	Capacité (nF)
0.01	5.9765E-07
0.5	1.1953E-08
1	5.9765E-09
1.5	3.9843E-09
2	2.9882E-09
2.5	2.3906E-09
3	1.9922E-09

Tableau 3. Différentes valeurs de la capacité en fonction de la tension électrique appliquée

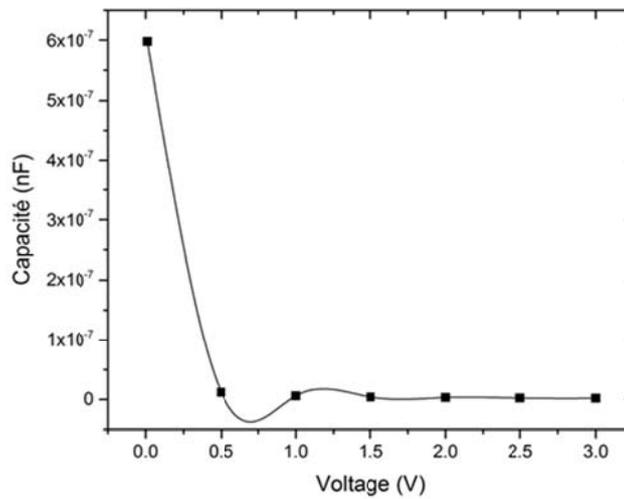


Figure 6. Variation de la capacité en fonction du voltage/ou B est la caractéristique de la capacité en fonction du voltage

La figure 6 montre l'évolution de la capacité du nano-condensateur en (nF) en fonction du voltage appliqué entre ses armatures. Pour un voltage faible, la capacité du nano-condensateur est très grande. Elle diminue rapidement avec l'augmentation du voltage jusqu'à la valeur de 1V. Au-delà de 1V, la courbe de capacité garde une tendance constante avec une capacité de l'ordre de 10^{-7} nF .

2.3. Énergie stockée dans un nano-condensateur de SWCNTs

Nous avons vu qu'un nano-condensateur soumis à une différence de potentiel portait des charges +q et -q sur ses armatures, avec la relation

$$Q = C.V$$

Pour accroître de dq la charge des armatures, il faut qu'une quantité dq de charges se déplacent et voient leur potentiel passer de zéro à v. On sait que pour un tel déplacement, il faut leur apporter une quantité d'énergie égale à $dW = dq.v$

Or, si on apporte une quantité de charges supplémentaires dq, la différence de potentiel V s'accroît de

$$dv = \frac{dq}{C}$$

Donc, on peut écrire $dq = C.dv$

Et $dW = dq.v = C.v.dv$

Par intégration, on peut en déduire la quantité totale d'énergie qu'il a fallu apporter pour amener la différence de potentiel aux bornes du condensateur de zéro à V

$$W = \int dW = \int_0^V C.v.dv = \frac{1}{2}.C.V^2$$

Si l'on relie ensuite entre elles les deux armatures par un fil conducteur, le condensateur va se décharger : les charges accumulées vont repartir. En faisant le même calcul que précédemment, on peut déterminer l'énergie que recevront les charges durant leur retour, pendant que la différence de potentiel entre les armatures va repasser de V à 0.

On obtient:

$$W = \int dW = \int_v^0 C \cdot v \cdot dv = -\frac{1}{2} \cdot C \cdot V^2$$

Ceci prouve que l'énergie fournie durant la charge était restée disponible et qu'elle est restituée lors de la décharge du condensateur.

Un condensateur est donc un réservoir d'énergie électrique.

e=200nm							
voltage capacité	0.01	0.5	1	1.5	2	2.5	3
1.99215E-11	9.96075E-16	2.49019E-12	9.96075E-12	2.24117E-11	3.9843E-11	6.2254E-11	8.96468E-11
3.9843E-11	1.99215E-15	4.98038E-12	1.99215E-11	4.48234E-11	7.9686E-11	1.2450E-10	1.79294E-10
5.97645E-11	2.98823E-15	7.47056E-12	2.98823E-11	6.72351E-11	1.1953E-10	1.8676E-10	2.6894E-10
7.9686E-11	3.9843E-15	9.96075E-12	3.9843E-11	8.96468E-11	1.5937E-10	2.4901E-10	3.58587E-10
9.96075E-11	4.98038E-15	1.24509E-11	4.98038E-11	1.12058E-10	1.9922E-10	3.11273E-10	4.48234E-10
1.19529E-10	5.97645E-15	1.49411E-11	5.97645E-11	1.3447E-10	2.3906E-10	3.73528E-10	5.37881E-10
1.39451E-10	6.97253E-15	1.74313E-11	6.97253E-11	1.56882E-10	2.789E-10	4.35783E-10	6.27527E-10
1.59372E-10	7.9686E-15	1.99215E-11	7.9686E-11	1.79294E-10	3.1874E-10	4.98038E-10	7.17174E-10
1.79294E-10	8.96468E-15	2.24117E-11	8.96468E-11	2.01705E-10	3.5859E-10	5.60292E-10	8.06821E-10
1.99215E-10	9.96075E-15	2.49019E-11	9.96075E-11	2.24117E-10	3.9843E-10	6.22547E-10	8.96468E-10
2.19137E-10	1.09568E-14	2.73921E-11	1.09568E-10	2.46529E-10	4.3827E-10	6.84802E-10	9.86114E-10
2.39058E-10	1.19529E-14	2.98823E-11	1.19529E-10	2.6894E-10	4.7812E-10	7.47056E-10	1.07576E-09
2.5898E-10	1.2949E-14	3.23724E-11	1.2949E-10	2.91352E-10	5.1796E-10	8.09311E-10	1.16541E-09
2.78901E-10	1.39451E-14	3.48626E-11	1.39451E-10	3.13764E-10	5.578E-10	8.71566E-10	1.25505E-09
2.98823E-10	1.49411E-14	3.73528E-11	1.49411E-10	3.36175E-10	5.9765E-10	9.3382E-10	1.3447E-09
3.18744E-10	1.59372E-14	3.9843E-11	1.59372E-10	3.58587E-10	6.3749E-10	9.96075E-10	1.43435E-09
3.38666E-10	1.69333E-14	4.23332E-11	1.69333E-10	3.80999E-10	6.7733E-10	1.05833E-09	1.52399E-09
3.58587E-10	1.79294E-14	4.48234E-11	1.79294E-10	4.0341E-10	7.1717E-10	1.12058E-09	1.61364E-09
3.78509E-10	1.89254E-14	4.73136E-11	1.89254E-10	4.25822E-10	7.5702E-10	1.18284E-09	1.70329E-09
3.9843E-10	1.99215E-14	4.98038E-11	1.99215E-10	4.48234E-10	7.9686E-10	1.24509E-09	1.79294E-09

Tableau 4. La variation d'énergie en fonction de la capacité (nF) et le voltage(V)

La figure 7 présente l'évolution de l'énergie stockée dans le nano-condensateur en fonction de la capacité calculée dans le tableau 1, et le voltage avec une épaisseur entre les armateurs de 200 nm. D'après cette figure, il est très clair que l'énergie stockée est proportionnelle à la capacité et au voltage appliqué entre les armatures.

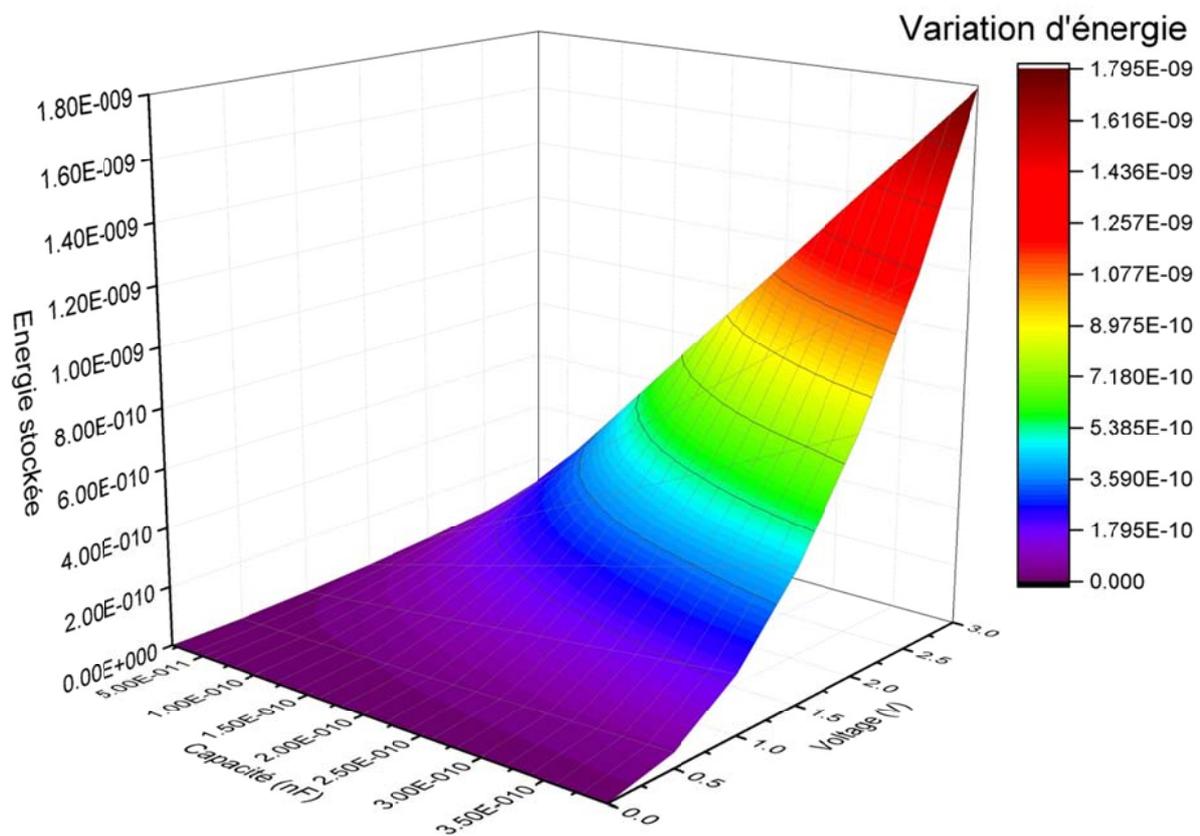


Figure 7. Variation de l'énergie stockée dans le condensateur en fonction de la capacité et le voltage

2.4. Charge et décharge d'un nano-condensateur plan de SWCNTs

Le montage de la figure 8 permet de charger (position 1 du commutateur) le nano-condensateur C à l'aide de la source de tension U au travers la résistance R puis de décharger ce même nano-condensateur C dans la résistance R lorsque le commutateur est sur la position 2.

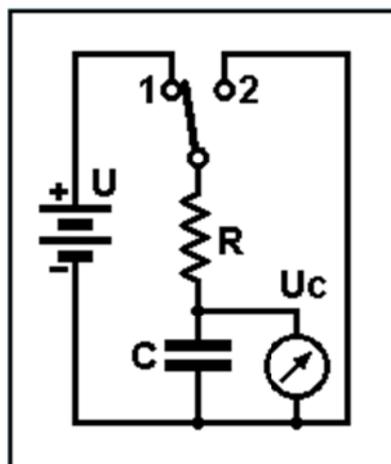


Figure 8. Montage d'essai de charge et de décharge du nano-condensateur

Le temps de charge (ou de décharge) est d'autant plus long que :

- La valeur de la résistance R est grande.
- La capacité C du nano-condensateur est forte.

On mesure la tension u_c aux bornes du nano-condensateur. L'énergie chargée se dissipe dans la résistance sous forme de chaleur (Energie, travail et puissance). Une fois chargé on peut dire que le nano-condensateur bloque le passage du courant continu mais on voit qu'en basculant alternativement le commutateur de la position charge (1) à décharge (2) un courant variable circule.

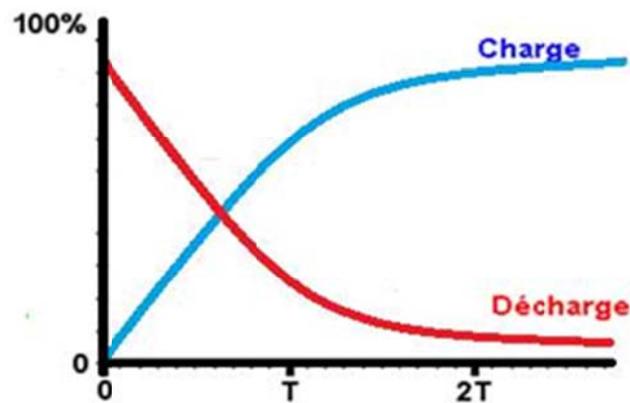


Figure 9. Courbe de charge et de décharge

La figure 9 représente la courbe de la tension aux bornes d'un nano-condensateur qui se décharge dans une résistance (courbe de Décharge) ou qui se charge au travers d'une résistance (courbe de Charge). On voit que la courbe de décharge est rigoureusement symétrique à la courbe de charge par rapport à un axe de symétrie horizontal passant par la valeur 50%. A chaque combinaison R_c (résistance R et condensateur C) correspond une seule courbe de charge et de décharge. Autrement dit le temps nécessaire pour que, lors de la charge, la tension aux bornes du nano-condensateur atteigne 50% de sa valeur maximum est déterminé par la valeur de R et de C et ce temps est identique lors de la décharge pour que la tension aux bornes du condensateur diminue de 50%.

Les informations présentées dans les chapitres précédents montrent que le SWCNT est le meilleur conducteur connu jusqu'à présent. Pour cela, nous proposons dans ce qui va suivre d'étudier l'utilisation du SWCNT pour la fabrication d'un nano-condensateur plan, d'étudier son fonctionnement et son comportement, et de le comparer avec d'autres types de condensateurs utilisable dans les circuits électriques.

3. Conclusion

Nous avons présenté les propriétés du SWCNT et sa structure cristalline. Une application originale d'utilisation du SWCNT en électrodes pour un nano-condensateur est présentée. En effet, des courbes spécifiques et caractéristiques du nano-condensateur à base de SWCNT sont obtenues et présentées dans ce rapport. On peut, par conséquent, citer la capacité-potentiel électrique appliqué (C-V), la variation de l'énergie stockée dans le nano-condensateur en fonction de la capacité et le potentiel électrique appliqué, la courbe en 3D représentative de la variation de la capacité en fonction de la surface et l'épaisseur et finalement la variation en 3D de la densité de charge en fonction du voltage et de l'épaisseur. Ceci démontre que le SWCNT est un bon candidat pour les applications en électrodes de tout genre, pour les nano-condensateurs et donc pour les composants électronique.

Il serait intéressant, par la suite, d'essayer d'augmenter la variation de la capacité relative de notre nano-condensateur à base des SWCNT et d'obtenir les deux caractéristiques de la charge et de la décharge pour une résistance très appropriée.

Bibliographie

- [BOC 97] BOCKRATH, D. COBDEN H., « *Single-electron transport in ropes of carbon nanotubes*» *Science* 275(5308), p. 1922-1925, 1997
- [ELH 08] K. EL-HAMI K., MATSUSHIGE K., « *Imaging Wet Individual Single Walled Carbon Nanotube at Atomic Level*» *The Open Construction and Building Technology Journal*, 2, p.134-136, 2008.
- [OUY 01] OUYANG M. HUANG.J.L. CHEUNG C..L., LIEBER C. M., « *Atomically Resolved Single-Walled Carbon Nanotube Intramolecular Junctions*», *Science*, vol. 29, pp. 97-102, June 2001.
- [ODE 97] ODELIUS M., BERNASCONI M., PARRINELLO M., « *Features of the charge transfer in nanoporous silicon*», *Physical Review Letters*, vol. 78, pp. 14-20, June 1997.
- [HOR 02] HORNBAKER D.J., KAHNG S.J., MISRA S., « *Mapping the onedimensional electronic states of carbon nanotubes*», *Science*, vol.295, pp. 828-90, October 2002.
- [HUM 01] HUMMER G., RASAIHA J. C., NOWORYTA J. P., « *Water Conduction through the Hydrophobic Channel of a Carbon Nanotube*», *Nature*, vol. 414, pp 188-92, February 2001.
- [ODO 98] ODOM T.W., HUANG J.L., KIM PLIEBER., C.M., « *Structure and Electronic Properties of Carbon Nanotubes*», *Nature*, vol. 62, p.391-7, September 1998.