

# Nanotubes de carbone pour la Nanorobotique

La géométrie bien définie, les propriétés mécaniques exceptionnelles et les caractéristiques électriques extraordinaires des nanotubes de carbone les qualifient pour structurer les circuits nanoélectroniques, les systèmes nanoélectromécaniques et les systèmes nanorobotiques. Des déplacements relatifs entre les coques imbriquées atomiquement lisses dans des nanotubes de carbone multi-couche peuvent être exploités comme mécanismes de mouvement nanométriques robustes pour des applications telles que des roulements, des commutateurs, des oscillateurs gigahertz, des navettes, des mémoires, des seringues et des actionneurs. Les structures creuses des nanotubes de carbone peuvent servir de conteneurs, de conduits, de pipettes et de câbles coaxiaux pour stocker une masse ou une charge, ou pour le transport.

Non seulement les nanotubes peuvent servir de blocs de construction pour des structures, outils, capteurs et actionneurs plus complexes, mais ils peuvent également être utilisés comme composants fondamentaux pour les nanorobots futurs. Nous passons en revue les progrès technologiques sur les nanotubes de carbone liés à la nanorobotique.

La nanorobotique est le domaine émergent de la robotique à l'échelle nanométrique. Il comprend des robots de taille nanométrique, c'est-à-dire des nanorobots (qui n'ont pas encore été réalisés), et de grands robots capables de manipuler des objets ayant des dimensions nanométriques avec une résolution nanométrique, c'est-à-dire des manipulateurs nanorobotiques. Bien que les visionnaires aient prévu un avenir nanorobotique de la fabrication moléculaire et de la nanomédecine, la forme que prendront les nanorobots et les tâches qu'ils vont accomplir ne sont pas claires. Cependant, il est clair que la nanotechnologie progresse vers la

construction de structures, d'outils, de capteurs, d'actionneurs et de systèmes de plus de 100 nm qui étendront notre capacité à explorer le monde du nano à partir des perspectives de perception, de connaissance et de manipulation. La réduction de la taille de l'appareil à des dimensions nanométriques présente de nombreuses possibilités fascinantes, comme la manipulation de nano-objets avec des nano-outils, la mesure de masse dans des plages de femtogrammes, la détection de forces à piconewton et l'induction du mouvement gigahertz. Alors que nous comprenons encore peu en ce qui concerne la mise en œuvre de «fonctions avancées» telles que l'intelligence, la réplique et la synthèse mécano-chimique atome par atome à l'échelle nanométrique, les premiers développements qui ont fondé le domaine nanorobotique incluent l'invention de nouveaux outils tels que les microscopes à effet tunnel (STM) et la synthèse de nouveaux nanomatériaux atomiquement bien définis tels que les nanotubes de carbone (NTC).

Tableau 1. Propriétés physiques des NTC

Property	Item	Data	Potential applications in nanorobotics
Geometrical	Layers	Single/multiple	Structures, probes, grippers/tweezers, scissors
	Aspect ratio	10–1000	
	Diameter	~0.4 nm to >3 nm (SWNTs) ~1.4 nm to >100 nm (MWNTs)	
	Length	Several micrometers (rope up to centimeters)	
Mechanical	Young's modulus	~1 TPa (steel: 0.2 TPa)	Actuators, bearings, syringes, switches, memories
	Tensile strength	45 GPa (steel: 2 GPa)	
	Density	~1.33–1.4 g/cm <sup>3</sup> (Al: 2.7 g/cm <sup>3</sup> )	
	Interlayer friction	Ultrasmall	
Electronic	Conductivity	Metallic/semiconducting	Diodes, transistors, switches, logic gates
	Current carrying capacity	~1 TA/cm <sup>3</sup> (Cu: 1 GA/cm <sup>3</sup> )	Wires/cables
	Field emission	Activate phosphorus at ~1–3 V	Proximity/position sensors
Electromechanical	Piezoresistivity	Positive/negative	Deformation/displacement sensors
Thermal	Heat transmission	>3 kW/mK (Diamond: 2 kW/mK)	Circuits, sensors, thermal actuators

## Blocs de construction à base de CNT

# **pour les systèmes nanorobotiques**

La géométrie bien définie, les propriétés mécaniques exceptionnelles et les caractéristiques électriques extraordinaires, parmi d'autres propriétés physiques exceptionnelles des CNT (voir Tableau 1) les qualifient pour des applications potentielles dans les circuits nanoélectroniques, les systèmes nanoélectromécaniques (NEMS), et les systèmes nanorobotiques. Pour les nanorobotiques, certaines des caractéristiques les plus importantes des nanotubes comprennent leur diamètre nanométrique, leur grand format (10-1000), leur module d'Young, leur excellente élasticité, leur frottement ultramine, leurs excellentes propriétés d'émission de champs, diverses conductivités électriques, conductivité thermique élevée, capacité de transport de courant élevée avec surtout pas de chauffage, sensibilité de la conductance à divers changements physiques ou chimiques, et modification de longueur de liaison induite par la charge. Les NTC peuvent servir dans des systèmes nanorobotiques en tant qu'éléments structurels, outils, capteurs et actionneurs. Comme le montre la figure 1, à partir des nanotubes de carbone cultivés, les nanotubes peuvent être assemblés en structures plus complexes en utilisant des approches ascendantes ou conçues pour réaliser des blocs de construction secondaires en utilisant des approches descendantes.

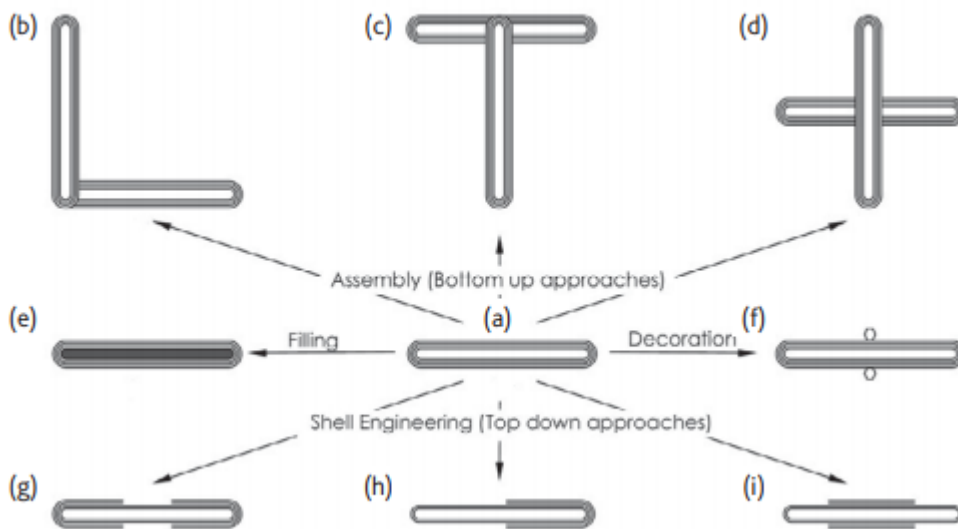


Fig. 1 Blocs de construction à base de NTC. En partant de (a) NTC cultivés, les nanostructures peuvent être créées par les approches ascendantes de (b-d) assemblage, (e) remplissage, ou (f) les décorer, ou de manière descendante (g -i) Ingénierie de leurs coquilles / bouchons.

Les NTC cultivés peuvent servir directement d'éléments fonctionnels pour les nanodispositifs. Le premier exemple d'un tel dispositif est la sonde à nanotube pour un microscope à force atomique (AFM) – qui a été démontré par Dai et al. pour améliorer la résolution spatiale d'un AFM et protéger la pointe du phénomène de «crash de pointe». Dans ce dispositif, un CNT à parois multiples (MWNT) a été assemblé manuellement sur un cantilever en Si disponible dans le commerce. D'autres développements ont amélioré la technique de construction par dépôt chimique en phase vapeur (CVD), l'assemblage contrôlé, et le prélèvement d'un tube à partir de nanotubes à paroi unique (SWNT) alignés verticalement à partir de surfaces de substrat planes. Les pinces à nanotubes ont été construites avec deux nanotubes sur une fibre de verre et entraînées par l'interaction électrostatique entre elles. En assemblant des nanotubes de carbone, des structures plus complexes peuvent être construites. Les jonctions intermoléculaires et intramoléculaires à nanotubes sont des éléments de base pour de telles structures. Pour la nanoélectronique, les circuits

de nanotubes purs créés par l'interconnexion de nanotubes de différents diamètres et par chiralité peuvent conduire à la prochaine génération de l'électronique.

Les jonctions suspendues peuvent fonctionner comme une mémoire non volatile électromécanique. Les mouvements intercouches entre des coques de carbone individuelles, imbriquées et suspendues par des forces de van der Waals dans un MWNT, fournissent des performances exceptionnelles en nanobares linéaires et rotatives avec une capacité de retour de position inhérente, et potentiellement en résonateurs / oscillateurs / navettes gigahertz , interrupteurs tubulaires, mémoires, seringues, nano-servomoteurs linéaires avec détection de position intégrée, et éléments rotatifs pour utilisation dans NEMS.

Outre leurs performances nanomécaniques intéressantes, la variation de la résistance des NTC avec le mouvement du noyau télescopique fournit un mécanisme électrique unique pour détecter et contrôler leur fonctionnement. Alors que les prototypes ont prouvé certains des concepts précédents, la capacité de modifier de façon contrôlable la structure de coque fermée de MWNT telle que synthétisée pour former des dispositifs intershell-motion est un défi important pour leur fabricabilité et leur commercialisation. Avec leurs noyaux creux et leurs grands rapports physiques, les NTC sont des conduits possibles pour des quantités nanométriques de divers matériaux. Une variété de matériaux ont été encapsulés par les NTC, tels que les métaux et leurs composés, l'eau et les fullerènes. Des applications pour des dispositifs tels que les gabarits, les thermomètres et les nanotubes ont été présentées. La possibilité de fournir des matériaux encapsulés à partir de coques de carbone présente un grand intérêt en raison des applications potentielles en tant que sources atomiques pour le nanoprototypage, le nanoassemblage et l'injection. Nanoassemblage de CNTs L'étalement aléatoire, la croissance directe, l'auto-assemblage, l'impression par

transfert et l'assemblage diélectrophorétique (DEP) ont été utilisés pour le positionnement de nanotubes ou autres nanostructures sur des électrodes pour la construction de dispositifs électroniques, généralement NEMS, dans un certain type de matrice régulière.

Nous avons pu réaliser un dépôt contrôlé de différentes formes nanométriques de carbone sur des copeaux de Si en utilisant des techniques d'assemblage ascendantes pilotées par DEP. Ce type d'assemblage est compatible avec les techniques traditionnelles de micro-usinage et de nanomachinage, et offre ainsi un outil puissant pour la fabrication par lots de NEMS de nouvelle génération. Plus précisément, nous avons démontré l'aptitude de cette technique à assembler des MWNT, des CNT à double paroi (DWNT), des CNT remplis de Cu et des bobines de CNT (figure 2). Le processus utilisé pour construire le réseau de nanostructures est le suivant.

Tout d'abord, la couche de nanoélectrode inférieure (15 nm Cr / 45 nm Au) est définie sur un substrat de Si, qui est recouvert d'un oxyde isolant à 500 nm. La couche de nanoélectrode est formée en définissant des motifs dans une résine bicouche (poly (méthacrylate de méthyle) / poly (2-acétamidoacrylate de méthyle), ou PMMA / PMAA) en utilisant la lithographie par faisceau d'électrons, suivie d'un dépôt de métal et d'un décollage. Les électrodes ont une largeur de 300 nm et sont séparées par des espaces de 350 nm. Ensuite, des nanomatériaux à base de carbone sont déposés sur les électrodes par couplage ac-dc DEP. Pour cette étape, les nanomatériaux sont suspendus et soniqués dans l'éthanol pour assurer l'homogénéité. La puce est ensuite immergée dans un réservoir contenant la suspension et un champ électrique composite AC-DC est appliqué avec un générateur de fonction haute fréquence.

Après environ 100 s, la puce est retirée du réservoir et rincée dans de l'éthanol propre. Enfin, elle est soufflée à sec avec un pistolet à azote. Ce processus d'assemblage permet

de réaliser des structures permettant d'étudier et de caractériser les propriétés électriques et mécaniques de ces nanomatériaux. Plus important encore, la capacité d'assembler des nanomatériaux disparates en utilisant la même technique permettrait leur intégration dans des nanostructures complexes dans la réalisation de NEMS intégré et d'autres nanosystèmes.

La nanomanipulation est une approche prometteuse pour le nanoassemblage complexe. Les techniques clés permettent le contrôle de la position et de l'orientation des blocs de construction avec une résolution nanométrique combinée à leur connexion. L'assemblage nanorobotique permet la construction de structures plus complexes en prototype NEMS. Les jonctions intermoléculaires et intramoléculaires à nanotubes sont des éléments de base pour de tels assemblages. Bien que certains types de jonctions aient été synthétisés avec des méthodes chimiques, rien n'indique pour l'instant qu'une approche basée sur l'auto-assemblage peut fournir des structures plus complexes.

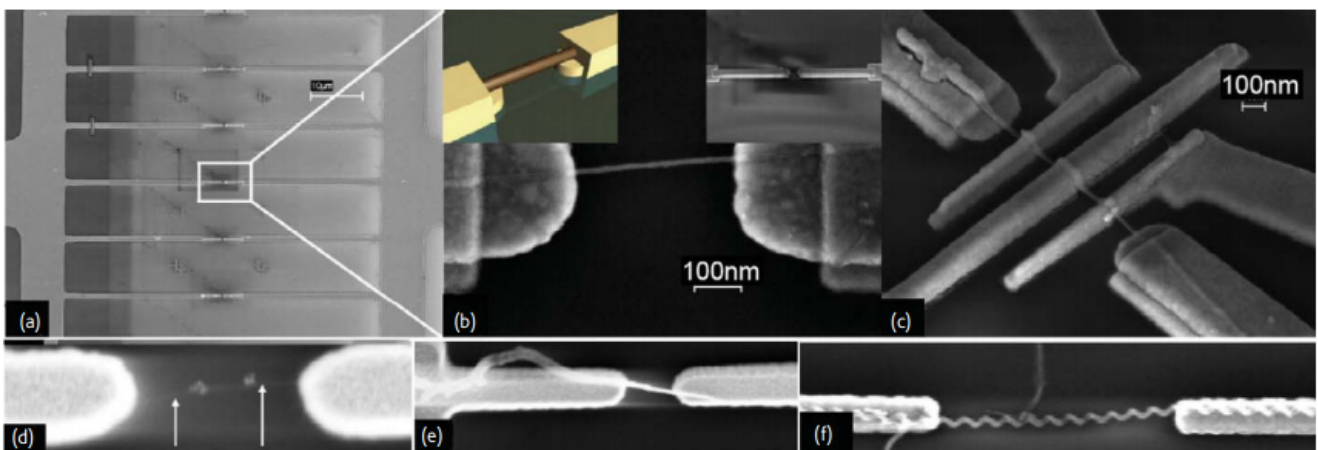


Fig. 2 Approche de nanofabrication hybride pour la réalisation de nanosystèmes intégrés. (a) Conception de nanoarray. (b) nanosystème MWNT. Encarts: micrographie électronique à balayage (MEB) schématique et à faible grossissement. (c) Assemblage direct de nanostructures sophistiquées. (d-f) Divers nanomatériaux tels que les DWNT, les NTC remplis de Cu et les nanocoils.

Dans la figure 3, nous montrons quelques exemples de l'assemblage nanorobotique de jonctions CNT en mettant l'accent sur les méthodes de connexion. Des jonctions CNT ont été créées en utilisant les forces de van der Waals (figure 3a), le dépôt induit par faisceau électronique (EBID) (figure 3b), la liaison par mécano-chimie (figure 3c) et le soudage par points à l'intérieur des nanotubes de carbone Fig. 3d). Les jonctions CNT connectées par EBID donnent des jonctions plus fortes que celles connectées par les forces de van der Waals, comme le montrent les Fig. 3a et 3b.

Le développement de l'EBID classique a été limité par le filament d'électrons coûteux utilisé et la faible productivité. Nous avons démontré un système parallèle EBID utilisant des NTC comme émetteurs d'électrons. Pour construire des jonctions plus fortes sans ajouter de matériau supplémentaire, l'assemblage mécano-chimique nanochrome est une stratégie importante. Cette approche est basée sur des réactions chimiques en phase solide, ou mécanosynthèse, qui est définie comme une synthèse chimique contrôlée par des systèmes mécaniques fonctionnant avec une précision à l'échelle atomique. La technique permet une sélection directe de la position des sites de réaction<sup>3</sup>. En assemblant des atomes avec des liaisons pendantes plutôt que des atomes stables, il est plus facile de former des liaisons primaires, ce qui fournit une connexion simple mais forte. La fabrication destructive fournit un moyen de former des liens pendants aux extrémités des tubes cassés. Certaines des liaisons pendantes peuvent alors se lier avec des atomes voisins, mais généralement quelques liaisons resteront réactives. Un nanotube avec des liens pendants à son extrémité se liera plus facilement à un autre pour former des jonctions intramoléculaires. La figure 3c montre une telle jonction.



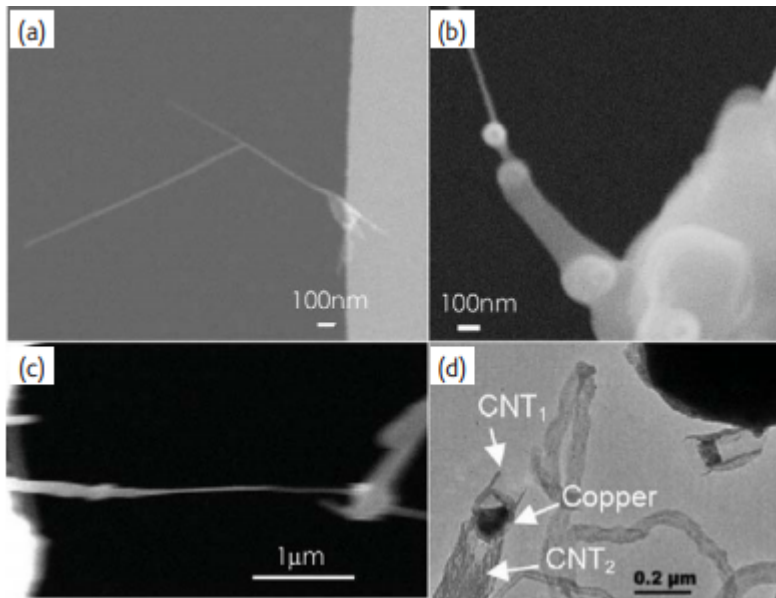


Fig. 3 Jonctions CNT. (a) CNT connectés par des interactions de van der Waals. (b) CNT rejoints par EBID. (c) NTC liés par une réaction mécano-chimique. (d) CNT soudés en utilisant du Cu.

EBID implique des faisceaux d'électrons de haute énergie et a besoin de précurseurs externes pour l'obtention de dépôts conducteurs, ce qui limite ses applications. La liaison mécano-chimique est prometteuse, mais elle n'est pas encore mature. Récemment, nous avons développé une technique de soudage nanorobotique par points en utilisant des NTC remplis de Cu pour le soudage de nanotubes. La soudure est encapsulée à l'intérieur des noyaux creux des NTC pendant leur synthèse, donc aucun précurseur externe n'est nécessaire. Un biais de seulement quelques volts peut induire la migration du Cu, ce qui en fait une approche rentable. La figure 3d montre une jonction soudée en utilisant cette technique. La qualité de la soudure est en partie déterminée par la capacité à contrôler le débit massique du tube. Un dépôt de haute précision de 120 ag / s a été réalisé dans notre expérience basée sur l'électromigration. La manipulation nanorobotique en trois dimensions a ouvert une nouvelle voie pour le nanoassemblage. Cependant, la nanomanipulation est toujours réalisée de manière sérielle avec un contrôle restreint, ce qui n'est certainement pas une technique de production à grande échelle.

Néanmoins, avec les progrès dans l'exploration de la physique mésoscopique, un meilleur contrôle de la synthèse des matériaux, des actionneurs plus précis, et des outils efficaces de manipulation, nanoassemblage à grande vitesse, parallèle et automatique seront possibles.

Source : [Carbon nanotubes for nanorobotics](#), Lixin Dong, ArunkumarSubramanian, Bradley J. Nelson, 2007.