

Nanosystèmes

Feuille de route

Plan

1. Groupe et Base de travail
2. Quelques définitions
3. Pourquoi une feuille de route « Nanosystèmes » ?
4. Les grands domaines d'analyse
 - 4.1 Fabrication, synthèse de nano-objets et nanocomposants
 - 4.2 Systèmes, applications
 - 4.3 Modélisation
5. Synthèse et recommandations

1. Groupe et base documentaire de travail

Groupe de travail – A. Bancaud, C. Bergaud, A. Esteve, L. Nicu

Mode de travail – réunions mensuelles (démarrage sept. 08), analyse et discussion à partir de documents de prospective

Base documentaire –

« Productive Nanosystems – A Technology Roadmap »

- document (400 p.) établi à l'initiative de la Fondation « **The Waitt Family** » supportée par 3 autres compagnies/organisations (**Battelle, Foresight Nanotech Institute, Society of Manufacturing Engineers**), à l'aide d'un comité d'organisation de renommée internationale ;

« Darpa – 50 years – Bridging the gap, powered by ideas »

- document stratégique de la Darpa établi à l'occasion du 50^{ème} anniversaire de l'organisation

Base documentaire (suite) –

« Nanotechnology and society – time of change », Mike Tredder, Exec. Director, Center for Responsible Nanotechnology

« The future of technology », Melanie Swan, MS Futures Group

« Agenda stratégique de Lisbonne – 2010 », Union EU.

- Plus refs. bibliographiques « de chevet » propres à chacun des membres du groupe de travail

ATTENTION : risque de recouvrement thématique (par moment) avec les autres groupes de travail – Systèmes Intelligents, Nanomédecine, Photonique...

2. Quelques définitions

Terminologie de la road-map

Nanosystèmes – nanostructures et/ou composants et/ou dispositifs interactifs

Nanosystèmes fonctionnels – nanosystèmes traitant de l'énergie et/ou information

Nanosystèmes fonctionnels avancés – nanosystèmes fonctionnels incorporant un ou plusieurs nanocomposants ayant une structure à précision atomique

Nanosystèmes productifs (PN) – nanosystèmes fonctionnels capables de fabriquer des structures, composants et dispositifs à précision atomique

Terminologie « simplifiée »

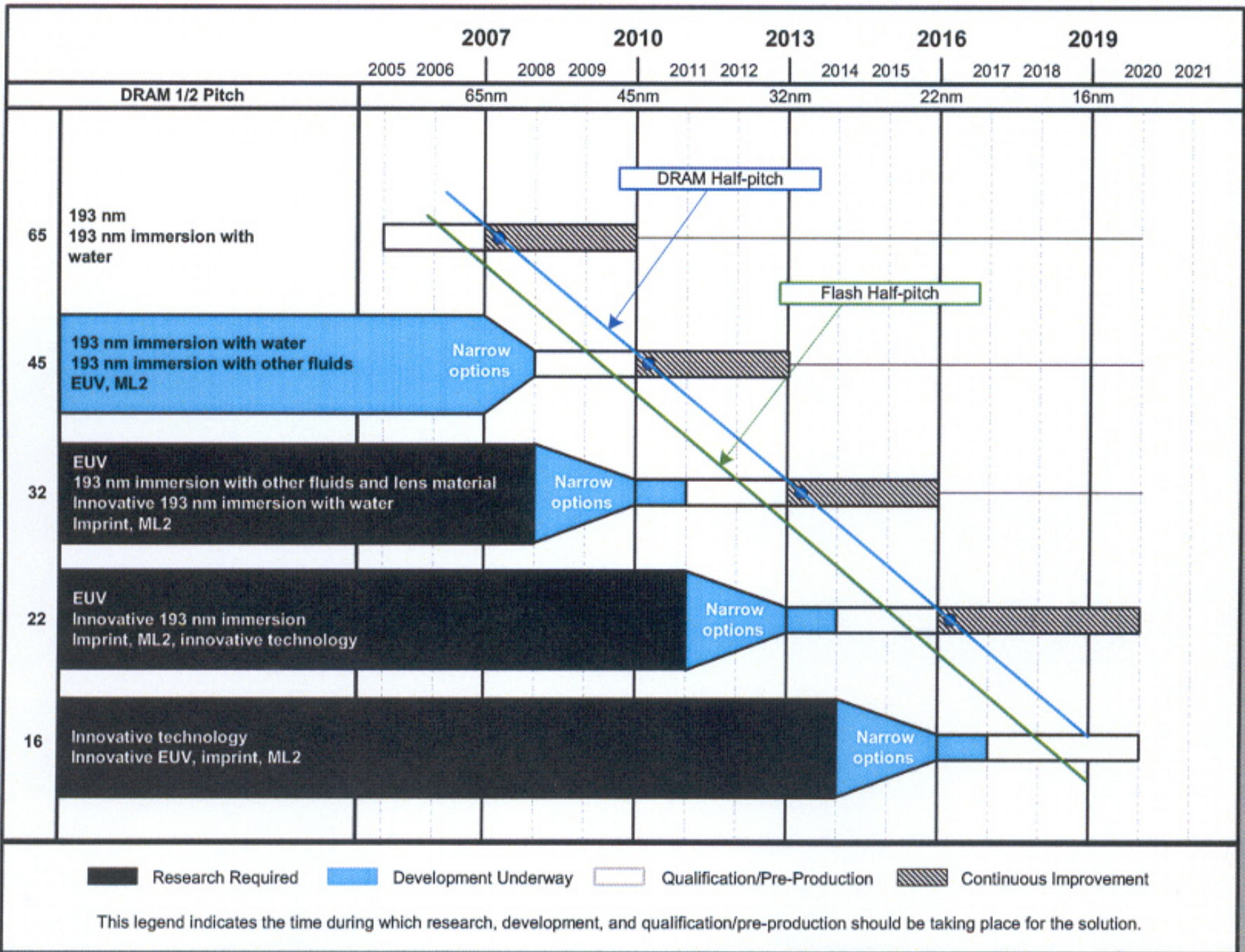
Nano-objet - élément structurel *passif* satisfaisant une contrainte dimensionnelle (sub-100nm)

Nanocomposant – élément structurel *actif* (fonction physique) satisfaisant une contrainte dimensionnelle (sub-100nm)

Nanosystème – ensemble de nanocomposants ayant une *raison d'être* fonctionnelle

Architectures de nanosystèmes – réseaux de nanosystèmes qui communiquent, voire agissent de façon coordonnée en vue d'accomplissement d'une ou plusieurs actions

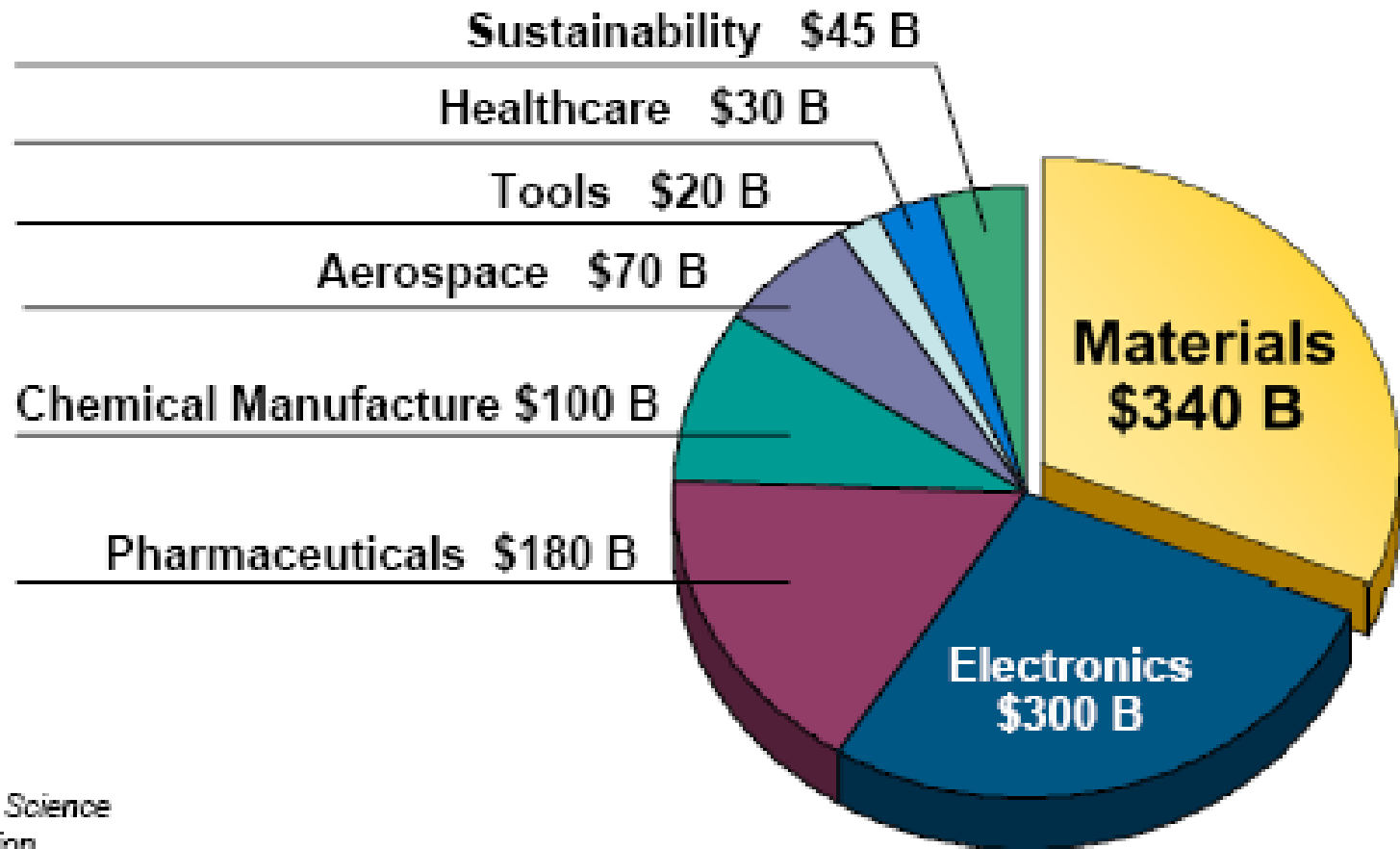
3. Pourquoi une feuille de route
« Nanosystèmes » ?



Feuille de route « Nanosystèmes » – objectifs

1. Aider les compagnies à développer des plans stratégiques technologiques (incluant les opportunités d'alliances avec d'autres compagnies)
2. Poser les fondations d'une recherche technologique coordonnée et des futurs programmes de développement industriels transverses
3. Prioriser les besoins technologiques majeurs pas encore adressés
4. Aider à la création de plateformes technologiques émergentes
5. Identifier les opportunités de croissance prenant racine dans les technologies émergentes

Impact industriel estimé des nanosystèmes en 2015 > 1000Md \$



Source:
National Science
Foundation

Development Area	Horizon I	Horizon II	Horizon III
<p>Atomically Precise Fabrication and Synthesis Methods</p> <p><i>...où comment je fabrique...</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> Bio-based productive nanosystems (ribosomes, DNA polymerases) Atomically precise molecular self-assembly Tip-directed (STM, AFM) surface modification Advanced organic and inorganic synthesis 	<ul style="list-style-type: none"> Artificial productive nanosystems in solvents Mechanically directed solution-phase synthesis Directed and conventional self-assembly Crystal growth on tip-built surface patterns Coupled-catalyst systems 	<ul style="list-style-type: none"> Scalable productive subsystems in machine-phase environments Machine-phase synthesis of exotic structures Multi-scale assembly Single-product, high-throughput molecular assembly lines
<p>Atomically Precise Components and Subsystems</p> <p><i>...où quelles sont les briques de base...</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> Biomolecules (DNA- and protein-based objects) Surface structures formed by tip-directed operations Structural and functional nanoparticles, fibers, organic molecules, etc. 	<ul style="list-style-type: none"> Composite structures of ceramics, metals, and semiconductors Tailored graphene, nanotube structures Intricate, 10-nm scale functional devices 	<ul style="list-style-type: none"> Nearly reversible spintronic logic Microscale 1 MW/cm³ engines and motors Complex electro-mechanical subsystems Adaptive supermaterials
<p>Atomically Precise Systems and Frameworks</p> <p><i>...où comment j'assemble...</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> 3D DNA frameworks, 1000 addressable binding sites Composite systems of the above, patterned by DNA-binding protein adapters Systems organized by tip-built surface patterns 	<ul style="list-style-type: none"> Casings, "circuit boards" to support, link components 100-nm scale, 1000-component systems Molecular motors, actuators, controllers Digital logic systems 	<ul style="list-style-type: none"> Complex systems of advanced components, micron to meter+ scale 100 GHz, 1 GByte, 1 μm-scale, sub-μW processors Ultra-light, super-strength, fracture-tough structures
<p>Applications</p> <p><i>...où quelle finalité...</i></p>	<ul style="list-style-type: none"> Multifunctional biosensors Anti-viral, -cancer agents 5-nm-scale logic elements Nano-enabled fuel cells and solar photovoltaics, High-value nanomaterials Artificial productive nanosystems 	<ul style="list-style-type: none"> Artificial immune systems Post-silicon extension of Moore's Law growth Petabit RAM Quantum-wire solar photovoltaics Next-generation productive nanosystems 	<ul style="list-style-type: none"> Artificial organ systems Exaflop laptop computers Efficient, integrated, solar-based fuel production Removal of greenhouse gases from atmosphere Manufacturing based on productive nanosystems
	5 – 10 ans	10 – 15 ans	15 – 30 (+) ans

4. Les grands domaines d'analyse

4.1 Fabrication, synthèse de nanocomposants

4.2 Systèmes, Applications

4.3 Modélisation

4.1 Fabrication, synthèse de nano-objets

Fabrication et synthèse de nano-objets

- Techniques et technologies de fabrication avec une précision ultime (atomique ?)
- Assemblage ordonné et hiérarchique d'atomes ou de nano-objets pour obtenir des nanosystèmes

Approches descendantes « Top-down » :

Précision ultime ?

Approches ascendantes « Bottom-up » :

Assemblage ordonné et hiérarchique ?

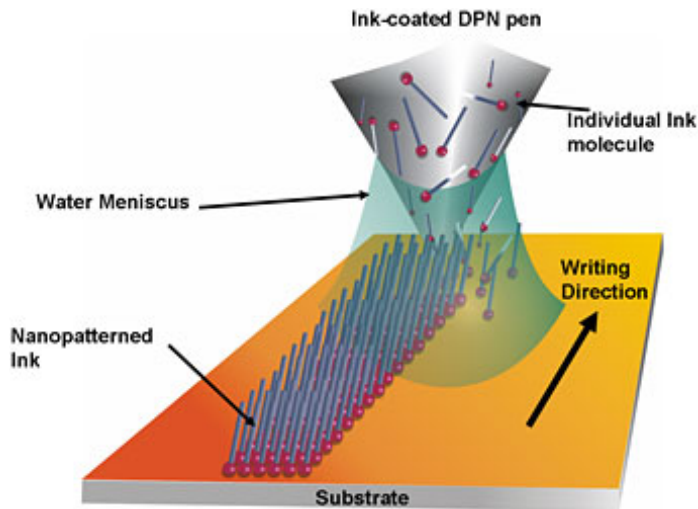


Combinaison des deux approches !

Fabrication et synthèse de nano-objets

Approches descendantes « Top-down » :

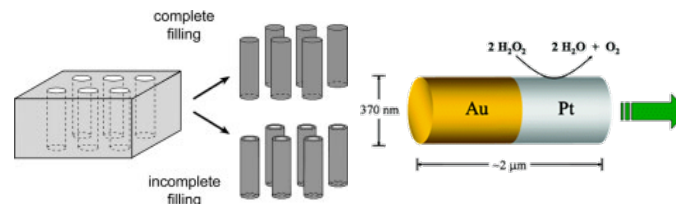
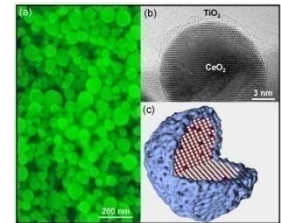
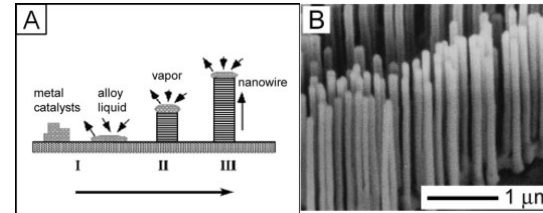
- Lithographies
- Champ proche (AFM, STM, SNOM)
- Nano-impression
- Lithographie douce
- ...



Approches ascendantes « Bottom-up » :

Fabrication de nanostructures 0D et 1D

- Synthèse organique et organométallique
- Croissance par épitaxie
- Dépôt dans nanopores
- ...



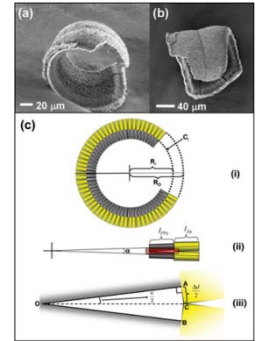
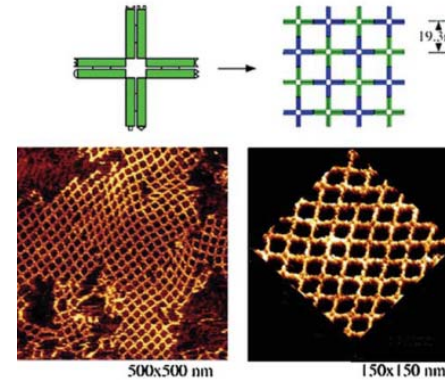
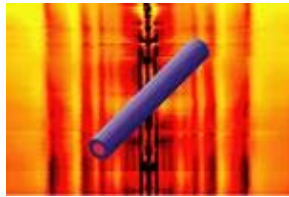
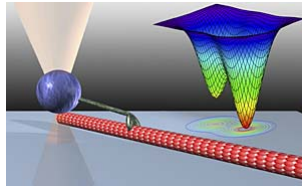
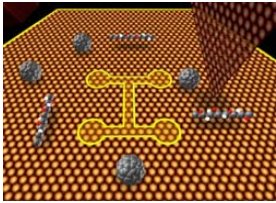
Intégration ordonnée et hiérarchique de nano-objets

Top-down

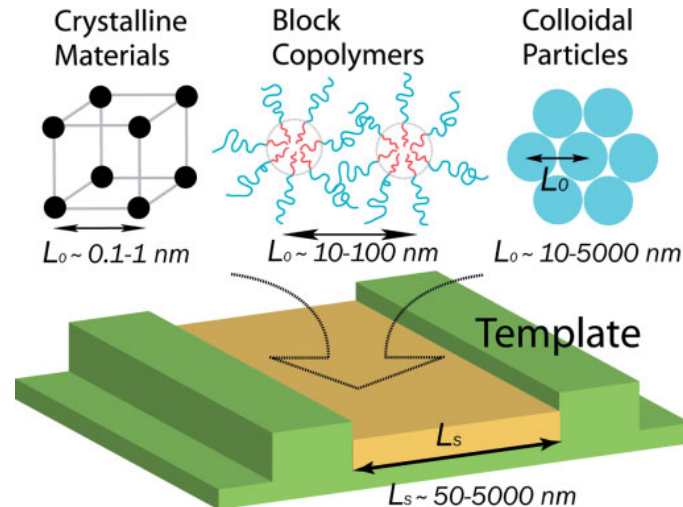
Bottom-up

Nano-manipulation mécanique, optique et électrique

Assemblage par voies chimique et biologique

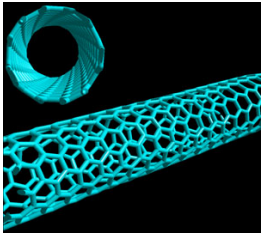


Couplage « Bottom-up » et « Top-down » : effet « Template »



4.1 Fabrication, synthèse de nanocomposants

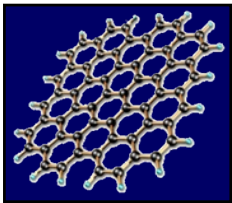
Les promesses des nano-composants



1- Composants à fonctions optimisées pour électronique / NEMS

les nanotubes de carbone

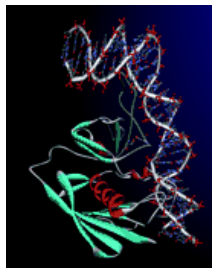
- l'hélicité détermine le caractère conducteur/semi-conducteur
- propriétés mécaniques remarquables : longueur de persistance ~ 1 mm
- apparition des méta-nanotubes : substitués, revêtus, dopés, hétéro



2- Composants pour électronique / magnétisme / NEMS

le graphène

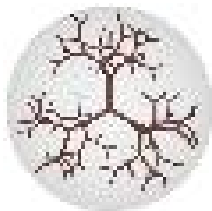
- feuilles de carbone mono-atomique
- propriétés électriques quasi parfaites / rigidité colossale



3- Aptamères: interacteurs spécifiques pour bio-capteurs

les nanostructures biologiques: ADN, ARN et protéines

- structures contrôlées à l'échelle moléculaire
 - réplication de l'ADN 10^9 paires de bases reproduites à l'identique
- possibilités infinies d'interactions/associations, e.g. protéines



4- Couches sensibles pour capteurs physico-chimiques

les nanostructures synthétiques: dendrimères

- nano-structures chimiques branchées
- fonctions chimiques exaltées en surface

5- Couches actives pour les composants opto/capteurs...

les technologies de nanostructuration par CVD

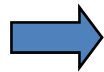
Fabrication de nanocomposants

On retrouve les...

Approches top-down :

2D :

- Structuration de couches moléculaires par épitaxie, CVD...
e.g. nanomatériaux énergétiques, ChemFET...
- Structuration de couches organiques par polymérisation, chimie aqueuse...
e.g. poly-pyrroles, poly-NIPAM, MIPs...



Fabrication classique, poursuite de travaux engagés au LAAS

3D :

- Réalisation de nano-motifs par microscopie électronique
e.g. nanophotonique
- Réalisation des surfaces nano-structurées par AFM
e.g. nanobioplumes

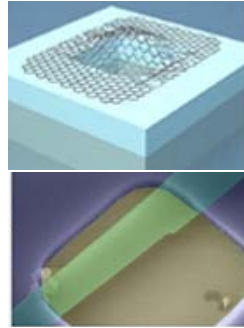
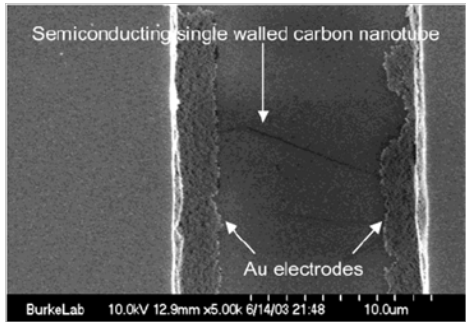


Engagé, mais *problèmes d'intégration* au niveau du composant unique

Fabrication de nanocomposants

On retrouve les...

Approches bottom-up : comment intégrer le composant ?

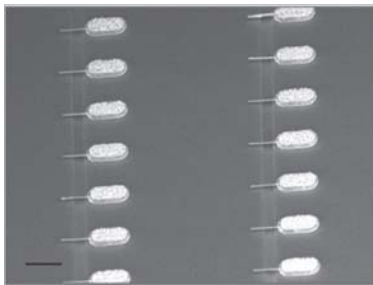


Du processus aléatoire,
à l'adressage du nano-composant...

Burke lab & Craighead lab

... mais également,

Le succès de méthodes hybrides



Auto-organisation assistée par champ associée à technologie lift-off



Mayer et coll, (2008)

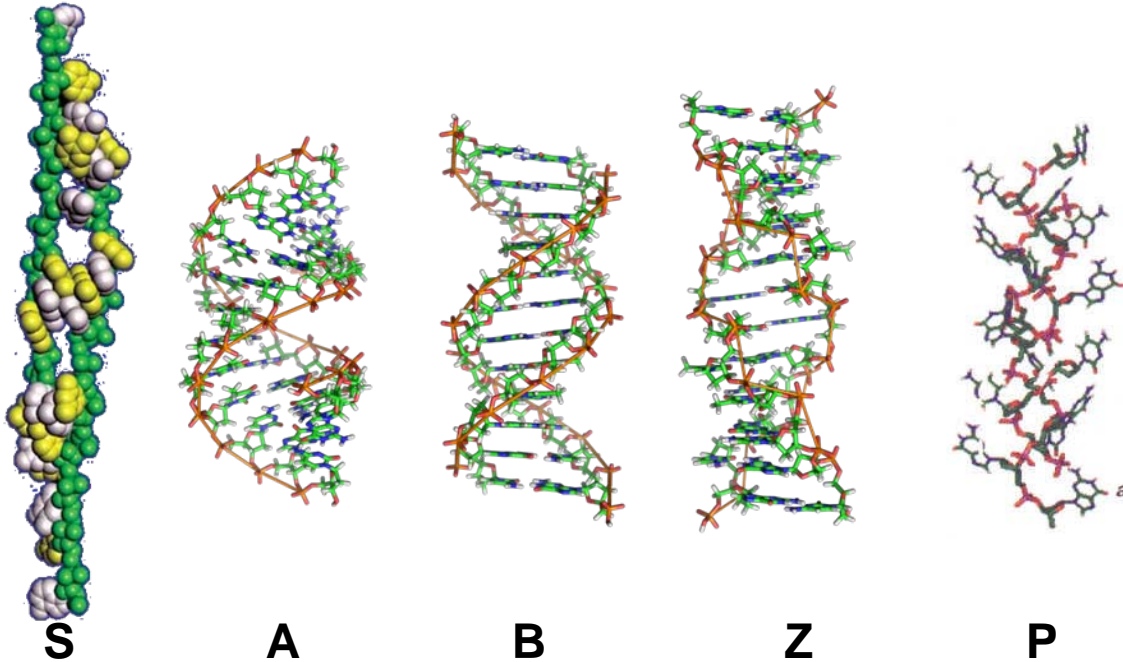


Les méthodes d'intégration seront des approches combinées

Une reconfiguration des nano-composants

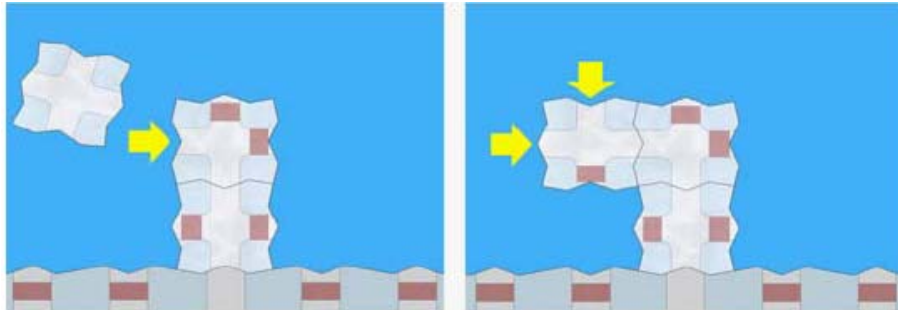
Le nano-système augmente la complexité de fonctionnement

La nature donne des exemples de multi-fonctions / redondance fonctionnelle



La structure de l'ADN change selon les sollicitations physico-chimiques

Une piste : le système reprogrammable



Les blocs fonctionnels sont assemblés par actionnement fluide

Tolley et al., μ TAS (2008)

4.2 Systèmes, Applications

Objectif : réaliser des nanosystèmes fonctionnels

	Nanotube Nanomotor	<p>A. M. Fennimore, T. D. Yuzvinsky, Wei-Qiang Han, M. S. Fuhrer, J. Cumings, and A. Zettl, "Rotational actuators based on carbon nanotubes," <i>Nature</i> 424 (July 24, 2003): 408-410</p>
	Molecular Actuator	<p>B.C. Regan, S. Aloni, K. Jensen, R.O. Ritchie and A. Zettl, "Nanocrystal-Powered Nanomotor," <i>Nano Letters</i> 5 (2005): 1730-1733.</p>
	Molecular Seal	<p>Nguyen TD, et al., "Design and optimization of molecular nanovalves based on redox-switchable bistable rotaxanes" <i>J Am Chem Soc.</i> 2007 Jan 24;129(3):626-34</p>
	Molecular Bearings	<p>Cummings, J.; Zettl, A. "Low-Friction Nanoscale Linear Bearing Realized from Multiwall Carbon Nanotubes," <i>Science</i> 289 (2000): 602-604.</p>
	Nanosprings	<p>P. A. Williams, S. J. Papadakis, A. M. Patel, M. R. Falvo, S. Washburn, and R. Superfine, "Fabrication of nanometer-scale mechanical devices incorporating individual multiwalled carbon nanotubes as torsional springs," <i>Applied Physics Letters</i>, v. 82, no. 5 (3 Feb 2003): 805-807.</p>
	Telescoping Arms	<p>Cummings and Zettl, "Low-Friction Nanoscale Linear Bearing Realized from Multiwall Carbon Nanotubes". <i>Science</i> 289, 602-604 (2000)</p>
	Biomotors	<p>Montemagno, C. D., and Bachand, G. D., "Constructing nanomechanical devices powered by biomolecular motors." <i>Nanotechnology</i> 10 (1999): 225-331</p>
	Radio frequency controlled biomolecules	<p>K. Hamad-Schifferli, J.J. Schwartz, A.T. Santos, S. Zhang and J.M. Jacobson, <i>Nature</i> 415, 152 (2002);</p>
	"Nanocar"	<p>Shirai Y, Morin JF, Sasaki T, Guerrero JM, Tour JM, "Recent progress on nanovehicles". <i>Chem Soc Rev.</i> 2006 Nov;35(11):1043-55</p>
	DNA-based robotic arm	<p>Ding B, Seeman NC., "Operation of a DNA robot arm inserted into a 2D DNA crystalline substrate." <i>Science.</i> 2006 Dec 8;314(5805):1583-5</p>
	Light-driven rotaxane-based motor	<p>Balzani V, Clemente-León M, Credi A, Ferrer B, Venturi M, Flood AH, Stoddart JF., "Autonomous artificial nanomotor powered by sunlight". <i>Proc Natl Acad Sci U S A.</i> 2006 Jan 31;103(5):1178-83</p>

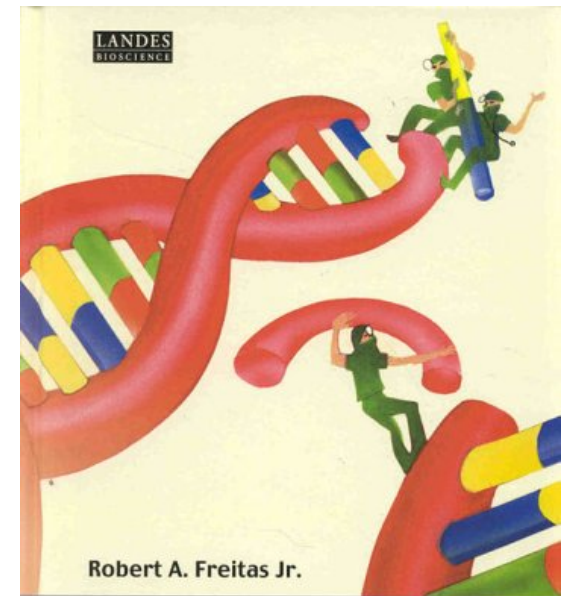
Domaines d'application –court, moyen terme

1. Nombreux domaines applicatifs bénéficieraient des Technologies à Précision Atomique sur le moyen terme
 - Pile à combustible
 - Photonique
 - Photovoltaïque
 - Réseaux de capteurs
2. La nanomédecine serait, dans l'immédiat, moins concernée par les Technologies à Précision Atomique (grand volume)
 - Diagnostique du cancer en utilisant des dendrimères
 - Thérapie du cancer par hyperthermie (nanoparticules, pas de précision atomique requise)
3. A moyen terme, un nombre modeste de dispositifs à précision atomique pourrait bénéficier à des applications (nano)médicales
 - Séquençage d'ADN (nanopores), thérapie génique non-virale...

Domaines d'application – (très) long terme

Robert A. Freitas – équivalent moins romancé (pour la nanomédecine) de Jules Verne (pour l'espace) ou Isaac Asimov (pour la robotique)

Vision transhumaniste



Nanomedicine
Volume I: Basic Capabilities

Nanomedicine by
Robert A. Freitas Jr.

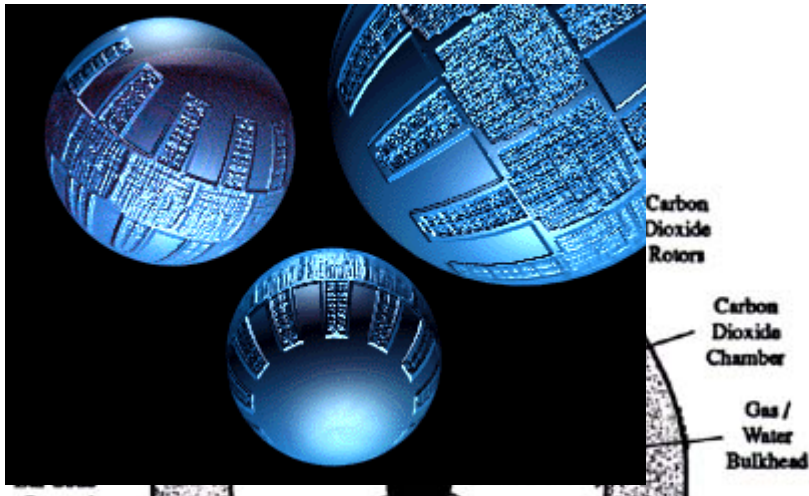
Volume I 1999

Volume IIA 2003

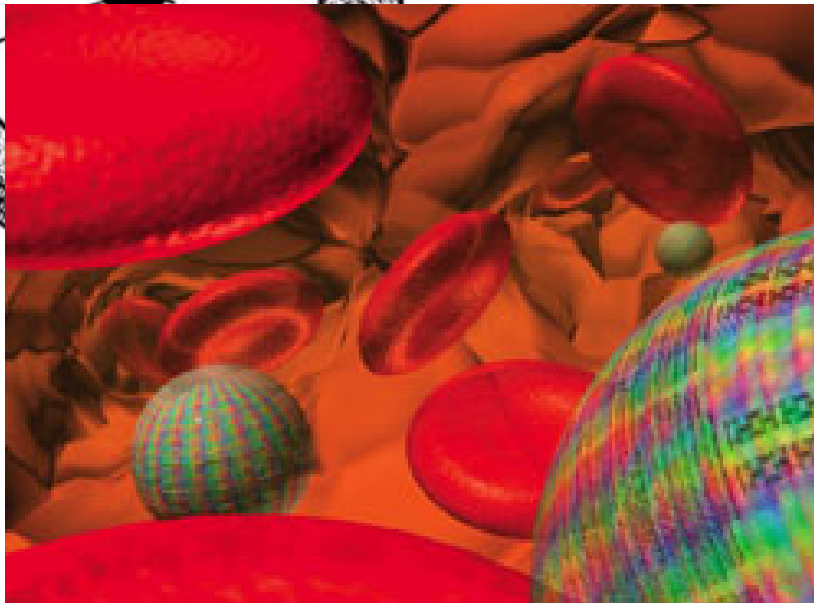
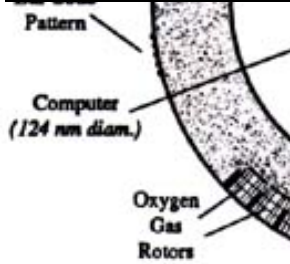
Volume IIB in progress

Volume III planned

...« *Respirocytes* »...



Artificial mechanical red blood cell
~1 micron dia. sphere
Diamondoid 1000-atm pressure vessel
Deliver 236x more O₂ than natural red cells
18 billion structural atoms plus 9 billion O₂

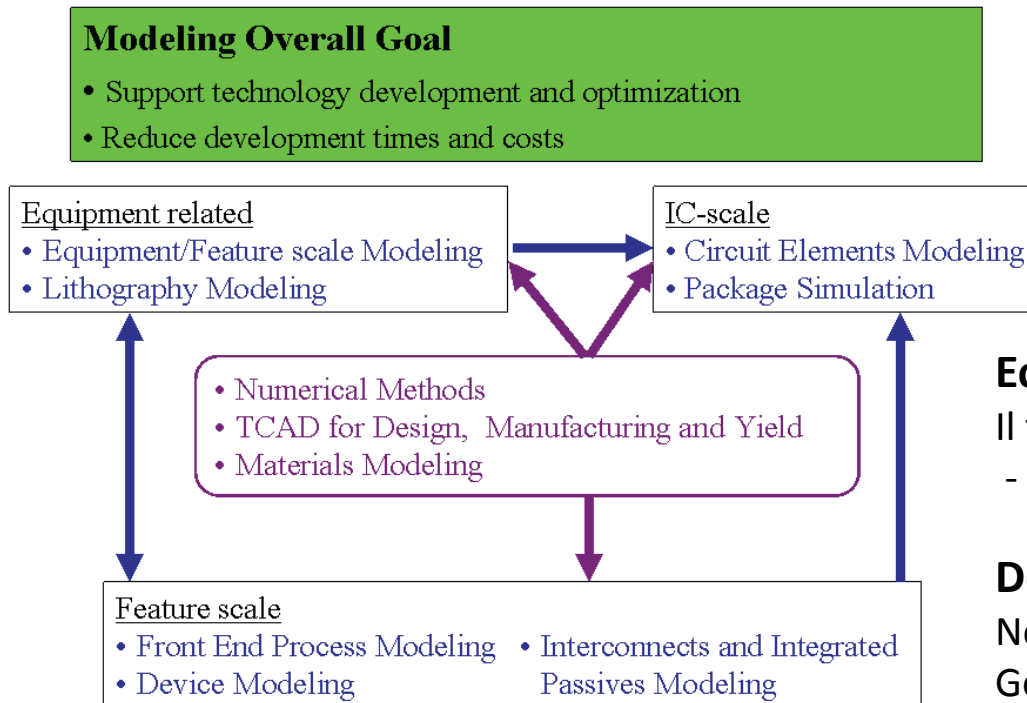


... mais également, les ***clottocytes*** (coagulation instantanée),
neurones artificiels, etc.

4.3 Modélisation

Modélisation des nanosystèmes. Un modèle d'organisation, celui de la conception en microélectronique

Objectifs: simuler avec une précision atomique un nano-objet (~ 5000 à 30 000 atomes)



Relation entre la structure du nano-objet et son processus d'élaboration :

Comprendre les principes

Designer

Simulation au niveau procédé

Simulation du fonctionnement

Echelles de temps et d'espace :

Il faut combiner plusieurs niveaux de modélisation

- pas de modèle universel

Des calculateurs massivement parallèles :

Nouveaux algorithmes

Gestion des données

Capitalisation

Beaucoup de travail en perspective

- au niveau développement méthodologique et production de nouveaux outils

- au niveau de la gestion des ressources via du calcul intensif

Modélisation des nanosystèmes. Quels enjeux (« road-map »)?

Comment gère-t-on la complexité, où sont les verrous?

Organisation de la matière

⇒ Potentiels classiques pour calcul de nanostructure :

on sait faire, **mais**

difficile de générer de potentiels : de systèmes hétérogènes,
aptes à simuler des réactions chimiques

⇒ Monte Carlo sur réseau: pour simulation de procédés :

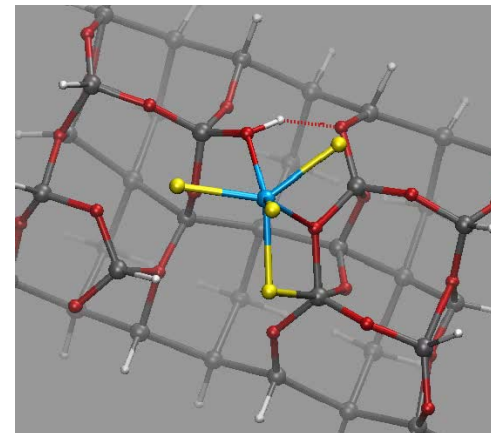
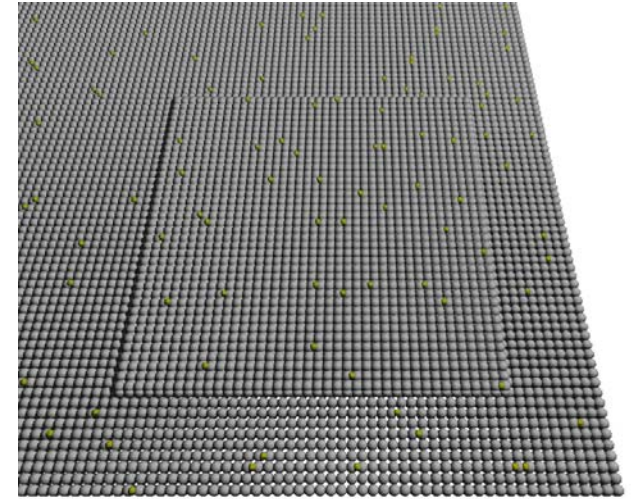
on sait faire, **mais**

Il faut développer les codes au cas par cas...

Réactions chimiques élémentaires

(ruptures de liaisons chimiques), on sait faire!

=> Modèles quantiques / Equation de Schroedinger



Modélisation des nanosystèmes. Quels enjeux en détail (hors « roadmap » ??? – matière molle)

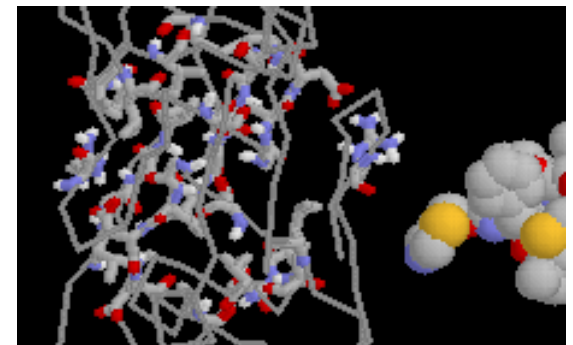
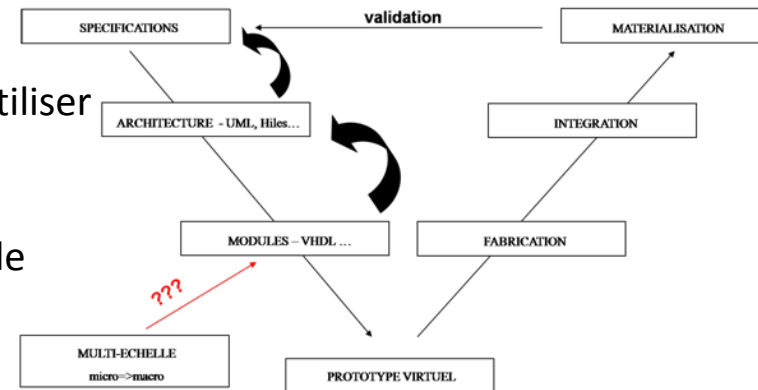
Modélisation des aspects systèmes (complètement absent du roadmap)

- ⇒ Qu'est-ce que la simulation système en nano ? Peut on utiliser les connaissances actuelles en simulation système
- ⇒ Si oui, sous quelle forme
- ⇒ Quels liens établir avec les niveaux de simulation à l'échelle atomique

Idem mais incluant des nano-objets complexes, polymères, biomolécules

⇒ Au plan strict des interactions en biologie (repliement, docking), les méthodologies multi-modèles existantes sont encore limitées pour atteindre un seuil prédictif raisonnable (travaux non évoqués dans le roadmap).

⇒ Au plan des interactions bio/non bio, méthodologies multi-modèles encore à définir en liaison avec le point précédent (non évoqué dans le roadmap)



5. Recommandations et questions ouvertes

Feuille de route « Nanosystèmes productifs » – recommandations

1. Poursuivre le « roadmapping »
 - Développer un agenda de recherche amélioré
2. Améliorer les méthodes de fabrication
 - Outils à précision atomique
 - Procédés à résolution atomique
 - Composants à précision atomique
 - Nanosystèmes moléculaires composites (modulaires)
3. Privilégier les outils et méthodes qui semblent déjà prometteuses
 - Assemblage « assisté par pointe »
 - Auto-assemblage
 - **Hybride** (ex. combiner l'approche « systèmes fabriqués par lithographie avancée » et systèmes obtenus par assemblage de structures et dispositifs existants)
 - **But ultime** : aboutir à la réalisation de « ribosomes artificiels »

Questions ouvertes : quelle place pour le LAAS ?

1. La nano-caractérisation : pas de road-map, l'existant est suffisant (cf. suite...)
2. Quelles voies pour le LAAS sur les créneaux
 - Fabrication : « top-down » - notre métier, « bottom-up » - pas notre métier. Privilégier les approches « **hybrides** » ?
 - Composants, dispositifs : sortir du « tout silicium ou dérivés », aller vers des familles « **hybrides** » - nanofils fonctionnels, couplage bio (ou polymère) / inorganique ?
 - Systèmes : les nanosystèmes comme la seconde (et ultime?) chance de concrétiser le pont entre la 07 et la 08 en terme d'architectures des systèmes. Comment décliner la tolérance aux fautes, la robustesse... au niveau d'architectures de nanosystèmes « **hybrides** » ?
 - Modélisation : approches multi-échelle, multiphysiques « **hybrides** » à imaginer ?
3. Et si on redevenait « visionnaires » ?

Method	Sample Requirements	Information Gained	Comments and Caveats
Scanning Electron Microscopy (SEM)	Placement/deposition on substrate; high vacuum compatible method	Particle size, morphology, component segregation	Must be conductive or coated (e.g., with Gold); Sample must be stable in the electron beam
Environmental SEM	Placement/deposition on substrate; high vacuum compatible method	Particle size, composition, hygroscopicity	Lower resolution in wet mode; Same general issues as SEM
Focused Ion Beam SEM	Typically up to 1" thick, up to 8" diameter	Topography, 3-D composition, crystallography	Excellent for TEM sample preparation as well
Transmission Electron Microscopy/High Resolution TEM	Placement/deposition on substrate; high vacuum compatible method < ~150 nm thick	Phase and structure, composition, chemical state in some cases	Excellent spatial resolution; Sample must be stable in the electron beam
Cryo-Electron Tomography	< ~100 nm thick	3-D structure (tomography)	Can be chemically specific (for example, a gold nanoparticle label)
X-ray Diffraction, Powder X-Ray Diffraction	On substrate (film ~20nm), as a powder (~0.1g), or as single crystals	Crystalline phase, average crystallite size, amorphous content, crystal lattice constants (space group), molecular geometry	-193 to +1000 °C temperature range; Inert atmosphere or rough vacuum sample environment
3-D Atom Probe	Conductive, needle shaped UHV compatible	3-D reconstruction of sample including minor elements to 0.1 atom %	Very high resolution; Sample preparation is often challenging
Scanning Helium Ion Microscopy	Vacuum compatible method	Topography, chemical contrast	Early stage commercialization
Secondary Ion Mass Spectrometer (NanoSIMS)	Flat, <9mm thick UHV compatible	Atomic/isotopic distribution	Usually coat sample with gold; ~50 nm resolution
Scanning Probe Microscopy ¹	Placement/deposition on substrate; Requires a fairly flat sample	Topography, nanoparticle size, shape, electrostatic, magnetic and mechanical properties	Excellent spatial resolution; low sample numbers; slow scan speeds; air, liquid or vacuum environment
Auger Electron Spectroscopy/Scanning Auger Microscopy	Placement/deposition on substrate; high vacuum compatible method	Size, shape, surface composition, 3-D composition	Conductive sample ~20 nm resolution
X-ray Photoelectron Spectroscopy	Placement/deposition on substrate; high vacuum compatible method	Average surface composition, chemical state	Modeling of complex systems improves understanding
Time of Flight Secondary Ion Mass Spectrometry	Placement/deposition on substrate; high vacuum compatible method	Average surface composition, molecular state	Molecular information; good at measuring trace contaminants ~100 nm resolution
Small Angle X-ray and Neutron Scattering	Particles in liquid	Local chemical environment, geometry and size of nanoparticles, clustering of nanoparticles	Requires synchrotron sources
X-ray Absorption Fine Structure	Particles in liquid	Oxidation state, solvation structure	Requires synchrotron sources
Proton Induced X-ray Emission	Placement/deposition on substrate; high vacuum compatible method	Elemental composition	Sample must be stable in the particle beam

Method	Sample Requirements	Information Gained	Comments and Caveats
Terahertz (THz) Spectroscopy	Solid-state, in liquid, ambient conditions	Low-frequency vibrational modes, inter- and intramolecular interactions	Many solvents are good THz absorbers (limits utility); resolution currently limits use
Raman Spectroscopy	Airborne, in solution, as solid-state samples, or deposited/mounted on substrate	Energies of vibrational modes, molecular conformation, inter- and intramolecular interactions	Low signal/noise; optical selection rules make for partial determination of molecular vibrations
Fluorescence Resonant Energy Transfer	Ambient, in liquid	Intermolecular distance	Fluorescent tag required
Fluorescence Return After Photobleaching	Ambient, in liquid	Diffusion, clustering using fluorescent probes or auto-fluorescent species	Used in biological systems
Fourier Transform Infrared Spectroscopy	Airborne, in solution, as solid-state samples, or deposited/mounted on substrate	Energies of vibrational modes, molecular conformation, inter- and intramolecular interactions	Low signal/noise; optical selection rules make for partial determination of molecular vibrations
Ultraviolet-Visible Spectroscopy	Airborne, in solution, as solid-state samples, or deposited/mounted on substrate	Electron transition states, survey of potential photochemistry, optical properties	Important characterization tool for molecular electronics applications
Coherent and incoherent inelastic neutron scattering spectroscopy (CINS, IINS)	Solid-state and powder samples	Normal modes of vibration, phonon (intermolecular) modes, molecular geometry via selective deuteration (IINS)	Absence of optical selection rules means all vibrations are observed; resolution limits at higher energies ($>1000\text{ cm}^{-1}$)
Nuclear Magnetic Resonance (NMR)	Molecules, macromolecules in solution; selective for many isotopes (such as ^1H , ^{10}B , ^{11}B , ^{13}C , ^{14}N , ^{15}N , ^{17}O , ^{19}F , ^{23}Na , ^{29}Si , ^{31}P , ^{35}Cl , ^{195}Pt)	Inter- and intra-molecular structure, atomic connectivity, geometry of secondary structure, monitoring progress of chemical reactions	Experiments can take hours to days for high quality spectra; Two-dimensional methods available (COSY, EXSY, HSQC, HMQC, HMBC, NOESY, TOCSY, J-spectroscopy)
Solid State NMR	Solid-state samples; selective for many isotopes	Molecular structure, local chemical and magnetic environment	Disordered solids, interfaces can be analyzed; <i>operando</i> monitoring is a possibility
Dynamic Laser Light Scattering ²	Particles in liquid	Size distribution down to 5 nm	Light must not be absorbed by liquid; Typically very low ionic strength liquid
Phase Analysis Light Scattering	Particles in liquid	Charge state of particle	Large ionic strength dynamic range
Disc Centrifuge Photosedimentation	Particles in liquid	Size distribution down to 3 nm	Broad range of particle size determination in complex mixtures

Nanosystèmes productifs – potentiels de production et applications

Niveaux de potentiel productif

Contrôle de la séquence de monomères dans une chaîne

Contrôle de la position de monomères dans un solide

Contrôle des positions atomiques dans un solide

Produits à précision atomique

Nanoparticules polymériques

Nanoparticules céramiques

Fibres super-résistantes

Machines moléculaires

Membranes nanostructurées

Dispositifs thérapeutiques intelligents

RAM « petabyte »

Matériaux intelligents super-résistants

Nanosystèmes productifs

Membranes pour pile à combustibles

Cellules solaires flexibles

Composites pour l'aérospatial

Quelques applications

Matériaux avancés

Production d'énergie « propre »

Amélioration des soins

Calcul avancé

Transports alternatifs