

# ***NANOMONDE - EPISODE 2*** **CONDUCTEUR**

**TC IN**  
**10 00 00 00**

## **GENERIQUE DE DEBUT (CARTONS SUR IMAGES )**

**UNE PRODUCTION**  
**LA COMPAGNIE DES TAXI BROUSSE**

**AVEC LA PARTICIPATION DE**  
**FRANCE TELEVISIONS**

**EN PARTENARIAT AVEC**  
**EUROVISION SCIENCE ET LA COMMISSION EUROPEENNE, DG**  
**RECHERCHE**

**UN FILM DE**  
**CHARLES-ANTOINE DE ROUVRE**  
**JEROME SCEMLA**

**PRODUIT PAR**  
**LAURENT MINI**  
**KARIM SAMAI**

### **COM**

Autour de nous, de vous, de moi... L'espace médiatique, scientifique, économique ne résonne plus que du préfixe nano. Je n'entends plus parler que de cette échelle, le milliardième de mètre, à peine quelques atomes.

L'agitation est planétaire : sciences et technologies annoncent grâce aux nanos un monde fascinant, des domaines de recherches presque infinis, et des perspectives miraculeuses.

Des matériaux à l'énergie, de l'environnement à la médecine, en passant par l'électronique, ou l'agriculture ; les nanos permettraient d'aller vers le plus performant, le plus résistant, le moins cher, le moins polluant...

Rien dans notre monde n'échapperait désormais aux nanos, une démesure qui me semble parfois effrayante...

Bienvenue dans le Nanomonde, dans les nanomondes...

10:01:07:00

**TITRE**

**BIENVENUE DANS LE NANOMONDE**  
... DES NANOS AUTOUR DE NOUS ...

**COM**

Bienvenue dans cette exploration, à la découverte des matériaux et des technologies au service de notre quotidien.

10:01:15:00

**VLADIMIR BULOVIC**

**CHERCHEUR EN ELECTRONIQUE**

**MIT**

*Je suis ingénieur électronique et j'adore la physique.*

*On ne sait absolument pas comment les choses marchent à cette échelle nano, c'est donc le domaine à explorer, le domaine dans lequel je peux espérer beaucoup apprendre et ainsi approfondir mes connaissances.*

10:01:34:00

**COM.**

La fin du 20ème siècle a vu la micro informatique révolutionner le travail, les loisirs et l'industrie.

Ce 21ème siècle, débute avec la compréhension des mécanismes nanométriques qui interviennent au cœur de la matière, et la possibilité de manipuler celle-ci à cette échelle.

Ces Nanosciences et nanotechnologies bousculent l'ordre établi et permettent déjà d'envisager des matériaux aux propriétés nouvelles, et la fabrication d'objets plus petits, plus performants, plus écologiques...

10 02 03 00

Un petit rappel. Ce préfixe nano indique une échelle : le milliardième de mètre,  $10^{-9}$  mètres (à l'écran 0,00 00 00 1 m). Et tout ce dont on va parler désormais se passe à cette échelle... Quelques grands principes donnent aux nanosciences et technologies leurs caractéristiques particulières.

D'abord travailler la matière à l'échelle nano plutôt que macro, la nôtre, permet de travailler directement à partir des constituants de la matière et non plus à partir d'un bloc déjà constitué. Depuis la fin du XXème siècle, les scientifiques de toutes les disciplines - physique, chimie, biologie - utilisent

leurs connaissances conjuguées pour manipuler les atomes individuellement et les assembler comme s'il s'agissait de simples briques.

Plus besoin de tailler forcément un arbre pour obtenir un cure-dent. Il suffit en théorie d'assembler les atomes qui composent ce cure-dent, pour parvenir au même résultat.

Agir directement sur les constituants de la matière permet aussi de profiter de propriétés différentes de cette matière. Parce que la taille est différente, les matériaux réagissent différemment... Ainsi à l'échelle macro, l'or sera conducteur, à l'échelle nano : isolant.

10:03:14:00

### **COM**

Toujours à cette échelle, se manifestent encore d'autres particularités comme les effets de la physique quantique. Notre réalité, celle de la physique classique n'est plus toujours valable dans le nanomonde.

Par exemple, si je prends une balle, la lance contre un mur, elle devrait rebondir. Mais si je suis tout petit, et que cette balle est de taille nanométrique, lorsqu'elle touche le mur elle va rebondir bien sûr, mais elle va aussi le traverser, elle va être là, ici, et nulle part.

Si vous n'y comprenez pas grand-chose, moi non plus, et les plus grands chercheurs s'interrogent toujours.

10 :03:56 :00

Un coup d'œil sur un moteur de recherche? 18 millions de pages traitent du sujet nano.

Et la présence des nanosciences et technologies autour de nous se vérifie déjà jusque dans les domaines les plus inattendus.

### **SYNTHE :**

FLORENCE

10:04:10:00

### **COM**

En Italie, pour commencer, je vais à la rencontre du professeur Baglioni, scientifique passionné par la Renaissance.

Il travaille à sauver la beauté du passé avec des procédés plein d'avenir.

Il a mis au point dans son laboratoire une solution issue des nanotechnologies qui permet des progrès phénoménaux pour la restauration d'œuvres d'art menacées par le temps.

10:04:28:00

**PIERO BAGLIONI**

**CHIMISTE**

**UNIVERSITE DE FLORENCE**

*Oh, mais... Pourquoi avez-vous tout nettoyé ?*

*Ces gens...*

*Je leur ai dit que la télévision française allait venir tourner dans ce labo et ils ont tout nettoyé !... Ça donne une mauvaise impression ! Tout est propre, c'est terrible ! Incroyable...*

*Bon, ici dans ce labo, nous produisons des nanoparticules qu'on destine principalement à des procédés de restauration.*

*Nous produisons par exemple ces particules d'hydroxyde de calcium, elles ont exactement la même composition chimique que le matériau utilisé par les artistes...*

*Si vous voulez goûter, pas de problème, ce n'est pas toxique. Si vous voulez essayer... Vous aurez peut-être besoin d'aller faire un tour aux toilettes après... Mais ce n'est pas du tout toxique.*

10:05:35:00

**COM.**

C'est dans l'impressionnant Palais Pitti, au cœur de Florence, qu'il me montre l'utilisation de ses nano particules. Illustration avec un sauvetage de fresques du XVII<sup>e</sup> siècle récemment découvertes.

10:05:49:00

**PIERO BAGLIONI**

**CHIMISTE**

**UNIVERSITE DE FLORENCE**

*Ici, c'est la première pièce qu'on a commencé à restaurer, après avoir découvert ces appartements. Au plafond, il y a une fresque qui était en très mauvais état. Comme elle est située sous le jardin, il y avait des infiltrations d'eau qui ont provoqué une contamination par des sulfates et une présence importante de nitrates.*

*Je vais vous montrer comment on procède, juste sur une petite partie, je vais faire ça ici. C'est un endroit très fragile. Les nano particules sont dissoutes dans un solvant organique, de l'isopropanol. En gros, j'ai besoin d'un bout de papier, pour éviter le contact direct avec la partie que je veux traiter, pour éviter d'enlever les pigments. Je vais traiter juste une petite zone ici... La*

*bonne façon de procéder, c'est d'ajouter autant de particules que possible, et lorsque la paroi ne les absorbe plus, c'est qu'elle en est saturée.*

*Et pour finir, on recouvre le tout de cellulose, et on laisse sécher.*

*Avec ces nanoparticules d'hydroxyde de calcium, on remplace ce qui s'est perdu au fil des ans. Nous ne modifions aucune propriété chimique ou physique, tout ce qu'on fait, c'est ramener la peinture à son état original.*

10:07:50:00

### **COM**

Les nanoparticules élaborées par Baglioni sont de la même composition chimique que les matériaux utilisés par les peintres de la Renaissance. En pénétrant au cœur même de la fresque, ces nanoparticules provoquent une recombinaison chimique de la matière. Les atomes et molécules présents dans la solution viennent prendre la place de ceux perdus par la peinture avec le temps.

Contrairement aux procédés utilisés jusqu'à présent, les pigments ou le support ne sont ni modifiés ni détériorés

10:08:15:00

### **L'ENQUÊTEUR**

*Et après, pendant combien de temps la fresque est-elle protégée ?*

10:08:18:00

### **PIERO BAGLIONI**

*Ça dépend, s'il ne pleut pas, ça peut résister un siècle, cinq siècles. S'il n'y a pas de fumée, ça peut durer pour l'éternité.*

10:08:29:00

*Quand vous diminuez l'échelle, et que vous travaillez avec ces petites particules... vous travaillez avec les constituants fondamentaux de la matière, avec ce qu'on appelle dans notre jargon la structure supra moléculaire de la nature. Ce sont les briques de la nature.*

*Et les mêmes particules peuvent être utilisées à des fins différentes.*

*Nous disposons maintenant de procédés qui peuvent s'appliquer aux fresques, aux peintures à l'huile ou à la préservation du papier, de codex.*

10:09 :04:00

### **COM.**

Les progrès liés aux nanotechnologies ne se limitent pas à la restauration d'œuvres anciennes.

Des musées aux supermarchés, du laboratoire à l'application : plusieurs centaines de produits de grande consommation sont déjà disponibles, de la raquette de tennis aux revêtements pour vitres, en passant par des chaussettes, des chemises, ou des cravates aux capacités inédites...

Car au-delà des défis scientifiques et technologiques, l'enjeu est d'abord commercial, et l'industrie textile a très vite compris l'avantage qu'elle pouvait tirer des progrès liés aux nanotechnologies.

En modifiant à l'échelle nanoscopique la surface des fibres, les chercheurs sont parvenus à lui conférer d'étonnantes propriétés.

À moi d'en profiter en jouant le cobaye sur une plage du Pacifique...

**SYNTHE :**  
**SAN FRANCISCO**

10:10:31:00

**COM**

Mes cheveux, mon visage, ma peau sont trempés et salés. Mais l'eau n'a fait que glisser sur la surface du tissu sans pénétrer les fibres.

Pour comprendre l'explication scientifique derrière ce phénomène, je vais rencontrer l'un des spécialistes en la matière, sur la côte ouest américaine.

10:10:50:00

**WILLIAM STOCKTON**

**CHIMISTE**

**NATIONAL TEXTILE CENTER**

*Nous ajoutons des éléments, mais à une échelle extrêmement petite, à l'échelle nano. Ça nous a permis de fabriquer des tissus dotés de performances particulières. Ça existait déjà dans le passé, mais à l'époque ça changeait les caractéristiques naturelles du tissu, la sensation qu'on avait du tissu.*

**L'ENQUETEUR**

*Aujourd'hui, le coton reste du coton...*

**WILLIAM STOCKTON**

*Le coton reste du coton, la soie de la soie, la laine de la laine... Mais ils sont dotés en plus d'une performance nouvelle, obtenue grâce au traitement à l'échelle nano.*

10:11:21:00

## **COM**

Tout cela à l'air peu de chose, mais le pouvoir d'ajouter ces capacités à l'échelle nanoscopique a des conséquences fondamentales. Avec ces textiles, plus besoin de laver aussi souvent. Moins de gâchis... Moins d'eau, moins de détergents, moins de déchets et de pollution. Au final, on économise du temps, pas mal d'argent, et surtout de l'énergie.

10:11:41:00

## **WILLIAM STOCKTON**

*Très souvent, les nanotechnologies cherchent à imiter la nature. Un bon exemple, c'est ce qu'on appelle l'effet « peau de pêche ». Il y a comme un petit duvet à la surface des pêches, qui les rendent hydrophobes.*

10:12:13:00

## **COM**

En tombant les gouttes d'eau conservent leur forme sphérique et s'écoulent en roulant, repoussées par la surface super -hydrophobe.

Ce phénomène qui se produit à l'échelle nanoscopique est appelé aussi effet lotus. Les feuilles de cette plante restent toujours sèches, et propres. L'eau glisse et emporte avec elle toutes les particules de poussière présentes. La feuille s'auto nettoie.

À l'échelle nano, la feuille de lotus a une structure particulière. Elle présente une multitude de plots, eux-mêmes bardés de poils, sur lesquels les gouttes d'eau ne réussissent pas à se maintenir ou à s'étaler.

Mais les chercheurs vont encore plus loin : après par exemple l'effet hydrophobe ou auto nettoyant appliquées aux vitres et imitant la feuille de lotus, ils sont capable de manipuler les matériaux en surface pour offrir aux revêtements de nouvelles propriétés : ignifugés, anti-bactériens, ou un jour, qui permettront des changements de couleur...

Et bien entendu, l'armée n'est pas la dernière à investir dans la recherche de nouvelles capacités. Imaginez un tissu synthétique super léger, s'inspirant de la toile d'araignée, à la fois solide et étirable, capable de résister aux balles... Imaginez des uniformes aux fibres bardées de capteurs capables de détecter des produits chimiques ou bactériologiques à la molécule près.

**SYNTHE :**  
**BRUXELLES**

## **COM**

Tout ça est pour bientôt, si l'on en croit Alain de Neve, qui me reçoit à l'Académie Militaire du Royaume de Belgique.

10:13:35:00

**ALAIN DE NEVE**

**ANALYSTE**

**INSTITUT ROYAL SUPERIEUR DE DEFENSE**

*L'idée à la base dans le domaine textile, notamment dans le domaine militaire, c'est de créer des matériaux intelligents. C'est à dire des textiles qui ont quelque part du répondant.*

*Des textiles qui pourraient également s'acclimater aux terrains dans lequel est amené le combattant, et un terrain qui peut être par exemple changeant. Et dans ce cas-là effectivement on pourrait assister à des systèmes de camouflage de nouvelle génération qui assureraient la discrétion maximale du combattant.*

*On peut également imaginer de camoufler quelque part sous ces textiles un certain nombre de nano-agents qui viendraient à réduire l'inhibition d'un combattant sur le terrain.*

*Ensuite vient la possibilité de réaliser ce que l'on appelle des systèmes invasifs.*

*On va utiliser des nanotechnologies pour créer des matériaux qui permettront de réaliser un contrôle beaucoup plus approfondi, par exemple des agents de taille nanométriques qui vont être distribués dans le corps du combattant pour réaliser un monitoring en temps réel, sur les aptitudes du combattant, sur son état de fatigue, son état de stress et par exemple de décider quelle unité est la plus apte à réaliser telle ou telle mission et tout ça en temps réel.*

10:15:08:00

**COM**

Et pourquoi pas aussi des vêtements qui nourriraient ou qui soigneraient... L'industrie agro-alimentaire et les laboratoires pharmaceutiques suivent à loupe ces possibles débouchés... Et moi, ça me fait rêver autant que ça m'inquiète.

10:15:20:00

**ALAIN DE NEVE**

*Disons que les applications dans le domaine militaire vont essentiellement concerner, dans un premier temps peut-être, la résistance des matériaux. On*

*va sans doute réaliser des matériaux beaucoup plus performants, beaucoup plus résistants. Leur durée de vie va être nettement accrue.*

*Ça c'est ce qui concerne en fait les premiers types d'applications. Donc je dirais la résistance des ... la création de matériaux nano-structurés.*

10:15:47:00

**COM**

La création, c'est l'étape suivante : il ne s'agit plus simplement de revêtir la surface d'un matériau d'une couche de nano particules, mais d'aller jusqu'à modifier sa structure interne, voire de créer des matériaux composites intégralement nouveaux aux propriétés exceptionnelles. Lesquelles ? Pourquoi ?

Aux Etats-Unis, sur la côte Est, j'ai rendez-vous pour en parler au MIT, le Massachusset Institute of Technologie, l'endroit du monde où l'on trouve la plus forte concentration de Prix Nobel.

**SYNTHE :**

**BOSTON**

10:16:30:00

**COM**

Krystyn Van Vliet y dirige un labo spécialisé en sciences des matériaux. Son plus grand plaisir : pousser la matière jusqu'à son point de rupture, afin de découvrir comment l'améliorer.

10:16:38:00

**IN**

*Hello, I'm Charles*

*Krystin...*

10:16:45:00

**KRYSTYN VAN VLIET**

**PROFESSEUR EN SCIENCE DES MATERIAUX**

**MIT**

*Il y a deux raisons principales qui expliquent pourquoi on consacre tellement de temps à étudier les matériaux à l'échelle nano.*

*La première, c'est que ça peut nous permettre de découvrir des propriétés émergentes, des propriétés nouvelles qui n'existent pas du tout à l'échelle micro.*

*La deuxième, c'est que l'échelle nano est la limite fondamentale, celle des atomes et des molécules.*

*Tout objet est « fait » de quelque chose. Par exemple, si je regarde une caméra ou une montre, je me demande de quoi elles sont faites. Est-ce qu'il s'agit d'un alliage ou d'un métal pur ? Est-ce que c'est résistant à la corrosion, est-ce que c'est dur ? Quelle quantité d'énergie sera nécessaire pour fabriquer votre montre, comparée à la mienne ?*

*C'est comme ça que je vois les choses, les objets : je les décompose pour savoir de quel matériau ils sont faits, puis comment il serait possible de les fabriquer pour qu'ils soient de meilleure qualité, qu'ils soient moins chers et qu'ils consomment moins d'énergie...*

*Comprendre comment l'acier se déforme dans un pont à l'échelle macro, c'est déjà bien, mais pour fabriquer un acier dix fois plus fort et dix fois plus résistant à la corrosion, il faut comprendre comment ses atomes se déplacent, à l'échelle nano.*

10:18:00:00

### **COM**

Les scientifiques connaissent les propriétés des matériaux. Ils ont les capacités technologiques de les manipuler. Ils peuvent donc désormais imaginer créer en laboratoire de nouveaux matériaux composites en combinant molécules par molécule, atome par atome, les avantages des uns et des autres.

Par exemple plus un matériau est constitué de grains de matière petits et serrés, plus il va être dur. Plus les grains peuvent se déformer, plus le matériau va être souple. On peut imaginer combiner ainsi les avantages du métal et du plastique en fabriquant un nouveau matériau, un nano composite, dur et souple...

10:18:38:00

### **KRYSTYN VAN VLIET**

*Une voiture, c'est un bon exemple. Elle contient plein de matériaux très différents – des plastiques, des céramiques, des verres, des métaux. Les progrès de ces matériaux sont liés à la recherche à l'échelle nano. C'est ce qui rendra nos voitures plus sûres et meilleures pour l'environnement. Bon alors d'abord, dans une voiture, on a du métal. Son atout principal, c'est qu'il vous protège en cas d'accident, c'est sa capacité à résister aux impacts.*

*Donc... Les matériaux nano structurés, les métaux nano structurés, sont développés pour améliorer ça.*

*Il faut fabriquer un matériau de faible densité, c'est à dire léger, de façon à ne pas consommer trop d'essence, mais il faut aussi qu'il soit résistant à la déformation mécanique, très solide et rigide.*

*En théorie, ce matériau existe déjà, mais sommes-nous capables de développer sa production à grande échelle, pour la fabrication d'une voiture ?*

*Maintenant si on parle du verre, aujourd'hui on sait déjà le rendre très résistant.*

10:19:53:00

**IN**

*Je n'aurai peut-être plus jamais le droit de faire une telle chose ! Merci beaucoup.*

10:19:59:00

**KRYSTYN VAN VLIET**

*Aujourd'hui, on travaille sur une sorte de verre qui ne se contenterait pas simplement de nous permettre de voir au travers, mais qui intégrerait des nano particules capables de décomposer certains des gaz nocifs dégagés dans l'atmosphère, comme par exemple ceux des pots d'échappement. Ce verre pourrait donc jouer un rôle environnemental, en plus de sa fonction de base.*

10:20:33:00

**KRYSTYN VAN VLIET**

*La bonne chose c'est que, comme on le voit ici, vu la quantité massive de voitures, les progrès pourraient profiter au plus grand nombre. Ça permet de faire avancer la recherche. Il existe un marché pour ces voitures aux performances améliorées.*

10:20:54:00

**COM**

Concevoir des voitures plus performantes passe aussi par une autre façon de consommer l'énergie, et par l'utilisation de modes de propulsion alternatifs.

Dans cette histoire, il y a aussi celle des piles à combustibles, qui produisent de l'électricité à partir d'hydrogène et d'oxygène.

Mais pour cela, elles ont besoin d'un catalyseur : le platine. Profitant du rapport surface volume plus important à l'échelle nano qu'à l'échelle micro, les nanotechnologies permettent de dépasser des barrières jusque-là infranchissables.

**SYNTHE :**  
**GRENOBLE**

10:21:21:00

**COM**

En France, le département de Nicolas Bardi au Laboratoire d'Innovations pour les Technologies des Energies travaille dans cette direction.

10:21:32:00

**NICOLAS BARDI**

**INGENIEUR DEPARTEMENT DES TECHNOLOGIES DE  
L'HYDROGENE**

**LITEN**

*Ce n'est pas l'arrivée des nanotechnologies qui permet d'inventer la pile à combustible. On reste dans un principe qui a été inventé par un Anglais qui trempait des plaques dans une solution d'acide en 1800 et des bricoles.*

*C'est juste que la capacité qu'on a à manipuler, à voir tout bêtement des nano- objets, nous permet de faire de manière plus efficace avec moins de matière des choses qu'avant on faisait avec des coûts beaucoup plus importants.*

*Dans une voiture, vous avez besoin de quelques dizaine de kwts de puissance électrique donc ça ferait quelques dizaine de grammes de platine. Le platine, il vaut à peu près sur les marchés, il vaut 30 euros le gramme... Donc 30 euros le gramme si vous voulez par exemple 100 KW, il vous faudrait 3000 euros de platine dans votre voiture... Donc on voit bien que c'est pas tenable...*

*Mais finalement ce qui est actif ce n'est pas le cœur du platine, c'est juste sa surface. Donc on va prendre une surface de carbone qui ne coûte pas cher, puis dessus on va mettre des tous petits grains de platine et c'est juste la surface de ces petits grains de platine qui est active et donc on arrive à avoir les mêmes performances avec une charge en platine beaucoup plus petite.*

*Donc notre objectif en recherche, et c'est vraiment là-dessus qu'on travaille aujourd'hui, c'est de réduire par le facteur 10 la quantité de platine.*

10:22:54:00

*Ça c'est une image au microscope électronique – de ce que ça donne une fois que c'est déposé. Vous voyez tous les petits points blancs, c'est des petits grains de catalyseur. Et tous les ronds un peu plus gros c'est les grains de carbone. Vous avez l'échelle ici, qui est de 100 nanomètres.*

10:23:26:00

**COM**

L'avènement de nouveaux outils de plus en plus performants pour étudier ces réactions chimiques complexes et le comportement particulier de la matière à l'échelle nano ont permis d'immenses progrès.

Mais plus les scientifiques avancent, et plus leurs recherches nécessitent des machines puissantes, rapides, capables de simulations extraordinairement délicates. Leur limite se trouve peut-être là aujourd'hui : dans la puissance de calcul et de stockage de données.

10:23:48:00

**KRYSTYN VAN VLIET**

**PROFESSEUR EN SCIENCE DES MATERIAUX**

**MIT**

*Nous essayons d'étudier les réactions des matériaux, et ces réactions se déroulent en quelques secondes, ou même moins que ça. Si on n'est pas assez rapide pour les observer, on a tout raté, et en fait le temps qu'on prend pour acquérir une image au microscope, et donc pour voir, et bien c'est là sans doute un des principaux freins à nos recherches.*

*Et ça repose sur le matériel informatique dont on dispose, sur sa puissance, sur sa rapidité de calcul, sur la vitesse du transfert d'information, bref sur des questions d'électronique, de processeur. C'est de cette vitesse de l'information que dépend notre travail.*

10:24:30:00

**COM**

Et pourtant. Toujours plus vite, toujours plus petit, toujours plus puissant. Tels étaient déjà les objectifs de l'informatique alors que les premiers transistors remplissaient encore des salles entières.

La révolution informatique est venue de la miniaturisation de ces transistors, ce composant fondamental de l'électronique parce qu'il permet de contrôler d'amplifier un signal. Elle les a rendu progressivement accessibles, puis indispensables à tous.

Aujourd'hui, le microprocesseur, la puce, ce petit carré de silicium d'à peine un centimètre de côté, est au cœur de toutes nos machines. Grâce aux millions de transistors qu'il recèle, il effectue tranquillement plusieurs

millions d'opérations par seconde. Et plus il y a de transistors à la surface d'une puce, plus sa capacité de calcul est importante.

Aujourd'hui les microprocesseurs contiennent 500 millions de transistors, et ce n'est rien comparé à ce qui nous attend. Comme l'a théorisé Gordon Moore, l'un des fondateurs d'Intel, dans sa fameuse loi - tous les dix-huit mois, la taille des puces devrait diminuer de moitié, tandis que leur puissance devrait encore doubler...

Mais dans la pratique, cette théorie se heurte à un mur. La fabrication atteint une limite : les capacités du silicium. Les chercheurs n'arriveront bientôt plus à y loger le moindre transistor supplémentaire.

L'industrie, qui veut à tout prix continuer sa progression, mise sur les nanotechnologies pour trouver la solution.

**SYNTHE :**  
**GRENOBLE**

10:25:44:00

**COM**

Toujours en France, Jean Christophe Gabriel cherche des réponses innovantes à ces questions.

10:25:51:00

**JEAN-CHRISTOPHE P. GAGRIEL**

**RESPONSABLE DU PROGRAMME « BEYOND CMOS »**

**LETI**

*« Les chercheurs ne se sont encore jamais trouvés dans une situation où il y avait autant de feux rouges à une échelle de temps aussi proche. Ça fait donc cinquante ans que l'on fait de l'électronique à base de silicium et on arrive aux limites des propriétés du silicium. La puce que vous avez dans votre ordinateur dont l'ordre de grandeur est le centimètre carré, il y a à peu près cinq cent millions de transistors dessus, sachant que d'ici un ou deux ans, on va passer le milliard. A l'heure actuelle on a vraiment du mal à réduire la taille, donc ce que les gens font maintenant c'est qu'ils empilent, ils font plusieurs niveaux c'est ce qu'on appelle le trois dimension. Ce sont des structures où vous avez donc des fils, les uns sur les autres, un, deux, trois fils. Chacun de ses fils est en fait un transistor, donc maintenant on a une structure très dimensionnelle de transistors. Donc vous pouvez vous dire que ça va permettre d'augmenter la densité mais non plus dans le plan mais en trois dimension. Il faut se rendre compte que des structures comme ça, on arrive à les faire avec des fils qui font de l'ordre de la dizaine de nanomètres. On prévoit donc d'avoir des structures de ce type là aux alentours de 2020-2025.*

*Maintenant on utilise des fils qui sont tellement petit que l'isolant que l'on va mettre autour ne fait plus que quelques atomes. Ça ça veut dire quoi ? Ça veut dire que l'on a des fuites électriques. Et ces petites fuites électriques quand vous avez un milliard de petits fils comme ça, voire des milliards de petits fils, et bien cela chauffe. Je ne sais pas si vous avez remarqué, mais vos portables maintenant quand vous les avez sur les genoux, c'est limite, ça brûle presque. Il y a des gens qui pensent que pour éviter tous ces problèmes de chaleur, etc, on va remplacer les électrons, on ne va plus utiliser l'électronique, mais quelque chose autre, alors ça peut être ce qu'on appelle un spin, le spin c'est le fait que quand un électron globalement on dit qu'il tourne, comme ça a une charge, cela créé un petit aimant qu'on appelle le spin.*

*Alors le spin peut être généralement pointé vers le haut ou le bas, comme le champs magnétique de la terre, alors on pourrait dire haut et bas c'est zéro et un, si j'arrive à le mesurer, etc. Donc là il y a beaucoup moins d'énergie mise en jeu, on aurait beaucoup moins de problèmes de chaleur. »*

10:28:07:00

**COM**

Spin de l'électron, nanofils ou nanotubes servant de transistors, ordinateurs quantiques... Quelles que soient les possibilités envisagées, chaque nouvelle solution pour continuer à faire progresser les performances des ordinateurs est désormais issue des nanosciences et nanotechnologies...

10 28 29 00

En Californie, Jim Heath, s'est lui aussi attelé à cette tâche.

**SYNTHE :**

**PASADENA**

**COM**

Avec son équipe du Caltec, il a réussi, avec des molécules, à fabriquer des transistors – des transistors moléculaires – et en les assemblant à élaborer une puce à peine de la taille d'un globule blanc mais capable de stocker autant d'information que l'ensemble du savoir de cette université.

10:28:49:00

**JAMES HEATH**

**CHIMISTE**

**CALTECH**

*Les nanotechnologies, c'est du « bottom up », on construit à partir des briques. C'est comme pour nous, au départ il y a juste la combinaison de deux cellules, celle de maman, celle de papa, et vous voilà.*

*Les nanotechnologies, c'est le même processus de fabrication.  
Et c'est comme ça qu'on a fabriqué un système informatique, qui fonctionne  
comme un ordinateur normal, sauf qu'il a été assemblé à l'échelle  
moléculaire, bien loin de celle à laquelle on fabrique les puces aujourd'hui.  
On est beaucoup plus petits.*

10:29:25:00

### **L'ENQUETEUR**

*Vous voulez dire que vous utilisiez des molécules à la place de silicium ?*

### **JAMES HEATH**

*En fait, on a utilisé quelques composants en silicium: c'était juste des fils  
d'un diamètre aussi grand que celui d'une molécule avec entre eux des  
espaces eux aussi de la taille d'une grosse molécule, et il y avait également  
des interrupteurs qui étaient en fait des molécules.*

*En utilisant ces interrupteurs moléculaires et ces fils extrêmement petits, on a  
construit un circuit, une mémoire de 160 000 bits, donc... Un truc costaud,  
enfin, en tout cas suffisant pour stocker le contenu d'un livre de petite taille,  
mais un truc qui n'est pas plus grand, voire même plus petit qu'un globule  
blanc.*

*En plus de ça, nous avons développé le procédé de fabrication industrielle à  
l'échelle moléculaire qui va avec, qui nous permet de travailler avec une  
précision digne de l'électronique.*

*Si on se demande par exemple quand une société comme Intel serait capable  
de fabriquer cette puce, ça ne serait pas avant 2020, ou 2021. Nous, on sait  
qu'on peut encore progresser d'ici là, et qu'en 2030, on sera capable de faire  
une puce 10 fois plus petite.*

10:30:36:00

### **COM:**

Mais la recherche de Jim Heath ne s'arrête pas là : son but est de donner à ses dispositifs électroniques la même complexité et la même robustesse qu'un être vivant...

10:30:50:00

### **IN**

*Okay*

*So you wanted to give us...*

10:31:02:00

### **JAMES HEATH**

*En fait notre idée... C'est une idée qui est déjà présente dans la nature, c'est d'amener de la redondance dans le système.*

*Si on prend par exemple, une puce actuelle. Et qu'on plante un tournevis sur une seule partie de cette puce. Tout le système va malheureusement sauter.*

*C'est foutu.*

*En revanche, avec le corps humain, si on enlève un bout de peau au niveau du doigt, le corps va continuer à fonctionner. Ce sera peut-être un peu douloureux, on dira « aïe », mais le corps continuera à fonctionner correctement, parce qu'il est doté de systèmes redondants. Le fonctionnement d'une personne ne dépend pas du bon fonctionnement de la moindre petite partie de son corps.*

*Et donc... Nous voulions concevoir une architecture qui soit similaire à celle des rues de Los Angeles. Il se trouve que ces rues forment bêtement un quadrillage.*

*De sorte que, si vous voulez aller de l'intersection entre ces doigts à un autre point sur un autre doigt, il y a plein de chemins possibles pour y arriver.*

*Donc notre idée, c'était que si on parvenait à fabriquer des fils et des interrupteurs suffisamment bon marché et en quantité suffisante, même dans le cas où certains seraient cassés, on pourrait toujours trouver des alternatives pour aller d'un point à un autre, d'autres moyens permettant de procéder au calcul informatique.*

*Voilà ce que les nanotechnologies peuvent nous apporter, des pièces bon marché et très pointues, fabriquées de sorte que même si certaines d'entre elles deviennent défectueuses, le système peut quand même fonctionner.*

10:32:48:00

**COM**

En quittant Jim Heath et la Californie, je ne me fais plus aucun souci pour l'industrie de l'électronique. Nos ordinateurs ont de beaux jours devant eux.

Vouloir imiter la nature, c'est bien. Utiliser les modèles d'architectures qui nous entourent c'est encore mieux...

Je retourne sur la Cote Est américaine pour découvrir à nouveau ce que nous sommes déjà capable de faire à l'échelle nanoscopique toujours dans l'électronique.

**SYNTHE :**  
**BOSTON**

10:33:19:00

**IN**

*So that's the place, the miracle of science ?... »*

*Yes, it's supposed to be nice... »*

10:33:30:00

**COM**

Vladimir Bulovic, chercheur au M.I.T, a un bon exemple pour satisfaire mon appétit de connaissance.

10:33:38:00

**VLADIMIR BULOVIC**

**CHERCHEUR EN ELECTRONIQUE**

**MIT**

*Pour la première fois, on est capable de partir de l'échelle macroscopique et de descendre jusqu'à l'échelle nano, avec une vision cohérente et en comprenant ce qui se passe.*

*Une fois qu'on aura vraiment bien décrypté tout ça, on sera capable de faire des choses jusqu'à présent inimaginables.*

*Par exemple, si je voulais fabriquer une télé de la taille de cette table, il faudrait que je sois capable de disposer quelques couches de molécules sur toute cette zone, avec une précision de 10 ou 15 molécules d'épaisseur, en tout cas pas plus de 20 molécules.*

*Comment y parvenir ? Prenons un écran LED.*

10:34:14:00

**COM**

Un écran L / E / D - ce qui signifie diode électro- luminecente - est constitué de trois couches. La première – au centre - est une couche d'un matériau qui va produire de la lumière lorsqu'il est excité, par exemple par de l'électricité. Au-dessus et en dessous sont disposées deux autres couches qui entretiennent en permanence cette excitation Elles-mêmes sont reliés à la source d'énergie grâce à deux autres couches qui assurent les contacts électriques.

10:34:40:00

**VLADIMIR BULOVIC**

*Maintenant ce qui change quand on est à l'échelle nano, c'est l'unité opérationnelle, c'est-à-dire celle qui fait fonctionner l'écran.*

*Et là, c'est la couche du milieu, celle qui a une épaisseur d'environ cinq à dix molécules, qui fait le travail. Quand on regarde un écran LED, c'est la seule qui est luminecente. Et ce qui est incroyable, c'est que cette couche mesure à peine 10 nanomètres.*

*10 nanomètres, ça représente quoi ? L'épaisseur d'un cheveu fait environ 15 microns, donc 10 nanomètres c'est 5 millièmes d'un cheveu.*

*Et donc c'est la seule partie du système qui fonctionne.*

*Et il faut parvenir à l'étaler sur une surface aussi large que cette table avec une précision permettant d'avoir un écran parfaitement uniforme.*

*Maintenant, si vous prenez ce cornichon, ce qui lui donne sa couleur à l'intérieur est aussi une molécule. Il s'avère que ces molécules, comme n'importe quelle molécule, peuvent servir de semi-conducteur, avec un état excité et un état initial.*

*Donc si je parviens à trouver un moyen d'exciter ce cornichon, d'exciter les molécules dans ce cornichon, c'est à dire de les faire passer d'un état à un autre, ça devrait me donner de la lumière.*

*Si on génère une excitation suffisante, on peut exciter presque n'importe quoi, jusqu'au point où cela produit de la lumière.*

*Donc si je vous excite suffisamment, avec de l'électricité, vous deviendrez luminescent... ha ha ha.*

10:36:12:00

**COM**

Faire de la lumière avec un cornichon... j'ai du mal à y croire. Utiliser des molécules organiques pour fabriquer un écran... Un OLED avec un O pour organique. Quel intérêt ? Il serait plus performant, plus mince, et consommerait moins d'électricité.. Démonstration...

10:36:23:00

**VLADIMIR BULOVIC**

*Voilà ce que nous allons allumer.*

*Il suffit pour cela d'appliquer 110 volts de courant alternatif dans ce cornichon LED. Et on va voir s'il s'allume.*

*Allons-y... Tournons l'interrupteur et... Regardez-moi ça :*

*vous voyez bien de la lumière, une lumière jaune, qui correspond à l'excitation des molécules organiques dans le cornichon.*

*Maintenant, si vous voulez une couleur différente pour votre écran télé, il faut utiliser un autre type de molécules.*

*Il y a plein, plein de molécules là-dedans. Pour chaque cm<sup>3</sup> il y en a 10 puissance 21, et chacune d'entre elle peut briller plus d'un million de fois, parfois un milliard de fois, ce qui vous donne une idée de la durée de vie d'un tel dispositif.*

*Dans le cas de cet écran particulier, il faut appliquer 110 volts, parce que le cornichon LED lui-même est très épais. Si on voulait faire fonctionner ce LED avec seulement 5 volts, il faudrait découper le cornichon en tranches très fines et disposer des électrodes au-dessus et au-dessous. On pourra alors obtenir le même genre de résultat que celui que j'ai ici, mais dans une structure beaucoup plus petite. À peu de chose près.*

10:37:46:00

### **COM**

Ces écrans à base de molécules organiques de la taille de quelques nanomètres sont impressionnants. Images pointues, couleurs éclatantes, noir profond, et épaisseur de quelques millimètres. Dans les laboratoires, les scientifiques promettent pour bientôt des murs d'images.

10:37:59:00

### **VLADIMIR BULOVIC**

*Ce qui est exceptionnel avec les nanotechnologies, c'est que nous changeons de paradigme dans la manière dont nous construisons les choses.*

*Les écrans organiques OLED sont maintenant une réalité.*

*Si on va plus loin, et qu'on voit les images qu'on peut générer, et la finesse des écrans, on peut imaginer des écrans flexibles, des écrans qu'on pourraient rouler, des écrans transparents qui ressembleraient à de simples vitres jusqu'à ce qu'on les allume.*

*Imaginez qu'un jour je veuille que tout mon mur devienne un écran, par exemple, pour remplacer ma petite télé habituelle. Et je veux que mon grand écran ne fasse pas plus de quelques molécules d'épaisseur.*

*Comment y parvenir ? Comment arriver à fabriquer une télé plus grande que celle-ci et faire en sorte qu'elle ne soit pas trop coûteuse ?*

*Je pense qu'une des solutions, c'est de l'imprimer.*

*On me vendrait un bout de tissu, ou une feuille flexible en plastique, qui serait recouverte de structure organique et que je n'aurai plus qu'à découper à la taille désirée, puis je l'accrocherai au mur avec des agrafes... et voilà...*

*C'est une télévision, à partir de maintenant !*

*Un jour, peut-être ....*

10:39:03:00

### **COM**

Le Graal que permettent d'atteindre les OLED c'est l'écran souple... Et il est déjà opérationnel en laboratoire. Pour la grande série, reste un petit hic : l'air ne doit pas rentrer en contact avec les couches. Ça les dégrade. Il faut trouver un matériau de façade avec des qualités identiques à celles du verre, mais aussi souple que du plastique.

Et ... après ? Après, pourquoi ne pas imaginer tout et n'importe quel écran... même le peindre directement sur un mur. Tout est possible car les OLED permettent aussi de contourner un autre problème, celui de l'énergie. Aujourd'hui, 1% de l'électricité américaine est engloutie par les écrans de télévision, un autre pour cent par les écrans informatiques... Ca fait deux pour cent. Et ça ne va aller qu'en s'aggravant, impossible de continuer sur cette voie.

Or OLED signifie peu de molécules, signifie peu d'énergie nécessaire. Ouf. Je vais pouvoir continuer à regarder la télé la conscience tranquille.

Mais le mieux serait peut-être de trouver une solution, des solutions durables aux problèmes énergétiques qui se dessinent pour ce XXIème siècle. Les nanotechnologies ont encore leur pièce à apporter à ces questions techniques, qui sont désormais aussi des questions de sociétés.

10:40:22:00

**JAMES HEATH**  
**CHIMISTE**  
**CALTECH**

*Grâce aux nanotechnologies, il va être possible d'améliorer nettement les technologies qui nous servent à collecter, convertir, et stocker l'énergie. Et notamment pour l'énergie solaire, qui est la solution ultime. Que les nanotechnologies puissent donner naissance à de nouvelles choses, ou qu'elles n'apportent qu'une valeur ajoutée à des technologies existantes, dans tous les cas, elles les rendront deux ou trois fois plus efficaces.*

**L'ENQUETEUR**

*Et ça, c'est pour dans longtemps ?*

**JAMES HEATH**

*Non, non, non, c'est en train d'arriver, c'est maintenant.*

10:41:00:00

**COM**

Belles promesses tout cela. Mais en pratique ?

La pratique, elle passe par exemple par le photovoltaïque.

**SYNTHE :**

**SANTA BARBARA**

**COM**

Le soleil de la Californie a de quoi encourager les chercheurs. Ce n'est peut-être pas pour rien si Alan Heeger, prix Nobel de chimie pour ses travaux dans ce domaine, s'est installé sur cette côte ouest américaine.

L'ambiance est comme toujours détendue, ce qui n'empêche pas des avancées tout aussi prometteuses.

À l'aube d'une société post-pétrole et d'un apocalypse climatique annoncée, l'équation -miracle selon Heeger semble à portée de main. Il suffit d'améliorer une technologie que l'on connaît déjà, celle qui utilise l'énergie solaire

10:41:44:00

**IN**

*C'est une belle vue...!*

**ALAN J. HEEGER**  
**PHYSICIEN PRIX NOBEL DE CHIMIE 2000**  
**UCSB**

*Dans ce labo, nous concentrons tous nos efforts pour améliorer l'efficacité du solaire.*

*Ces cellules solaires sont fabriquées ici, dans ce laboratoire, avec de nouveaux matériaux et une nouvelle architecture, ce qui devraient nous permettre d'améliorer leur rendement.*

**L'ENQUETEUR**

*Mais pourquoi faut-il être à l'échelle nano pour envisager cet objectif ?*

**ALAN J. HEEGER**

*Si on était à l'échelle micro, on ne pourrait pas espérer récupérer à terme autant d'énergie, ça ne fonctionnerait pas. Notre dispositif ne fonctionne que s'il est assemblé à l'échelle nano. Mais cet assemblage n'est pas évident, car l'ordre de grandeur auquel on doit travailler est de 10 nanomètres. C'est trop petit pour permettre des manipulations, il faut donc que cette nano structure se crée par elle-même, qu'elle s'auto – assemble.*

*Si on l'observe de très très près, on voit qu'il y a là deux ingrédients qui se mélangent et s'assemblent à l'échelle nanométrique.*

*Donc tout ce que nous, nous avons à faire, c'est de mélanger ces deux composants dans un solvant qui va les dissoudre, avant de s'évaporer. On obtient comme résultat cette fantastique nano structure qui nous permet de transformer les photons en électricité.*

*Mais attention, on n'y arrive pas à tous les coups : la difficulté, c'est de parvenir à agencer les ingrédients de façon à obtenir la bonne structure nanométrique.*

10:43:32:00

**COM**

Alan Heeger est un militant de l'énergie solaire. Direction chez lui : il décide de nous montrer sa propre installation sur les hauteurs de Santa Barbara.

10:43:44:00

**ALAN J. HEEGER**

*Nous avons installé ces panneaux solaires, il y a environ deux ans et le résultat est fantastique : nous avons en fait réduit à zéro notre dépense d'électricité.*

*Le soleil fournit, en une heure, une énergie qui suffirait à elle seule à couvrir tous les besoins de la planète pendant un an. C'est impressionnant, non ?*

*Et ça, c'est notre compteur électrique, comme vous pouvez le voir il tourne dans ce sens.*

**L'ENQUETEUR**

*Ce qui signifie que vous vendez.*

**ALAN J. HEEGER**

*Oui, nous vendons de l'électricité au réseau. La nuit, il tourne dans l'autre sens, et donc on achète de l'électricité au réseau.*

*Nous travaillons sur une nouvelle génération de cellules photovoltaïques. Ce sont en fait des cellules solaires en plastique, qui ressemblent à ça. Elles sont très légères, flexibles et seront beaucoup moins chères que celles qui sont disponibles aujourd'hui.*

*Ces cellules en plastique sont en fait imprimées à partir d'une solution, une solution contenant une sorte d'encre 'semi-conductrice', et donc ça ne coûte pas plus cher qu'une simple impression.*

*Cette technologie est l'un des meilleurs exemples de ce que peuvent faire les nanosciences et technologies.*

10 45 28 00

## COM

Imprimer un panneau solaire dont la structure s'auto assemble... Les nanotechnologies apportent la solution et sa mise en pratique. La solution parfaite. Tout devient possible. Léger, pas cher, simple à fabriquer.

Mais il reste un problème à résoudre, celui de l'efficacité. Car jusqu'à aujourd'hui les rendements de ces panneaux solaires souples sont moitié moins importants que ceux des panneaux solaires rigides qui ont eux-même un rendement limité.

10:45:51:00

### ALAN J. HEEGER

*A l'heure actuelle, en laboratoire, le rendement est faible, environ 6% comparé aux 15 ou 18 % que nous obtenons avec ça.*

*Okay... Il y a donc encore beaucoup de progrès à faire en termes d'efficacité.*

10 46 25 00

*Un jour, ces cellules en plastique seront incorporées directement dans les tuiles, sur le toit.*

*Le rêve, c'est que quand vous installerez les tuiles, les panneaux solaires seront d'ores et déjà intégrés.*

*Rêvons un peu... Ça peut arriver !*

10 46 42 00

*Si nous avons des cellules solaires avec un rendement de 10%, on peut obtenir 100 watts par m<sup>2</sup>, ok? Et c'est quoi, 100 watts ?*

*100 watts, c'est suffisant pour alimenter une ampoule. 100 watts, pour une famille qui n'a pas l'électricité, ça peut changer sa vie : 100 watts, ça peut lui permettre d'avoir de la lumière la nuit, de faire fonctionner une radio ou une petite TV.*

*Donc un de nos rêves, avec cette technologie, c'est de diffuser ces cellules flexibles, simples, légères, au coût le plus bas, et de fournir ces 100 watts aux milliards de gens qui n'ont pas accès au réseau électrique.*

10:47:30:00

## COM

Des villes comme des plantes, se nourrissant du soleil par photosynthèse... C'est un beau rêve, non ? On est loin d'arriver à faire ce que fait la photosynthèse, qui permet à une plante de transformer la lumière venant du ciel en énergie avec tellement d'efficacité... Et puis.. Encore faudrait-il savoir comment la stocker... Car la nuit, point de salut : impossible de recharger mon téléphone avec ce petit panneau solaire.

En tout cas, selon un autre prix Nobel de chimie, Walter KOHN, l'utilisation des cellules photovoltaïques devrait satisfaire, à elles seules, jusqu'à 35% de nos besoins en énergie d'ici 2050.

Et bientôt, de grandes usines de fabrication de cellules solaires pourraient voir le jour. Certaines sont annoncées avec des capacités de production d'environ 200 millions de cellules solaires par an, soit une puissance totale de 430 MW, c'est-à-dire assez d'électricité pour alimenter plus de 300 000 foyers

10:48:16:00

**JAMES HEATH**  
**CHIMISTE**  
**CALTECH**

*Si nous voulons transformer le monde tel qu'il est aujourd'hui, avec d'un côté, quelques pays riches et de l'autre, une multitude de pays pauvres, rien n'est plus déterminant que l'accès à l'énergie : c'est là-dessus qu'il faut agir pour augmenter le niveau de vie. Vous savez, il suffit que la consommation d'énergie augmente, pour que le niveau de vie augmente.*

10:48:35:00

**PIERO BAGLIONI**  
**CHIMISTE**  
**UNIVERSITE DE FLORENCE**

*On peut dire que les nanosciences sont une sorte de Renaissance pour la science. Parce qu'elles encouragent l'interdisciplinarité, et qu'elles font faire à la connaissance un véritable bond en avant.*

*Ça sera comme une sorte de révolution industrielle, lorsque les nanosciences seront vraiment opérationnelles.*

*On n'en est qu'au début.*

10:49:03:00

**VLADIMIR BULOVIC**  
**CHERCHEUR EN ELECTRONIQUE**  
**MIT**

*En fait, depuis la fin du XX et le début du XXIème siècle, nous réalisons enfin, qu'en jouant la carte de l'interdisciplinarité, et en apprenant à communiquer les uns avec les autres, nous allons être capables de faire des choses inimaginables.*

10:49:20:00

**ALAN J. HEEGER**  
**PHYSICIEN PRIX NOBEL DE CHIMIE 2000**  
**UCSB**

*Il y a tant de projets excitants, tant de nouvelles idées, de nouveaux concepts et aussi tant d'outils pour les mener à bien... waouh, j'aimerais avoir de nouveau 25 ans !*

10:49:36:00

## **COM**

Ce futur a de quoi donner envie. L'exploration du nanomonde n'en est encore qu'à ses tous débuts.. Et ce qu'on fait aujourd'hui est tellement primitif, comparé à ce que fait la nature. Les nanotechnologies sont un outil, pas une fin en soi

Au centre de cet univers de tous les possibles, il y a nous, les humains. Et en premier lieu, notre corps qui sera sans doute le plus directement touché par les nanotechnologies : Car la médecine, en devenant la nano-médecine, nous offre le plus fabuleux champs d'expérimentation : la vie...

Mais en découvrant de ce territoire naissent aussi des peurs, fantasmes ou inquiétudes légitimes...

En route pour d'autres voyages...

TC OUT 10 50 25

## **GENERIQUE DE FIN (DEROULANT SUR IMAGE)**

**UN FILM DE**  
CHARLES-ANTOINE DE ROUVRE  
JEROME SCEMLA

**PRODUIT PAR**  
LAURENT MINI  
KARIM SAMAI

**ECRIT PAR**  
CHARLES-ANTOINE DE ROUVRE  
JEROME SCEMLA  
ANNE FRANCE SION

**MUSIQUE ORIGINALE**  
JOSEPH GUIGUI  
DAVID DAHAN

**COMMENTAIRE DIT PAR**  
CHARLES-ANTOINE DE ROUVRE

**AVEC LES VOIX DE**  
STEPHANIE BELLE  
STEPHANE KALB  
JEAN CHRISTOPHE LEBERT  
LAURENT LEGRAET  
OLIVIER PEISSEL  
BERNARD PETIT

**MONTAGE**  
DELPHINE DUFRICHE

**ASSISTEE DE**  
BENOITE DORLACQ

**MONTAGE SON**  
CLAIRE JOUAN

**DIRECTRICE DE PRODUCTION**  
BENEDICTE RICHARD

**DIRECTION DE POST PRODUCTION**  
NOËL MORROW  
SÉVERINE CAPPÀ

**STAGIAIRES**  
CHANTAL RUFFIN  
SOUADE SAMAI

**RECHERCHES**  
LAURENCE PIVOT  
BENJAMIN TURQUET

**IMAGES**  
REMY REVELLIN  
CHRISTOPHE LEMIRE  
BORIS CARRETE  
JEROME SCEMLA

**SON**  
VINCENT MAGNIER  
ODILE DARMOSTOUBE

**MACHINERIE**  
YOHANN TROUBAT

**GRÉGORIE DAUBAS**

**SILHOUETTE – FEMME**  
LISA FACHAU

**MAQUILLAGE**  
STEPHANIE FIORILE

**REGISSEURS**  
LAURENT AIT BENALLA  
WAI YIM WONG CHARMES  
AYA ASAKURA, YOKO ISHITANI  
FLORENCE ROUDAUT, LUCAS DELOFFRE  
LYN MARKEY  
VERONIQUE GARA

**DOCUMENTATION**  
VALERIE COMBARD  
VALERIE FRENE  
XAVIER BRILLAT

**TRANSCRIPTION & TRADUCTION**  
PAULETTE DOMINIQUE  
FABIENNE BERLATIER

**ETALONNAGE**  
THIERRY LERAY  
PASCAL FAIVRE CHALON  
PAUL- HENRY ROUGET

**MIXAGE**  
SPARKLE STUDIO

**HABILLAGE ET ANIMATIONS 2D**  
TCHACK

**DIRECTION ARTISTIQUE 2D 3D**  
LUCIANO LEPINAY

**STORY-BOARD 2D 3D**  
DANIEL KLEIN

**ANIMATION & COMPOSITING**  
DENIS VAUTRIN  
SANTINE MUNOZ  
ARMEL FORTUN

**PRODUCTION**  
MATTHIEU LIEGEOIS

**STAGIAIRES**  
LOUISE CAILLEZ  
VIRGINIE GUICHAOUA

**ANIMATION 3D**  
CREATIVE CONSPIRACY

**PRODUCTION**  
LUC VAN DRIESSCHE, KOEN VERMAANEN

**ANIMATION**  
BART BOSSAERT, BRUNO HANSSENS,  
TOM NEUTTIENS, WANNES AELVOET, JEREMIE LOUVAERT

**COMPOSITING**  
GERRIT BEKERS, JEREMIE LOUVAERT

**SFX**  
MITCHEL SMITH

**STAGIAIRES**  
EVELYN BEKAERT, JEROEN BOURGOIS  
PIETER DEPANDELAERE, XAVIER VANYSACKER

**MUSIQUE ADDITIONNELLE**  
CHANSON « ESSAYE » INTERPRETEE PAR ALARASH  
CHANSONS « NANOBOTS » & « EPILOGUE » PAR JAMES HEATH

**ARCHIVES**  
ANGELS AGAINST NANOTECHNOLOGIES  
APARCHIVE  
ATELIER DES ARCHIVES  
BBC  
CALTECH ARCHIVES  
CERIMÈS  
CHICAGO T.H.O.N.G.  
FRAMEPOOL  
GAUMONT-PATHE ARCHIVES  
GEDEON PROGRAMMES  
IBM  
INSERM  
NEC  
NICK PAPADAKIS  
PAUL W.K. ROTHEMUND  
PILKINGTON FRANCE  
PROGRAM33  
SONY  
SVT  
TRANSPARENCE PRODUCTION  
WORLD TRANSHUMANIST ASSOCIATION

## **REMERCIEMENTS**

### **LIRMM**

PHILIPPE POIGNET / DAVID GUIRAUD / GUY CATHEBRAS / FABIEN SOULIER

### **MINATEC / CEA**

LORENE FERRANDES / CLEMENT MOULET

### **FRANÇOIS TARDIF**

CHEF DU LABORATOIRE DES TECHNOLOGIES DES TRACEURS

### **SEBASTIEN NOËL**

PHYSICIEN DES SEMI-CONDUCTEURS

### **GUILLAUME SAVELLI**

PHYSICIEN / THERMO-ELECTRIQUE

### **~~NICOLAS BARDI~~**

~~INGENIEUR /CHEF DU LABORATOIRE PILES A COMBUSTIBLE~~

### **~~DENIS TREMBLAY, PAULINE LEGRAND, DIDIER LOUIS~~**

~~PASCALE BAYLE-GUILLEMAUD, PIERRE-HENRI JOUNEAU,  
VIOLAINE SALVADOR  
PLATEFORME DE NANOCARACTERISATION~~

### **FABRICE NAVARRO**

CHERCHEUR EN BIOLOGIE

### **THOMAS DELMAS**

PHYSICO-CHIMISTE

### **ELODIE SOLLIER**

INGENIEUR DOCTORANTE EN MICROFLUIDIQUE POUR LA SANTE

### **JEAN-CHRISTOPHE P.GABRIEL**

RESPONSABLE PROGRAMME BEYOND CMOS

### **F.BERGER**

MEDECIN CHERCHEUR

### **CHRISTINE PEONNET**

CHEF DE SERVICE BIOSYSTEM ON CHIP

### **RAPHAEL SALOT**

PHYSICIEN DES MATERIAUX / CEA/LITEN

### **JEAN-YVES LAURENT**

ELECTROCHIMISTE / CEA/LITEN

### **UNIVERSITE DE HARVARD**

QUAN QING

**UNIVERSITE DE CORNELL**

MARGARET FREY / GEORGE G. MALLIARAS / MICHAEL SKVARLA

**M.I.T.**

VICKY DIADUCK / LUIS FERNANDO VELASQUEZ-GARCIA  
MARC A. BALDO / JESUS A. DEL ALAMO / KARL K. BERGGREN

**IBM WATSON RESEARCH CENTER**

JOERG APPENZELLER

**CALTEC**

MARK DAVIES / ERIK WINFREE / PAUL ROTHEMUND

**UCSB**

WALTER KOHN

**UNIVERSITE POLYTECHNIQUE DE HONG KONG**

ANNE HON

**NATIONAL SCIENCE FOUNDATION**

JOSHUA A. CHAMOT

**FORESIGHT**

CHRISTINE PETERSON

**NBCI**

MASAO WATARI

**EQUIPE NANOMEDECINE DE L'UNIVERSITE DU TEXAS**

ENNIO TASCIOTTI / ALESSANDRO GRATTONI / RITA SERDA / ROHAN  
BHAVANE / ALI BOUAMRANI / SILVIA FERRATI / BING XIA / JIANHUA GU /  
ROBERT CAHILL

**CENTRE ETH ZURICH**

VAHID SANDOGHDAR / PHILIPPE KUKURA

IRENE CAMPOS / DEUTSCHES MUSEUM MUNICH

EVA TIETZ

LADY MARGARET KROTO

CHRISTOPHER RADIC

GUY FORESTIER

GUNTER OBERDORSTER

DANIELA DINI

SANTA CROCE / PALAZZO PITTI

PHILIPPE LEMOINE

MINOO DASTOOR

ROLAND HERINO

DANIEL OCHOA

ILARION PAVEL

ISABELLE MURMURE

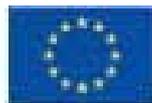
JEAN-ERIC WEGROVE  
MARJORIE THOMAS  
PAOLA, KIM, CHIARA, ILARIA, FEDERICA AND GIACOMO FERRARI  
MASAYO ENDO / SONY CORP.  
KONARKA  
COMPUTER HISTORY MUSEUM  
LE TELEPHERIQUE DE LA BASTILLE A GRENOBLE  
RESTAURANT LE PER'GRAS  
ATOMIUM DE BRUXELLES  
STEPHANIE GIRAUD / URBASOLAR  
ARKEMA  
SAGEM DEFENSE SECURITE

**UNE PRODUCTION**  
LA COMPAGNIE DES TAXI BROUSSE  
LAURENT MINI  
KARIM SAMAI

**EN COPRODUCTION AVEC**  
EUROVISION SCIENCE  
PHILIPPE JACOT  
LAURA LONGOBARDI  
KAREN SIMHA

DANS LE CADRE DU PROJET  
SCIENCE IN EUROPE 2020

COPRODUIT AVEC LA PARTICIPATION FINANCIERE DE LA COMMISSION  
EUROPEENNE, DIRECTION GENERALE DE LA RECHERCHE



EUROPEAN COMMISSION  
European Research Area

**AVEC LA PARTICIPATION**  
D'EUROPE IMAGES INTERNATIONAL

**AVEC LE SOUTIEN DE**  
LA REGION LANGUEDOC-ROUSSILLON  
DU CENTRE NATIONAL DE LA CINEMATOGRAPHIE  
DE L'ANGOA ET DE LA PROCIREP  
SOCIETE DES PRODUCTEURS

**PRODUIT AVEC LA COLLABORATION DE**  
LA RTBF –TELEVISION BELGE –CLAIRE COLLART  
UR- NINNIE KÜLLER

TFO, LA CHAÎNE ÉDUCATIVE ET CULTURELLE DE LANGUE FRANÇAISE DE  
L'ONTARIO

**AVEC LA PARTICIPATION DE  
FRANCE TELEVISIONS**

POLE FRANCE 5

POLE DOCUMENTAIRES  
PIERRE BLOCK DE FRIBERG  
CARLOS PINSKY  
HERVE GUERIN

PHILIPPE LE MORE  
VALERIE VERDIER FERRE

PRESSE FRANCE 5  
ANNE-SOPHIE BRUTTMANN

© 2009 LA COMPAGNIE DES TAXI BROUSSE