

NANOMONDE - EPISODE 3

COMMENTAIRE

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...

TITRE :

BIENVENUE DANS LE NANOMONDE
... DES NANOS EN NOUS...

COM

Bienvenue dans ce voyage, à la découverte de la nano-médecine...

01 15

MAURO FERRARI
DIRECTEUR DÉPARTEMENT NANO MEDECINE
UNIVERSITÉ DU TEXAS

Ma femme, ma première femme, Maria Luisa est tombé malade. Elle est morte d'un cancer à 32 ans, nous avons trois jeunes enfants, Giacomo, Kimi et Chiara. Les médecins me disaient qu'on ne pouvait rien faire, qu'elle allait bientôt mourir... Et pourtant, quand on la regardait, elle n'avait même pas l'air malade ! Et les problèmes dont me parlaient les médecins étaient d'ordre technique, technologique, d'ingénierie : comment détecter le cancer plus tôt ? Comment faire pour que les médicaments atteignent leur cible ?...

Et moi, j'étais là, au beau milieu de toute cette fabuleuse technologie, dans des universités comme Berkeley ou Stanford, dans un pays où partout on fait des prouesses dans le domaine de l'électronique... Et c'est là que je me suis demandé pourquoi on n'utiliserait pas toutes ces technologies pour relever les défis auxquels la médecine est confrontée ?

COM

La technologie au service de la santé. Je n'y vois a priori rien de nouveau. Sauf que cette technologie là est à l'échelle du nanomètre.

Et la recherche biomédicale travaille à cette échelle, celle de la molécule, depuis plus d'une décennie.

Avec les nanosciences, de nouvelles solutions se profilent. Les grands axes de recherche sont clairement définis. Diagnostiquer plus tôt et plus finement, soigner plus efficacement à moindre dose, mieux réparer ce qui a pu être détruit ou endommagé, peau, muscle, os et pourquoi pas organes...

02 46

Un petit rappel. Ce préfixe nano indique une échelle : le milliardième de mètre. 10⁻⁹ mètres (à l'écran 0,00 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.

03 27

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..

Autre particularité : le rapport surface volume va changer. En changeant d'échelle, pour un même volume, on gagne de la surface. Pour comprendre, il suffit par exemple de comparer la surface d'une balle, et la surface totale de toutes les balles plus petites qu'elle pourrait contenir. Cette dernière est supérieure.

04 10

A l'échelle nano, se manifestent aussi 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 reprends ma balle, la lance contre un mur, dans notre monde, elle va 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.

04 53

Un cabinet d'étude, Lux Research, a estimé qu'à l'horizon de 2014, jusqu'à 16% du chiffre d'affaires des produits liés à la santé sera issus des nanotechnologies.

Avec une même priorité partout dans le monde : la lutte contre le cancer. Des moyens impressionnants, et des résultats... Ici même, en Europe par exemple.

SYNTHE :
BERLIN

COM

J'ai rendez-vous en Allemagne avec le Professeur ANDREAS JORDAN dans un petit bâtiment à l'écart des jardins d'une institution : l'Hôpital de la Charité.

05 16

IN

Hello... hello...

We can start here...

05 32

COM

ANDREAS JORDAN a créé sa start-up, il y a maintenant près de 10 ans, pour développer une thérapie issue des nanotechnologies et traiter certaines tumeurs du cerveau. Cette dimension nano lui a permis de rendre efficace un procédé qui à l'échelle micro ne l'était pas.

05 48

ANDREAS JORDAN

PROFESSEUR EN BIOCHIMIE

FONDATEUR DE MAGFORCE NANOTECHNOLOGIES

La thérapie par hyperthermie ou thermo thérapie contre le cancer était une méthode connue. Mais avec les systèmes conventionnels, on n'était pas capable d'élever uniquement la température de la tumeur, on élevait aussi celle des tissus sains tout autour. Nous avons donc axé nos recherches sur des particules capables de générer de la chaleur à l'intérieur de la tumeur, en les soumettant à un champ magnétique externe.

COM

J'apprends donc que comme toute cellule de notre corps, les tumeurs ne survivent pas à une brutale élévation de température. Pour chauffer la tumeur, et uniquement celle-ci, ANDREAS JORDAN utilise des particules de taille nanométrique.

06 30

En entrant dans le laboratoire de JORDAN où s'élaborent ces nanoparticules, j'imagine un univers futuriste, high tech.... Mais non...

06 38

ANDREAS JORDAN

Voici donc notre département technique où les nanoparticules sont produites et fabriquées. Le principe de base de notre nouvelle thérapie contre le cancer repose sur ces nanoparticules d'oxyde de fer, qui font 15 nanomètres. Ce sont donc de très petites particules.

Si on prend un aimant, on se rend compte qu'elles réagissent au champ magnétique.

COM

Un champ magnétique. Pourquoi ? Comment ? Devant mes interrogations, JORDAN me propose une petite expérience... Démonstration

07 09

ANDREAS JORDAN

Je met en route le champ magnétique... et je mets ma main là, je ne sens rien alors que le champ magnétique est à sa puissance maximale.

07 21

L'ENQUETEUR

Je peux essayer moi ?

ANDREAS JORDAN

Oui, allez-y... Est-ce que vous ressentez de la chaleur ou une autre sensation ?
- Non.

COM

Sur ma main, pas de métal et encore moins d'oxyde de fer, donc pas de chaleur... mais là en revanche...

07 36

ANDREAS JORDAN

Et maintenant si je mets cette pièce ici, vous allez voir, en quelques secondes à peine... Elle chauffe.

L'ENQUETEUR

C'est donc exactement le même procédé que vous utilisez après avoir injecté heu...

ANDREAS JORDAN

Exactement, après avoir injecté les particules dans la tumeur, on les excite avec le champ magnétique extérieur... Et elles chauffent... Mais il n'y a que les particules qui chauffent

COM

Lorsque les nanoparticules sont soumises à un champ magnétique oscillant, elles entrent en vibration à raison de 100 000 fois par seconde. Ce qui provoque leur échauffement. La température à l'intérieur des cellules cancéreuses va grimper à 43° et les détruire.

08 23

L'ENQUETEUR

Pourquoi est-ce que cela ne fonctionne pas avec des macros particules ? Pourquoi faut-il avoir recours à des nanoparticules ?

ANDREAS JORDAN

J'ai fait des essais avec des centaines de particules, des particules différentes et plus grandes, avec différents revêtements et à chaque fois, il me fallait malheureusement au moins un gramme d'oxyde de fer par gramme de tissu de tumeur, ce qui représente une quantité vraiment énorme, et qui ne serait pas tolérable pour les hommes.

Le deuxième point c'est que l'on peut vraiment modifier avec précision la surface de la structure de sorte que les particules nano restent dans la tumeur : elles sont prises par les cellules de la tumeur, et non par les cellules normales. Elles migrent à l'intérieur du tissu de la tumeur, pas dans le tissu normal. Tous ces éléments sont dus aux caractéristiques du revêtement de ces nanoparticules. Et cela ne peut se faire qu'à cette échelle nano.

09 24

COM

Grâce à leur taille nano, ces particules, conçues et fabriquées par JORDAN lui-même, sont efficaces parce que particulièrement bien ciblés et répondant de manière optimale à la stimulation magnétique. Les doses nécessaires sont moins importantes et donc moins potentiellement toxiques

Et les résultats sont là. Des malades s'en sont sortis. Certains cas de rémission sont même exemplaires.

09 44

L'ENQUETEUR

Est-ce que vous vous rendez compte que vous donnez de l'espoir aux gens ?

ANDREAS JORDAN

Etant donné que les tests cliniques sont toujours en cours, il n'est pas encore possible de confirmer l'efficacité de manière significative, sur un plan statistique. Je peux néanmoins vous dire que plusieurs patients de notre étude sur les tumeurs du cerveau ont survécu bien plus longtemps que ne le laissaient présager les pronostics des médecins.

10 09

COM

Pourquoi tout ça ne va pas plus vite....

Si soumettre les nanoparticules à un champ magnétique est facilement maîtrisée, l'injection de ces nanoparticules dans la tumeur reste compliquée. Aujourd'hui les équipes du professeur Jordan doivent simuler l'intervention en images artificielles avant d'y procéder in vivo. L'injection doit être parfaitement contrôlée afin que le contenu soit bien distribué et qu'aucun tissu ne soit abîmé au passage.

ANDREAS JORDAN

Pour l'instant, nous nous heurtons à des obstacles, et le principal vient du fait qu'il nous faut obligatoirement injecter directement le produit dans la tumeur. Parfois, la tumeur reste inaccessible. Il arrive aussi que nous ne disposions que d'un nombre insuffisant de trajectoires d'injection.

10 52

COM

Il n'empêche. Les travaux d'ANDREAS JORDAN sont en phase 2 de tests cliniques. La dernière avant leur mise sur le marché. Une révolution ? Pas exactement... Mais des progrès, une vraie avancée permise par le travail à l'échelle nano. Ces progrès en augurent d'autres en termes de soins, mais aussi en termes d'économie de soins. Ces données sont désormais indissociables. Gagner six mois, dix ans d'espérance vie s'évalue en fonction d'un rapport coût bénéfice. Dans la médecine moderne, je suis, nous sommes des patients mais aussi des clients, des consommateurs.

L'argent est plus que jamais le nerf de la guerre contre la maladie. Aux Etats-Unis, où je poursuis mon voyage, 55% des fonds alloués aux nanosciences et nanotechnologies sont consacrés aux seules biotechnologies. Le National Cancer Institute a mis en place en 2004 un premier programme de 144 millions de dollars sur 5 ans dédiés aux recherches nano contre le cancer... La compétition pour la maîtrise de l'infiniment petit fait rage d'un continent à l'autre, d'un pays à l'autre, et entre laboratoires.

11 52

Prochain enjeu des nano-bio-technologies : ne plus avoir besoin d'injecter le traitement directement dans les zones malades. Grâce à la nanotechnologie, les médicaments sont en passe de devenir intelligents. En d'autres termes, une fois dans le sang, ces nanoparticules seront capables d'identifier seuls leur cible et de l'atteindre pour la traiter, de manière autonome plus rapidement, plus précisément, plus efficacement.

SYNTHE :
HOUSTON

COM

Au Texas, je vais croiser de nouveaux pionniers. Ici instituts et hôpitaux occupent un tiers de la superficie de la ville.

L'équipe du professeur Ferrari est l'une des plus en pointe dans l'élaboration de nanoparticules intelligentes.

12 35

MAURO FERRARI
DIRECTEUR DÉPARTEMENT NANO MEDECINE
UNIVERSITÉ DU TEXAS

Même avec les meilleurs médicaments, qui pour certains patients font déjà des miracles, par exemple dans la lutte contre le cancer du sein, seule une particule sur cent mille ou sur un million atteint la tumeur, les autres causent des dommages dans le reste du corps. C'est le problème des thérapies contre le cancer, il faut parvenir à s'assurer que le médicament va bien traiter la zone qu'il est censé traiter.

Le corps est plein de barrières biologiques, il est organisé avec toutes sortes de systèmes de défense pour repousser ou détruire tous les organismes étrangers.

Donc nos traitements doivent franchir ces barrières – c’est comme si il y avait des barbelés, des mines, des tranchées. Pour y arriver, on ne peut donc pas se contenter d’une seule particule, il faut pouvoir orchestrer tout un système.

13 34

MAURO FERRARI

Notre stratégie, et celle d’autres laboratoires, c’est de jouer sur les paramètres de design comme la taille, la forme et les matériaux,- ce qui était impossible il y a quelques années à peine...

COM

Il y a encore une vingtaine d’années il était impossible de fabriquer et contrôler des objets à l’échelle nanométriques. Aujourd’hui Ferrari dispose des outils qui lui permettent de formuler des doses nanoscopiques de traitement - par exemple d’intégrer une molécule traitante dans un tube nanométrique - et de coupler ces nanodoses à une tête chercheuse..

14 09

MAURO FERRARI

Nous avons donc défini le meilleur design possible - si vous en connaissez un meilleur, dites-le moi ! – et nous sommes parvenus, après toutes ces années, à cette taille et cette forme que l’on peut voir là... On dirait une demi-noix de coco. Grâce à ce design, nous sommes capables de donner des fonctionnalités très différentes à nos particules.

14 35

L’ENQUETEUR

Et de quoi est-ce fait ?

MAURO FERRARI

Ha. Dis-lui.

L’interviewée 2- Ho, nous n’avons pas précisé que ...

Dis-lui.

L’interviewée 2- C’est du silicium poreux.

C’est le même matériau que celui utilisé pour fabriquer des puces informatiques, mais quand il est poreux, ce qu’il a d’extraordinaire c’est qu’il se désintègre, il devient totalement dégradable sans rien laisser de toxique.

On peut donc le remplir de différentes charges de nano- traitements, des nano particules qu’on destine à différents compartiments sous-cellulaires, certaines

devant aller vers le noyau, d'autres vers le cytoplasme, et qui vont être relâchés à des moments différents.

15 10

COM

Dans le corps, ces transporteurs de nanoparticules, injectées n'importe où dans le sang, sont capables de se rendre dans les endroits les plus difficilement accessibles, de franchir les barrières naturelles, de repérer leurs cibles, de s'y fixer et de relâcher leurs principes actifs.

15 39

MAURO FERRARI

C'est un peu comme la conception d'une fusée qu'on enverrait vers la lune, il lui faut plusieurs étages. Et nous faisons la même chose.

Il y a plusieurs étapes, d'abord il y a la théorie, puis la validation biologique, et enfin la mise en application. Pour y arriver, il faut obligatoirement une collaboration entre physiciens, chimistes et biologistes moléculaire, il faut donc constituer des équipes interdisciplinaires.

L'ENQUETEUR

Mais cette technique marche en théorie ?

MAURO FERRARI

Oui.

L'ENQUETEUR

Vous avez déjà procédé à des essais ?

MAURO FERRARI

Oui. Ça marche.

L'ENQUETEUR

Alors pourquoi n'est-elle pas utilisée ?

16 10

MAURO FERRARI

Pour qu'elle soit validée, ça prend beaucoup de temps. Il faut faire des essais sur des centaines et des centaines de patients, ce qui prend forcément des années.

16 28

COM

Encore une fois, j'ai envie de leur dire d'aller toujours plus vite. Plus vite dans cette lutte contre le cancer. Je parie qu'avec l'énergie et la conviction dont est capable Ferrari, la théorie et la pratique se rejoindront bien vite. Reste cependant pour lui un impératif : découvrir la maladie à temps, avant qu'il ne soit trop tard.

16 46

MAURO FERRARI

Dans la grande majorité des cas, les cancers sont diagnostiqués trop tard. Du coup, les interventions sont très lourdes : il faut y aller au scalpel, avec des rayons, avec des traitements très toxiques, tout ça pour éviter la dissémination des métastases et rallonger un peu la durée de vie.

Aujourd'hui la question est : comment faire pour déceler les cancers plus tôt ? Dans le monde entier, nous disposons d'examen de dépistages - comme les rayons X, l'IRM, le scanner - qui sont très au point. Mais chaque intervention d'imagerie pose un problème radiologique, lié aux brûlures causées par les radiations, sans oublier le problème des tumeurs plus petites qui ne sont pas forcément détectables par ces moyens.

COM

Comment voir mieux, comment voir plus finement, diagnostiquer plus tôt, et sans que cela nuise au patient ?

Les nanotechnologies apportent là aussi un progrès déterminant.

L'idée est de construire une autre tête chercheuse, cette fois ci un nano-marqueur, dont la mission sera de révéler dans le corps la cellule malade.

Conçu pour être autonome, il devra trouver seul son objectif, s'y fixer et le rendre visible. Le tout est d'avoir le bon marqueur...

18 00

SYNTHE :

GRENOBLE

COM

En France, je rejoins, cobaye en main, une équipe du département Nanobio du LETI, le Laboratoire d'Électronique et de Technologie de l'Informatique où des scientifiques aussi sérieux que compétents se plient gentiment à mes caprices pour tenter de me faire comprendre leur travail.

18 16

FABRICE NAVARRO
CHERCHEUR EN BIOCHIMIE
DTBS / LETI

« Donc on a un petit capillaire là, qui contient le fluorofore, et ça je vais l'insérer dans notre lézard. Voilà. On le met dans le dispositif optique. On excite avec de la lumière, dans une longueur d'onde donnée, le fluorofore. Celui ci émet de la lumière, donc on voit bien le signal fluorescent au travers du lézard. Alors lorsqu'on injecte du fluorofore dans une souris, ce qu'on voit apparaître c'est une distribution homogène du fluorofore sur la souris. Le fluorofore va dans les vaisseaux sanguins, et les vaisseaux sanguins peuplent tous les organes, donc du coup le fluorofore et la nanoparticule va se distribuer de façon homogène via la circulation sanguine.

Ensuite, avec le temps, les nanoparticules vont pouvoir aller se loger en particulier au niveau de la tumeur.

Si on se place à un temps plus long, vingt-quatre heures, on va avoir ici une fluorescence plus importante au niveau de cette tumeur, sous la peau de la souris. Ce qui se passe au niveau de la tumeur, c'est qu'il y a de nouveaux vaisseaux sanguins qui se forment, ces nouveaux vaisseaux sanguins sont imparfaits, ils vont avoir des pores qui seront plus importants. Les nanoparticules d'une taille inférieure à cent nanomètre, peuvent traverser les pores au niveau des vaisseaux sanguins de la tumeur.»

FABRICE NAVARRO

« Les nanoparticules qui circulent dans le sang, vont pouvoir s'accumuler dans la tumeur et y rester. Et donc comme elles émettent de la lumière, si on les excite, on va pouvoir détecter, au bout d'un certain temps, cette tumeur par imagerie de fluorescence.»

19 59

COM

Mais là encore, devoir injecter un fluorofore restreint les possibilités. Pour tous les scientifiques, le plus simple serait de pouvoir établir un diagnostic directement à partir des fluides du corps. Juste un prélèvement et hop...

Aujourd'hui les laboratoires d'analyse sont trop chers, et ne permettent pas finalement d'apporter beaucoup d'informations. Ce qui bloque encore un dépistage large et très en amont.

La solution est encore de changer d'échelle, en passant du macro au micro puis au nanomètre.

SYNTHE :
PASADENA

COM

Elle est étudiée en Californie, au California Institute of Technology. C'est là qu'officie, Jim Heath, un air de Dude, de baba cool, avec un CV en or et des idées plein la tête.

IN

Hello Hi I'm Charles...

...

20 55

JAMES HEATH
CHIMISTE
CALTEC

Avant on se posait une seule question : y a-t-il une tumeur ou pas ? Aujourd'hui, nous voulons pouvoir répondre à plein de questions : savoir si vous avez le cancer, dans quel organe il est situé, quel est son stade – au début, avancé ou métastasé ? Quelle est la bonne thérapie et si vous en suivez une, est-ce que vous réagissez bien ou mal etc... ? Cela implique de multiplier les examens, les mesures, les scanners... Pour éviter cela, il a fallu en premier lieu comprendre la biologie et ensuite développer des technologies qui nous permettent, d'une manière assez simple, de prendre des centaines de milliers de mesures sans gêner le patient. Avec une simple prise de sang on peut obtenir des informations vraiment précises sur l'état du patient, sa réaction au traitement...

Le défi à relever, ça n'est plus seulement de trouver de nouveaux médicaments, mais surtout de nouvelles méthodes de mesures.

22 00

JAMES HEATH

Comme vous voyez, c'est un labo où on bosse, donc il y a pas mal de désordre... Ce qu'on utilise, ce sont des protéines présentes dans notre sang, elles nous informent sur l'état de santé de nos différents organes. Cela ne dure que quelques minutes à peine, guère plus de temps qu'il n'en faut au sang pour coaguler Aujourd'hui à l'hôpital, si vous avez un cancer de la prostate, on vous fait un test de dépistage à partir d'une protéine qui s'appelle PSA. Ce test coûte environ 50 dollars à l'hôpital et à vous ça vous coûte encore plus cher. Ici, en utilisant la même protéine que celle de l'hôpital, nous avons réduit le coût à environ 10 cents

par test. Nous incluons en plus dans le même examen 49 autres tests de protéines, et tout ça dure moins de 10 minutes. L'objectif, c'est simplement de réduire les coûts.

COM

Diagnostiquer pour un coût dérisoire. Une simple goutte de sang pour des milliers d'analyses en quelques secondes.

Je me prends à rêver d'un futur où prévention et traitement ne feraient plus qu'un. Et c'est l'objectif ultime de ce qu'on appelle des « laboratoires sur puce, » ou « lab on chip », des dispositifs pas plus gros qu'une puce électronique et capables d'effectuer des analyses, puis de délivrer un traitement.

Les recherches dans ce domaine ne se limitent pas à celles de Heath aux Etats-Unis, puisque toujours en France, toujours au LETI, l'équipe de Christine Peponnet travaille avec autant d'enthousiasme sur le même sujet, chemise hawaïenne en moins...

IN

C'est bien la première fois qu'ils voient leur chef en blouse...

24 05

CHRISTINE PEPONNET

CHEF DE SERVICE BIOSYSTÈMES SUR PUCE

DTBS / LETI

« Le Lab on Chip, c'est la petite puce là qu'on voit. Avec un système comme ça on peut analyser très finement quelques cellules, deux ou trois. Donc en fait c'est des outils qui permettent d'aller, par exemple, travailler sur des nanoéchantillons. Donc là ici on est en train de manipuler des gouttes, non pas par des pompes, ou des pousses-seringues ou des systèmes fluidiques, mais tout simplement en allumant ou éteignant une électrode. Et donc on va comme ça modifier la moyennabilité d'une surface et pouvoir déplacer une goutte d'une électrode à une autre. et en fait la faire aller d'un poste à un autre, on va lui faire faire soit lui ajouter du réactif, soit lui faire une détection, et donc en fait comme ça réaliser toutes les étapes d'un protocole biologique pour arriver à une analyse.»

25 08

JAMES HEATH

Vous voyez donc ici toute la tuyauterie qu'on utilise habituellement pour acheminer les réactifs vers les puces. Quand on regarde ça de près, ça semble vraiment

complexe, et c'est d'ailleurs effectivement le cas. Toute cette plomberie, on se demande comment tout ça pourrait être plus simple, meilleur marché, ça semble impossible. Et bien c'est ce qu'on a réussi à faire, on est arrivé à se débarrasser de tout ça et à le remplacer par un morceau de plastique et de verre, totalement intégré et autonome : une simple réaction chimique met en route et fait fonctionner tout le système. Il suffit donc d'avoir cette puce - plus besoin de tuyauterie, ni de rien d'autre- on prend un peu de sang, on le dépose dessus et c'est parti...

L'ENQUETEUR

Et à la fin, vous avez les résultats ?

JAMES HEATH

Oui

L'ENQUETEUR

La puce ne se contente pas de faire une opération, elle...

JAMES HEATH

Oui, elle réalise plein d'opérations.

Je veux que tout ça existe en dehors du labo avant que je ne sois trop vieux. Et que ça ne coûte pas cher.

Ce que je crois, c'est que si on arrive à exploiter toute cette technologie, on pourra élaborer des protocoles thérapeutiques, en relation directe avec les diagnostics, pour délivrer un traitement beaucoup plus efficaces et rapide auprès du patient. Et tout ça sera très accessible, pour aider les gens.

26 19

CHRISTINE PEONNET

« La frontière entre le diagnostic et la thérapeutique elle est en train de devenir de plus en plus floue, donc par exemple doser de façon un peu continu le médicament dans le sang ça peut être une façon intelligente de soigner les personnes. Donc en fait c'est un aller retour entre le diagnostic, je dose, je donne le médicament, je dose, je donne le médicament, et bientôt on aura pratiquement un monitoring en temps continu ou toutes les heures, avec notamment des délivrances assistées pour garder le taux le plus constant possible et éviter les à-coups , les piques et tout ce qui est indésirable dans les prises de médicaments»

L'ENQUETEUR

C'est quoi la vision que l'on peut avoir ?

CHRISTINE PEPPONNET

« La vision c'est de se rapprocher de plus en plus près du malade. Là typiquement ça pourrait être des systèmes d'analyse qui sont soit dans l'ambulance, soit au près du malade, oui dans sa poche pourquoi pas pour certaines pathologies c'est important de se tester une ou deux fois par jour. Ça peut aussi être dans les pays sous développés, en fait ils n'ont pas d'infrastructure de laboratoire, de la même façon qu'on est passé de pas de téléphone au portable, on pourrait passer de peu d'analyses de laboratoire à quelque chose de complètement délocalisé par ces nouveaux systèmes sans avoir besoin d'expert technique pour faire l'analyse en général. »

27 43

COM

Nous n'en sommes pas encore là. Les premiers dispositifs miniatures de délivrance embarqués sont toujours d'une taille comparable à celle d'une grosse capsule. Les informations collectées et interprétées par le système de diagnostic sur puce ne sont pas fiables et reproductibles.

Mais les progrès vont à une vitesse fulgurante. Les premiers laboratoires intégrés sur puce – mais dédiés à un diagnostic unique – celui du H5N1 ont été mis au point. Ils permettent de confirmer rapidement une suspicion. Ils remplaceront peut-être un jour une procédure peu fiable comme celle que j'ai subi, alors que j'étais en transit à l'aéroport de Hong Kong. Dans le cadre de la lutte contre la grippe aviaire, je passe au travers d'un filtre qui vérifie ma température corporelle. Pas de température, pas de maladie. Le procédé est simpliste mais a le mérite d'exister.

Après les laboratoires sur puce, certains extrapolent. Ils rêvent déjà de nanorobots intervenants directement dans notre corps. Mais aujourd'hui tout cela reste de la pure science-fiction.

29 15

JAMES HEATH

A mon avis, la réalité dépasse toujours la fiction. Surtout dans le domaine de la science,

Ecoutez, je vais vous raconter une histoire, celle d'un médicament conçu par mon collègue Mark Davis. Tout commence avec le retrait d'un médicament utilisé en chimiothérapie, et qui avait été retiré du marché, car trop toxique.

Mark a conçu une petite capsule que le corps pouvait prendre pour du sucre, mais un sucre impossible à digérer. Le corps ne peut donc ni le métaboliser, ni l'attaquer comme s'il s'agissait d'un intrus. Il a donc placé le médicament à l'intérieur de cette nano capsule. Normalement, la plupart des médicaments que nous prenons sont éliminés dans les quelques heures qui suivent la prise. En plus ce sont des petites molécules qui peuvent quitter les vaisseaux sanguins et attaquer des tissus sains, mais ce n'est pas le cas de celui-là. Grâce à la capsule, il peut circuler dans votre corps pendant une semaine s'il le faut, et il ne passe pas dans les tissus. Il attend d'avoir atteint la tumeur – les tumeurs ont des vaisseaux sanguins différents et c'est comme ça qu'il la reconnaît. Lorsque la capsule est ingérée par les cellules de la tumeur, leur acidité provoque son ouverture, et libère le médicament.

Donc Mark est parvenu à réduire de 20 fois la dose de ce médicament, qui avait été retiré du marché à cause de sa toxicité, et l'a donné à une personne atteinte d'un cancer du pancréas qui était déjà métastasé, c'est-à-dire qui se développait dans l'ensemble de son corps. Ce type-là, qui n'avait plus qu'un mois ou deux à vivre, son cancer a reculé, et il est toujours vivant deux ans plus tard. Il n'a même pas perdu de cheveux, il n'a subi aucun problème de toxicologie associé à ce médicament. Donc ça, pour moi, c'est juste une manière ingénieuse utilisant la chimie et la science des matériaux, de fabriquer un dispositif de délivrance de médicament. C'est pas un nano robot, mais bon, quand même ! C'est la réalité, et elle dépasse de loin la fiction.

31 20

COM

Là où la réalité dépasse aussi la fiction, c'est peut-être lorsque les nanotechnologies parviennent à imiter, à encourager ou à contrôler certaines propriétés du vivant. Car c'est à l'échelle nanométrique que se déroulent certains mécanismes indispensables à la vie. Si on les connaît, si on sait les reproduire, ou les améliorer, alors pourquoi ne pas rêver un jour de savoir faire repousser un membre ou un organe, telle la queue d'un lézard. Médecine du futur ou rêve de démiurge.

SYNTHE :

ABANO TERME

COM

Et bien en Italie, près de Venise, je rencontre Alessandra Pavesio. Elle s'intéresse à la repousse de la peau, et des cartilages, une des premières étapes vers une médecine régénérative.

32 21

ALESSANDRA PAVESIO
DIRECTRICE DU SERVICE
RECHERCHE ET DÉVELOPPEMENT
FIDIA ADVANCED BIOPOLYMERS

Notre technologie, c'est de l'ingénierie tissulaire. On prend les cellules d'un patient qui a subi, par exemple, un traumatisme ou qui a un problème de cartilage. On prend donc ces cellules, et on les cultive de façon classique pour les multiplier. Lorsqu'elles sont en nombre suffisant, on les implante sur le matériau que nous avons conçu grâce à notre technologie, et qui va guider leur croissance. Sur cette structure, les cellules se sentent chez elles, et peuvent proliférer en laboratoire dans toutes les directions, comme elles le feraient naturellement.

COM

Alessandra m'emmène sur la chaîne de fabrication de ce matériau. Il est élaboré à partir d'un polysaccharide – une forme de glucide - présent dans l'organisme, et qui permet de tisser des tuteurs sur lesquels vont se reconstruire peau et cartilages. Ces tuteurs agissent comme des leurres.

L'ensemble - tuteur+cellule - est parfaitement biocompatible puisque le matériau est biocompatible, et que les cellules sont issues des patients eux-mêmes.

33 38

ALESSANDRA PAVESIO

C'est bel et bien à l'échelle nanométrique que ça se joue. C'est à cette échelle nano que se passe la communication entre les cellules et le biomatériau.

Mieux comprendre comment s'établit cette communication entre les cellules et notre biomatériau, comment s'échangent l'information à l'échelle nano devrait nous permettre d'intervenir sur cette information, et donc de rendre ce type de matériaux plus intelligent, ce qui va nous permettre de mieux contrôler la croissance des tissus cellulaires.

Les potentialités de cette technologie vont au-delà de la simple reconstruction de tissu cellulaire, elles peuvent nous amener à de véritables thérapies cellulaires.

C'est pour ça qu'une partie essentielle de nos recherches porte sur la connaissance de cette information à l'échelle nano entre les cellules, qu'elle soit de nature chimique ou structurelle. Cette activité est encore balbutiante, il faudra encore plusieurs années avant son application clinique. Mais il s'agit certainement de l'une des applications les plus intéressantes de la nanomédecine.

34 58

COM

Comment intervenir sur le processus de régénération ? Comment le contrôler ?

SYNTHE :

HONG KONG

COM

Direction, la Chine.. Il y a peut-être là-bas un début de réponse. On m'a dit que certaines souris y retrouvent la vue !

La Chine investit énormément dans les nanotechnologies. Le gouvernement, comme celui de nombreux pays émergents, parie sur ces disciplines pour rattraper le fossé technologique vis-à-vis des pays occidentaux.

35 26

L'Université de Hong-Kong mise sur les travaux de Rutledge Ellis-Benhke, Un chercheur qui partage désormais son temps entre le prestigieux département Brain & Cognitive Science du MIT américain et les laboratoires chinois.

IN

« *Hello, Hi... How are you...*

COM

Avant tout chose, Rutledge se doit de me présenter au Professeur Soe, son chef, membre éminent de l'Académie Chinoise des sciences, et grand amoureux de la France.

IN

« *I was in Provence once... »*

36 15

COM

Au-delà des politesses, Rutledge Ellis-Benhke et Kwok-Fai Soe aiment le spectaculaire. Dans leur façon de présenter leur travail en tout cas... La communication qu'ils font sur leurs recherches et leurs résultats est si impressionnante que pour la première fois, je pourrais avoir le sentiment que la nano tient de la magie.

36 49

RUTLEDGE ELLIS-BEHNKE
PROFESSEUR DÉPARTEMENT D'ANATOMIE
UNIVERSITÉ DE HONG KONG

Imaginons un instrument thérapeutique qui ressemblerait à ce verre d'eau. L'eau qu'il contient c'est le produit que l'on va verser ou injecter. Ce produit va aller à un endroit spécifique de votre corps pour réparer un vaisseau sanguin, ou pour créer un environnement qui permettra de réparer le cerveau, le foie ou une jambe. Le même produit appliqué sur le dos d'une personne sévèrement brûlée va permettre aux cellules de revenir, de se reconstituer et à la peau de repousser. Dans toute son épaisseur.

Cela ne s'applique pas seulement à la peau, ça pourrait aussi fonctionner avec les cheveux.

Je travaille sur cette question, mais je n'ai pas encore été suffisamment loin, la prochaine fois qu'on se voit j'aurai plein de cheveux.

L'ENQUÊTEUR

J'ai le même problème.

RUTLEDGE ELLIS-BEHNKE

Vous verrez bien si on a réussi !

COM

On peut toujours rêver... Mais où en est-on en réalité ?

37 44

RUTLEDGE ELLIS-BEHNKE

Avec les molécules de ce produit, nous construisons des structures qui permettent au corps de s'auto-réparer. C'est ce que nous faisons. Cela semble incroyable, mais c'est ce que nous faisons.

IL faut voir les choses de cette façon : nous sommes des organismes auto-assemblés, le corps humain est comme ça : au départ il y a quelques molécules, qui deviennent un ovule, et un spermatozoïde, puis les deux s'assemblent ; nous devenons des cellules, des organes, des cheveux, des yeux, des petites cellules de peau, des grains de beauté, des poumons, et tout le reste... Tout cela s'est assemblé parfaitement à l'échelle nano, c'est à cette échelle que tout commence, avant de passer à l'échelle micro, puis à l'échelle macro, celle qu'on observe à l'œil nu.

38 28

RUTLEDGE ELLIS-BEHNKE

Voilà donc le laboratoire où nous travaillons pour produire des nano matériaux. Vous pouvez en voir ici, dans une concentration très élevée. Quand ils sont moins concentrés, ces nano matériaux ont exactement la même apparence que l'eau et se comportent de la même façon. Une fois injectée dans une zone, ils pénètrent et s'assemblent - comme si on avait une rivière qui s'infiltrait partout, puis qui se mettait à geler brusquement. C'est vraiment la même chose.

Ce sont de très petits composants - 5 nanomètres sur 1,3 nanomètre de hauteur. Et tout cela a commencé parce que une des choses que j'essayais de faire, c'était de réparer les connections d'un cerveau. Pour vérifier si ça marche, on teste la vision de l'animal – c'est simple – connection : il voit, pas de connection : il ne voit pas -. Alors ce qu'on a fait, c'est qu'on a coupé dans le cerveau des connections liées à la vision, puis on a injecté les nanomatériaux.

24h plus tard, en observant le cerveau de l'animal, nous avons constaté un début de cicatrisation, on n'avait jamais vu ça auparavant. La plupart du temps, on voit un grand trou dans le tissu, mais cette fois il y avait un début de cicatrisation. Le problème était ensuite de savoir si des fibres nerveuses allaient repousser à l'intérieur et se connecter.

Nous pensions qu'il faudrait stimuler la croissance, qu'il faudrait trouver des moyens d'accélérer le processus ou de faire en sorte qu'ils se reconnectent mieux. Mais en fait pas du tout : dans la zone que nous avons traité, nous avons découvert que non seulement le cerveau cicatrisait mais que les fibres nerveuses se reconnectaient. En encore mieux, nous avons pu constater le rétablissement de la fonction visuelle : lorsque nous avons montré un aliment à l'animal, il l'a vu et l'a pris.

40 04

COM

Dans le produit utilisé par Rutledge, les nanoparticules ont en fait plusieurs fonctionnalités.

D'abord elles viennent s'agglomérer autour et dans la blessure. Elles commencent par stopper l'hémorragie - et cela marche partout dans le corps y compris par exemple sur le foie -

40 33

Puis les nanoparticules favorisent la repousse en créant une sorte d'échafaudage. Sur cet échafaudage, les cellules viennent migrer et se multiplier, reconstituant au final par exemple la fibre nerveuse sectionnée.

40 57

RUTLEDGE ELLIS-BEHNKE

Nous sommes au Queen Mary Hospital. Je viens également ici pour mes recherches.

COM

Dans un environnement hospitalier, le produit de Rutledge trouve de nombreuses applications.

41 10

RUTLEDGE ELLIS-BEHNKE

Le plus gros problème en neurochirurgie, ce sont tous les petits saignements qu'il faut cautériser. Nos nanomatériaux permettraient non seulement de régénérer le système nerveux central, mais aussi de diminuer de moitié la durée de l'intervention chirurgicale. Il y a aussi plein de nouveaux domaines intéressants, comme une chirurgie qui se ferait à travers ce liquide transparent. On injecterait nos nanomatériaux dans la plaie, de sorte qu'à chaque fois qu'un instrument passerait au travers il serait nettoyé, stérilisé. En cas d'hémorragie, les saignements pourraient être stoppés presque immédiatement par le produit.

Aujourd'hui on fait tout notre possible pour que les salles d'opération soient propres, sans bactéries. Mais en fait ce qu'on veut faire, ça n'est pas éliminer les bactéries, c'est les immobiliser. C'est ce que feraient ces nanomatériaux, en créant une barrière empêchant les bactéries de pénétrer le corps du patient sans pour autant les tuer.

Car il vaut mieux avoir une bonne bactérie qui occupe le terrain, qu'on connaît et qu'on contrôle, plutôt que de laisser le champs libre à des bactéries mangeuses de chair.

Dans ce cas, plus besoin d'être dans un environnement contrôlé, stérile, pour pratiquer des opérations, on pourrait pratiquer une chirurgie « à domicile », chez les médecins, ou au besoin directement sur le terrain.

42 32

COM

Des découvertes comme celles de Rutledge me donne en tout cas envie de croire à une révolution. Celle de la médecine régénérative élargie à tous les organes. Bientôt le nerf optique, pourquoi pas demain la moelle épinière. Les handicaps accidentels ou de naissance pourraient être vaincus par les nano-bio-technologies.

Grâce aux progrès à l'échelle nanométrique dans les domaines de l'électronique ou de la biologie, les prothèses devraient voir leur performance et leur biocompatibilité améliorées.

SYNTHE :
BOSTON

43 03
COM

A l'Université de Harvard, l'université la plus riche du monde, Charles LIEBER travaille dans cette voie, sur des interfaces entre le vivant et l'électronique.

Dans ce labo du Massachusetts, dans le dédale des couloirs et des salles, il y a de quoi se perdre. Heureusement QUAN QUING, l'assistant du professeur LIEBER me guide.

43 33
QUAN QUING

J'ai passé mon diplôme à Pékin, mais je suis originaire de WOOHAN au milieu de la Chine.

IN

- Charles ?

- Oui, Charles... Charles, exactement comme vous...

43 43
CHARLES LIEBER
PROFESSEUR EN BIOCHIMIE
UNIVERSITÉ DE HARVARD

Okay... Alors... L'un des domaines qui m'intéresse le plus aujourd'hui et pour le futur, c'est d'essayer de créer des interfaces entre la nanoélectronique et les systèmes biologiques. Ça fait des années qu'on fait des recherches là-dessus, depuis ceux qui ont placé des grosses électrodes sur le cerveau humain, jusqu'à des micros dispositifs plus sophistiqués... Mais c'est toujours beaucoup plus volumineux que ce que la biologie parvient à créer naturellement.

Les interconnexions à l'intérieur de notre cerveau se font par le biais de synapses, au travers de canaux dans la membrane cellulaire, ou grâce à des molécules qui forment de véritables structures à l'échelle nano.

Notre objectif est donc de fabriquer ces structures, ou des synapses similaires, avec des composants artificiels, et de les connecter de la même façon, de manière à pouvoir recevoir ou émettre des signaux comme le fait naturellement le cerveau.

44 52

QUAN QUING

- *Vous voyez cette partie grise, là, sur la grille ?*
- *Oui.*
- *C'est une tranche de cerveau, qui vient d'un rat.*

Pour faire simple, le coeur du dispositif est très petit, la seule chose qu'on peut voir, c'est les motifs du circuit, là dans la zone centrale, mais on ne peut pas vraiment voir le fonctionnement. La tranche de cerveau est toujours déposée au centre de ce dispositif. . En ce moment, on travaille à relier cette tranche de cerveau au système de mesure électronique.

45 23

QUAN QUING

Là on voit le bord du morceau de cerveau. Les parties sombres, ce sont les fibres corticales qui sont en fait l'autoroute du cerveau. En gros, toutes sortes d'information circulent ici et différents groupes de cellules communiquent avec cette fibre.

COM

Pour pouvoir communiquer avec le cerveau... Charles Lieber cherche à se connecter à cette fibre. S'y brancher, pour recevoir et envoyer des informations.

45 49

CHARLES LIEBER

Les bénéfiques à court terme seront de pouvoir créer des outils beaucoup plus puissants pour mieux comprendre certains problèmes en biologie et en médecine. Mais au-delà de ça, l'objectif qui m'intéresse c'est de construire des interfaces pour les systèmes de prothèses afin qu'elles soient beaucoup plus sophistiquées, pour les maladies de la moelle épinière ou les maladies neurologiques, de façon à améliorer l'humain... Heu... améliorer les conditions de vie des malades. C'est notre espoir.

46 27

COM

Améliorer l'humain... Le lapsus de Charles Lieber est révélateur. Au-delà des soins, de la médecine, certains imaginent déjà avec les nanotechnologies d'augmenter dans le futur les performances de l'homme. Ils rêvent d'un homme aux capacités physiques et mentales améliorées.

Une créature entre Steve Austin et Terminator dont le squelette ou l'architecture musculaire seraient renforcés,. Un être dont les connections neuronales seraient dopées voire interfacées avec des nano-ordinateurs, qui le doteraient de réflexes plus rapides, d'une connaissance encyclopédique ; ou qui, cauchemar absolu l'asservirait.

Un homme - bien loin de moi - qui vaudrait des milliards...

46 00

CHARLES LIEBER

Regardez, ce qu'on est déjà capables de faire aujourd'hui avec les animaux en laboratoire, on greffe directement sur leur cerveau des électrodes, par exemple, pour contrôler leurs fonctions motrices.

Il y a quelques années, le DARPA, une agence du ministère de la défense, avait créé de cette façon le « Robot Rat »...

Avec un dispositif tout simple, un radio processeur et quelques électrodes, ils ont été capables de télécommander les mouvements de ce rat. Donc, par analogie, on peut déjà imaginer de contrôler un être humain si on lui implante des électrodes.

Ça pose comme toujours la question de savoir comment mettre en place les bons garde-fous, pour que ces technologies ne soient pas mal utilisées, qu'on ne se mette pas à implanter des électrodes ou des trucs –imaginez !- à la naissance sur une partie de la population pour la contrôler, imaginez !... Ça pourrait faire un bon bouquin de science fiction.

48 13

COM

Est-ce bien de la science-fiction ? Cette idée d'un homme robotisé, amélioré ou sous contrôle, troquant son humanité au profit de capacités technologiques, continue à me faire peur.

48 34

RUTLEDGE ELLIS-BEHNKE
PROFESSEUR DÉPARTEMENT D'ANATOMIE
UNIVERSITÉ DE HONG KONG

On n'essaye pas d'améliorer, ce qu'on essaye de faire, c'est juste de réparer. Maintenant, est-ce que dans 25 ou 30 ans on essayera d'améliorer les performances de l'homme ? Probablement, mais attendez, c'est ce qu'on fait déjà avec la chirurgie esthétique aujourd'hui. Au départ, cette chirurgie a été développée pour aider les gens souffrant de difformités ou les victimes d'accident, juste pour qu'ils aient l'air « normaux ».
Et bon... L'étape suivante, c'est forcément : « qu'est ce que je peux faire pour être plus beau ? ».

49 11

JAMES HEATH
CHIMISTE
CALTEC

Ça a tout le temps été comme ça, on a toujours profité des nouvelles technologies pour améliorer les performances humaines. Avec les nanotechnologies, c'est la même chose.
Mais ce qu'on essaye de faire, ou ce qu'on parvient à faire aujourd'hui, c'est pas grand' chose, c'est à peine plus évolué qu'une montre, un peu plus sophistiqué qu'un capteur qui mesure le taux de glucose dans une pompe à insuline... Vous savez, on est encore très loin de pouvoir donner à quelqu'un la possibilité de soulever une tonne avec seulement un bras, et en plus le gauche...

49 49

MAURO FERRARI
DIRECTEUR DÉPARTEMENT NANO MEDECINE
UNIVERSITÉ DU TEXAS

Je suis très optimiste pour l'avenir, surtout pour tout ce qui touche aux défis technologiques de la science.
En revanche, je suis très inquiet concernant l'accès de tous aux progrès scientifiques car, bien entendu, l'écart entre les riches et les pauvres dans le monde s'est creusé au lieu de s'être réduit au fil des ans.
Je crois qu'il faudra d'énormes efforts au niveau de la communauté internationale toute entière et des chefs d'état pour veiller à un accès universel.
Je pense que c'est à ce niveau-là que doivent intervenir les gens, et la société, faire que les chefs d'état agissent dans le bon sens, en les y obligeant s'il le faut.
C'est ce qui me préoccupe le plus.

50 41

COM

Les questions éthiques liées aux nanotechnologies ne se limitent donc pas à des délirantes histoires de post-humains, aux capacités dignes de films de science-fiction.

Accès universel à de nouveaux traitements, à une technologie de pointe, mise au point d'armes nouvelles, émergence de nouveaux risques toxicologiques...

Les enjeux sont multiples : sociétaux, économiques, environnementaux, philosophiques...

Je constate qu'en même temps que progressent les nanotechnologies se développent de légitimes inquiétudes.

Partout je vois les crispations se multiplier...

Partout j'ai le sentiment que le mot nano provoque moins d'enthousiasme, plus d'embarras, voire de peur...

Partout des débats s'organisent.

A temps ? Trop Tard ?

Il est temps pour moi de poursuivre cette exploration..

TC OUT 51 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
GRÉGORY 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 HANSSSENS,
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 PEPONNET

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 / DEUTSTCHES MUSEUM MUNICH
EVA TIETZ
LADY MARGARET KROTO

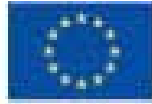
CHRISTOPHER RADIC
GUY FORESTIER
GUNTER OBERDORSTER
DANIELA DINI
SANTA CROCE / PALAZZO PITTI
PHILIPPE LEMOINE
MINOO DASTOOR
ROLAND HERINO
DANIEL OCHOA
ILARION PAVEL
ISABELLE MURMURE
JEAN-ERIC WEGROVE
MARJORIE THOMAS
PAOLA, KIM, CHIARA, ILARIA, FEDERICA AND GIACOMO FERRARI
MASAYO ENDO / SONY CORP.
KONARKA
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