

**"Les grands mythes fondateurs" des nanos :  
la loi de Moore ou l'héritage du talk de Feynman de 1959**

## Table des matières

1	La fabrication d'une histoire héroïque des nanotechnologies.....	4
2	Un intérêt accordé à ce discours essentiellement rétrospectif .....	6
3	Les années 2000 : Le développement des nanotechnologies placé sous le patronage du physicien .....	9
4	La loi de Moore : un instrument participant à modeler les évolutions de l'industrie électronique .....	11
	Qu'est-ce que la loi de Moore ? .....	12
1	1 <sup>ère</sup> version de la loi de Moore : 1965 – Prédications sur l'avenir de la filière des semi-conducteurs à l'horizon de 10 ans .....	12
2	2 <sup>ème</sup> version de la loi de Moore : 1975 – Nouvelles prédictions, prolongation de la courbe.....	14
3	Un énoncé performatif .....	16
5	Comment la loi de Moore et sa traduction dans des feuilles de routes a contribué à orienter la trajectoire l'industrie de l'électronique .....	17
1	Mobilisation américaine en réaction à la montée en puissance de l'industrie de la micro-électronique Japonaise .....	17
2	1992 - Première feuille de route de l'Association de l'Industrie des Semi-conducteurs (SIA) pour coordonner le développement de l'industrie des semi-conducteurs américaine .....	19
3	Des feuilles de routes internationales pour l'industrie microélectronique .....	20
6	Loi de Moore, feuilles de route et nanotechnologies .....	21

### Objectifs

Ce module vise la réflexion critique sur la manière dont un champ multidisciplinaire comme les nanos se fédère, et sur la façon dont une politique de recherche se construit.

## Introduction

Depuis les années 2000 et le lancement de la National Nanotechnology Initiative, les investissements dans les nanotechnologies affluent.

Qu'est-ce que les nanotechnologies ? Comme nous l'avons vu au module 1, plusieurs définitions soulignent que les nanotechnologies rassemblent des recherches hétéroclites partageant un intérêt commun pour l'étude, la manipulation, ou la fabrication d'objets de taille nanométrique ou bien d'objets structurés à cette échelle.

L'accent est aussi mis sur les propriétés : la raison d'être des nanotechnologies serait de tirer partie des propriétés nouvelles des objets aux toutes petites échelles.

Le domaine est pourtant multiforme et l'on peut s'interroger : qu'est-ce qui par exemple lie ensemble des recherches sur l'électronique moléculaire et des travaux sur des "nanomachines" à ADN utilisées pour cartographier le pH dans différents organelles d'une cellule ? Toutes deux se réclament pourtant des nanotechnologies puisqu'elles ont données lieu à des publications dans un numéro de juin 2013 de la revue *Nature Nanotechnology*.

Le critère de taille, l'idée d'émergence de nouvelles propriétés sont-ils des éléments suffisants ?

Pour définir les nanotechnologies, certains ne se contentent pas de mettre l'accent sur l'échelle d'action sur la matière et sur les nouvelles propriétés. Ils vont au delà en s'interrogeant sur ce qui fédère ce champ scientifique et technologique protéiforme. Le sociologue Brice Laurent<sup>1</sup> propose ainsi de considérer les nanotechnologies comme une politique scientifique globale. Parmi les arguments qui lui servent à étayer cette proposition, ce sociologue souligne l'existence d'un "grand récit" de l'histoire des nanotechnologies. Il souligne aussi comment le futur est anticipé et opérationnalisé au travers de discours visionnaires, mais aussi de feuilles de routes, instruments politiques qui contribuent à définir ce que sont les nanotechnologies.

Ce sont ces deux aspects que nous voulons discuter dans ce cours.

Nous allons y illustrer comment certains grands "mythes fondateurs" des nanotechnologies participent à fédérer un champ multidisciplinaire et comment le futur est mobilisé comme ressource dans la construction d'une politique de recherche scientifique et d'innovation.

Nous articulerons notre propos autour de deux exemples :

- Le discours de Feynman, prononcé le 29 décembre 1959, à l'université de Caltech, cité à tort et à travers comme LE premier discours traitant des potentialités des nanotechnologies.
- Et la loi de Moore, "loi" empirique chiffrant l'augmentation de la complexité des circuits intégrés puis des processeurs au fil des années, qui en fixant des objectifs de compétitivité à tout un secteur industriel a largement contribué à modeler l'avenir de la microélectronique et a pesé dans des choix d'investissements dans la nanoélectronique au début des années 2000.

---

<sup>1</sup>Laurent, B. (2010). Les politiques des nanotechnologies, Paris : Éditions Charles Léopold Mayer.

## 1 La fabrication d'une histoire héroïque des nanotechnologies

Dans de multiples discours de présentation des nanotechnologies, qu'ils soient prononcés par des politiques, par des chercheurs, ou relayés par diverses institutions (comme par exemple le CEA, ou le CNRS dans son dossier pédagogique "sagascience"<sup>2</sup>), une sorte de "grand récit" de l'avènement des nanotechnologies est souvent présenté. Et ce grand récit commence généralement par une référence à Feynman.

Prenons un exemple : celui de l'encyclopédie Wikipédia qui dans sa version anglaise, propose un article intitulé "History of nanotechnology"<sup>3</sup>. En juin 2013, cet article est articulé en 5 parties :

- les origines conceptuelles des nanotechnologies
- les avancées expérimentales
- le soutien des gouvernements
- la prise de conscience publique grandissante et la controverse
- les applications commerciales initiales.

La première partie sur les "origines conceptuelles" des nanotechnologies revient sur trois figures généralement mentionnées lorsqu'il s'agit de retracer une histoire des nanotechnologies et la première d'entre elle, est celle du physicien Richard Feynman.

Pourquoi Feynman ?

Parce qu'en décembre 1959, au *California Institute of Technology* (Caltech) aux États-Unis, lors du congrès de l'*American Physical Society*, le physicien, auteur des célèbres cours qui ont contribué à former des générations d'étudiants, prix Nobel pour ses travaux sur l'électrodynamique quantique, a prononcé un discours.

Un discours aujourd'hui célèbre intitulé "*There's plenty of room at the bottom*".

Un discours présenté comme un discours visionnaire.

Un discours présenté comme LE premier discours où quelqu'un aurait entre-aperçu les potentialités innombrables de la miniaturisation et de la manipulation rationnalisée de la matière atome par atome.

Ceci dit, l'encyclopédie collaborative wikipédia rapporte aussi que certains érudits (*scholars*) s'intéressant à l'histoire des sciences et des technologies ont relativisé l'influence réelle de ce discours sur le développement des recherches relevant ce que l'on nomme aujourd'hui les nanotechnologies.

Dans ce qui suit, nous allons justement questionner cette influence et nous allons nous poser les questions suivantes :

- Le discours de Feynman a-t-il vraiment joué un rôle de catalyseur dans le développement des nanotechnologies ?
- Pourquoi et comment les propos de Feynman sont-ils mobilisés dans la construction des programmes de développements des nanotechnologies ?

---

<sup>2</sup><http://www.cea.fr/technologies/nanotechnologies-et-nanosciences/nanosciences-et-nanotechnologies-quelques-reper> – Consulté le 7 juin 2013

<http://www.cnrs.fr/cw/dossiers/dosnano/decouv/hist/hist.htm> – Consulté le 7 juin 2013

<sup>3</sup>[http://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_nanotechnology#cite\\_note-30](http://en.wikipedia.org/wiki/History_of_nanotechnology#cite_note-30) – Consulté le 7 juin 2013

## **Richard P. Feynman**

Né le 11 mai 1918 à New York.  
Décédé le 15 février 1988 à Los Angeles.

Il fait ses études au MIT puis effectue sa thèse à Princeton sur le principe de moindre action appliqué à la mécanique quantique.

En 1942, alors qu'il n'a pas encore soutenu sa thèse, il rejoint le projet Manhattan qui débouchera quelques années plus tard sur la mise au point de la première bombe atomique.

Après la seconde guerre mondiale, il est nommé professeur à l'université de Cornell dans l'état de New York mais n'y reste pas. Il accepte un poste en Californie, à Caltech, notamment à cause de la douceur du climat.

C'est à Caltech qu'il développera ses travaux sur l'électrodynamique quantique qui lui vaudront en 1965 le prix Nobel de physique, partagé avec Tomonaga et Schwinger. C'est aussi à Caltech qu'il mènera des recherches sur la superfluidité de l'hélium ou encore qu'il développera les diagrammes de Feynman dans le cadre de ses travaux de physique des particules.

C'est enfin à Caltech, qu'il donne la série de cours magistraux qui seront reproduits en livre et deviendront *the Feynman Lectures on Physics*.

Sources :

[http://en.wikipedia.org/wiki/Richard\\_Feynman](http://en.wikipedia.org/wiki/Richard_Feynman) – Consulté le 29 juin 2013

Pour ceux qui souhaiteraient en savoir plus, une biographie de Feynman en bande dessinée a aussi été publiée en 2012 par Ottaviani et Myrick.



*Feynman*

*Illustration 1: Richard*

Year	Publication
1960a	There's Plenty of Room at the Bottom. <i>Engineering and Science</i> , Feb. 1960, pp. 22-36.
1960b	The Wonders That Await a Micro-Microscope. <i>Saturday Review</i> , 2 April 1960, pp. 45-47.
1960c	How to Build an Automobile Smaller Than This Dot. <i>Popular Science</i> , Nov. 1960, pp. 114 ff.
1960d	There's Plenty of Room at the Bottom. <i>California Institute of Technology Quarterly</i> , Fall 1960, 2(1):2-10.
1961	There's Plenty of Room at the Bottom. In <i>Miniaturization</i> , ed. by H.D. Gilbert (NY: Reinhold 1961), pp. 282-296.
1962	There Is Plenty of Room at the Bottom. <i>Technion Yearbook</i> , 19:29-33, 137-141.
1983	Infinitesimal Machinery (videotape of 23 February 1983). Pasadena CA: Caltech Archives.
1984	Tiny Machines (videotape of 25 October 1984). Mill Valley CA: Sound Photosynthesis.
1986b	The ORIGINAL NanoTechnology Paper (sic; reprint of "There's Plenty of Room at the Bottom"). In <i>NanoTechnology with Feynman Machines</i> , by Conrad W. Schneiker, unpublished book manuscript of 215 pages, pp. 133-149.
1991	There's Plenty of Room at the Bottom. <i>Science</i> , 29 November 1991, 254:1300-01.
1992a	There's Plenty of Room at the Bottom. <i>J. of Microelectromechanical Systems</i> , 1(1):60-66.
1992b	There's Plenty of Room at the Bottom. In <i>Nanotechnology: Research and Perspectives</i> , ed. by B.C. Crandall & J. Lewis (Cambridge, MA: MIT Press, 1992), pp. 347-363.
1993	Infinitesimal Machinery. <i>J. of Microelectromechanical Systems</i> , 2(1):4-14.
1999a	There's Plenty of Room at the Bottom. In <i>The Pleasure of Finding Things Out: The Best Short Works of Richard Feynman</i> , ed. by J. Robbins. Cambridge MA: Perseus, pp. 117-139.
1999b	There's Plenty of Room at the Bottom. In <i>Feynman and Computation</i> , ed. by Anthony J.G. Hey (Cambridge MA: Perseus, 1999), pp. 63-76.
2006	Infinitesimal Machinery. In <i>Nanotechnology: Science, Innovation, and Opportunity</i> , ed. by L.E. Foster (Upper saddle River NJ: Prentice Hall, 2006), pp. 247-268.

Illustration 2: Différentes publications du discours de Feynman "There's plenty of room at the bottom" et du discours "Infinitesimal machinery" que le physicien prononce en 1983 et où il revisite "There's plenty of room at the bottom".

Figure provenant de l'article de Toumey, C. (2006). Reading Feynman Into Nanotechnology: A Text for a New Science. *Techné*, 12:3, p.133-168.

## 2 Un intérêt accordé à ce discours essentiellement rétrospectif

Si le discours de Feynman est aujourd'hui souvent mobilisé lorsqu'il s'agit de présenter un bref historique des nanotechnologies, entre 1960 et 1983, les références au contenu de cette allocution ont été en revanche extrêmement rares. Par exemple, lorsqu'en 1974 Norio Taniguchi, professeur à l'université de Tokyo travaillant sur les semi-conducteurs et crédité de la paternité du terme "Nano-technology", emploie pour la première fois ce néologisme pour désigner les procédés de microfabrication permettant d'agir de manière contrôlée avec une résolution de l'ordre du nanomètre, il ne fait aucune allusion au discours de Feynman. De plus, si "There's plenty of room at the bottom" été publié à plusieurs reprises au cours des trois ans qui ont suivi l'intervention à Caltech (voir illustration 2), l'anthropologue Chris Toumey qui s'est intéressé aux reprises du discours de Feynman ne dénombre que 7 citations de ce discours dans les publications scientifiques parues dans les 20 ans qui ont suivi l'intervention de Feynman<sup>4</sup>.

<sup>4</sup>Toumey, C. (2009). Plenty of room, plenty of history. *Nature Nanotechnology*,

Toumey note pourtant que cette période a vu l'apparition d'outils tels que le microscope à effet tunnel, le microscope à force atomique, instrumentations qui ont joué un rôle important dans l'avènement des nanotechnologies et pour lui, leur mise au point n'a pas été influencée par Feynman.

Toumey relève par ailleurs que parmi les citations du discours de Feynman dans des revues scientifiques seule l'une d'entre elle mobilise ce texte en l'appréhendant globalement, comme une vision d'un champ à explorer : les nanotechnologies. Les autres articles n'y faisaient allusion qu'en référence à des commentaires du prix Nobel sur l'amélioration des microscopes électroniques ou sur ses prédictions relatives à la miniaturisation des ordinateurs.

Pour Toumey, l'intérêt prêté au discours de Feynman en tant que discours visionnaire est ainsi essentiellement rétrospectif. Ce n'est d'ailleurs qu'à partir de 1992, après la mise au point du microscope à effet tunnel, après la mise au point du microscope à force atomique, après la manipulation des atomes par les ingénieurs d'IBM avec un STM, après que *Science* ait fait paraître un numéro spécial sur les nanotechnologies, que le nombre de citations du discours de Feynman dans des publications scientifiques dépasse la centaine.

À partir des années 1985-1986, l'intérêt porté au discours de Feynman va en effet grandir.

En 1985, deux étudiants de Stanford Tom Newman et R. Fabian Pease réclament l'un des prix promis par Feynman dans son discours.

Ensuite lorsqu'en 1985, Binnig et Rohrer se voient décerner le prix Nobel pour la mise au point du microscope à effet tunnel, ils citent brièvement l'intervention de Feynman dans leur discours prononcé lors de la réception de leur récompense<sup>5</sup>. Même si, dans des entretiens accordés à l'anthropologue Toumey, ces deux scientifiques, ainsi que d'autres sommités des nanotechnologies (Eigler, Whitesides...) estiment que leur travail n'a pas été directement inspiré par le discours de Feynman, les microscopes à effet tunnel ouvrent, selon leurs inventeurs, des perspectives de manipulation de la matière et pourraient constituer des "tiny machines" auxquelles faisaient référence Feynman.

Les citations du discours de 1959 commencent ainsi à se multiplier. Le terme nanotechnologies devient par ailleurs de plus en plus utilisé.

C'est à cette époque, en 1986, qu'Eric Drexler, alors étudiant au MIT publie son livre *"Engines of creation. The coming era of nanotechnology"*.

Cet ouvrage est souvent présenté comme le livre qui a popularisé le terme de "nanotechnologie". Sur des accents prophétiques, Drexler y propose de s'inspirer de la biologie pour fabriquer des assembleurs moléculaires. Plus précisément, il propose de s'inspirer des machines moléculaires qui existent dans nos cellules<sup>6</sup> pour créer des assembleurs beaucoup plus efficaces que ceux qu'a produits l'évolution de la vie. Sa vision est ainsi une vision d'ingénieur. Pour lui, l'ère des nanotechnologies va reposer sur l'optimisation ces machines moléculaires.

---

<sup>5</sup>Ce discours est disponible en ligne à l'adresse (consultée le 14/06/2013):

<http://www.dcsc.tudelft.nl/~jrvanhulzen/thesis/plan/spm%20design/binning%20overview%20of%20stm.pdf>

<sup>6</sup>Pour ceux qui seraient intéressés par une vue d'artiste de certaines de ces machines moléculaires, des animations ont été réalisées par des gens de Harvard dont cette vidéo "Inner life of cell" :

<http://multimedia.mcb.harvard.edu/>

[http://fr.wikipedia.org/wiki/The\\_Inner\\_Life\\_of\\_the\\_Cell](http://fr.wikipedia.org/wiki/The_Inner_Life_of_the_Cell)

Pages consultées le 11/06/2013

Même si dans *"The Engines of Creation"* Drexler ne cite *"There's plenty of room at the bottom"* qu'à quelques endroits de son ouvrage, l'idée au cœur de ce livre prolonge l'idée développée par Feynman d'agencer la matière de façon contrôlée. Drexler a d'ailleurs eu connaissance du discours de Feynman en 1979 et dans d'autres de ses articles, il revendique l'héritage de l'illustre physicien<sup>7</sup>.

Le livre de Drexler ne s'arrête cependant pas à la discussion sur la faisabilité des assembleurs moléculaires. Il détaille aussi les réalisations que ces machines miniatures permettront. Il imagine un futur, celui de l'ère de la nanotechnologie, anticipant les multiples applications, les retombées sur nos sociétés mais aussi les possibles pertes de contrôle. De plus, pour donner corps à ce futur, Drexler fonde également un think-tank l'année de la parution de son ouvrage : le *foresight institute*. Cette organisation travaille à promouvoir le développement mais aussi à "éviter les dangers"<sup>8</sup> des nanotechnologies, de l'intelligence artificielle, des biotechnologies...

Les visions futuristes de Drexler ont par ailleurs eu un certain impact.

Une conférence du Foresight Institute organisée en 1998 sur l'ingénierie moléculaire obtient le soutien de la National Science Foundation américaine. Quelques années auparavant, en juin 1992, Drexler était aussi intervenu au congrès américain. En lien avec cette intervention, le sénateur Al Gore avait fait alors référence à *"Plenty of Room at the Bottom"* en soulignant les directions pointées par Feynman dans son discours prononcé devant l'American Physical Society.

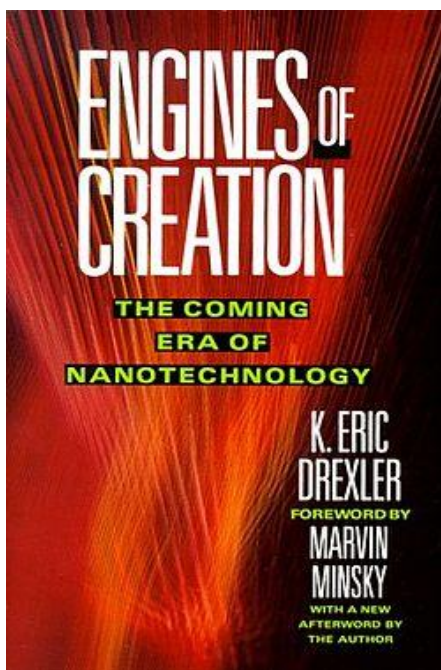


Illustration 3: Couverture du livre d'Éric Drexler, *les engins de création* (1986)

---

<sup>7</sup>Drexler, E. (2004). Nanotechnology: From Feynman to Fundings. *Bulletin of Science Technology and Society*, 24: 1, p 21-27.

<sup>8</sup>Pour reprendre l'expression utilisée sur le site du Foresight Institute <http://www.foresight.org/FI/> consulté le 11/06/2013

Ces visions futuristes et les scénarios catastrophistes anticipés par Drexler comme celui de la gelée grise (Grey Goo) où l'Homme perdrait le contrôle d'assembleurs s'auto-répliquant sont toutefois aussi regardés avec circonspection voire réticence par certains. Parmi eux, des scientifiques présentées par Toumey comme des éminences des nanotechnologies tel Stan Williams, d'HP labs, ou James Tour, professeur à la tête de l'équipe ayant produit le "NanoCar" de l'Université de Rice ou encore Don Eigler d'IBM<sup>9</sup>. Le sociologue Laurent rapporte aussi qu'au début des années 2000, les visions de Drexler centrées sur les assembleurs moléculaires n'étaient pas du goût de certains industriels de la Nano Business Alliance, créée en 2001 pour défendre les intérêts de l'industrie des nanotechnologies et des microsystèmes auprès de l'administration fédérale. Ces détracteurs des visions drexleriennes estimaient qu'elles étaient trop déconnectées de ce qui intéresserait les marchés mais également qu'elles risquaient d'effrayer les consommateurs. Ainsi, si Drexler revendique l'héritage de Feynman, cette figure des nanotechnologies est plus controversée que celle du physicien.

### **3 Les années 2000 : Le développement des nanotechnologies placé sous le patronage du physicien**

Si la figure de Drexler est beaucoup moins consensuelle que celle de Feynman, l'acception restreinte des nanotechnologies centrée sur l'ingénierie moléculaire mise en avant par l'ingénieur du MIT ne fait pas non plus l'unanimité. Bien que Drexler et le *Foresight Institute* aient reçu un certain appui de la National Science Foundation en 1998 puisque cette agence apporte son soutien à l'une des conférences organisées par le think tank, dans les programmes nanotechnologiques qui ne vont pas tarder à être financés, des recherches ne s'apparentant pas à des travaux centrés sur l'ingénierie moléculaire vont être aussi estampillés "nano". Le sociologue Laurent indique ainsi qu'en 1999 les auteurs du rapport produit par l'*Interagency Working Group on Nanotechnology*, sorte de prélude au lancement de la National Nanotechnology Initiative, ne restreignent pas les nanotechnologies à la fabrication de machines moléculaires. Elles englobent la construction et l'utilisation de structures fonctionnelles dont au moins une des dimensions caractéristiques est de taille nanométrique. De cette manière, cette définition des nanotechnologies intègre les travaux de miniaturisation en électronique ou des travaux de chimie.

Néanmoins, bien que ce que recouvre le terme de nanotechnologies et la délimitation du programme de recherche qui leur est associé fasse l'objet de dissensus, la référence au discours de Feynman reste fédératrice. On peut ainsi lire dans le résumé technique du rapport de l'*Interagency Working Group on Nanotechnology*:

*"En 1959, le physicien lauréat du prix Nobel Richard Feynman prononçait son discours aujourd'hui célèbre : "There is Plenty of Room at the Bottom." Il stimulait son auditoire par la vision exaltante des découvertes nouvelles permises à la condition de pouvoir fabriquer des matériaux et des dispositifs à l'échelle atomique/moléculaire. Il pointait le besoin, pour que cela advienne, d'une nouvelle classe d'instrumentation miniaturisée pour manipuler et mesurer les propriétés de ces petites —"nano"—structures. Il a fallu attendre les années 1980 pour que soient inventées les instruments dotés des*

---

<sup>9</sup>Pour aller plus loin sur l'influence de Drexler voir Toumey, C. (2006). Reading Feynman Into Nanotechnology: A Text for a New Science. *Techné*, 12:3, p.133-168.

capacités que Feynman envisageait."<sup>10</sup>

Un peu plus tard, au début de l'année 2000, lorsqu'en visite à Caltech, le président américain Bill Clinton prononce son discours où il présente son budget pour les sciences et les technologies devant un parterre d'étudiants et de chercheurs, il fait lui aussi référence à la figure de Feynman. Il s'exprime ainsi :

*Mon budget soutient une nouvelle et majeure initiative nationale pour les nanotechnologies (National Nanotechnology Initiative) à hauteur de 500 millions de dollars. L'université Caltech n'est pas étrangère à l'idée de la nanotechnologie – la capacité à manipuler la matière à l'échelle atomique et moléculaire – . Il y a un peu plus de 40 ans, Richard Feynman, professeur à Caltech demandait, "Que se passerait-il si nous pouvions arranger les atomes un par un, de la façon dont nous avons envie ?"*

*Imaginez les possibilités : des matériaux possédant 10 fois la solidité de l'acier et pesant seulement une petite fraction de son poids, réduire toute l'information contenue dans la bibliothèque du Congrès en un dispositif de la taille d'un morceau de sucre, détecter des tumeurs cancéreuses quand elles ne sont encore composées que par quelques cellules. Certains de nos objectifs de recherche peuvent n'être atteints que dans 20 années ou plus, mais c'est précisément la raison pour laquelle le gouvernement fédéral a un rôle important à jouer<sup>11</sup>.*

Le lancement de la National Nanotechnology Initiative (NNI) par Clinton est ainsi placé sous le patronage de Feynman. Là encore, ce programme politique est plus large que le programme de développement d'assembleurs moléculaires promu par Drexler. Le champ couvert par la NNI est élargi aux recherches qui visent l'élaboration de nouveaux matériaux, des travaux en électronique et ce, sous l'influence des industriels qui s'intéressent aux nanotechnologies et à leurs applications.

Finalement, dans les années 2000, au moment où les investissements des gouvernements dans les nanotechnologies se mettent à exploser, le nombre des citations du discours de Feynman explosent aussi (voir figure 4), statufiant la figure tutélaire et fédératrice de Feynman dans le rôle du visionnaire qui avait prédit avant tout le monde l'avènement des nanotechnologies.

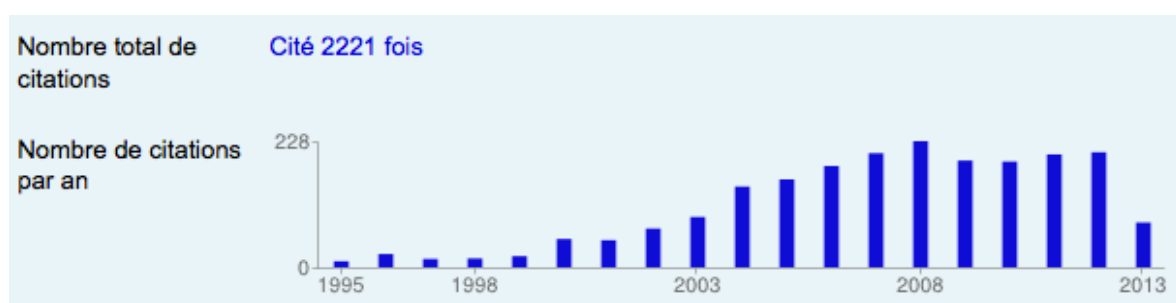


Illustration 4: Évolution du nombre de citations du discours de Feynman (source : Google Scholar ; Consulté le 7 juin 2013)

<sup>10</sup> Nanotechnology Research Directions: Vision for Nanotechnology in the Next Decade  
IWGN Workshop Report, U.S. National Science and Technology Council, 1999, Washington D.C.. p vii. -  
Notre traduction.

<sup>11</sup> Source : <http://www.aip.org/fyi/2000/fyi00.008.htm> – Consulté le 07 juin 2013 ; Notre traduction

Un grand récit du développement des nanotechnologies tend ainsi à se construire. Cette façon de raconter l'histoire qui insiste sur l'idée que Feynman avait prévu que les nanotechnologies allaient être développées, donne l'impression que ces développements étaient inéluctables. Elle inscrit de plus les programmes nanotechnologiques dans une histoire prestigieuse qui commence par le discours d'un prix Nobel et sera marquée ensuite par d'autres avancées couronnées elles aussi par d'autres prix Nobel : Binnig et Rohrer en 1985 pour le microscope à effet tunnel, Smalley, Kroto et Curl en 1996 pour les fullérènes.

Finale­ment, que faut-il retenir ?

- Qu'en 1959, Feynman a prononcé un discours à Caltech devant l'American Physical Society, pointant :
  - certaines possibilités que pourraient ouvrir l'observation et la manipulation contrôlée de la matière aux petites échelles,
  - mais aussi les défis technologiques à relever pour y arriver.
- Qu'à cette époque, ce discours semble être resté assez confidentiel même s'il a été publié dans plusieurs revues.
- Que de nombreuses avancées majeures en matière d'instrumentation qui ont permis d'accéder à l'observation et à la manipulation de la matière à l'échelle nanométrique ont eu lieu sans qu'elles n'aient été inspirées par le discours de Feynman de 1959.
- Que rétrospectivement, à partir du milieu des années 80, ce discours a été souvent présenté comme le discours visionnaire qui a inspiré le développement des nanotechnologies. C'est le cas dans les discours de politiques comme celui de Clinton en 2000 lorsqu'il a annoncé le lancement de la NNI, mais aussi dans tout un ensemble de documents présentant globalement les nanotechnologies...
- Que la construction d'un grand récit de l'histoire des nanotechnologies qui commencerait par le discours visionnaire de Feynman contribue à présenter les politiques de développement des nanotechnologies comme allant de soi et à les doter d'une certaine aura puisque le "père" des nanotechnologies ne serait rien moins qu'un prix Nobel.

Sur les photos qui immortalisent Clinton prononçant son discours à Caltech au cours du mois de janvier 2000 pour lancer la NNI, on voit deux hommes assis sur l'estrade, derrière la tribune où s'exprime le président. L'un d'entre eux est Gordon Moore. Celui de la loi de Moore sur laquelle nous allons maintenant porter notre attention.

#### ***4 La loi de Moore : un instrument participant à modeler les évolutions de l'industrie électronique***

Le discours de Feynman n'est pas le seul élément discursif mis en avant lorsqu'il s'agit de présenter les nanotechnologies. Au moment d'en proposer un bref aperçu et d'inscrire leur développement dans l'histoire des sciences et des technologies, il arrive fréquemment que soit fait référence à la loi de Moore<sup>12</sup>.

---

<sup>12</sup>Voir par exemple la chronologie proposée sur le site de la NNI à l'adresse <http://www.nano.gov/timeline> (Consulté le 18 juin 2013)

## Qu'est-ce que la loi de Moore ?

La loi de Moore est une loi empirique décrivant et prédisant l'évolution au cours du temps de la densité d'intégration des composants sur un circuit (qui est directement reliée à la taille de ces composants).

À dire vrai, on ne devrait pas parler de LA loi de Moore mais des lois de Moore. Son énoncé n'est en effet pas figé et a évolué suivant les décennies.

### 1 1<sup>ère</sup> version de la loi de Moore : 1965 – Prédications sur l'avenir de la filière des semi-conducteurs à l'horizon de 10 ans

En 1965, Gordon E. Moore, alors directeur des laboratoires de recherche et développement au sein de l'entreprise *Fairchild Semiconductor* publie un article pour le numéro spécial du 35<sup>ème</sup> anniversaire du magazine "Electronics"<sup>13</sup>. Cet article s'intitule "*Cramming more components onto integrated circuits*" c'est-à-dire : "Entasser plus de composants sur des circuits intégrés". Moore le rédige pour répondre à une demande : celle de s'aventurer à formuler des prédictions sur l'avenir de l'industrie des semi-conducteurs.

#### Gordon Earle Moore

Né le 3 janvier 1929 à San Fransisco (USA).

Docteur en chimie et physique de l'université de Caltech (USA).

Après ses études post-doctorales achevées en 1956, il rejoint Shockley (inventeur du transistor) et travaille pour le *Shockley Semiconductor Laboratory*. En 1957, il quitte son poste avec 7 autres collègues pour fonder l'entreprise *Fairchild Semiconductor* spécialisée dans la fabrication de transistors et de circuits intégrés.

En 1968, avec Robert Noyce, il co-fonde la société qui deviendra bientôt *Intel Corporation*. Il en devient le président en 1975 puis accède aux fonction de président du conseil d'administration et de PDG de 1979 à 1987.

En 2013, le magazine Forbes estimait sa fortune à 4,1 milliards de dollars, faisant de lui la 316<sup>ème</sup> fortune de la planète.

Sources :

[http://en.wikipedia.org/wiki/Gordon\\_Moore](http://en.wikipedia.org/wiki/Gordon_Moore)

<http://www.forbes.com/profile/gordon-moore/>

Sites consultés le 29 juin 2013

Au moment où il rédige son article, les circuits intégrés (ou puces électroniques) en sont à leurs débuts. Le premier circuit intégré date de 1958 et dans l'industrie des semi-conducteurs, tout le monde n'est pas persuadé que l'avenir de la filière passe par leur développement. Dans ce premier article, un des objectifs de Moore est de montrer que l'amélioration des circuits intégrés va être cruciale aussi bien pour le futur de l'industrie des semi-conducteurs que pour la croissance économique.

Que dit Gordon Moore dans cet article de 1965 ?

---

<sup>13</sup>Ce texte est disponible en ligne à l'adresse :

[http://web.eng.fiu.edu/npala/EEE4996/Gordon\\_Moore\\_1965\\_Article.pdf](http://web.eng.fiu.edu/npala/EEE4996/Gordon_Moore_1965_Article.pdf) (consulté le 18/06/2013)

Il est assorti d'un entretien avec Gordon E. Moore réalisé pour le compte d'Intel®.

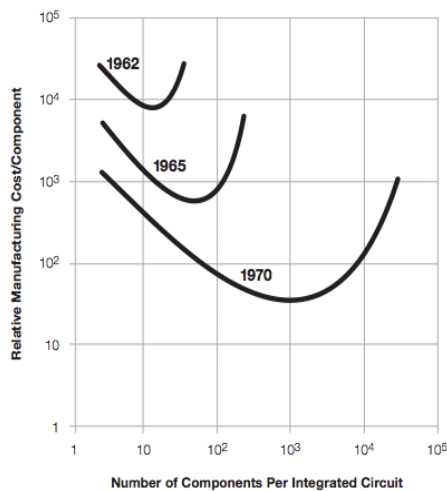
Pour ceux qui ont très envie de voir Monsieur Moore raconter l'histoire de la "loi" qui porte son nom en vidéo, un petit film est téléchargeable sur le site d'Intel à l'adresse (voir au bas de la page, dans la liste de liens) :

<http://www.intel.com/cd/corporate/techtrends/emea/fra/209837.htm> (consulté le 27/06/2013)

D'abord il spéculé sur les possibilités que vont ouvrir, selon lui, l'amélioration de ces circuits intégrés. À l'heure où cette technologie n'est encore essentiellement utilisée que par les militaires, la NASA, ou certaines entreprises, il parle d'ordinateurs personnels, de contrôles automatiques dans les voitures, d'équipements de communication portables. Il souligne les résultats probants obtenus par ces circuits intégrés, leur fiabilité.

Il s'intéresse ensuite à la relation entre diminution des coûts et augmentation de la densité de composants sur les circuits intégrés. Il dit alors deux choses :

- D'une part il estime qu'à un instant donné de l'histoire technologique, le coût de fabrication des composants sur un circuit intégré par composant a tendance à baisser au fur et à mesure que l'on ajoute des composants sur un substrat de semi-conducteur d'un diamètre donné. Cette baisse continue jusqu'à atteindre un minimum. À ce moment, le gain en terme de coût permis par l'augmentation de la densité des composants sur un circuit réaugmente, du fait des difficultés à fabriquer des produits avec une telle densité de composants sans défaut.



*Illustration 5: Reproduction de la courbe proposée par G.E. Moore dans son article de 1965 représentant l'évolution du coût de fabrication d'un composant en fonction de la densité d'intégration des composants sur le circuit*

- D'autre part, Moore remarque que le minimum de la courbe représentant le coût d'un composant du circuit en fonction de la densité de composants par circuit intégré a varié de manière quasi régulière au fil des années 1962, 1963 et 1964. Pendant ces 3 années, la densité d'intégration correspondant au coût minimum par composant a en effet environ doublé chaque année (voir l'illustration 6 tirée de l'article de 1965 de Moore). C'est à partir de ces 3 points que Moore va formuler la première version de la loi qui porte son nom : Moore estime en effet que ce doublement de la complexité des circuits pour un coût minimum par composant devrait se prolonger pendant les 10 années à venir. À ce rythme, la densité d'intégration de composant devrait atteindre, en 1975,  $2^{16}$  soit plus de 65 000 composants par circuit intégré. C'est cette première prédiction qu'on appelle, entre autres, la loi de Moore. Cette terminologie, aujourd'hui utilisée pour désigner cette extrapolation, sera proposée seulement dans les années 70 par un professeur de Caltech ami de Moore, travaillant aussi sur les circuits intégrés, Carver Mead.

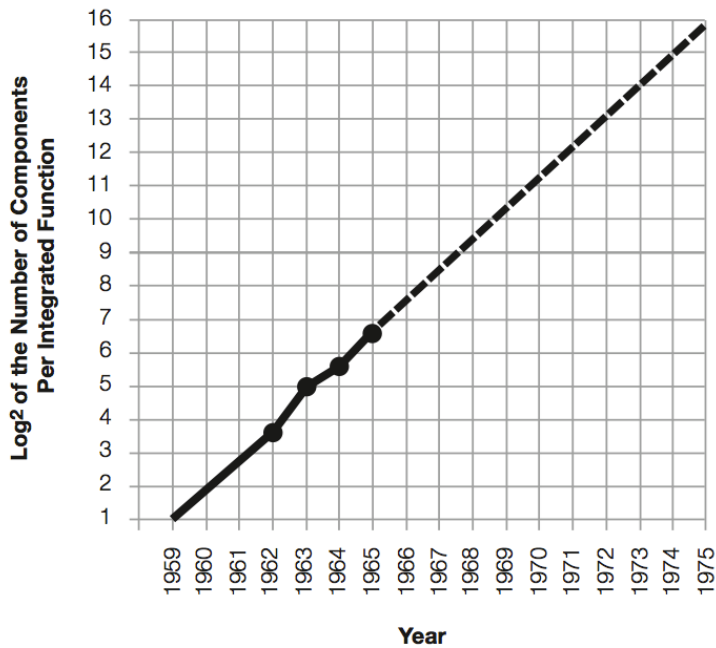


Illustration 6: Évolution de la densité de composants sur un circuit intégré en fonction du temps - Issu de l'article de Moore de 1965

## 2 2<sup>ème</sup> version de la loi de Moore : 1975 – Nouvelles prédictions, prolongation de la courbe

En 1975, Moore revient sur sa prédiction de 1965 au travers d'un article proposé pour la conférence de l'*Institute of Electrical and Electronics Engineers*<sup>14</sup>. Ses prévisions sur le rythme de croissance de la densité des composants sur un circuit intégré se sont avérées exactes. En 1975, Intel, entreprise que Moore a co-fondé en 1968 et dont il est alors le président, produit en effet à ce moment là une mémoire CCD (charge coupled device) dont la densité de composants atteint presque les 65 000 éléments sur une puce. Les prévisions de Moore ont ainsi été réalisées alors même que les technologies ont évolué puisque les transistors MOS ont fait leur apparition au cours des années 1969-1974.

Dans son article de 1975, Moore identifie les facteurs qui selon lui ont permis de prolonger la tendance à l'augmentation régulière de la complexité des circuits qu'il avait perçue au début des années 60. Il formule aussi de nouvelles prédictions sur la manière dont va augmenter la densité d'intégration des composants sur les circuits.

Quels sont les facteurs qui selon Moore ont contribué à permettre le doublement du nombre d'éléments électroniques par circuit intégré chaque année ?

Moore en identifie 3 :

1. La réduction de la taille des transistors et des autres composants a été permise par des avancées technologiques notamment en matière de lithographie.
2. L'augmentation de la densité des composants sans augmentation massive des coûts a par ailleurs été favorisée par les progrès dans les processus de production et par l'amélioration des propriétés des matériaux
3. Enfin, les améliorations apportées à l'architecture des circuits ont aussi contribué à l'augmentation exponentielle de la densité d'intégration des composants sur les puces. Ces facteurs vont-ils continuer à peser dans l'évolution de la technologies des puces ? Pour Moore, en 1975 et dans les années qui vont suivre, ni les lois de la physique, ni les pratiques en matière d'ingénierie ne devraient provoquer un ralentissement de la

<sup>14</sup> Moore, G. E. (1975). Progress in digital integrated electronics. In *Electron Devices Meeting, 1975 International* (Vol. 21, pp. 11-13). IEEE.



## Microprocessor Transistor Counts 1971-2011 & Moore's Law

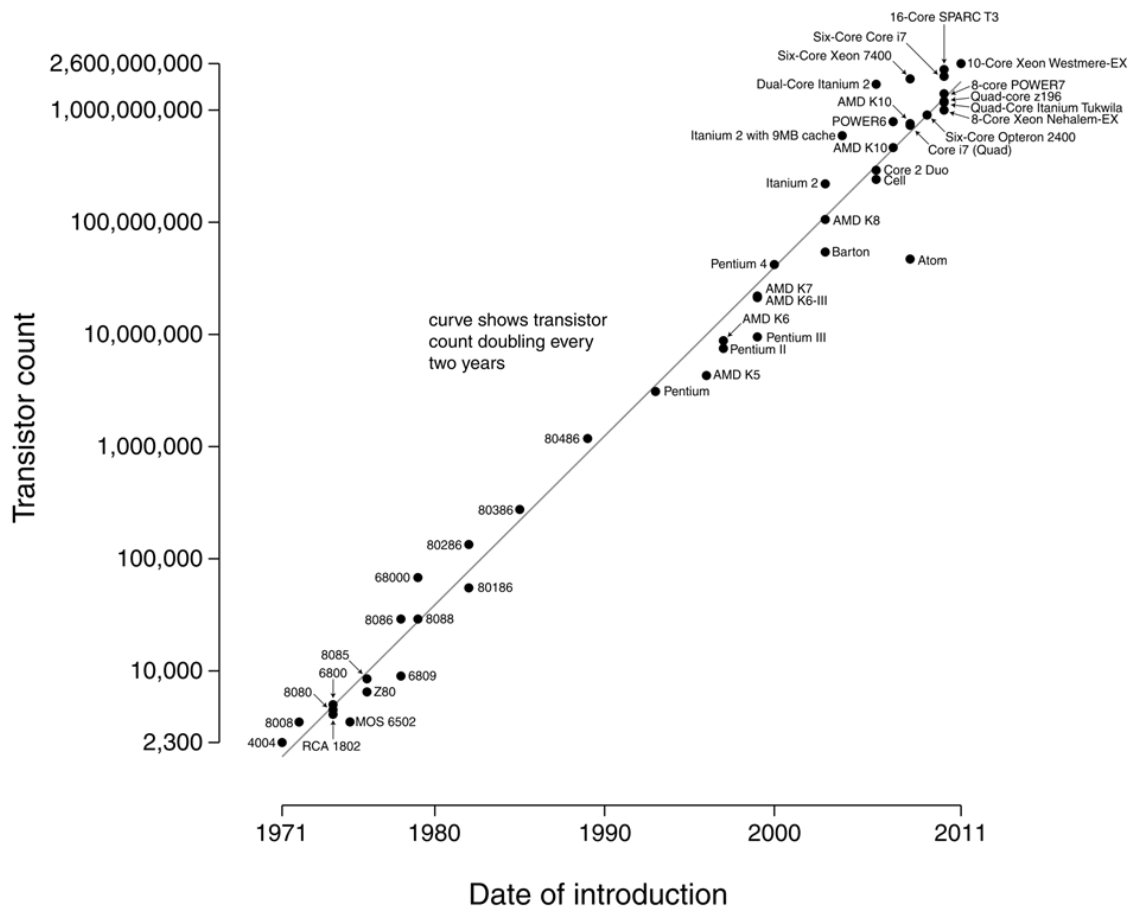


Illustration 8: Évolution du nombre de transistor sur les CPU en fonction de leur date d'introduction (source : Wikipédia - [http://en.wikipedia.org/wiki/Moore%27s\\_law](http://en.wikipedia.org/wiki/Moore%27s_law), consulté le 27/06/2013)

La loi de Moore est fréquemment mentionnée lorsqu'il s'agit de présenter l'envolée des performances de l'électronique dans la deuxième moitié du XX<sup>ème</sup> et du début du XXI<sup>ème</sup> siècles. Les formulations proposées font parfois cependant quelques infidélités aux énoncés de Moore, par exemple en perdant l'accent mis sur l'idée de diminution du coût des composants qu'intègre la formulation de Moore. Pour la petite histoire, on trouve de plus souvent écrit qu'en 1975 Moore avait prédit un doublement de la complexité des circuits tous les 18 mois. Moore se défend catégoriquement d'avoir dit ceci<sup>15</sup>. Lui n'avait parlé que de l'augmentation du nombre de transistors sur une puce. Moore explique cependant qu'un de ces collègues d'Intel® s'appuyant sur l'amélioration des performances des transistors avait conclu que la *performance* des circuits doublerait tous les 18 mois.

### 3 Un énoncé performatif

L'importance de la loi de Moore est-elle seulement dûe à sa capacité à décrire l'évolution de la complexité des circuits intégrés ou des microprocesseurs ?

Non. La formulation d'une telle "loi" a en effet eu un rôle performateur.

<sup>15</sup>Voir l'entretien disponible en ligne : [http://web.eng.fiu.edu/npala/EEE4996/Gordon\\_Moore\\_1965\\_Article.pdf](http://web.eng.fiu.edu/npala/EEE4996/Gordon_Moore_1965_Article.pdf) (consulté le 18/06/2013)

Pourquoi ? Parce que, comme le souligne Schaller<sup>16</sup>, docteur en philosophie qui s'est intéressé au processus d'innovation technologique dans le secteur de la microélectronique depuis les années 1950, la loi de Moore a pesé et continue d'influer sur la définition des feuilles de route qui ont contribué à définir et à coordonner les orientations des entreprises et des investissements dans le domaine de la microélectronique. La loi de Moore est d'ailleurs considérée par certains acteurs de la microélectronique comme une prophétie auto-réalisatrice. Dans un entretien accordé en 1999 à Schaller, alors membre senior du personnel technique chez *Texas Instrument* et aujourd'hui, PDG de *Silicon Integration Initiative, Inc* affirmait par exemple :

*Cette industrie [la microélectronique] a suivi la courbe de Gordon Moore pendant si longtemps qu'elle est allée au delà de la sagesse conventionnelle : c'est devenu un évangile, une sorte de prophétie auto-réalisatrice. Pendant des années, j'ai fait référence à la "loi de Moore" en parlant de "suggestion de Moore", car notre capacité à maintenir ce rythme repose sur le pouvoir de suggestion, et non sur une quelconque loi fondamentale. Nous investissons dans une proportion nécessaire à la réalisation de notre prophétie, parce que nous croyons que l'investissement fournira toujours de plus grandes retombées<sup>17</sup>.*

Comment la loi de Moore est-elle devenue une sorte de guide pesant dans la définition des feuilles de routes technologiques et donc dans l'orientation des investissements en micro-électronique ? C'est la question à laquelle nous allons nous intéresser à présent.

## **5 Comment la loi de Moore et sa traduction dans des feuilles de routes a contribué à orienter la trajectoire l'industrie de l'électronique**

### **1 Mobilisation américaine en réaction à la montée en puissance de l'industrie de la micro-électronique Japonaise**

Les années qui suivent l'énoncé de la "seconde loi de Moore" sont marquées par un ensemble de mutations de l'activité de recherche et d'innovation<sup>18</sup>. Aux États-Unis, on s'inquiète de la concurrence japonaise, en particulier dans le secteur de la microélectronique. Cette fissuration du leadership américain, qui se déroule sur fond de financiarisation de l'économie, va peser sur la réorganisation des relations entre acteurs de l'activité scientifique et technologique et va aussi conduire à des transformations profondes en matière de droit de la propriété intellectuelle. Dans le secteur de la micro-électronique, la fragilisation de la pré-éminence américaine est imputée aux pratiques de gestion des capitaux et des investissements, jugées moins efficaces que celles en vigueur au Japon. Comment redresser la barre et permettre aux États-Unis de retrouver sa position leader du secteur de la microélectronique ? Cette question fait objet de débat à la fin des années 1980.

En 1984, le congrès américain vote le "*National Cooperative Research Act*" qui assouplit la législation anti-trust et encourage les organisations à lancer des programmes de recherches trop risqués pour qu'une seule entreprise ne s'y aventure en solitaire.

---

<sup>16</sup>Sa thèse (Schaller, R.R. (2004). *Technological Innovation in the Semiconductor Industry: a case study of the International Technology Roadmap for semiconductors (ITRS)*. Doctoral dissertation, George Madison Universtiy) est disponible en ligne à l'adresse : <http://corphist.computerhistory.org/corphist/documents/doc-487ecec0af0da.pdf>

<sup>17</sup>Citation issue de la thèse Schaffer (2004, p. 380), notre traduction.

<sup>18</sup>Pour ceux que cela intéresse, le petit ouvrage de Pestre, "Science, argent et politique : un essai d'interprétation" paru en 2003 aux Éditions de l'INRA

S'ensuit la création de SEMATECH<sup>19</sup> en 1987, organisation dont la mission est de travailler sur les procédés de fabrication, en amont de la production de produits industriels, perçus comme le talon d'achille de l'industrie américaine.

En 1988, le congrès des États-Unis met aussi sur pied un comité consultatif national sur les semi-conducteurs (NACS) au travers du "*Semiconductor Research and Development Act*". Les conclusions que ce comité avancement en 1989 dans un rapport intitulé "*A Strategic Industry at Risk*" soulignent que l'industrie américaine des semi-conducteurs est en danger, alors même que cette industrie est vitale pour le pays. Des pistes de solutions pour remédier à la perte de parts de marché face au Japon sont proposées.

La première a trait à la création d'un fonds de capitaux alimenté par l'industrie, par le gouvernement, ainsi que par des investisseurs privés et institutionnels. L'idée est de créer des sources de financements permettant aux firmes américaines de bénéficier de conditions aussi favorables que les entreprises japonaises dont les membres du comité croient savoir qu'elles bénéficient de capitaux moins coûteux et d'investissements à long terme. Cette piste de solution est cependant abandonnée car au moment où paraît le rapport final du comité consultatif, le secteur des semi-conducteurs aux États-Unis connaît un regain de vigueur grâce à l'arrivée des microprocesseurs. Le Japon qui dominait le marché des mémoires DRAM (Dynamic Random Access Memory) perd alors des parts de marché.

La seconde piste de remédiation est aussi relative à la gestion des investissements. La construction d'un circuit intégré mobilise une série d'opérations : photolithographie, gravure, dépôt de métaux... Chacune de ces opérations est effectuée par une instrumentation coûteuse et spécialisée que produisent différentes entreprises. Et la haute technicité de cette instrumentation peut entraver les évolutions technologiques. En effet, si une firme propose un changement sans concertation avec les autres, et que toute la chaîne de fabrication du circuit n'est pas prête à tenir compte de ce changement, cette évolution risque de ne pas être productive. Pour favoriser une propagation optimale des améliorations, l'idée consiste donc à améliorer la coordination entre entreprises et agences de recherche. Ceci permettrait d'optimiser et de synchroniser les dépenses engagées dans des programmes de recherche et développement "pré-compétitifs", c'est-à-dire les programmes visant à développer des technologies de base, utiles à toutes l'industrie des semi-conducteurs dans son ensemble.

Le comité prend l'exemple de la lithographie aux rayons-X, dont le développement, hardu et très coûteux pourrait bénéficier à toute l'industrie. Il regrette que ce sur ce cas particulier les États-Unis n'aient pas la même efficacité que la concurrence asiatique :

*"Au regard du programme développé en Extrême-Orient, les efforts déployés aux États-Unis dans le développement des rayons X souffrent d'un manque d'envergure, de coopération et d'organisation.<sup>20</sup>"*  
(National Advisory Committee on Semiconductor, 1989, p.20, cité dans un article de Miller & O'Leary de 2007)

Pour continuer à rester compétitif, le comité consultatif national sur les semi-conducteurs suggère donc d'améliorer la coordination du financement des projets de recherches et de leur évaluation. L'outil qui va être privilégié pour assurer cette coordination sera les feuilles de routes.

---

<sup>19</sup>Semiconductor Manufacturing Technology

<sup>20</sup>Notre traduction.

## **2 1992 - Première feuille de route de l'Association de l'Industrie des Semi-conducteurs (SIA) pour coordonner le développement de l'industrie des semi-conducteurs américaine**

En avril 1991, la NACS et le bureau de la politique scientifique et technologique de la Maison Blanche mettent sur pied des ateliers rassemblant des représentants des producteurs américains de semi-conducteurs, des constructeurs d'équipement, des fournisseurs de matériaux, des institutions de recherches, des universités, des agences fédérales américaines, des institutions publiques de recherche afin de créer une feuille de route technologique pour l'industrie des semi-conducteurs. Le rapport final produit à l'issue de ces ateliers est intitulé *Micro Tech 2000 Workshop Report: Semiconductor Technology Roadmaps*. Ce document tente de définir une stratégie d'évolution technologique s'étalant sur une décennie qui doit permettre de rattraper et même de dépasser le Japon dans le domaine des semi-conducteurs.

Schaller, philosophe des sciences qui s'est intéressé à l'élaboration des feuilles de routes dans le domaine des semi-conducteurs, estime que les réactions ont été diverses lors de la parution de ce rapport. Selon lui, les chercheurs se montrent généralement satisfaits de son contenu. En revanche, les industriels considèrent souvent que le rythme d'évolution des technologies est irréaliste notamment en raison des fonds dont ils disposent. Néanmoins, si la faisabilité de cette feuille de route fait débat, l'idée de travailler à coordonner la trajectoire du secteur de la microélectronique dans son ensemble est jugée utile et les initiatives vont se poursuivre. Le NACS était un comité dont la durée de vie était fixée à 3 ans. Aussi en 1992, son existence prend fin et la SIA, l'Association de l'Industrie des semi-conducteurs prend la relève. Gordon Moore entre alors de nouveau en scène. Toujours PDG d'Intel, il est en effet aussi président (*Chairman*) du comité technologique de l'Association de l'Industrie des semi-conducteurs. Ce comité a recommandé la formation d'un groupe de travail pour évaluer les possibilités de mise en œuvre du rapport *Micro Tech 2000*. Il considère que ce rapport peut constituer un point de départ pour élaborer une feuille de route globale tenant compte des travaux de SEMATECH et de ceux du consortium américain de recherche sur les semi-conducteurs (SRC). Le groupe de travail mis sur pied par le comité technologique de la SIA va alors se focaliser sur la façon dont il est possible d'assurer la pré-éminence des États-Unis, non en matière de technologie, mais en matière de *production* des semi-conducteurs dans un contexte de compétition économique.

En 1992, 179 scientifiques et ingénieurs se rencontrent à Irvin, au Texas. Comme pour les ateliers MicroTech 2000, ils représentent les plus grandes compagnies américaines des semi-conducteurs et d'informatique, des universités, des agences gouvernementales et des laboratoires nationaux. Cependant, la proportion d'industriels a augmenté et celle des universitaires et des représentants des agences gouvernementales a diminué. L'objectif de cette rencontre est de créer une vision commune de l'évolution de la technologie des semi-conducteurs pour les 15 années à venir qui soit réaliste. L'outil auquel va aboutir cette réunion est la première feuille de route technologique publiée par l'association de l'industrie des semi-conducteurs. Ce document, au travers de prédictions chiffrées (voir l'illustration 9) trace le chemin à suivre pour les années à venir. Le problème des coûts de production y est pris en considération comme le suggère l'item "*wafer processing cost*" mesuré en coût au  $\text{cm}^2$ . Cette feuille de route est en effet pensée comme un outil pour l'industrie, qui tient compte des contraintes économiques pesant sur les industriels. Le rythme d'évolution des technologies utilisant les semi-conducteurs qu'elle suggère est par ailleurs cohérent avec celui esquissé dans la loi de Moore ; Moore déclare ainsi en 1997 :

*"Si nous pouvons rester sur la feuille de route de la SIA, nous pouvons pour l'essentiel rester sur la courbe [de la Loi de Moore]. Cela devient vraiment une question de mettre les rails en avant du train pour coller aux prévisions."*<sup>21</sup>

---

<sup>21</sup>Ed Korcynski, "Moore's Law Extended: The Return of Cleverness," (interview with Gordon Moore) *Solid State*

Characteristic	1992	1995	1998	2001	2004	2007
Feature size (microns)	0.50	0.35	0.25	0,18	0,12	0.10
Gates per chip (millions)	0.3	0.8	2.0	5.0	10.0	20.0
Bits per chip						
DRAM	16M	64M	256M	1G	4G	16G
SRAM	4M	16M	64M	256M	1G	4G
Wafer processing cost (\$/cm <sup>2</sup> )	\$4.00	3.90	3.80	3.70	3.60	3.50
Chip size (mm <sup>2</sup> )						
logic	250	400	600	800	1,000	1,250
memory	132	200	320	500	700	1,000
Wafer diameter (mm)	200	200	200-400	200-400	200-400	200-400
Defect density (defects/cm <sup>2</sup> )	0.10	0.05	0.03	0.01	0.004	0.002
Levels of interconnect (for logic)	3	4-5	5	5-6	6	6-7
Maximum power (watts/die)						
high performance	10	15	30	40	40-120	40-200
portable	3	4	4	4	4	4
Power supply voltage						
desktop	5	3.3	2.2	2.2	1.5	1.5
portable	3.3	2.2	2.2	1.5	1.5	1.5

Illustration 9: Première feuille de route pour l'industrie des semi-conducteurs, publiée par l'association de l'industrie des semi-conducteurs suite à la rencontre de novembre 1992.

### 3 Des feuilles de routes internationales pour l'industrie microélectronique

Après la publication de cette première feuille de route, la SIA va en faire paraître plusieurs autres, révisant ainsi régulièrement les objectifs fixés. Les premières, en 1994 et 1997 sont le fruit de l'industrie américaine seule. Mais en 1998, le bruit court que l'industrie des semi-conducteurs japonaise est sur le point d'organiser des ateliers qui pourraient déboucher sur l'élaboration de feuilles de routes mondiales, volant la vedette aux travaux menés aux États-Unis. La SIA réagit donc et ouvre le processus de révision de la feuille de route aux autres pays. Les associations coréenne et taïwanaise de l'industrie des semi-conducteurs acceptent de participer, de même que l'association européenne des composants électroniques et l'association japonaise des industries électroniques. Ainsi, en 1999, paraît la première feuille de route technologiques internationale pour les semi-conducteurs, l'ITRS (*International Technology Roadmap for Semiconductors*).

*"L'objectif de l'ITRS est d'assurer l'efficacité en terme de coûts des améliorations de la performance des circuits intégrés et des produits qui emploient ces dispositifs, et par là-même continuent d'assurer la santé et le succès de cette industrie."*<sup>22</sup>

Dorénavant, le rapport de l'ITRS sera produit en concertation entre les associations de l'industrie des semi-conducteurs tawainaise, coréenne, japonaise, européenne et américaine tous les deux et mis à jour tous les ans<sup>23</sup>. Ils continuent de l'être aujourd'hui.

Si le processus d'élaboration des feuilles de route s'est élargi à de nouveaux acteurs,

*Technology*, Vol. 40, No. 7, July 1997, 364, cité par Schaller, dans sa thèse (p. 475). Notre traduction.

<sup>22</sup><http://www.itrs.net/about.html> – Consulté le 26/06/2013 – Notre traduction.

<sup>23</sup>Ces rapports sont consultables sur le site de l'ITRS: <http://www.itrs.net/reports.html> – Consulté le 27/06/2013

l'influence de loi de Moore continue de se faire sentir dans ces documents. En 2012 ces feuilles de route poursuivaient encore les objectifs de miniaturisation suggérés par la loi de Moore. Cependant, depuis le milieu de années 2000, les pistes pour prolonger la courbe exponentielle ne sont plus les seules pistes explorées dans ces documents. *Un autre volet de réflexion, intitulé "More than Moore" s'intéresse au développement d'autres dispositifs qui ne suivent pas forcément le rythme de miniaturisation de suggéré par la loi de Moore mais permettent d'apporter une valeur ajoutée aux dispositifs. Il s'agit par exemple de tout ce qui a trait au dispositifs de communication radiofréquence, d'économie d'énergie, aux composants passifs, capteurs ou actionneurs.*

*Par ailleurs dans les dernières feuilles de route de l'ITRS, on anticipe aussi le futur en s'interrogeant sur la manière de continuer à augmenter les puissances de calcul ainsi que les capacités des mémoires lorsque les limites physiques liées à la réduction des dimensions seront atteintes. Lorsque l'épaisseur des couches de matériaux isolants des transistors ne dépasseront pas quelques couches d'atomes, les effets quantiques (courants de fuite tunnels) risquent en effet d'entraver leur fonctionnement et la feuille de route de 2011 prévoit d'atteindre ce seuil physique dans les années 2020. En réaction, tout une partie de la réflexion relatée dans le document de l'ITRS porte sur les pistes technologiques qui pourraient être potentiellement fructueuses : nanoélectronique utilisant le carbone, spintronique, logique ferromagnétique, interrupteurs à base de systèmes électromécaniques nanométriques (NEMS)...*

Les dernières moutures des feuilles de route de l'ITRS s'efforcent donc de coordonner les efforts pour aller "au delà de 2020" ou pour faire "plus que Moore" en déployant des efforts dans des domaines relevant des nanotechnologies.

## **6 Loi de Moore, feuilles de route et nanotechnologies**

Si les feuilles de route de l'ITRS suggèrent d'investir dans certains pans des nanotechnologies, la référence à la "loi de Moore" proprement dite a aussi pesé dans l'orientation d'investissements dans la nanoélectronique.

Par ailleurs, concernant les nanotechnologies, on peut faire une analogie entre :

- la façon dont la loi de Moore a contribué à modeler le devenir de la microélectronique en influençant le tracé des feuilles de route de l'industrie des semi-conducteurs
- et la manière dont certains promoteurs des nanotechnologies contribuent à influencer les orientations des programmes de développements "nanos".

À titre d'exemple, aux alentours de 2005 Mihail Roco, conseiller senior pour les nanotechnologies de la National Science Foundation américaine, a proposé dans divers documents et présentations<sup>24</sup> sa vision de l'évolution des nanotechnologies dans les années à venir (voir illustrations 10 et 11). Entre 2000 et 2020, il prévoit 4 phases dans le développement et la commercialisation des nanotechnologies :

1. à partir de 2000, des recherches ont porté sur la production et la mise au point de prototypes industriels de *nanostructures passives* : produits utilisant des nanoparticules, matériaux nanomanufacturés
2. à partir de 2005 (moment où Roco porte ce discours), les efforts se sont concentrés en plus sur les *nanostructures actives* incluant des nanosystèmes, des médicaments ciblés, des composants de nanoélectronique...
3. à partir d'environ 2010, Roco prévoit (en 2005) que des travaux se focaliseront sur la mise au point de "*systèmes de nanosystèmes*" regroupant des efforts de recherche et de développement d'assemblages contrôlés de nanosystème, de nano-robotique, de système capable d'évolution.

---

<sup>24</sup>La présentation de ces "4 générations" est disponible par exemple dans l'article : Roco, M. C. (2005).

International perspective on government nanotechnology funding in 2005. *Journal of Nanoparticle Research*, 7(6), 707-712.

4. Enfin à partir de 2015, Roco estime (toujours en 2005) que chercheurs et ingénieurs travailleront sur la mise au point de *nanosystèmes moléculaires*. Ces travaux porteront sur la conception de systèmes au niveau atomique, de systèmes aux "fonctions émergentes", finalement assez proches de l'ingénierie moléculaire de Drexler.

#### Timeline for beginning of industrial prototyping and nanotechnology commercialization: Four Generations

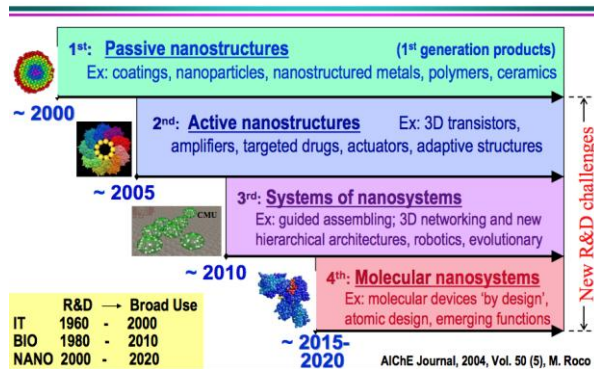


Illustration 10: Reproduction d'une diapositive représentant les 4 générations des nanotechnologies selon Roco.

Elle est issue d'un diaporama présenté à l'Université Polytechnique de New York, disponible en ligne à l'adresse : [http://mechatronics.poly.edu/Control\\_Lab/Padmini/NanoSymposium/NNI\\_07-0423\\_Roco@PolyNY\\_FrontiersNT\\_80sl.pdf](http://mechatronics.poly.edu/Control_Lab/Padmini/NanoSymposium/NNI_07-0423_Roco@PolyNY_FrontiersNT_80sl.pdf) (consulté le 27/06/2013)

Un peu comme la loi de Moore pour la microélectronique, cette extrapolation proposée par l'un des artisans de la National Nanotechnology Initiative américaine anticipe l'évolution du domaine. Par ailleurs ce qui intéresse Roco ici c'est l'établissement d'un agenda industriel visant la commercialisation des objets nano. Comme la loi de Moore, sa prévision lie ainsi développements scientifiques et technologiques à la dimension économique. En revanche, par rapport à la loi de Moore, sa prévision est beaucoup plus générale : Roco pointe des champs de recherche et d'innovation à investir en leur associant des dates quand Moore faisait des prédictions sur l'augmentation de la complexité des circuits intégrés.

Finalement ces 4 générations proposées par Roco ont contribué à peser dans la définition des programmes politiques de développement des nanotechnologies telles que la NNI. En publicisant sa vision du futur notamment auprès des responsables de programmes de recherche, Roco a participé et participe à orienter ce que sont les nanotechnologies. Le sociologue Laurent (2010) rapporte par exemple que le responsable du programme de développement des nanotechnologies de l'agence nationale de la recherche française (PNANO) estimait que, sous l'influence de la logique de développement des nanotechnologies définie par Roco, ce programme avait évolué à partir de 2009 en plaçant les nano-systèmes au centre du projet<sup>25</sup>.

Mais ces "4 générations des nanotechnologies" ne constituent pas le seul instrument servant à faire advenir un futur. Dans le domaine des nanotechnologies, des feuilles de route sont également élaborées pour anticiper, coordonner et donner corps à ces développements. Plusieurs organisations en ont ainsi publiées sur différentes facettes des nanotechnologies.

C'est le cas de regroupements d'industriels parfois en partenariats avec des institutions de recherche et des agences fédérales comme pour la "Chemical Industry R&D Roadmap for Nanomaterials by Design" parue en 2003.

C'est le cas du Foresight Institute en 2007<sup>26</sup> qui au terme d'ateliers a produit une feuille

<sup>25</sup> Laurent, B. (2010). Les politiques des nanotechnologies. Editions Charles Léopold Mayer, Paris.

<sup>26</sup> Cette feuille de route est disponible en ligne à l'adresse : <http://www.foresight.org/roadmaps/> - Consulté le 27/06/2013

de route technologique pour des nanosystèmes productifs.

C'est le cas de la plateforme technologique européenne pour la nanomédecine qui a publié une feuille de route sur ce sujet en 2006, en partenariat avec la commission européenne<sup>27</sup>. Ce document vise à fournir des indications à l'Europe pour ensuite orienter l'attribution de financements. Les plateformes technologiques européennes sont en effet, selon la commission européenne<sup>28</sup>, des réseaux menés par l'industrie qui fournissent un cadre pour les acteurs, afin de définir des priorités de recherches et des plans d'action dans des secteurs technologiques où l'Europe souhaite accroître sa compétitivité, sa capacité d'action et la durabilité de ses actions. Ces plateformes définissent et mettent à jour des priorités de recherche et leur associent des agendas. Ceux-ci, développés en concertation entre acteurs industriels, chercheurs du secteur public et représentants des gouvernements servent ensuite à définir l'orientation de financements européens. Ils sont aussi porteurs d'un ordre particulier d'organisation de la recherche notamment au travers de la promotion forte des partenariats entre recherche industrielle et académique, et de l'idée d'articuler recherche et innovation pour répondre à des impératifs économiques de croissance et de compétitivité.

Enfin, plus récemment la plateforme d'innovation et d'intégration technologique européenne "Nanofutures" qui travaille en collaboration avec 11 plateformes technologiques européennes, a aussi publié une feuille de route en 2012<sup>29</sup> intitulée "*Integrated Research and Industrial Roadmap for European Nanotechnology*".

Finalement, le développement des nanotechnologies et la définition des programmes politiques qui leur sont associés, est modelé par des visions du futur. L'opérationnalisation de ces scénarios d'anticipation de l'avenir proche ou plus lointain s'effectue au travers de la définition des grands programmes de financement tels que la NNI. Elle est également médiée, comme ce fut le cas pour la microélectronique à partir des années 1990, par des instruments tels que les feuilles de route qui permettent de coordonner les efforts des acteurs d'un secteur scientifique et technologique donné. Ainsi, en orientant les investissements et les priorités de recherche, visions du futur et feuilles de route participent à faire advenir un futur en phase avec les prévisions qu'elles avaient anticipées.

---

<sup>27</sup>[http://www.etp-nanomedicine.eu/public/press-documents/publications/etpn-publications/091022\\_ETPN\\_Report\\_2009.pdf](http://www.etp-nanomedicine.eu/public/press-documents/publications/etpn-publications/091022_ETPN_Report_2009.pdf) - Consulté le 27/06/2013

<sup>28</sup> Source : <http://cordis.europa.eu/technology-platforms/> - Consulté le 28/06/2013

<sup>29</sup>[http://www.nanofutures.info/sites/default/files/NANOfutures\\_Roadmap%20july%202012\\_0.pdf](http://www.nanofutures.info/sites/default/files/NANOfutures_Roadmap%20july%202012_0.pdf) - Consulté le 27/06/2013

Enfin, que faut-il retenir ?

□ Que la loi de Moore propose des prédictions de l'évolution de la complexité des circuits intégrés, tout en articulant cette évolution avec la diminution du coût des composants.

□ En 1965, Moore travaille dans une entreprise de semi-conducteurs. Il extrapole à partir de la tendance des trois années passées, en prédisant, pour les 10 années à venir, un doublement de la densité de composants sur les circuits correspondant à ceux pour lequel le coût par composant est minimum.

□ En 1975, Moore devenu PDG d'Intel actualise sa prédiction : selon lui, le nombre de transistors sur une puce va doubler tous les deux ans dans les années à venir.

□ Que ces deux prédictions de Moore se sont réalisées.

□ Que la loi de Moore est souvent considérée comme une prophétie auto-réalisatrice, dans la mesure où la prédiction qu'elle propose a servi de référence pour fixer des objectifs aux chercheurs et aux industriels des semi-conducteurs.

□ Que l'évolution de l'industrie des semi-conducteurs a été largement influencée par l'établissement des feuilles de routes de l'Association de l'Industrie des Semi-Conducteurs puis de l'*International Technology Roadmap for Semiconductors* conçues pour coordonner les investissements et les recherches des acteurs de la filière. Ces feuilles de routes sont des instruments qui lient la recherche scientifique et technologiques et le monde économique et elles participent à donner corps à des visions du futurs en guidant les efforts de toutes les parties prenantes d'un secteur industriel.

□ Que l'impératif de "rester sur la courbe de la loi de Moore" a participé à orienter des investissements dans les nanotechnologies au tournant des années 2000.

□ Que des visions du futurs participent aussi à modeler les programmes politiques de développements des nanotechnologies et que des instruments tels que les feuilles de route sont aussi utilisés pour structurer les initiatives de recherche et développements sur les nanotechnologies.