

L'électronique des micro/nanosystèmes : évolutions et perspectives

Daniel ESTEVE
Directeur de Recherches au CNRS*

Eric CAMPO
Maître de Conférences à l'IUT de Toulouse

L'évolution des technologies à la fin du XX^e siècle a été dominée par la course à la miniaturisation, par l'intégration de fonctions de plus en plus complexes dans un même support, et par la diversification des applications. Cette évolution va de pair avec une diminution constante des coûts, et avec la richesse des fonctions proposées aux utilisateurs, aussi bien dans le domaine des technologies de pointe, que dans celui des technologies à très grande diffusion qui concernent chaque citoyen. C'est dans ce contexte que sont apparus les dispositifs microsystèmes et qui sont appelés aujourd'hui à être de plus en plus "intelligents", c'est à dire à être dotés de capacités d'analyse, de décision et de communication. De ce fait, ils interagissent de plus en plus fortement avec l'homme dans son environnement de vie, soit pour la supervision de tâches complexes ou tout simplement dans le domaine de la sécurité. Cependant, l'évolution technologique va atteindre les limites physiques des procédés de réalisation de tels dispositifs à l'échelle micrométrique (2012/2015). On doit donc, dès à présent, envisager des technologies à l'échelle atomique ou moléculaire faisant appel à de nouveaux matériaux mettant en jeu de nouveaux mécanismes qu'il convient d'explorer. Les domaines d'applications sont, pour certains, déjà bien identifiés. Etant donné l'étendue des questions soulevées, nous avons limité cet article à l'analyse de l'évolution technologique en considérant l'histoire et la perspective ouverte par l'électronique.

Mots clés : microsystèmes, microtechnologies, nanotechnologies, microélectronique.

Introduction

Le progrès technologique est extraordinairement rapide depuis le XIX^e siècle, engageant un processus d'industrialisation mondial grâce à la mécanisation et la maîtrise de l'énergie d'abord, grâce ensuite au développement de l'électronique depuis près de cent ans.

Notre réflexion porte plus précisément ici sur la période qui va de l'invention du transistor bipolaire en 1950 par W. Shockley, J. Bardeen et W. Brattain de Bell Laboratories [1-2], jusqu'à ce que l'on nomme aujourd'hui les nanotechnologies. Quels sont les moteurs technologiques ? Quelles sont les orientations les plus récentes ? Sommes nous entrés dans une nouvelle étape avec les nanotechnologies ?

Nous considérerons principalement les aspects technologiques mais évidemment aussi l'impact économique et social. Quelques chiffres donnent l'ampleur de ces questions :

- l'industrie électronique est le secteur industriel mondialement le plus important et le plus dynamique : plusieurs milliers de milliards d'Euros annuellement avec un taux de croissance moyen de plus de 10% depuis cinquante ans [3],

- des millions d'emplois et des centaines de milliers de chercheurs concourent à cette dynamique : le seul secteur de la microélectronique, de la conception et de la fabrication de circuits intégrés représente 200 milliards d'Euros. On peut donc dire que c'est la clef du développement général qui fixe le rythme de développement d'ensemble selon la loi empirique de Moore : à prix égal, un gain en performance multiplié par deux tous les dix huit mois [4].

Tous les secteurs industriels sont concernés : on dit que les technologies de l'électronique et de la microélectronique sont diffusantes au sens où, sans représenter le cœur fonctionnel d'un système ou d'un produit, elles en sont le vecteur promotionnel. Les exemples sont nombreux dans plusieurs domaines : automobile, aéronautique, surveillance biomédicale, domotique... Il faut ici faire mention spéciale de l'informatique et des télécommunications qui ont directement dynamisé l'économie mondiale depuis vingt ans. Evidemment, l'activité humaine s'en est trouvée profondément modifiée dans la vie professionnelle comme dans la

* Laboratoire LAAS-CNRS, 7 avenue du Colonel Roche,
31077 TOULOUSE CEDEX 4, FRANCE
Téléphone : (+33) 5 61 33 62 00 - Fax : (+33) 5 61 33 62 08
E-mail : (esteve, campo)@laas.fr

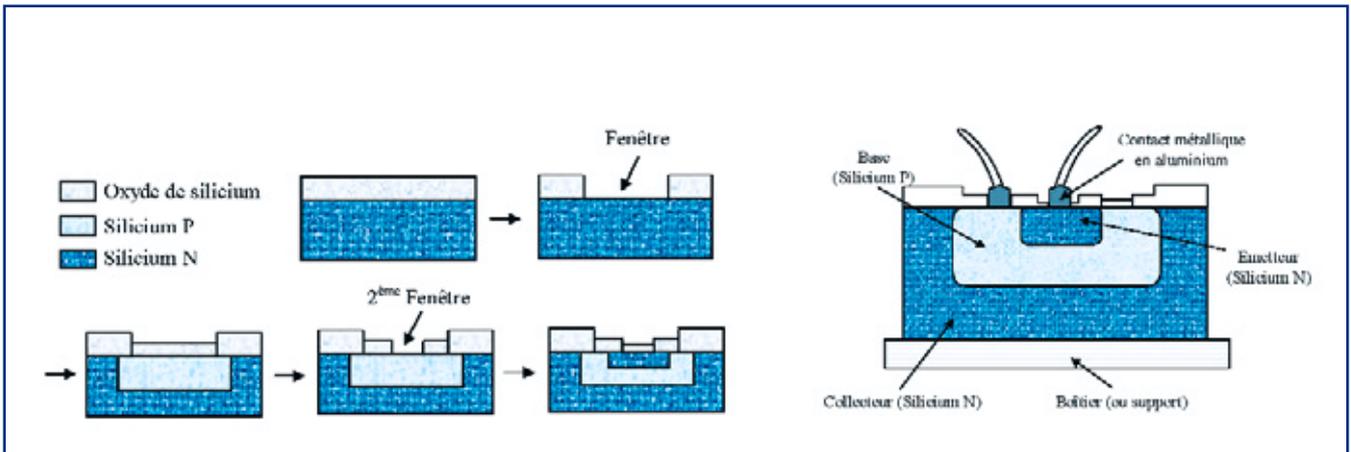


Figure 1 : Procédé "planar" et structure en coupe d'un transistor planar au silicium.

vie privée. Deux changements importants sont particulièrement visibles :

- la circulation de l'information à tous les niveaux : information publique, communication d'entreprise, échanges privés...
- l'amplification apportée aux activités humaines dans les interfaces homme-machine ou homme-système, où l'homme se trouve, de fait, aux commandes d'ensembles techniques très performants et complexes, souvent bien au delà de sa faculté de compréhension propre.

On distingue deux grandes conséquences à ces changements :

- un environnement qui se "mondialise" dans ses interconnexions multiples humaines, économiques et sociales, avec des espoirs et des souffrances encore mal évalués,
- une psychologie humaine qui subit de plein fouet l'effet d'un mouvement collectif irréversible qu'il faut gérer individuellement.

Il n'est pas étonnant donc que les questions d'environnement et de société émergent progressivement tant dans le débat public que dans l'analyse conjoncturelle du développement industriel. Cette préoccupation est manifeste dans la programmation de Recherche en général, dans le monde, notamment celle de la Commission des Communautés Européennes [5].

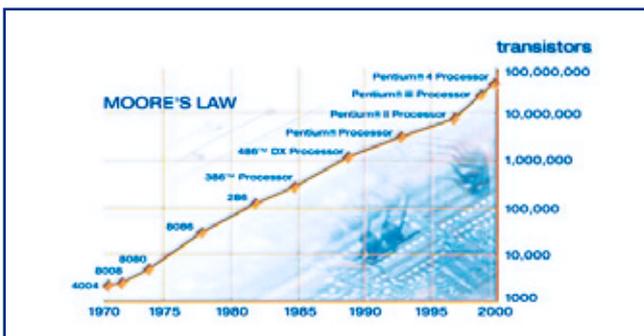


Figure 2 : Loi de Moore.

Le problème considéré dans toute son ampleur est très vaste, hors de portée d'une simple analyse particulière : nous limiterons donc notre propos à l'analyse de l'évolution technologique en considérant l'histoire et la perspective ouverte par l'électronique, dans ses étapes principales que sont l'invention des composants à semi-conducteurs et les circuits intégrés, la micro-informatique et les machines numériques, les réseaux numériques et les télécommunications.

1. Du transistor bipolaire aux microsystèmes

W. Shockley, J. Bardeen et W. Brattain [6] ont obtenu le prix Nobel en 1957, pour l'invention du transistor bipolaire. Il récompensait une innovation marquante dans le monde de l'électronique qui s'était jusque là construite sur le concept de tube électronique et qui donc basculait vers des composants solides, miniaturisés. Composants et applications se sont rapidement développés : on se souvient du transistor portable proposé au grand public de cette période là. Une deuxième innovation [7] a joué un rôle majeur sans connaître le succès populaire, il s'agit du procédé "planar" de fabrication (1960) des composants au silicium (figure 1). Il porte avec lui toutes les composantes technologiques de la microélectronique moderne : oxydation de silicium (SiO₂), photolithographie, masquage SiO₂ des diffusions et passivation des surfaces...

Sur cette base, il n'a fallu que quelques années pour penser et réaliser des circuits intégrés d'abord à base de transistors bipolaires puis à base de transistors MOS [8-9]. C'est là que commence l'aventure du calcul numérique, la micro-informatique des années 70. Elle va engager un processus de progrès ininterrompu bien caractérisé par la loi de Moore (figure 2) qui prédit un doublement de la complexité des

circuits intégrés (nombre de composants/cm²) tous les 18 mois, encore valable de nos jours [4].

Vitesse de calcul, capacité de mémoires, miniaturisation sont les vecteurs supports d'une évolution des ordinateurs illustrée par la figure 3.

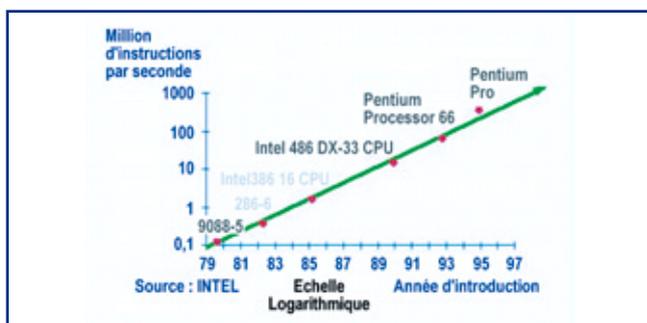


Figure 3 : Evolution des performances des microprocesseurs.

Cette évolution a fait augmenter la productivité de l'industrie informatique (figure 4).

Même si le circuit intégré numérique est le cœur du développement technologique, il n'est pas la seule source d'innovation en électronique : quatre secteurs, au moins, sont à évoquer : l'intégration analogique, l'intégration de puissance, l'intégration radiofréquence, l'optoélectronique.

Deux courants de pensée concourants ont construit les évolutions les plus récentes vers la mise en compatibilité et l'intégration des technologies. Ces deux orientations concernent l'intégration de systèmes sur puce S.O.C (Systems On Chip) avec un exemple majeur qui est le téléphone portable, et les microsystèmes correspondant à l'intégration sur une même plaque de silicium, du capteur et de son électronique de traitement, mais aussi dans certains cas, des éléments mécaniques : engrenages, moteurs et autres actionneurs...

2. L'évolution des microsystèmes

Alors que les S.O.C sont une évolution naturelle d'une démarche d'intégration, les microsystèmes ou MEMS (Micro Electrical Mechanical Systems), que l'on retrouve aussi sous d'autres noms ou acronymes comme Micro Systems Technologies (MST) en Europe ou Micromachining au Japon, sont nés d'une démarche d'innovation visant à intégrer sur une même puce de silicium des fonctions hétérogènes en ouvrant deux axes de développement technologique entièrement nouveaux :

- le micro-usinage de silicium et la gravure ionique réactive profonde (DRIE) complétés par les technologies de la microélectromécanique. En effet, la microinjection, le MIM, le LIGA assurent également la réalisation de microstructures avec des dimensions inférieures à 25 μm ,
- l'actionnement électrostatique à travers les micromiroirs silicium appliqués à la projection d'images [10], à la commutation optique [11] et, par exemple, à la robotique mobile (caméra laser 3D) [12].

La diffusion de ces techniques nouvelles a permis le développement de nouveaux dispositifs miniaturisés à l'échelle du micron, plus complexes et de plus en plus intégrés (associant capteurs, actionneurs, électronique de commande et de transmission du signal, et source d'énergie) qui ont rapidement intéressés le secteur industriel : accéléromètre et baromètre, imprimantes à jet d'encre, matrices de miroirs commandables... [13-14].

Mis en place en 1992 par la Communauté Européenne, le réseau NEXUS (Réseau d'excellence des microsystèmes multifonctionnels) [15] a eu pour but de promouvoir la recherche et le développement de ces technologies MEMS.

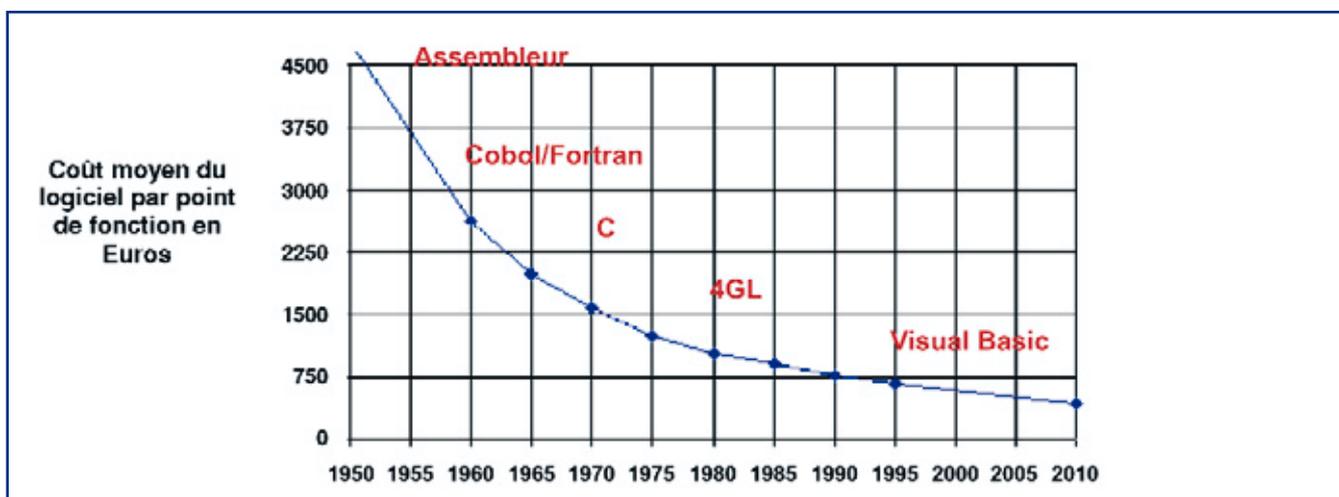


Figure 4 : Evolution de la productivité depuis 50 ans (cas des logiciels).

Les premières années ont été surtout consacrées au développement de micro-capteurs intégrant le transducteur et l'électronique de traitement. Un des premiers exemples de microsystèmes est l'accéléromètre pour "airbag" dans les voitures, mais l'avenir verra des microsystèmes de plus en plus "intelligents" remplir des fonctions extrêmement variées, depuis l'administration automatique de médicaments par système autonome implanté dans le corps humain, jusqu'aux microsattelites, et intégrant des fonctions de Nanotechnologie [16].

L'apport au stade de la conception, de méthodes et d'outils de modélisation de plus en plus performants permet aussi d'accroître la robustesse des microsystèmes étudiés et d'étendre le champ d'études et de développement aux micro-actionneurs, micro-moteurs, micro-pompes et micro-valves, micro-instruments opto-mécaniques, éléments de base des microsystèmes.

Le concept des microsystèmes est naturellement ouvert aux approches monolithiques et aux approches hybrides (S.O.P : System On Package) où l'ambition est de multiplier l'offre technologique de produits miniaturisés dans des domaines applicatifs où les volumes sont plus réduits. On rejoint alors les approches technologiques de l'assemblage hybride M.C.M (Multi Chip Modules) 3D.

Deux travaux de recherche menés au LAAS-CNRS illustrent nos propos :

- les microsystèmes multicapteurs sans fil, autonomes, répartis (projet SMARTGEC en collaboration avec EDF R&D) pour la surveillance des structures béton [17]. Ces microsystèmes (figure 5) intègrent des microcapteurs de mesures environnementaux (pression, humidité, température, déformation de structure) et des capacités d'analyse, d'autodiagnostic et de communication pour la surveillance du Génie Civil. L'objectif applicatif de ce travail est de créer un maillage de microsystèmes intelligents capables de collecter des



Figure 5. Assemblage 3D du microsystème (projet SMARTGEC).

informations sur les caractéristiques physiques de son environnement.

- les microsystèmes fluidiques qui concernent essentiellement l'analyse biologique et les procédés de synthèse chimique. L'essentiel de l'effort au LAAS est centré sur les systèmes d'éjection et les systèmes complexes : multifonctionnels de type Lab on Chip ou Fab on Chip, utilisant l'intégration hybride (polymères/silicium). Les études portent entre autres sur les injecteurs matriciels pour la génomique [18] : matrice d'éjecteurs réalisée sur membrane diélectrique fine intégrant les résistances chauffantes en polysilicium ou les microdiodes fluidiques (micro-valves sans partie mobile) [19].

3. Les "objets intelligents" : une perspective applicative émergente

Les perspectives applicatives de l'électronique numérique sont conditionnées en ampleur et en vitesse de croissance par la poursuite des progrès de la technologie microélectronique. Au rythme actuel, les experts considèrent que l'on va évoluer avec la loi de Moore jusqu'en 2012/2015. Cette analyse s'appuie sur le fait que les composants unitaires qui serviront de base à ces développements ont déjà été réalisés en laboratoire... Elle n'enlève rien à l'intérêt des efforts technologiques à réaliser pour industrialiser des objets d'une complexité encore jamais envisagée et pour innover encore au niveau des machines et des procédés comme, par exemple, l'introduction d'oxydes de grille à forte valeur de la constante diélectrique [20].

Ce que nous considérons ici se situe dans la filière des microsystèmes et de l'intégration des technologies pour la réalisation d'ensembles multifonctionnels. L'hypothèse de travail est celle d'une multiplication des systèmes répartis, communicants. Notre guide conceptuel est celui de la surveillance par réseau de capteurs et fusion multisensorielle. On peut en effet distribuer, ou mettre en réseau, nombre de ces composants de très petite taille pour obtenir, par fusion de données, différentes fonctionnalités plus que celle d'origine individuelle (Figure 6). On peut aussi combiner, sur un même substrat parmi les constituants du microsystème des parties processeurs, ouvrant ainsi des perspectives de diagnostic autonome pour des applications nouvelles et originales dans l'environnement : climat, pollution..., dans les transports, dans les services, dans la surveillance des personnes et des biens, dans la surveillance épidémiologique, dans la surveillance militaire...

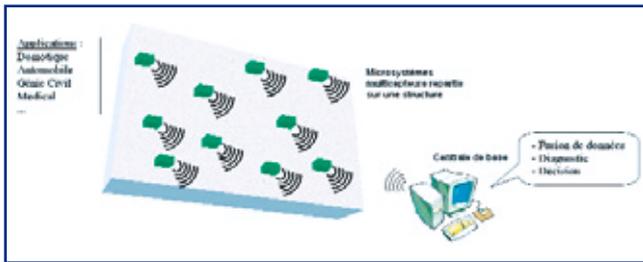


Figure 6. Réseau multicapteurs et fusion de données.

L'architecture générique est caractérisée par des prises d'informations multiples, communiquant "sans fil" entre elles, collectées sur un ordinateur central avec des missions de diagnostic et d'alerte. Si les principes sont classiques et généraux, le développement technologique peut être très différent en fonction de l'application : autonomie des capteurs, procédures de transmission, algorithmes de diagnostic, caractéristiques topologiques pouvant aller de la matrice intégrée (cas des Bio-Puces) à la surveillance climatique mondiale (prévisions des catastrophes climatiques). On prendra trois exemples pour illustrer nos propos :

- Celui de l'automobile qui a constitué un premier marché de masse bien adapté à la "pénétration" des micro-systèmes avec les premiers micro-accéléromètres - capteurs inertiels simples - dédiés à l'installation des "airbags". En dix ans, la part de l'électronique a atteint de 20 à 30 % du coût d'une voiture : capteurs de pression des pneus, des gaz de moteur, ou de l'huile, capteurs de flux d'air ou d'oxygène, capteurs de vitesse permettant de régler l'injection du véhicule, capteurs d'autocollision, microgyroscopes de contrôle dynamique du véhicule pour des applications de suspension active ou d'ABS... Tous ces systèmes sont liés à des transpondeurs permettant de transmettre l'information, ou à des systèmes permettant de rectifier les dysfonctionnements détectés ou de déclencher des alarmes dans le cas d'une surveillance d'hypovigilance du conducteur [21].
- Celui du domaine militaire avec des projets tel SMART DUST aux USA [22] réalisé par l'université de Berkeley où l'objectif visé est de créer un réseau intelligent de micro-ordinateurs de très petite taille (1mm³). En fait, il s'agit de puces silicium, capables de traiter les informations provenant de capteurs (accéléromètres, thermomètres, capteurs lumineux...) et de communiquer leurs observations en se mettant en relation avec les centaines d'autres éléments qui sont placés à proximité.
- Celui de la domotique (système PROSAFE [23]) avec notamment la surveillance des biens et des personnes. Le LAAS s'est spécialisé sur la surveillance de personnes âgées dans le cas de situations à risques (chute, malaise...), basée sur des capteurs disposant de fonctions intelligentes avec une capacité minimale propre de traitement et de communication.

Ces capteurs s'insèrent en réseau dans une architecture de contrôle qui leur permet en interaction avec leur environnement de disposer de capacités décisionnelles et réactives, en association avec des systèmes d'aide à la décision.

En fait, tous les secteurs sont potentiellement demandeurs en micro-systèmes :

- l'espace, où des micro-systèmes embarqués participeront au guidage de microsattellites (quelques kilos) par des micro-systèmes de propulsion (technique de micropropulsion),
- les télécommunications, où les micro-systèmes hyperfréquences multiplient les applications aussi bien en téléphonie mobile qu'en liaisons satellitaires. Dans ce même secteur, les micro-systèmes optiques sont aussi de plus en plus engagés [24],
- l'industrie agroalimentaire, où le mûrissement des fruits est déjà suivi grâce à des microcapteurs chimiques,
- la médecine, où l'on développe des actes chirurgicaux robotisés (minimal invasive) et des diagnostics in vivo (notamment cardiaque) et par prélèvement biologique (laboratoires sur puces pour effectuer des tests et analyses à moindre coût),
- l'aéronautique, où l'on étudie l'insertion dans les volets et sur les ailes des avions, de maillages de micro-volets afin d'augmenter les performances et les économies d'énergie.

Le nombre de domaines industriels concernés n'est pas définitif car les micro-systèmes seront progressivement partout présents par les fonctions supplémentaires qu'ils apportent. La diversité des applications permet d'utiliser des matériaux encore moins coûteux que le silicium, notamment les polymères qui devraient ouvrir aux PME une nouvelle voie d'accès vers l'innovation en microtechniques.

D'autre part, l'évolution récente de ces concepts vers des applications réparties comme les micro-systèmes intelligents en réseau, rend le marché plus attractif (taux de croissance de l'ordre de 18 % par an). Des études aussi bien en Europe, qu'aux États-Unis et au Japon démontrent cette perspective dont la dynamique passe aussi par l'application de procédés de fabrication stables et fiables, comparables à ceux employés dans la technologie microélectronique. On estime que, d'ici dix ans, le nombre de micro-systèmes fabriqués dans le monde croîtra d'un facteur 10 000 [25]. Ces systèmes ont progressé, et progresseront encore rapidement pour deux raisons :

- ils ont su trouver des domaines d'applications de masse (comme l'automobile et les télécommunications), donc des zones de rentabilité à partir desquelles ils pourront essaimer vers d'autres applications industrielles,

- ils mettent en oeuvre une interdisciplinarité, restreinte dans un premier temps mais en croissance rapide, puisqu'elle couple les sciences de l'ingénierie et des disciplines diverses : électronique, physique, chimie, biologie, etc. Cette interdisciplinarité nécessaire et féconde n'exclut pas qu'assez rapidement des problèmes d'intégration de systèmes se posent, invitant à développer les fonctions algorithmiques, comme c'est le cas en téléphonie.

Au-delà des promesses aujourd'hui clairement perçues, la translation des micro aux nanosystèmes semblent s'imposer au delà de 2012-2015. D'un ordre de grandeur 10 à 100 fois plus petit, cette évolution soumise à des contraintes d'interdisciplinarité plus larges et proposant des services sans usages sociaux encore établis, pose des problèmes d'une autre ampleur.

4. Nouvelles perspectives des Micro aux Nanosystèmes

L'objectif vers les nanotechnologies (échelle spatiale de l'ordre du nanomètre) s'est imposé aux chercheurs d'abord comme une réponse à la microélectronique ultime, qui, au delà de 2015, arrive aux limites des procédés technologiques connus. Avec les nanotechnologies, la façon d'aborder la technologie de la miniaturisation est d'une nature radicalement différente. Contrairement aux microtechnologies, nous sommes dans une approche "bottom-up" basée sur l'exploitation des propriétés intrinsèques de la nature et des molécules. L'espoir est quand même plus ouvert à d'autres applications que l'électronique dans la mesure où on imagine pouvoir découvrir et exploiter de nouveaux mécanismes et de nouveaux matériaux, en travaillant dans la structure intime atomique ou moléculaire : les nano-tubes de carbone sont une illustration de cette possibilité. Les publications sur le sujet sont depuis quelques années nombreuses soit qu'elles explorent le procédé de fabrication des nano-tubes qui fournirait de nouvelles générations de matériaux composites, soit qu'elles explorent les propriétés électroniques et bio-chimiques de ces nouvelles structurations de la matière [26]. En fait, on explore l'idée de concevoir et réaliser des matériaux qui, par leurs configurations atomiques et moléculaires, comporteraient des effets de structuration spontanée et des possibilités "intrinsèques" de mesure et d'actionnement. C'est une vision d'intégration atomique du concept d'objet intelligent que l'on retrouve dans les effets déjà identifiés de mémoires de forme, d'auto-assemblage, de moteurs moléculaires...

Les résultats actuels en laboratoire permettent d'imaginer la révolution qu'entraînera l'introduction de ces nouveaux

"nano-objets" dans des dispositifs complexes, exploitant des fonctions encore inaccessibles aujourd'hui.

Au delà des incertitudes liées à des systèmes qui ne viendront pas à maturité avant dix-quinze ans, certains des domaines d'application des nanosystèmes sont, dès à présent bien identifiés :

- les systèmes dédiés à la santé pour l'analyse et le diagnostic permettent d'anticiper les besoins thérapeutiques, avec en particulier : les biopuces, les laboratoires sur puce, les techniques de surveillance in vivo et les systèmes d'alerte associés, les organes artificiels, les thérapies anti-cancéreuses exactement ciblées, les délivrances localisées in vivo de médicaments en fonction des réactions de l'organisme, la surveillance des personnes âgées ou handicapées.
- La protection de l'environnement et le développement durable. Déjà, les microsystèmes sont capables de capter le degré de pollution de l'eau et de mettre en oeuvre des dispositifs d'alerte sur ce point. Ils sont aussi capables de proposer des dispositifs dans les pots d'échappement des automobiles assurant une meilleure régulation des moteurs thermiques et, par voie de conséquence, une amélioration des rejets gazeux. Nous donnerons deux exemples d'extension prévisible :
 - * En matière de protection de l'environnement, les nanotubes de carbone permettant d'éliminer la dioxine ou de filtrer des gaz et des liquides.
 - * En matière de développement durable : les mêmes nanotubes semblent pouvoir être un support de stockage ultra léger de l'hydrogène pouvant être utilisé dans les futures piles à combustible. Les installations photovoltaïques sont encore peu utilisées pour la production électrique en raison de leur faible rendement actuel. Celui-ci pourrait être porté de 10 % à 30 %, voire 40 % de l'énergie solaire reçue. Une nouvelle approche de l'énergie domestique en résulterait...
- Les domaines de la sécurité : le domaine des textiles intelligents est actuellement très exploré (vêtements délivrant du parfum grâce à des micro-encapsulation, vêtements incorporant des capteurs pour les usages sportifs - surveillance cardiaque, tensiomètre -, vêtements incluant des systèmes d'information sur le textile permettant par exemple d'auto-gérer les machines à laver, vêtements avec système de localisation du type GPS pour, par exemple, donner l'alarme quand un enfant s'éloigne d'un certain périmètre).

Cela ne constitue que des exemples en gestation, parmi d'autres, de la façon dont les nanosystèmes vont peu à peu irriguer les industries traditionnelles, et de façon quelquefois imprévue. Au total, c'est l'ensemble du secteur industriel traditionnel et la totalité des objets d'usage quotidien et

des produits de consommation courante qui vont être bouleversés par l'irruption massive de ces nouvelles "nano-puces" électroniques.

5. Conclusions

Le développement technologique se développe sur une diminution constante des coûts, et avec une richesse croissante des fonctions proposées aux utilisateurs. Ceci est vrai dans le domaine des technologies de pointe (informatique, biologie, électronique, chimie...), aussi bien que dans celui des technologies à très grande diffusion qui concernent chaque citoyen (communication, médecine, transports, domotique...). Et, bien sûr, la Recherche joue un rôle majeur dans cette évolution.

L'exemple le plus spectaculaire est celui de la microélectronique, qui est, depuis des décennies, l'un des principaux moteurs du développement socio-économique. L'essor exponentiel des performances et des marchés (informatique, télécommunications, multimédia) a été rendu possible par une évolution constante des idées et des techniques de fabrication, accélérée par des ruptures technologiques profondes, et basée sur des recherches menées en commun par les physiciens, chimistes et électroniciens. On montre dans cet article qu'il y a deux axes de progrès technologique en microélectronique :

- celui de l'électronique numérique et des circuits intégrés,
- celui de l'intégration des technologies pour des microsystèmes multifonctionnels.

Ces deux axes s'ouvrent à moyen terme 2012/2015 sur des technologies extrêmes sur puces ou sur puces interconnectées par des moyens de communication (optique ou électromagnétique) avec des dimensions nanométriques. Les espoirs, tant économiques que sociaux, que l'on peut fonder sur l'essor des nanosystèmes, sont réels (on estime leur marché en 2015 à plusieurs centaines de milliards d'Euros) mais pas acquis. Il semble, dès maintenant, nécessaire d'associer étroitement les industriels à une veille technologique à moyen terme et de leur permettre d'orienter, dans certains cas, les développements technologiques de base. Nous entreons alors véritablement dans le monde des Nanosciences.

Références

- [1] J. Bardeen, W. H. Brattain. The transistor, a semi-conductor triode, *Phys. Rev.*, N°74, (Cambridge University Press, New York), pp. 230-231, 1948.
- [2] W. Shockley. The theory of *p-n* junctions in semiconductors and *p-n* junction transistors, *Bell Syst. Tech. J.*, n°28, pp. 435-489, 1949.
- [3] G. Musi. La production électronique retrouve le chemin de la croissance, *Electronique Internationale Hebdo*, n°565, pp. 16, 17 juin 2004.
- [4] Gordon E. Moore. Cramming more components onto integrated circuit, *Electronics*, Vol. 38, n°8, 19 avril 1965.
- [5] http://www.telecom.gouv.fr/programmes/cue_progist.htm
- [6] J. Bardeen. Semiconductor research leading to the point-contact transistor, in *Les Prix Nobel en 1956*, edited by K. M. Siegbahn et al. (P. A. Nordstet & Sons, Stockholm), pp. 77-99; edited and reprinted in *Science*, n°126, pp. 105-112, 1957.
- [7] J. Hoerni. Planar Silicon Transistors and Diodes, Paper presented at the 1960 Electron Devices Meeting, Washington, D.C. - October 1960, Bruce Deal Papers, 88-033, Stanford Archives and Special Collections.
- [8] W. Shockley. The path of Junction Transistor, *IEEE Transaction on Electron Devices*, (reprise de 1976) nov 1984.
- [9] W. Shockley. Transistor technology evokes new physics, *Nobel Lecture*, pp. 344-374, 11 December, 1956.
- [10] R. A. Conant, P. M. Hagelin, U. Krishnamoorthy, M. Hart, O. Solgaard, K. Y. Lau, R. S. Muller. A raster-scanning full-motion video display using polysilicon micromachined mirrors, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 83, Issues 1-3, pp. 291-296, 22 May 2000.
- [11] E. S. Kolesar, P. B. Allen, J. W. Wilken, J. T. Howard. Implementation of micromirror arrays as optical binary switches and amplitude modulators. *Thin Solid Films*, Vol. 332, Issues 1-2, pp. 1-9, 2 November 1998.
- [12] H. Camon, F. Larnaudie. Fabrication, simulation and experiment of a rotating electrostatic silicon mirror with large angular deflection, *13th IEEE Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'2000)*, Miyazaki (Japon), pp.645-650, janvier 2000.
- [13] H. Fujita and H. Toshiyoshi. Microactuators and their applications, *Microelectronics Journal*, Vol. 29, Issue 9, September pp. 637-640, 1998.
- [14] Dan Haronian. A low-cost micromechanical accelerometer with integrated solid-state sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 84, Issues 1-2, pp. 149-155, 1 August 2000.
- [15] <http://www.nexus-emsto.com/>
- [16] C. Rossi, A. Chaalane, B. Larangot, V. Conedera, D. Briand, P.Q. Pham, N.F. De Rooij, J. Kohler, K. Jonsson, H. Kratz, M. Puig Vidal, P. Miribel, E. Montane, J. Samitier. Pyrotechnical microthrusters for space application, *International Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications (PowerMEMS'2003)*, Makuhari (Japon), 4p., 4-5 Décembre 2003.
- [17] R. Maurice, E. Campo, D. Estève, D. Bouchet. Méthodologie de conception pour la réalisation d'un microsystème multicapteurs autonome communicant, *JNRDM 2004, 7^{me} Journées Nationales du Réseau Doctoral de Microélectronique*, Marseille, 4-6 mai 2004.

- [18] T. Phou, A.M. Gué. A microarray ejectors for in-situ oligonucleotide synthesis on DNA chips. *MME'02*, Sinaia (Roumanie), pp.149-152, octobre 2002.
- [19] M. Anduze, S. Colin, H. Camon. Les microdiodes fluidiques : Une solution alternative aux microvalves: Fluidic microdiodes: An alternative for microvalves, *Mécanique & Industries*, Vol. 2, Issue 4, pp. 349-354, July 2001.
- [20] G. Ghibaud, R. Clerc, E. Vincent, S. Bruyère, J. L. Autran. Gate dielectrics for ultimate CMOS technologies – Limitations and alternative solutions, *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IV - Physics*, Vol. 1, Issue 7, September pp. 911-927, 2000.
- [21] D. Estève, B. Jammes, A. Titli, M. Gonzalez-Mendoza et A. Santana-Diaz. Hypovigilance diagnosis module: developments and experiments, *Contrat AWAKE*, n°IST-2000-28062, 16p., septembre 2002.
- [22] <http://robotics.eecs.berkeley.edu/~pister/SmartDust/>
- [23] M. Campo, D. Estève, M. Chan. L'apprentissage des pratiques et des habitudes de vie : une clé de l'automatisation domotique. *Revue Signaux* (association des anciens élèves de l'ISEP), n°98, pp. 4-12, mars 2004.
- [24] S. Renard, B. Estivals. L'émergence des microsystèmes optiques dans les réseaux de télécommunications Photoniques, n°2, pp.27-30, Juin 2001.
- [25] Claude Sannier, sénateur. L'évolution du secteur des semi-conducteurs et ses liens avec les micro et nanotechnologies, *Office Parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques*, Tome I : Rapport d'information n°566 Assemblée Nationale et n° 138 Sénat, 166p., 22 janvier 2003.
- [26] J. Chung, J. Lee. Nanoscale gap fabrication and integration of carbon nanotubes by micromachining. *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 104, Issue 3, pp. 229-235, 15 May 2003.

1955-2005. L'ISEP fête son 50^{ème} anniversaire

L'ISEP a été fondée en 1955. Cette année sera l'occasion de nombreuses manifestations pour fêter cet événement. Elles mettront en valeur notre école, riche d'un passé, d'une culture et d'une histoire qui lui sont propres, et porteuse d'un projet d'éducation et de formation en adéquation avec les besoins des entreprises.

En participant à des événements scientifiques, sportifs, culturels ou humanitaires, nous avons l'ambition de rassembler et rapprocher les membres de l'ISEP, les anciens diplômés et les élèves, nos partenaires économiques et institutionnels, et d'accroître la notoriété de l'école.

✿ LES ÉVÉNEMENTS PRÉVUS ✿

- Livre sur le cinquantenaire de l'ISEP / une école d'ingénieurs du 3^{ème} millénaire, 50 ans d'histoire - sortie prévue en septembre 2005 – sur souscription.
- Exposition itinérante à travers différents musées nationaux (par exemple, "L'Observatoire" à Paris), réalisée par des isépiens, présentant la première expérience de télécommunication sans fil de Edouard Branly ; cette exposition s'inscrit dans le cadre de "l'année mondiale de la physique" et plus particulièrement, du "centenaire de la 1^{ère} communication sans fil" / toute l'année 2005.
- Inauguration d'une sculpture symbolisant les arts et les sciences (partie "creuse") de Dominique de Seguin dans le hall d'accueil de l'école dont le pendant (partie "pleine") sera installé dans une école d'enseignement artistique / 27 janvier 2005.
- Conférence "L'effet photoélectrique, de la découverte à l'interprétation" le 17 mars 2005 (date anniversaire de la publication par Einstein du célèbre article dans lequel il interprète l'effet photoélectrique, article qui lui vaudra le prix Nobel de physique) - L'effet photoélectrique de Hertz à Lenard, par Jean-Claude Boudenot et L'interprétation d'Einstein, par Gilles Cohen-Tannoudji - à l'ISEP - sur réservation.
- Participation massive d'élèves et de membres du personnel aux "Foulées du Luxembourg", une course parisienne de 10 km, au profit de la recherche médicale / premier WeekEnd d'octobre 2005.
- Tables rondes sur des thèmes liés aux sciences et aux grandes écoles / "Les défis de l'interculturalité", "L'ingénieur entrepreneur", "De la nanoélectronique à l'électronique moléculaire", "Quelle place pour une école catholique d'ingénieurs dans le monde d'aujourd'hui ?" / 20 octobre 2005, au ministère de la Recherche- sur réservation.
- Remise de diplômes "spéciale anniversaire" / Parrainage IBM/ 18 novembre 2005.
- Gala des élèves Soirée anniversaire des élèves de l'ISEP / 18 novembre 2005.
- Messe concélébrée autour de l'Abbé Vieillard en l'Eglise St Ferdinand des Ternes, suivie d'un concert donné avec des anciens / le 25 novembre 2005.
- Soirée festive au Musée des Arts Forains / jeudi 1^{er} décembre 2005 (entreprises -personnel - anciens -élèves présidents d'associations).

Enfin, l'ensemble des événements qui rythmeront la vie de l'école en 2005 seront aussi autant d'occasions pour "afficher" le cinquantenaire.