



La fabrication d'une puce nécessite deux cents à trois cents étapes élémentaires

## Circuits intégrés : de l'idée à la puce

PAR MARION CHAMPION

À l'Institut Leti, des chercheurs, des techniciens et des ingénieurs conçoivent et optimisent les puces électroniques de demain. Ils sont architectes de composants, spécialistes des matériaux, lithographes... Six cents à mille métiers différents gravitent autour de la conception et de la fabrication d'une puce. Explications.

**E**lles nous accompagnent au quotidien ! Dès lors que nous payons avec une carte bancaire, que nous téléphonons avec un mobile, que nous travaillons sur un ordinateur, que nous regardons la télévision... Les puces électroniques poursuivent leur ascension dans notre vie courante. Pour les concevoir, les optimiser et imaginer de

nouvelles applications, près de 1 500 chercheurs, techniciens et ingénieurs travaillent au sein de l'Institut Leti (Laboratoire d'électronique et de technologies de l'information à Grenoble). Ils sont architectes pour concevoir les plans du circuit ou de ses composants, spécialistes des matériaux, dessinateurs DAO (dessin assisté par ordinateur), graveurs, lithographes, ►►

III► informaticiens... La fabrication d'une puce peut se comparer à la construction d'un immeuble. L'architecte commence par concevoir les plans, il faut ensuite poser les fondations de l'immeuble, et enfin le construire étage par étage... Pour une puce électronique, c'est pareil ! L'architecte conçoit les plans du circuit et de ses composants ; des spécialistes simulent son bon fonctionnement, des dessinateurs DAO élaborent des masques qui serviront à la fabrication, et les technologues des salles blanches construisent chaque étage du circuit grâce à différentes techniques : le dépôt de couches, la lithographie, l'implantation ionique, la gravure...

### Avoir un coup d'avance

Au total, la fabrication d'une puce nécessite deux cents à trois cents étapes élémentaires. Un chiffre

en constante augmentation puisque les scientifiques intègrent chaque jour de nouvelles fonctions et de nouveaux composants. « En effet, aujourd'hui nos téléphones équivalent, en termes de puissance de calcul, aux ordinateurs qui existaient il y a quinze ans, explique Bruno Mourey, chef du Département intégration hétérogène sur silicium. Et demain, à quoi ressembleront ces puces ? Elles seront les mêmes qu'aujourd'hui, mais en plus petit, le but étant d'intégrer toujours plus de fonctions sur un minimum de surface. Hormis la miniaturisation, nous avons d'autres objectifs à atteindre, comme la réduction des coûts et l'augmentation des performances, notamment en termes d'autonomie. » Pour cela, l'Institut Leti travaille le plus souvent en collaboration : sur des projets en amont avec des universités, et plus en aval avec des industriels

**S**i l'on compare un circuit à une petite ville constituée de plusieurs quartiers – pour stocker des informations, faire des calculs, communiquer... –, on peut dire que chaque quartier contient des millions de composants : du garage au réverbère en passant par des maisons... Et dans une puce, ce sont ces millions de composants, des transistors pour la plupart, qui m'intéressent. » Au sein du Laboratoire des dispositifs innovants, Thomas Ernst est architecte de composants. « En cherchant à réduire au maximum les dimensions des puces, de nouveaux problèmes physiques apparaissent. Par exemple, les matériaux, jusqu'alors bien isolés, deviennent perméables à l'échelle atomique ce qui induit une perte d'énergie intolérable pour le circuit. Mon rôle est donc de trouver des solutions à ces difficultés physiques en m'appuyant sur les expérimentations réalisées par les équipes des salles blanches et sur les simulations physiques. » Comment ? En concevant de nouveaux composants. « Comme pour une maison, nous commençons par définir l'architecture d'un composant : le nombre d'étages, la hauteur, les matériaux avec les spécialistes des procédés de fabrication. Au



IMAGINER

“ Définir l'architecture d'un composant ”

THOMAS ERNST discute avec un doctorant pour la conception d'un nouveau composant

**Thomas Ernst,** architecte de composants

Bac S – Master en ingénierie électrique et électronique, INPG Grenoble – Master sciences sur la physique avancée et les technologies des semi-conducteurs à l'Université Joseph Fourier Grenoble – Doctorat à l'INPG de Grenoble

total, il peut y avoir plus de cent cinquante étapes à noter, sachant que la moindre erreur sur l'une d'entre elles entraînera immédiatement un dysfonctionnement du composant. » Au quotidien, Thomas Ernst effectue des allers-retours permanents entre

l'expérimentation et la simulation. La simulation pour mieux comprendre le fonctionnement du composant. Et l'expérimentation en salle blanche pour suivre le “chantier” comme un architecte et voir si la réalité correspond bien à ce qu'il avait imaginé.

**F**ace à son ordinateur, un cahier des charges en main, Nicole Bouzaida dessine. Le dessin en question n'est autre que le schéma du futur biocapteur qu'on lui a demandé de concevoir. Au Laboratoire environnement conception, Nicole Bouzaida est spécialiste du dessin assisté par ordinateur (DAO). Aux moyens de logiciels spécialisés, elle dessine les plans d'un circuit. Ces plans permettront d'élaborer les masques, sorte de pochoirs qui serviront, par la suite, à la fabrication du circuit en salle blanche. « Nous sommes la marche entre le concepteur qui imagine le circuit et les technologues qui le construisent en salle blanche. » Nicole Bouzaida a travaillé sur un biocapteur capable de détecter des matières toxiques. « Ici, tout est fait sur mesure. Nous essayons bien sûr d'automatiser nos outils pour éviter les erreurs qui sont possibles dès lors qu'intervient la main de l'homme. Mais à chaque nouvelle demande du concepteur, nous devons réadapter nos outils informatiques et notre savoir-faire. » Et aujourd'hui, les demandes deviennent de plus en plus complexes. Avant, pour fabriquer un circuit intégré, les couches étaient empilées les unes sur les autres du même côté de la plaquette de silicium, mais aujourd'hui les concepteurs imaginent des circuits en 3D avec des couches sur la face avant, la face arrière...

« Mon parcours? Je viens des salles blanches! Là-bas, je suis passée par toutes les étapes de fabrication: la lithographie, la gravure... Et le fait de toucher



**DESSINER**

“ Tout est fait sur mesure ”

**NICOLE BOUZAIDA s'imprègne du cahier des charges d'un nouveau biocapteur pour dessiner les masques nécessaires à sa fabrication**

à différents métiers de la fabrication m'a permis d'apprendre chaque aspect de l'intégration et d'engranger des connaissances très utiles pour la conception des masques. Aujourd'hui, une nouvelle génération de dessinateurs nous a rejoints au laboratoire. Ils sortent d'écoles spécialisées avec une bonne approche informatique, mais une moindre connaissance

technologique de terrain. C'est pourquoi nous formons une équipe parfaitement complémentaire: mélange de nouvelle et d'ancienne génération, d'informatique et de formation technologique. »

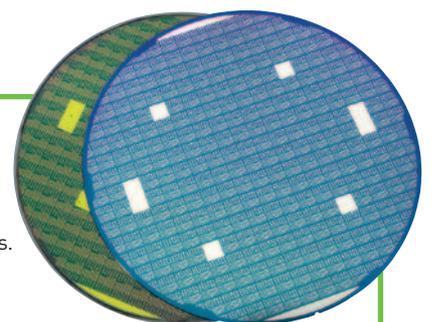
**Nicole Bouzaida, dessinatrice DAO**

Bac S - IUT de chimie à Rennes - License et Maîtrise de chimie à l'Université de Rennes

comme STMicroelectronics, Soitec, Sofradir, Biomérieux... « Lorsqu'on travaille sur les circuits intégrés, il faut toujours avoir un coup d'avance, précise Stéphanie Gaugiran, lithographe. Les circuits sur lesquels nous travaillons actuellement seront en production d'ici un ou deux ans. Et dans un projet avec un industriel, il faut développer rapidement pour rester dans l'innovation. » Aujourd'hui leader français dans ce domaine, l'Institut Leti est également très bien positionné sur la scène internationale: il est l'une des cinq entités au monde, aux côtés d'IBM ou encore de Caltech, capables de regrouper au sein d'une salle blanche une telle concentration d'équipements et de compétences. Ces techniques s'associent également à la biologie ou encore aux sciences de l'énergie, pour proposer des solutions de plus en plus innovantes aux nouveaux défis de notre société. ■

### Puce ou circuit ?

Le circuit intégré, aussi appelé puce électronique, est un élément électronique qui intègre différents composants et différentes fonctions. Aujourd'hui les circuits intégrés frôlent le milliard de composants, à 99 % des transistors.



**P**our la fabrication, direction la salle blanche. Équipée d'une combinaison intégrale, d'un masque et de lunettes protectrices, Stéphanie Gaugiran parcourt les différentes zones de la salle blanche – la gravure, le dépôt... – avant d'arriver à son poste de travail : la lithographie. Étape clé, la lithographie permet de matérialiser les premiers motifs sur le circuit. En effet, Stéphanie Gaugiran reproduit sur une résine photosensible, déposée sur la plaque de silicium, le dessin du circuit à réaliser. « Je projette l'image du masque, élaboré par les dessinateurs DAO, sur la plaque recouverte de résine. Lorsque j'envoie la lumière à travers le masque, certaines zones de la plaque sont exposées. Ces nouveaux motifs, créés par la lumière, déterminent les zones où le courant pourra passer. Il me reste ensuite à développer ma plaque comme on développerait une photographie, puis à l'apporter à d'autres collègues de la salle blanche qui poursuivront les étapes de fabrication. » Si Stéphanie Gaugiran travaillait dans l'industrie, son



**FABRIQUER**

“ Nous cherchons à atteindre des dimensions plus petites ”

**STÉPHANIE GAUGIRAN** apporte les plaques de silicium à traiter au poste de lithographie

travail s'arrêterait à cette production. Mais à l'Institut Leti, elle est surtout chargée de démontrer une faisabilité. « Nous évaluons de nouvelles résines photosensibles et de nouveaux matériaux pour la lithographie, car nous cherchons à

atteindre une résolution toujours plus grande et donc des dimensions plus petites. Notre mot d'ordre reste la miniaturisation. Et si, à chaque fois, nous pensons arriver au bout des limites de cette miniaturisation, nous avons, pour le moment, toujours réussi à les repousser! »

**Stéphanie Gaugiran,** lithographe

Bac S – Prépa Math Sup Math Spé – Ecole d'ingénieur, spécialisation Physique des composants pour la microélectronique – Thèse au CEA

**D**ernière étape: les tests. Dans l'un des bâtiments de Minattec se trouve l'équipe du Laboratoire simulation et caractérisation électrique. C'est ici que Fabienne Allain procède aux tests qui valideront ou non la nouvelle technologie. « En quoi consistent-ils? Lorsqu'un lot d'une quinzaine de plaques nous arrive des salles blanches, nous vérifions leur fonctionnement électrique. Nous testons jusqu'à trois mille paramètres par puce. Ils peuvent être acquis sur différents composants: des transistors, des mémoires, des capacités... Et certains d'entre eux ne mesurent que quelques dizaines de nanomètres. La nature de ces tests dépend de ce que souhaite démontrer le concepteur. Mais au final, nous pouvons traiter plusieurs milliers de résultats par lot! » Une mission assurée par les machines spécialisées du laboratoire. Et Fabienne Allain est, justement, chargée d'écrire les programmes informatiques qui automatiseront ces machines: l'enchaînement des puces, les déplacements... « C'est d'ailleurs ce côté scientifique de l'informatique qui m'a attirée ici: le fait de concevoir constamment des nouveaux programmes et



**TESTER**

“ Nous testons jusqu'à trois mille paramètres par puce ”

**FABIENNE ALLAIN** observe la plaque qu'elle s'apprête à caractériser sur un testeur paramétrique

de les voir fonctionner par la suite. » Car pour chaque nouvelle technologie, il faut réécrire un programme de tests appropriés. « Les composants évoluent au fil du temps, et les tests suivent cette évolution. Par exemple aujourd'hui, nous effectuons des tests en température pour accélérer le

vieillesse des circuits et vérifier leur fiabilité. » À l'époque, l'Institut Leti avait besoin d'informaticiens pour mettre au point les premiers tests automatiques, car tout était manuel. Aujourd'hui notre laboratoire a beaucoup évolué: nous avons développé un parc de machines plus important et plus fiable.

**Fabienne Allain,** technicienne en test et caractérisation

Bac S - IUT Informatique de Grenoble