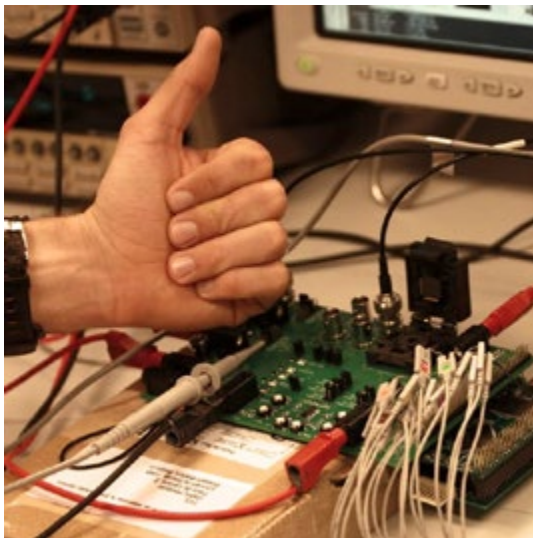


HISTOIRES DE MON LABORATOIRE

Le laboratoire de microélectronique de l'UCL de 1958 à nos jours

CHARLES TRULLEMANS



ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE LOUVAIN

HISTOIRES DE MON LABORATOIRE

Le laboratoire de microélectronique de l'UCL de 1958 à nos jours

CHARLES TRULLEMANS

AVEC DES CONTRIBUTIONS DE

DAMIEN BERTRAND, JEAN-PIERRE COLINGE, PIERRE DE PONTIÈRE, LAURENT DEMEÛS,
DENIS FLANDRE, ALAIN FONTAINE, LAURENT FRANCIS, BERNARD GENTINNE,
ISABELLE HUYNEN, ANDREAS KAISER, YVES LEDUC, MAURICE LOBET, JEAN NOËL,
JEAN-PIERRE RASKIN, AKIRA TERAQ, ANNE-MARIE TRULLEMANS ANCKAERT,
DANIELLE VANHOENACKER JANVIER, PIERRE VERLINDEN,
MICHEL VERLEYSSEN ET BRIGITTE WÉNIN DUPONT

ET LE COMPTE-RENDU DES INTERVIEWS DE

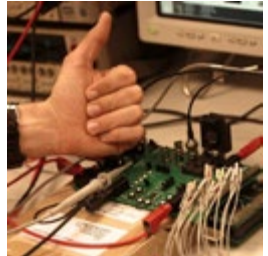
DAVID BOL, ANDRÉ CRAHAY, PAUL JESPERS, CHRISTIAN RENAUX, PASCAL SIMON,
ANDRÉ VANDER VORST ET THIERRY WATTEYNE.

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE LOUVAIN
PÔLE D'INGÉNIERIE ÉLECTRIQUE

Après plusieurs mois d'attente du retour de fabrication, le circuit Sleep-Walker est testé le 9 septembre 2011 par l'équipe de ses jeunes concepteurs.

La tension est à son comble lorsque la procédure de test est lancée. Après quelques secondes une LED jaune s'allume, preuve que le système est fonctionnel.

Photo Julien De Vos, 2011.



Université catholique de Louvain

École polytechnique de Louvain

Institut des Technologies de l'Information et de la Communication,
Électronique, et Mathématiques appliquées (ICTEAM)

Publié par le pôle d'Ingénierie électrique

Date d'impression : novembre 2013. Version numérique : août 2014.

© Charles Trullemans (UCL/ICTEAM/ELEN)

Bâtiment Maxwell

Place du Levant, 3 - bte L5.03.02

B-1348 Louvain-la-Neuve

ἐὰν μὴ ἔλπηται, ἀνέλπιστον οὐκ ἐξευρήσει,
ἀνεξερεύνητον ἐὼν καὶ ἄπορον.

*Sans l'espérance, vous ne trouverez
pas l'inespéré, qui est introuvable et
inaccessible.*

Héraclite d'Ephèse
Clément, Stromates, II, 24, 5.
Ve siècle av. JC

SOMMAIRE

Avant-propos	1
Préface	5
Prologue	7
La création	35
Les pionniers	67
La chaîne pilote	127
L'expansion	188
Épilogue	251
Tables	261

AVANT - PROPOS

Ce livre raconte des histoires qui ont jalonné la vie de mon laboratoire. Je ne dis pas « mon laboratoire » pour souligner que je le possède, c'est le contraire. Je dis « mon laboratoire » car c'est le laboratoire auquel j'appartiens.

The Electronics Laboratory of the Institut d'Électrotechnique of Louvain University, Electronic Research laboratories, Laboratoire de microélectronique, Unité des courants faibles (FAI), Unité des dispositifs et circuits électroniques (DICE), aujourd'hui une composante aux frontières mal définies à l'intérieur du pôle d'Ingénierie électrique (ELEN). Comment faut-il le nommer ? Je dirai en général : *le laboratoire* ou plus simplement *le labo*.

À l'occasion du cinquantième anniversaire de sa création, la faculté a publié le livre « Des écoles spéciales à l'EPL : 50 ans de science et technologie à l'UCL ». Lorsque j'ai répondu à la demande de Marcel Crochet en entamant la rédaction d'un chapitre de ce livre, mon angoisse de la page blanche était surtout l'angoisse de trouver les sources qui me permettraient de remplir l'immense espace blanc imparti au chapitre. La microélectronique est un domaine où le passé lointain n'est âgé que de quelques années. Livres et archives n'y ont pas la vie longue. J'ai donc appelé de nombreuses personnes à m'apporter l'aide de leur mémoire. Beaucoup ont répondu, parfois par quelques lignes, parfois par quelques pages, parfois par des extraits de documents récents. Le texte est donc mêlé des contributions de Damien Bertrand, Jean-Pierre Colinge, Pierre de Ponthière, Laurent Demeüs, Denis Flandre, Alain Fontaine, Laurent Francis, Bernard Gentinne, Isabelle Huynen, Andreas Kaiser, Yves Leduc, Maurice Lobet, Jean Noël, Jean-Pierre Raskin, Akira Terao, Anne-Marie Trullemans Anckaert, Danielle Vanhoenacker Janvier, Pierre Verlinden, Michel Verleysen et Brigitte Wénin Dupont, et du compte-rendu des interviews de David Bol, André Crahay, Paul Jaspers, Christian Renaux, Pascal Simon,

André Vander Vorst et Thierry Watteyne.

Parce que la couverture de la période récente, depuis 1995, me paraissait la plus incertaine, j'ai envoyé le texte à Denis Flandre en sollicitant commentaires et corrections. À ma grande surprise, il ne s'est pas limité à la période incriminée ; j'ai reçu de lui une version enrichie un peu partout d'annotations minutieuses. Avant que je puisse le remercier, il m'a remercié lui-même « pour cette histoire passionnante où j'ai trouvé une mine d'informations ». Comment faire face à un tel coup, alors qu'à ce moment mon angoisse était devenue de réduire à la mesure de l'espace incroyablement parcimonieux imparti au chapitre la montagne des matériaux rassemblés. La mine d'informations débordait de pages à jeter ! Sans le savoir, Denis Flandre venait de me donner l'idée de publier la version complète, un livre des histoires de mon labo à côté du livre de la faculté qui en contient, en un chapitre, une version abrégée. Les archives n'ont pas la vie longue en microélectronique mais tout compte fait, on ne détaille que très peu la microélectronique dans ces histoires. La vie de ce livre dans la bibliothèque du labo, où il pourra combler un peu du vide laissé par les archives manquantes, sera peut-être plus longue que la moyenne ?

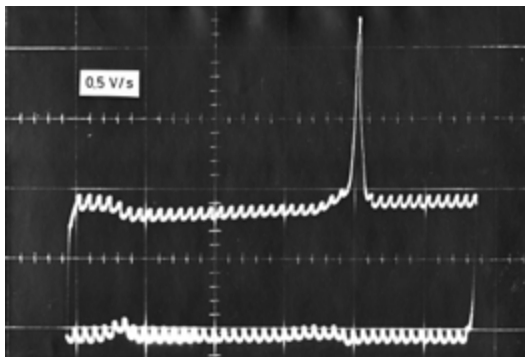
Il y a peu de microélectronique en tant que science dans ce livre. Pourtant, qu'on ne s'y trompe pas. J'ai choisi d'écrire un texte qui raconte des histoires mais en contrepartie, les références sont l'endroit où l'on peut voir qu'on parle bien d'un laboratoire de recherche. Quelqu'un qui parcourt les références et qui sait de quoi on parle pourra y voir l'évolution de l'activité scientifique. C'est la raison pour laquelle on les trouve en bas de page, en quelque sorte en filigrane du récit, et non en fin de volume selon l'usage pour un texte scientifique.

Lorsque je préparais ma thèse de doctorat, j'avais observé un phénomène curieux en mesurant des capacités MOS trempées dans l'azote liquide. Chaque matin, à la cafétéria, j'arrivais avec une nouvelle explication et j'entreprenais avec succès d'en convaincre les autres assistants du labo. Le seul qui n'était pas vraiment convaincu, c'était moi.

La discussion pourrait reprendre le lendemain, avec la même intelligence et la même cordialité. La bonne explication, celle qu'on ne parvient pas à démentir expérimentalement, a fini par venir.

J'avais appris une chose extraordinaire : la vie dans un laboratoire, dans une faculté de l'UCL, est une aventure humaine. Voilà pourquoi je raconte l'histoire des circuits et systèmes électroniques à l'UCL en faisant intervenir plus de personnages qu'un roman de Dostoïevski. Ils entrent en scène à tout moment, au hasard du récit. C'est ce hasard qui a guidé mon choix, impossible de les citer tous, ce livre n'aurait été qu'une liste de noms.

L'action du prologue ne se joue pas dans le laboratoire ; il commence au début du 20e siècle, au moment où l'électronique fait ses premiers pas. En 1959, Robert Noyce associe le concept de circuit intégré et la technologie Planar ; l'électronique se donne libre cours. Le prologue se termine en 1963, quand le transistor MOS va pouvoir partir à la conquête du monde.



Phénomène curieux

Deux capacités MOS d'épaisseurs d'oxyde différentes ont une frontière commune. On observe un pic de courant inattendu dans la caractéristique capacité/tension mesurée par la méthode de la rampe.

Qu'est-ce que c'est ?

C'est en 1959 que débutent les *Histoires de mon laboratoire*. Elles couvrent, au fil des chapitres, l'ère de la création à partir d'un grand laboratoire vide, ensuite la période des pionniers qui arrivent à Louvain-la-Neuve en 1971, le temps du développement de la chaîne pilote et de l'environnement de conception assistée par ordinateur durant les années 80, l'âge de l'expansion marquée par la naissance des technologies SOI en 1990 et la création de spin-offs, l'époque des associations et des grands projets à partir de 2001. L'épilogue est un instantané pris en fin 2012.

Les chapitres sont jalonnés de dates qui balisent des événements clés. Tous ceux qui ont suivi un cours de Jaspers savent qu'il vaut mieux ne pas être pris au dépourvu quand il utilise au chapitre trois des concepts qu'il n'expliquera qu'au chapitre six. Ils ne seront pas déconcertés ici où le fil de la mémoire enjambe souvent le fil du temps pour tisser des liens entre des événements anciens et les prolongements qu'ils ont suscités bien plus tard.

Pendant toutes ces années, quelques couples se sont formés dans le laboratoire. Au cas où ce livre tomberait entre les mains de quelqu'un qui n'est pas au courant, je dois préciser que ce sont mon épouse et moi qui avons marqué la voie. Vous devez remercier avec moi Anne-Marie pour avoir répondu aux innombrables appels que je lançais à travers la maison pendant la rédaction de ce livre : « Tu as une minute ? Viens voir ce que j'ai écrit ». Vous devez savoir que le livre est parsemé de traces de ses conseils.

Charles Trullemans

Dion-le-Mont, décembre 2012



PRÉFACE

Les histoires de « son laboratoire », racontées par Charles Trullemans, sont le reflet d'une épopée passionnante. Elles révèlent la transformation, tout au long des cinquante dernières années, d'une équipe de recherche, celle de son université et de sa relation à la société, celle aussi de la technologie qui a profondément modifié les méthodes de travail et la communication.

L'invention du transistor et des circuits intégrés a révolutionné le monde de la science et des techniques, de manière extrêmement rapide et souvent inattendue. Alors que jaillissaient ces nouvelles idées, comment une faculté où régnait une tradition que l'on pouvait qualifier d'industrielle, où l'enseignement du génie électrique était fondé sur les « courants forts », parvint-elle à faire partie du voyage et à affirmer sa présence au niveau international ? Un bel exemple de l'effet papillon lorsque Lucien Morren convainc le recteur d'engager Paul Jaspers dont le laboratoire, parti de rien, va bientôt combler ses souhaits lors du déménagement de Leuven à Louvain-la-Neuve. . . C'est aussi l'époque où l'expansion universitaire prend son essor en Belgique et permet d'engager une nouvelle génération de chercheurs et d'enseignants.

Ce que l'on voit naître, tout au long de cet ouvrage, c'est avant tout le goût de l'expérimentation, du laboratoire, de la main à la pâte, au sein d'installations munies d'un équipement d'avant-garde, comme celles des grandes universités d'outre-Atlantique. La fibre internationale qui couvait à l'Institut d'Électrotechnique d'Heverlee se développe, s'étend rapidement à l'ensemble de l'équipe et lui permet de se comparer aux meilleurs.

Fibre internationale, mais aussi nationale, qualité rare dans un pays segmenté par ses langues et ses allégeances. C'est ainsi que le laboratoire s'engage dans ARAMIS qui devient un lieu de rencontres, d'échanges et de concertation permettant aux quatre écoles d'ingénieurs de la Communauté française d'affirmer leur présence, ensemble, face à un domaine dont l'innovation est le caractère majeur.

L'innovation, aujourd'hui, fait naturellement partie du discours de tout ministre de la politique scientifique et de la recherche. Elle est la source de la créativité industrielle et de la prospérité future. N'est-il pas fascinant de lire la naissance d'un crayon lecteur au sein du laboratoire, qui va conduire à l'émergence d'une entreprise internationale de la taille d'IRIS, ou d'apprendre qu'en 1978 déjà, Fernand Van de Wiele, physicien de type « fondamental », s'attelle à l'étude des cellules solaires ? Les chercheurs sont des explorateurs qui portent loin leur regard et n'ignorent pas que la maturation de leurs découvertes prendra plusieurs années. Il s'agit là de gestes précurseurs pour une université qui souhaite participer au développement socio-économique de sa région, va bientôt créer des spin-offs (NEUROTECH, CISSOID ...) et s'engager dans les programmes de recherche régionaux dotés d'un objectif de valorisation.

L'apogée de ces « histoires » apparaît en ce début de siècle lorsque la distinction entre laboratoires s'estompe au profit d'une organisation de recherche où fusionnent l'électronique, les matériaux, l'informatique, les télécommunications, les circuits... Il en est de même de « la science » et des « sciences appliquées » dont la dénomination différenciée a perdu son sens. Le projet NANOTIC, auquel participe activement le laboratoire fondé par Paul Jaspers, en est le plus bel exemple, qui fait appel aux équipes de recherche de trois Facultés.

Cet ouvrage traite de la recherche et de l'innovation. N'oublions pas cependant qu'elles se développent au sein d'une institution dont l'objectif premier est de former les étudiants et de les préparer aux défis de demain. Le travail de fin d'études est d'ailleurs pour nombre d'entre eux l'occasion de manifester leur créativité et, parfois, de provoquer une nouvelle initiative de recherche.

Il est bon de rappeler que, durant ses années de décanat, Charles Trullemans a été le porteur du programme CANDIS 2000 dont une des caractéristiques est de développer la passion des étudiants dès leur entrée aux études grâce à leur implication dans un projet. Il est incontestable que l'on trouve là la trace des cinquante années glorieuses de son laboratoire !

Marcel Crochet

PROLOGUE

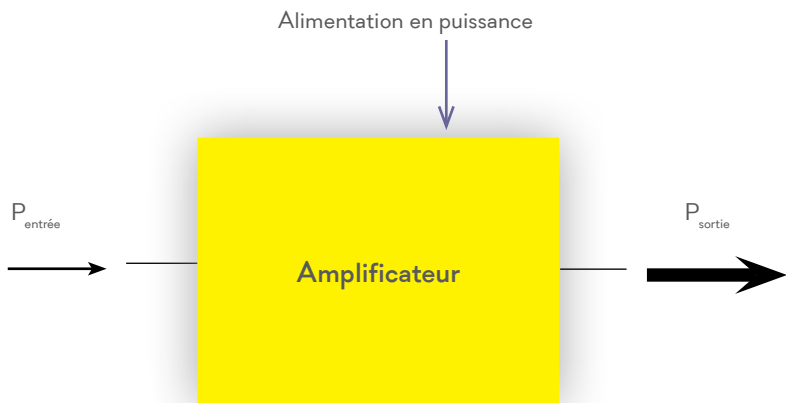
OÙ L'ON VOIT LA QUÊTE DE DISPOSITIFS AMPLIFICATEURS
MARQUER LA NAISSANCE DE L'ÉLECTRONIQUE.

OÙ L'ON VOIT ENTRER EN SCÈNE DIVERSES VARIÉTÉS
DE CHIMISTES, PHYSICIENS ET INGÉNIEURS.

OÙ S'APPLIQUENT LA MÉTHODE DES ÉCHECS CRÉATIFS,
L'ÉTUDE DE CAS SIMPLES MAIS SIGNIFICATIFS
ET LA VOLONTÉ DE RÉFLÉCHIR.

Qu'il s'agisse d'une image envoyée depuis Mars, d'un message reçu par une tablette, de la commande d'un moteur de locomotive ou d'une sonate de Bach, les circuits et systèmes électroniques mesurent, manipulent, mémorisent, transportent de l'information. Dans un circuit, l'information est présente sous forme d'énergie électrique et on l'appelle *signal*. Un signal varie continuellement dans le temps. Modifier ou transporter un signal, cela se paie fatalement par un peu d'énergie perdue. L'infrastructure Internet mondiale dissipe actuellement plus de 20 TWh/an.

La naissance de la théorie des circuits est marquée par la publication, en 1845, de l'article introduisant les deux lois de Kirchhoff¹. Elles formalisent en termes d'équations sur les courants et les tensions les lois physiques fondamentales de conservation de la charge et de la puissance. Les Lois de Kirchhoff ouvrent la voie à l'étude de la structure des circuits. Elles ne disent cependant rien de la manière de rendre à un signal la puissance qu'il aurait perdue. Curieusement, aujourd'hui encore, les livres de physique classiques² passent toujours sous silence cette question de régénération de puissance, pourtant cruciale pour tout circuit électronique et particulièrement pour les télécommunications. Pour se mettre à l'oeuvre, les inventeurs du 19^e siècle n'attendent heureusement pas qu'on lui ait trouvé réponse. Ce sont d'ailleurs eux qui posent la question.



L'amplificateur, pierre philosophale de l'électronique

Il fournit à sa sortie, aux dépens de l'alimentation, un signal identique au signal qu'il reçoit à l'entrée mais beaucoup plus puissant.

En 1876, Alexander Graham Bell prononce dans un microphone la phrase légendaire : *Mr Watson, come here, I want to see you*. Il se fait entendre dans la pièce voisine. Mais un signal téléphonique perd de la puissance au fur et à mesure qu'il voyage sur un fil. Sans l'aide d'un amplificateur, il ne peut traverser un pays dont la taille dépasse celle de la Belgique.

Dès 1900, Guglielmo Marconi construisait des prototypes d'émetteurs radio dans l'espoir de transmettre des messages télégraphiques à travers l'Atlantique. Machines à vapeur et dynamos fournissaient une puissance de près de 30 kW à l'émetteur mais, à quelques milliers de kilomètres de distance, l'antenne du récepteur n'en recevait qu'une infime partie. À partir d'un signal aussi faible, sans l'aide d'un amplificateur, la réception était bien aléatoire.

Au début du 20^e siècle, l'électronique était donc à la recherche de sa pierre philosophale : un dispositif amplificateur de puissance, capable de transformer un signal faible en un signal puissant. Le premier sera le tube triode (imaginé en 1906) ; ensuite le transistor à effet de champ (1926) puis le transistor bipolaire (1947). Le développement de la

En 1822, Oersted, physicien suédois, tenait en mains un fil de cuivre, réuni par ses extrémités aux deux pôles d'une pile de Volta.

Sur sa table se trouvait une aiguille aimantée placée sur son pivot, et il vit tout à coup (par hasard, direz-vous peut-être, mais souvenez-vous que dans les champs de l'observation le hasard ne favorise que les esprits préparés), il vit tout à coup l'aiguille se mouvoir.

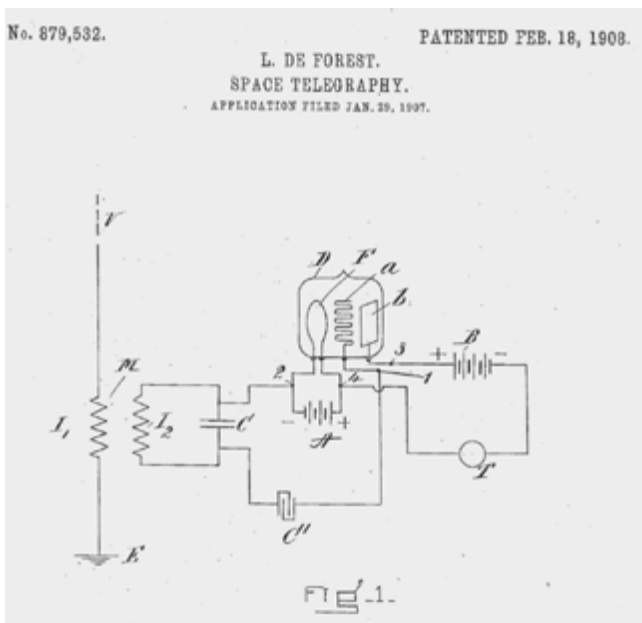
Louis Pasteur

technologie des circuits intégrés et de méthodes de conception de circuits qui lui sont adaptées (1964), conduiront à des produits révolutionnaires. En 1968 Fairchild produit l'A741, l'amplificateur opérationnel le plus populaire que l'on connaisse. Il est petit, peu gourmand en puissance, fiable, peu coûteux (moins d'un euro en 2012), d'emploi très simple malgré (en réalité, grâce à) la complexité du circuit interne qui contient 22 transistors, 11 résistances et un condensateur. Cet amplificateur se comporte de manière presque idéale comme une source de tension commandée. Il a détrôné cet élément classique en faisant lui-même irruption dans les premiers chapitres des manuels³ de théorie des circuits. Aujourd'hui, les étudiants font la connaissance des *amplis op'* dès leurs premiers pas au laboratoire. On peut rendre de la puissance à un signal, il n'y a plus de raison de s'en étonner.

Le chemin sera tracé par des physiciens, des chimistes — et par une corporation qui apparaît au début du 20e siècle : les électroniciens. Il sera marqué par une suite d'échecs mais ce seront, selon le mot d'Enrico Fermi, des *échecs créatifs*, accompagnés de la *volonté de réfléchir*⁸, c'est à dire d'approfondir l'étude fondamentale des phénomènes physiques sous-jacents. Il s'agit bien de science expérimentale, où la chance, dit Louis Pasteur, joue bien un rôle – en faveur de ceux qui ont réfléchi.

LE TUBE TRIODE

Ni dans la présentation de l'Audion à l'Association américaine des Ingénieurs électriciens en 1906, ni dans la demande de brevet qu'il dépose en janvier 1907, Lee de Forest ne parle d'amplification ou de puissance.



Récepteur de radiotélégraphie à détecteur Audion, brevet déposé par Lee de Forest en 1907.

Ce circuit fonctionne exactement comme le détecteur à diode de Fleming (1904) mais Lee de Forest l'ignore. L'explication correcte du fonctionnement du détecteur Audion sera donnée par Edwin Armstrong en 1915.

Ce qu'il présente est un *détecteur d'oscillations* destiné à un récepteur de télégraphie sans fil. Son objectif est de réaliser un détecteur, de faire ainsi le bonheur des américains grâce à la radiodiffusion et, bénéfice collatéral, de faire lui-même fortune.

Les physiciens du 18e siècle lui ont préparé le chemin en découvrant que l'air peut conduire un courant électrique. Dès 1900, il étudie l'effet du rayonnement provoqué par un arc électrique (l'émetteur) sur la conduction entre deux électrodes plongées dans la flamme d'un bec Bunsen². Il utilise ensuite un tube de Fleming, tube à vide qui contient un filament incandescent et une électrode froide, l'anode. En connectant l'antenne du récepteur à une troisième électrode, une grille placée à l'extérieur du tube, il constate que la sensibilité du détecteur augmente. Finalement, il introduit la grille à l'intérieur du tube, entre filament et anode et construit ainsi un dispositif qu'il appelle *Audion*. Il insiste sur le fait que la conduction et les propriétés de détection sont dues aux ions du gaz résiduel qu'il contient. En réalité, c'est presque un tube triode, mais on ne le sait pas encore. L'Audion est instable précisément à cause de l'absorption de gaz résiduel par les électrodes ; il est difficile à construire, peu fiable et coûteux à maintenir.

Irvin Langmuir est chimiste et physicien. Il obtiendra le prix Nobel de Chimie en 1932 pour sa contribution à la chimie des surfaces. C'est lui qui transformera l'Audion en véritable triode⁵ en éliminant toute trace de gaz résiduel. Il montre qu'en dessous d'un vide de 10^{-6} mm de mercure, le mode de conduction change complètement : le courant devient un courant d'électrons. Langmuir développe la théorie de l'émission thermo-ionique d'un filament en présence d'une charge d'espace. Sur cette base, il développe un modèle analytique qui permet le calcul du courant dans la triode en fonction des tensions appliquées. Il décrit le fonctionnement de circuits basés sur la triode en tant que détecteurs, amplificateurs ou oscillateurs.

Edwin Armstrong applique sa démarche à l'analyse du fonctionnement de l'Audion⁶.

Il se débarrasse des instabilités en appliquant au tube un vide poussé comme le recommande Langmuir. Il caractérise la triode en traçant la courbe du courant d'anode en fonction de la tension de grille. Il affirme qu'il ne faut rien en connaître d'autre pour l'utiliser dans la conception d'un circuit.

Il montre que le gaz résiduel présent dans l'Audion ne joue aucun rôle dans la détection. et qu'en plus, le montage de Lee de Forest n'apporte aucune amplification du signal à haute fréquence.

Il propose des circuits à régénération dont les performances sont bien supérieures. Il n'est pas le seul à avoir eu l'idée de cette technique de circuit, mais le seul à l'avoir comprise et caractérisée de manière à la rendre utilisable en pratique.

Quand Edwin Armstrong commence ses études de génie électrique à l'Université de Columbia, les laboratoires de recherche en physique s'occupent peu de radio. Armstrong, véritable *homme de circuits*, invente la profession d'ingénieur électronicien. Sa démarche n'est pas une démarche d'essais et erreurs. Elle repose sur une identification précise des problèmes et une solide intuition. Il contribuera à fonder une approche méthodologique d'analyse et de conception typique de l'électronique. Il explique correctement le fonctionnement de l'Audion en tant qu'amplificateur⁴. On lui doit les inventions majeures à l'origine des circuits de télécommunication modernes : régénération, super-régénération, récepteur super hétérodyne, transmission en modulation de fréquence.

Pendant les vacances d'été qui précèdent sa dernière année de Baccalauréat, il imagine d'appliquer la régénération, c'est-à-dire une rétroaction positive, à un amplificateur. Le détecteur à régénération est plus sensible que tous les récepteurs radio qui existaient à l'époque. Soumis à une rétroaction suffisante, l'amplificateur devient un oscillateur stable et puissant qui sonnera le glas des émetteurs à arc ou à alternateur.

En 1909, l'American Telegraph & Telephone Company annonce la mise en service de lignes téléphoniques transcontinentales pour l'ouverture de l'exposition de San Francisco qui doit fêter, en 1915, l'ouverture du canal de Panama. Les actions d'AT&T prennent de la valeur. L'annonce n'est toutefois qu'un pari car la technologie nécessaire n'existe pas encore. En réponse à un appel aux inventeurs, Lee de Forest présente l'Audion. La démonstration met surtout en évidence son instabilité. Mais grâce aux travaux de Langmuir la solution est connue : AT&T achète le brevet de l'Audion et en corrige les défauts. Fin juin 1914, la ligne est terminée. On peut se trouver à New York, dire dans un téléphone : *Come here, Watson...* et être entendu à San Francisco.

Dès qu'il est diplômé, l'Université de Columbia propose à Armstrong un poste d'assistant. Il installe des antennes géantes entre les bâtiments du campus et démontre, devant une assistance stupéfaite, la réception de signaux émis à Honolulu. La distance est de plus de 8000 km, au delà du rêve de Marconi. En 1920, les premiers récepteurs de radio domestiques apparaissent sur le marché.

AT&T confiera à Harold Black la tâche d'améliorer les amplificateurs utilisés dans les systèmes de téléphonie. Il est, lui aussi, un homme de circuits. Plutôt que d'agir sur la physique des triodes, il crée des structures de circuits moins sensibles à leurs défauts.

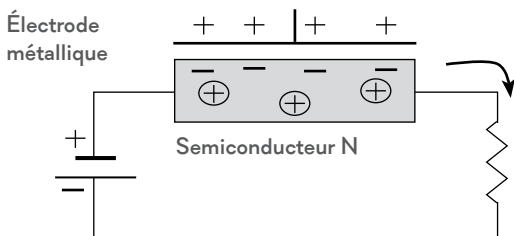
L'idée lui vient un jour de 1927 dans le bac qui traverse l'Hudson⁷. Le principe est simple : pour obtenir un signal de sortie qui est une copie parfaite du signal d'entrée, il faut concevoir un circuit qui tente d'annuler la différence entre les deux. La mise en oeuvre est invraisemblable : il faut utiliser un amplificateur dont le gain est beaucoup plus grand que nécessaire (par exemple 10 000 fois trop grand) et sacrifier ce gain insensé en appliquant un énorme taux de contre-réaction.

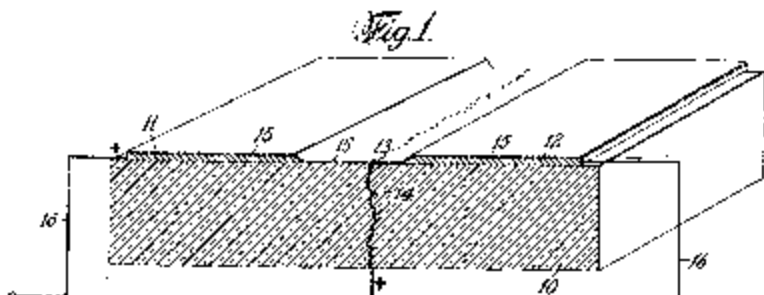
Son idée est tellement opposée à l'opinion établie qu'il lui faudra près de dix ans pour obtenir un brevet. L'accroissement de performance est spectaculaire : un signal téléphonique d'excellente qualité peut être transmis à une distance de 10 000 km. Elle a un prix : pour amener 1 mW de puissance utile à destination, il a fallu mettre en jeu des centaines d'amplificateurs.

Sur le terrain, il faut mobiliser une armée de techniciens pour en assurer la maintenance. La quête d'un dispositif amplificateur plus fiable et moins gourmand n'est pas près de s'arrêter.

Modèle très simple de transistor à effet de champ.

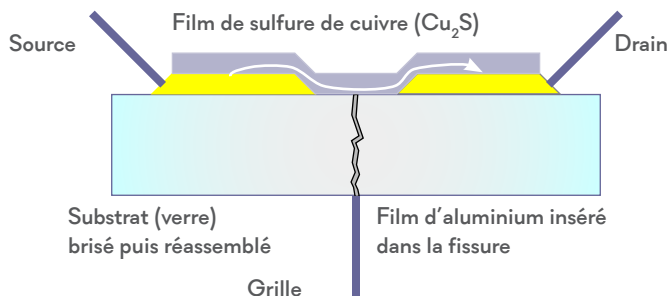
Schockley, 1945





Le transistor à effet de champ de Lilienfeld, brevet soumis en 1926.

Un substrat en verre (10) est brisé puis réassemblé. Une feuille d'aluminium (13) est insérée dans la fissure. Deux électrodes métalliques (11, 12) sont déposées à la surface. Un film de sulfure de cuivre (Cu_2S) établit un chemin conducteur entre les électrodes (11, 12). Le courant est commandé par le champ électrique appliqué par la feuille d'aluminium (13).

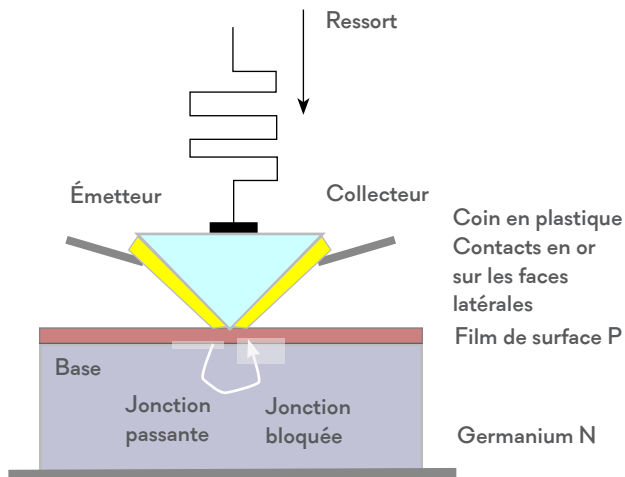


LE TRANSISTOR BIPOLAIRE

Dès 1925, Julius Lilienfeld avait décrit la physique du transistor à effet de champ. Il dépose plusieurs brevets où il décrit différents types de transistors. En théorie, c'était un dispositif très simple. On ignore cependant si Lilienfeld a réussi à le faire fonctionner. Il faudra attendre 1947 pour que Shockley réussisse à en démontrer expérimentalement le concept.

Immédiatement après avoir reçu son Ph. D. en 1936, William Shockley entre aux Bell Labs. Le Dr Mervin Kelly, directeur des recherches, met l'accent sur un objectif important : remplacer les composants mécaniques des centraux téléphoniques par des dispositifs électroniques. Shockley pense que des dispositifs basés sur des phénomènes de physique du solide seraient de meilleurs candidats que les tubes. La guerre mondiale interrompt cette activité mais en revanche, le développement de détecteurs pour les radars entraîne de nombreux progrès en technologie des matériaux semi-conducteurs, notamment le silicium et le germanium. À la fin de la guerre, Shockley reprend ses recherches sur les dispositifs amplificateurs.

Sa méthode est d'étudier des cas très simples mais significatifs qui stimulent la réflexion, l'intuition et l'inventivité expérimentale. Un cas simple, dit-il, est un outil de réflexion pour la recherche. C'est aussi un dispositif pédagogique qui stimule l'apprentissage. L'étude d'un modèle très simple libère des tâches ennuyeuses et répétitives mais crée un cadre de référence pour l'interprétation des résultats du calcul et de l'expérience. Le dispositif à effet de champ très simple qu'il imagine est un condensateur dont une électrode est métallique et l'autre est un film mince de semi-conducteur. Le courant circule au travers du film, perpendiculairement au champ électrique appliqué par l'électrode métallique. Le champ modifie la concentration en électrons dans le semi-conducteur, donc sa conductivité. Mais cela ne fonctionne absolument pas. Le calcul montre que l'effet mesuré est 1500 fois plus faible que l'effet prédit par le modèle simple. C'est un échec.



Le transistor à pointes de Bardeen et Brattain, né officiellement l'avant-veille de Noël 1947.

Ils cherchent à moduler la conductivité du film P qui conduit le courant de l'émetteur au collecteur. Sans qu'on ne le sache, le véritable effet transistor est également présent : il y a injection de minoritaires dans la base par la jonction passante d'émetteur et transfert de ces minoritaires au collecteur à travers la jonction bloquée. Shockley l'expliquera un mois plus tard.

En mars 1946, John Bardeen le transforme en échec créatif. Il suggère de corriger le modèle simple en supposant que la mobilité des électrons au voisinage de la surface n'est sans doute pas la même que dans le volume du matériau parce qu'ils sont piégés dans des *états de surface*. La théorie des états de surface devient un sujet de recherche très actif dans le groupe de Bardeen. En novembre 1947, un chimiste propose d'immerger le dispositif à effet de champ dans un électrolyte. Les gros condensateurs sont un gisement d'électrolyte commode ; on peut l'en extraire à l'aide d'un marteau et un clou⁸. Ainsi progresse la découverte du transistor, une des découvertes les plus importante du siècle, en train de naître aux Bell Labs.

Les discussions à l'occasion du lunch et la récupération de l'électrolyte conduisent à l'invention du transistor bipolaire, un merveilleux chemin de traverse qui relègue à l'arrière-plan le transistor à effet de champ. Le mois de décembre 1947 est une période magique. Les expériences qui se succèdent génèrent l'idée qui conduira au succès : Bardeen et Brattain appliquent deux très petits contacts distants de moins de 50 μm sur un bloc de germanium. Le courant dans une des électrodes influence le courant dans l'autre avec un gain en puissance. Le premier amplificateur à état solide naît dans le secret, le 16 décembre 1947. La démonstration officielle aura lieu le mardi 23 décembre 1947, comme un prodigieux cadeau de Noël.

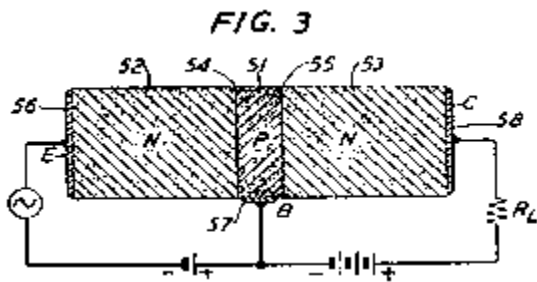


Figure 3, extraite du brevet déposé le 26 juin 1948 par William Shockley : le transistor bipolaire à jonctions.

Le 23 janvier 1948, Shockley rédige dans son carnet de laboratoire cinq pages intitulées *High Power Large Area Semi-Conductor Valve*. Elles sont l'acte de naissance du transistor à jonctions. Il remarquera lui même⁸ à quel point le titre est mal choisi : ce sont les performances à haute fréquence et un niveau de puissance le plus faible qui ait jamais été atteint qui révolutionneront l'industrie des ordinateurs. La demande de brevet qu'il dépose en juin décrit plusieurs structures de transistor dont la figure 3, parfait exemple de cas simple mais significatif que l'on retrouvera dans tous les manuels de physique des dispositifs semi-conducteurs. Le prix Nobel de Physique 1956 est attribué conjointement à W. B. Shockley, J. Bardeen and W. H. Brattain « pour leurs travaux sur les semi-conducteurs et la découverte de l'effet transistor ».

Les transistors à pointes étaient de fragiles objets de laboratoire. Les transistors à jonctions sont de meilleurs candidats à une production industrielle. Sans qu'on ne l'écoute, le chimiste Gordon Teal prétend qu'ils doivent être fabriqués dans un monocristal de germanium et non dans du germanium polycristallin dont la résistivité est très variable et où les frontières de grains sont localisées au hasard.

Pour construire en grande série des appareils électroniques complexes, tous identiques, il faut disposer de composants dont les tolérances de performance sont serrées. Il faut produire les composants à faible coût, donc avec de hauts rendements de fabrication. Teal met au point le procédé industriel de fabrication de transistors à jonction par tirage. En juillet 1952 les transistors à jonction commencent à envahir le monde.

En 1953, Gordon Teal rejoint Texas Instruments où il dirige le *Materials and Components Research Department*. C'est là que sera créé, en avril 1954, le premier transistor au silicium commercial. Au moment où Gordon Teal annonce son existence, en mai 1954, lors d'une conférence de l'IRE, Texas en a déjà démarré la production.

Contrairement à ce que vous racontent mes collègues à propos de sombres perspectives pour les transistors au silicium, il s'avère que j'en ai justement quelques-uns dans ma poche.

Gordon Teal†

† devant le public de l'Institute of Radio Engineers (IRE)
National Conference on Airborne Electronics, Dayton, Ohio,
10 May 1954.



Le premier transistor au silicium, produit par Texas Instruments en 1954.

Dès 1954, 100 000 exemplaires de la première radio de poche à transistor envahissent le marché. Les premiers ordinateurs à transistors apparaissent, dont, en 1957, le *Flyable TRADIC* aéroporté, premier ordinateur à être installé dans un avion, beaucoup plus petit et frugal que toute machine à tubes. En 1936, Mervin Kelly avait indiqué à William Shockley un objectif important : remplacer les composants mécaniques des centraux téléphoniques par des dispositifs électroniques. Les transistors bipolaires sont disponibles en 1952 mais encore fallait-il que la technologie des ordinateurs progresse. Le premier central téléphonique à commutation électronique, le #1ESS, ne sera installé qu'en 1965.

WORLD'S FIRST POCKET RADIO

Regency



\$49.95
less battery

Uses tiny transistors . . . no bulky tubes, combines amazingly compact size, high performance

- First truly personal radio! Weighs only 12 ounces, measures 3" x 5" x 1 1/4". Slips in pocket or purse, available with leather carrying case. Genuine superheterodyne circuit; astonishingly clear tone . . . through acoustically-buffed speaker or tiny earphone. Shock-resistant, virtually service free . . . engineered for lifetime performance. Uses standard 22 1/2 V. battery. Smart plastic case in black, ivory, mandarin red, cloud gray, mahogany or olive green. See it! Hear it! Get it!

REGENCY DIVISION, I. B. E. A. INC., INDIANAPOLIS, INDIANA



Does anywhere . . . plays everywhere!



So nice with wireless bang!



Your's most exciting new gift idea!

ACCESSORIES



Leather carrying case has built strap, perfect for earphone or spare battery. **\$3.95**



Feather-light earphone is no longer stuck in hearing aid. Softens comfortably to ear. **\$7.50**

1954 : La radio de poche Regency TR 1 de Texas Instruments, prête à diffuser les nouvelles de la Guerre froide et le Rock 'n Roll.

Plus tard, Texas inondera le marché de calculettes Pocketronic. Il faudra toutefois attendre 1970, le développement de la technologie des circuits intégrés MOS à grande échelle (MOS LSI) et une alliance de Texas avec Canon, familier des marchés grand public. Mais les ingénieurs ne pourront pas pour autant remiser la règle à calcul qui ne quitte pas leur poche de chemise car il ne peuvent pas faire grand-chose d'une machine arithmétique à quatre opérations. La première machine à calculer scientifique prête à remplacer la règle à calcul sera conçue avec pour objectif « d'entrer dans la poche de chemise de M. Hewlett ». Ce sera la HP 35 de Hewlett-Packard, disponible à partir de 1972. Elle contient 30 000 transistors MOS répartis en cinq circuits. Elle effectue tous les calculs que l'on veut, au bureau, sur chantier, à la maison, sur 200 décades, avec 10 décimales.

La vie des ingénieurs allait changer. Il n'y aura pas que la HP 35. La vie de tous les autres allait changer aussi. La voie des smartphones s'ouvre peu à peu.



1972 : La calculette scientifique HP 35, conçue pour entrer dans la poche de chemise de M. Hewlett.

À part une plus grande mobilité des porteurs et une métallurgie plus facile qui lui vaut d'entrer le premier en scène, le germanium a peu d'avantages à opposer au silicium. Le silicium est par contre un véritable miracle de la nature, abondant dans le sable des plages, bientôt omniprésent dans les dispositifs électroniques.

On découvrira peu à peu que l'oxyde natif (SiO_2) que l'on fait croître par oxydation directe du cristal de silicium réduit la densité d'états de surface et passive les jonctions. Il diminue fortement leurs courants de fuite. Chimiquement très stable, il couvre les transistors d'un vernis protecteur qui les met à l'abri de l'atmosphère extérieure. Il est un excellent isolant, prêt à recevoir des contacts électriques et – on ne le saura que plus tard – un diélectrique de haute qualité, l'oxyde de la structure métal-oxyde-semiconducteur (MOS). Mais ce n'est pas tout.

En 1955, l'hydrogène porteur des impuretés dans un four de diffusion aux Bell Labs prend feu. En présence de vapeur d'eau, les tranches de silicium s'oxydent. Cet heureux accident conduit Carl Frosh et Lincoln Derick à découvrir que l'oxyde peut agir comme un masque. Il empêche les atomes dopants de pénétrer dans le silicium. Il est facile d'y ouvrir des fenêtres en le gravant à l'aide d'acide fluorhydrique — qui n'attaque pas le silicium. On peut ensuite doper sélectivement certaines régions de la tranche, puis se débarrasser de la couche d'oxyde qui a servi de masque et la remplacer par un oxyde propre. Les Bell Labs publient en 1957 cette technique fondamentale pour la fabrication de transistors : réaliser une diffusion locale au travers d'un masque d'oxyde.

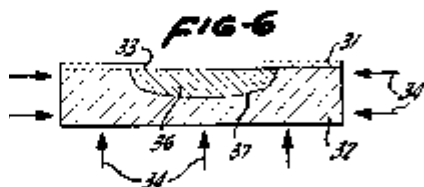
En décembre 1957, le physicien Jean Hoerni note une idée dans son carnet : faut-il vraiment enlever l'oxyde qui a servi de masque ou au contraire éviter à tout prix d'exposer les jonctions, très sensibles à toute contamination ? Il y a d'autres priorités chez Fairchild et ce n'est qu'en janvier 1959 qu'il dépose un brevet décrivant la technologie Planar. En mars 1959, il réalise la démonstration d'un transistor Planar. Il avait raison : l'oxyde qui a servi de masque se révèle être une bonne protection pour les jonctions.



Transistor à jonction fabriqué par double diffusion, procédé Planar

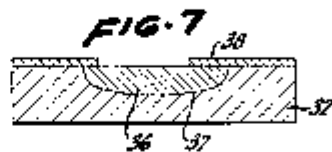
31 Couche d'oxyde (protection du silicium, obstacle à la diffusion des impuretés, isolation électrique)

32 Substrat de silicium de type N, collecteur du transistor



33 Fenêtre de diffusion obtenue par photogravure

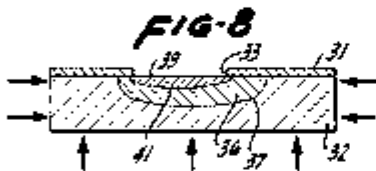
34 Chaleur appliquée



36 Couche diffusée de type P, base du transistor

37 Jonction PN base-collecteur, protégée en surface par l'oxyde 31

38 Oxyde formé durant la diffusion



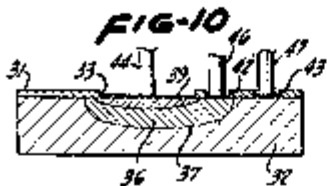
39 Couche diffusée de type N,
émetteur du transistor

41 Jonction NP émetteur-base,
protégée en surface par l'oxyde 31



42, 43 Trous de contact

44, 46, 47 Connexions électriques
au transistor



La diffusion latérale amène les
jonctions sous la protection de
l'oxyde de surface qui ne sera jamais
enlevé.

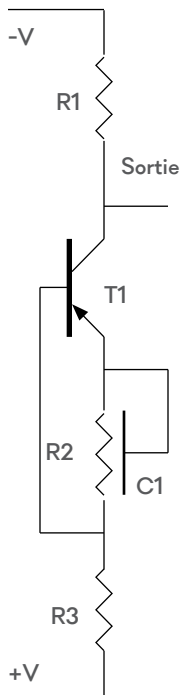


Schéma du premier circuit intégré : l'oscillateur de Jack Kilby, septembre 1958

En avril 1960, Fairchild introduit sur le marché le premier transistor Planar, le fameux 2N1613 qui sera un jour mythique pour les étudiants en électronique de l'UCL car il apparaîtra à chaque page du cours de Jespers.

La technologie Planar est une avancée spectaculaire. C'est un procédé de fabrication en grand volume qui se répandra rapidement dans l'industrie des semiconducteurs. Les performances accrues des transistors répondent aux demandes de l'industrie aérospatiale. La réduction des courants de fuite résout un des problèmes les plus critiques pour la conception des circuits logiques, donc des ordinateurs. Son nom, *Planar*, recèle une promesse latente : il signifie que toutes les connexions au transistor peuvent se trouver dans un même plan sur la même face du substrat. Robert Noyce réalisera la promesse.

Durant l'été 1958, Texas Instruments est en vacances mais pas Jack Kilby, récemment engagé en mai. Il cherche à faire ses preuves. Il imagine le concept de circuit intégré, basé sur l'idée que tous les composants d'un circuit électronique, transistors, résistances et condensateurs sont réalisables dans une même technologie donc peuvent être fabriqués simultanément sur un même substrat puis interconnectés entre eux.

En septembre, il démontre le fonctionnement d'un oscillateur fait d'un unique transistor et d'un circuit de contre-réaction à résistances et capacités, dans une technologie MESA sur germanium. Le prix Nobel de physique sera attribué en 2000 « à des chercheurs et inventeurs dont les travaux ont jeté les bases des nouvelles technologies de l'information », conjointement à Z. Alferov, H. Kremer et J. Kilby « pour sa contribution à l'invention du circuit intégré ». Avec l'idée de Kilby, le monde des concepteurs de circuits bascule. L'ingéniosité déployée pour utiliser avec parcimonie des tubes chers et encombrants n'a plus cours. Le nombre de transistors a peu d'influence sur le coût du circuit, ils prennent très peu de place, on les utilise à discrétion ; tout l'art est de s'accommoder des restrictions sur les autres composants. Il faudra un certain temps pour que l'enseignement de l'électronique s'adapte à ce monde nouveau.

En 1959, Robert Noyce (Fairchild) associera l'idée de Kilby au procédé de Hoerni en y adjoignant l'élément manquant : la réalisation des interconnexions par photogravure d'un film d'aluminium. Il le dépose par évaporation sur la couche d'oxyde isolant prête à l'accueillir. En 1968, Robert Noyce et Gordon Moore seront les fondateurs d'Intel. Moore prédira que le nombre de transistors assemblés dans un circuit intégré doublerait tous les deux ans. Plus d'un milliard de transistors peuplent aujourd'hui chaque microprocesseur i7 d'Intel.

Le procédé Planar est un procédé de production de masse, comme l'était la presse à imprimer de Gutenberg. Ses conséquences technologiques, économiques et sociales seront immenses.

LE TRANSISTOR MOS

En décembre 1947, la démonstration du transistor à pointes de Bardeen et Brattain prouvait le fonctionnement d'un dispositif amplificateur. L'analyse montre un peu plus tard qu'une partie du courant passait par le bloc de germanium N appelé base, par un mécanisme d'injection. Cette observation oriente en fait tous les efforts vers le transistor bipolaire. Paradoxalement, c'est un chemin de traverse. L'analyse montre aussi qu'une autre partie du courant, probablement dominante, passe dans un film de surface dont on contrôle la conductivité ; la démonstration prouvait donc simultanément le fonctionnement d'un transistor à effet de champ⁹. Elle aurait pu ouvrir une route directe vers les circuits électroniques actuels.

Le chemin de traverse n'était peut-être pas un mauvais choix. La demande pour des transistors bipolaires fiables et performants encourage de nombreux progrès soutenus par un échange ouvert entre universités et laboratoires industriels. Le développement des technologies de fabrication a pour effet de bord de rendre possible la fabrication du transistor à effet de champ, où tout se passe non pas dans le volume du matériau mais dans le film de surface beaucoup plus difficile à maîtriser. Les méthodes de conception et d'analyse de circuits se perfectionnent ; les premiers circuits à transistors bipolaires n'étaient rien d'autre que l'adaptation de leurs ancêtres à tubes, puis de nouveaux circuits sont apparus, qui tiraient profit des particularités du transistor. Les circuits utilisant des transistors complémentaires, où le courant est transféré à travers la base soit par des trous soit par des électrons n'ont pas de contrepartie réalisable avec des tubes où la conduction est toujours due à des électrons.

En 1960, il devient possible de faire croître à haute température à la surface du silicium une couche d'oxyde qui est un film diélectrique de bonne qualité. La voie est ouverte à Kahng et Attala qui fabriquent aux Bell Labs le premier transistor MOS fonctionnel¹⁰. Il fonctionne, en effet, mais il est trop instable pour qu'on puisse l'utiliser. Le transistor de Kahng souffre de deux problèmes qui ne seront identifiés que plus tard¹¹. L'oxyde contient des ions mobiles qui rendent le transistor instable. Des liaisons insaturées subsistent à l'interface silicium-oxyde lorsque l'on arrête l'oxydation thermique.

ELECTRIC FIELD CONTROLLED SEMICONDUCTOR DEVICE

Filed May 31, 1960

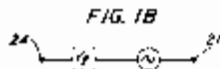
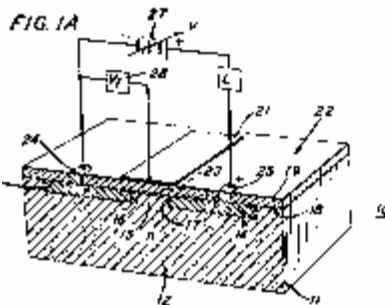
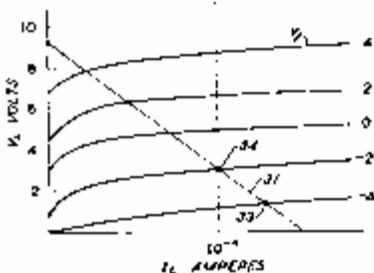


FIG. 2



Dispositif semiconducteur commandé
par un champ électrique,

Dawon Kahng, 1960,

- 11 Substrat, silicium mono-cristallin,
type N
- 13, 14 Régions diffusées, type P
- 15 Espace (75 μm) entre les régions
diffusées, type N
- 24, 25 Contacts métalliques (drain,
source)
- 15 Région de type P limitée par les
régions de type N (13, 14)
- 21 Electrode (grille) déposée sur la
face apparente d'une couche
d'oxyde mince (100 nm)
- 27, 28 Tensions d'alimentation et de
polarisation

En 1960, RCA demande à Steven Hofstein¹⁰ de tenter de fabriquer un transistor MOS. Cette mission suicide a déjà coûté à plusieurs leur carrière mais lui, toujours engagé dans un programme de *graduate studies*, n'a pas encore de carrière à risquer. Comme tout le monde avant lui, il observe bien un effet mais le transistor ne fonctionne pas. Il se souvient du recuit des métallurgistes et du *forming gas*, mélange d'azote et d'hydrogène. Grâce au *forming gas*, après d'innombrables essais, il neutralise les états d'interface. Il obtient un transistor qui fonctionne mais qui est toujours instable. On ne peut pas le vendre.

Adrew Grove, réfugié hongrois arrivé aux États-Unis en 1957, reçoit en 1963 un Ph. D. en chimie à l'Université de Berkeley. Fairchild Semiconductor avait décidé d'étoffer considérablement son effort de recherche en matériaux et dispositifs semi-conducteurs¹². Ils engagent Andrew Grove et d'autres jeunes diplômés, Frank Wanlass et Ed Snow (physiciens de l'état solide), et Bruce Deal (chimiste). Ils font de la mesure de la capacité d'une structure MOS en fonction de la polarisation la méthode classique de caractérisation de l'interface oxyde-silicium. Ils montrent la présence d'ions mobiles dans l'oxyde, notamment des ions de sodium. Ils publient des résultats¹³ à propos de la physique des instabilités mais ne parlent pas du procédé de *gettering* que Fairchild a mis au point et qui stabilise les ions à la surface de l'oxyde dans un verre de phosphore. Mais à cause des états d'interface qu'ils n'ont pu maîtriser, leur transistor ne fonctionne pas correctement. On ne peut pas le vendre.

En 1965, Hofstein a l'idée d'organiser la première édition de la *Silicon Interface Specialists Conference*. Il invite les quelques 60 personnes occupées à travailler activement, aux USA, sur le silicium et son emploi dans les transistors. Ce sont eux qui en savent le plus à propos de l'interface oxyde-semiconducteur mais aucun ne sait tout. Hofstein veut les réunir au bénéfice de chacun. Il les invite dans un endroit impensable, à Las Vegas. L'hôtel Stardust est tellement impressionné d'accueillir un véritable congrès de véritables scientifiques qu'il entame un grand nettoyage et offre la chambre aux congressistes. Hofstein reçoit des consignes : « Surtout, ne rien dévoiler... quoique... nous aimerions savoir comment ils s'y prennent pour que leur transistors soient stables et eux ignorent comment nous arrivons à faire fonctionner les nôtres. Bref, si vous parvenez à parler avec Andy Grove et que vous lâchez un morceau du secret nous ne vous en tiendrons pas rigueur. Il pourrait en lâcher un morceau, lui aussi — ces choses arrivent. »

A Las Vegas, Hofstein et Grove se retrouvent dans la piscine et bavardent un peu.

Peut-être disent-ils :

- Hydrogène.
- Chlore.

Peu après, les transistors MOS apparaissent sur le marché.

Entre temps, depuis 1958, le rideau est levé : à l'UCL, l'histoire des circuits et systèmes électroniques a commencé.

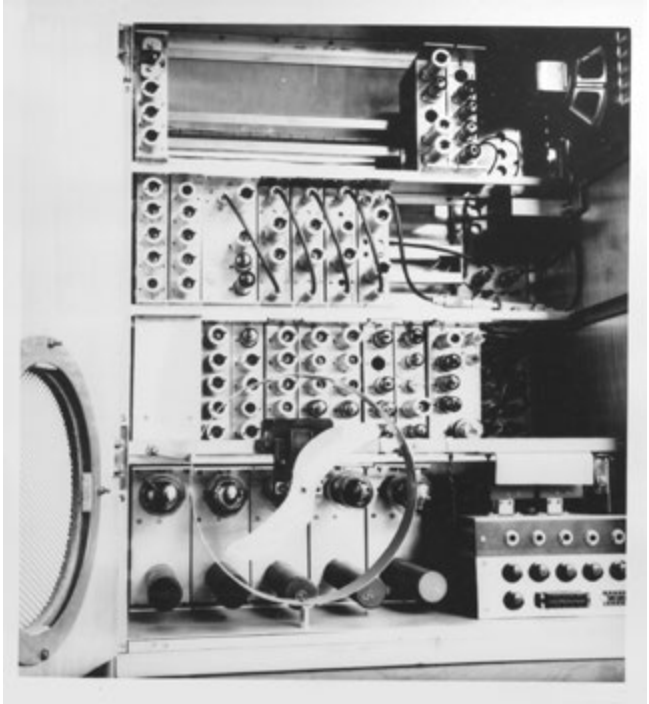
FIN DU PROLOGUE

RÉFÉRENCES POUR LE PROLOGUE

1. Kirchhoff G, *Ueber den Durchgang eines elektrischen Stromes durch eine Ebene, insbesondere durch eine kreisförmige*, Annalen der Physik 64 (1845) : 497-514 ;
2. Par exemple, Young & Freedman, *University Physics*, Addison Wesley, 2004
3. Par exemple, Thomas, Rosa and Toussaint, *The analysis and Design of Linear Cicruits*, 1st edition, 1994
4. Lee De Forest, *The Audion, a new receiver for wireless telegraphy*, 21th Meeting of the American Institute of Electrical Engineers. New York, October26th, 1906.
5. Langmuir, I. ; *The Pure Electron Discharge. And its Applications in Radio Telegraphy and Telephony* ; Proceedings of the Institute of Radio Engineers, Sep 1915, Vol. 3, no 3, p. 261-286
6. Armstrong E. H. ; *Operating features of the Audion* ; Electrical World, December 14, 1914, repris et étendu dans *Some Recent Developments in the Audio Receiver*, Proceedings of the IRE, vol. 3, no. 9, p. 215-247, Sept. 1915 et publié à nouveau en tant que *Classic paper* dans Proceedings of the iEEE, Vol. 85, No. 4, p. 685-697 April 1997
7. Black, H. S. ; *Stabilized Feed-Back Amplifiers* ; Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Vol. 53 no 1 pp 114-120, 1934
8. Shockley W ; *The Path to the Conception of the Junction Transistor* ; IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 23 no 7 pp 597-620, 1976

9. Chih-Tang Sah ; *Evolution of the MOS Transistor – From Conception to VLSI* ; Proceedings of the IEEE, Vol. 76, no. 10, pp 1280-1326, 1988
10. D. Kahng and M. M. Atalla, *Silicon-silicon dioxide field induced surface devices*, presented at the IRE-AIEE Solid- State Device Research Conference at Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh, PA, 1960.
11. B. E. Deal, *A Scientist's Perspective on the Early Days of MOS Technology* ; The Electrochemical Society Interface, Fall 2007
12. *Oral History of Steven R. Hofstein* interviewed by David Laws, Mountain View, California, October 28, 2011. Computer History Museum ref. X6296. 2012
13. Grove, A. S. ; Deal, B. E. ; Snow, E. H. ; Sah, C. T. ; *Investigation of thermally oxidized silicon surfaces using metal-oxide-semiconductor structures* ; IEEE Transactions on Electron Devices Vol. 11, no 11, p. 531 ; Nov. 1964

LA CRÉATION



Récepteur de mesure, Paul Jaspers, 1957.

Il contenait quelques dizaines de tubes à vide dont on exprimait les dimensions en cm et les puissances en W.

En 2012, on utilisera nm et nW et on comptera par millions les transistors intégrés sur une même puce.

1958

JACK KILBY (TEXAS INSTRUMENTS) INVENTE LE CIRCUIT INTÉGRÉ
LE PR LUCIEN MORREN CONVAINC LE RECTEUR D'ENGAGER
PAUL JESPERS

1959

PAUL JESPERS ÉBAHI DÉCOUVRE
UN GRAND LOCAL PRATIQUEMENT VIDE

À la fin des années cinquante, le professeur Morren pensait avec clairvoyance que l'électronique, en pleine évolution au niveau mondial, devait être présente à l'Université de Louvain. Cinquante ans plus tard, il racontait lui-même qu'il en avait convaincu le Pr Gillon et le Recteur, Mgr Van Wayenberg, et qu'il leur avait de plus conseillé d'engager Paul Jaspers¹. C'était, disait-il, une de ses meilleures actions à l'université. Il a obtenu ainsi la création d'une petite section « Courants faibles » qui n'a cessé de se développer, donnant par la suite naissance aux laboratoires de microélectronique, d'automatique, de télécommunications et d'électromagnétisme, eux-mêmes aujourd'hui diversifiés et intégrés dans l'Institut des technologies de l'information et de la communication, électronique et mathématiques appliquées (ICTEAM).

Au printemps de l'année 1959, André Vander Vorst, alors assistant du Professeur Gillon, attend la première visite de son nouveau patron. Il se trouve à l'entrée du laboratoire d'électronique, au deuxième étage de l'Institut d'Électrotechnique à Heverlee. Paul Jaspers arrive en compagnie de H. P. Debruyen. André Vander Vorst – il ne l'oubliera jamais – voit l'expression de stupeur qui frappe le visage de Jaspers au moment où celui-ci découvre son futur laboratoire, une grande salle meublée de tables de bois et de tableaux électriques en

1. Jaspers, P. ; *Contribution à l'étude des phénomènes transitoires dans les récepteurs radioélectriques superhétérodynes, application au récepteur de mesure des perturbations C. I. S. P. R.*; Mémoire présenté en vue de l'obtention du grade de Docteur en Sciences appliquées sous la direction du Pr L. Morren (19 mai 1958).



Institut d'Électrotechnique, Heverlee, 1964

marbre. Jaspers pose une question redoutable : mais où est l'équipement ? Il demande un budget. C'est nous qui sommes aujourd'hui frappés de stupeur en apprenant qu'à cette époque un Recteur pouvait accorder, sans consulter personne, un crédit d'équipement de trois millions de francs.

LA BANDE DES QUATRE

Ceux que Jaspers appelle aujourd'hui la bande des quatre entrent alors en action : deux chargés de cours, lui même et H. P. Debruyne, son homologue néerlandophone, et deux assistants, André Vander Vorst et Pierre Grosjean. Jusque là, le laboratoire d'électricité de l'UCL ne s'occupait que de courants forts. L'ancien cours d'électronique décrivait qualitativement le fonctionnement des tubes à vides, sans modélisation mathématique. L'ancien programme prévoyait en tout trois séances de laboratoire, durant la dernière année. Les étudiants y mesuraient des caractéristiques de composants, tubes diodes et triodes, sans jamais voir un montage fonctionnel.

Durant les premières années, tout est à faire. Pour la bande des quatre, c'est une période d'activité incroyable. Ils créent cours et laboratoires à flux tendu. Jaspers imagine un essai par semaine. Debruyne concrétise le schéma et en assure la faisabilité. L'équipe des assistants, complétée par Marc Davio et René Govaerts, assemble les carnets de labo et manie le fer à souder pour construire les montages en chantant à tue-tête Verdi (Le Chœur des Esclaves) et des chansons à boire.

Pendant deux heures et demi, quatre fois par semaine, il y a des étudiants

Le chœur des esclaves
au CI

de g. à dr. : Marc Davio,
René Govaerts, André
Vander Vorst

mars 1964





Naissance d'un calculateur analogique, Heverlee, printemps 1962

au laboratoire ; assistants et chargés de cours les y accompagnent. Rien ne résiste à leur ardeur. Ils construiront même un calculateur analogique, Celui-ci assurera auprès des étudiants, jusqu'à Louvain-la-Neuve, près de trente ans de bons services, tout comme les appareils mythiques, oscilloscopes Tektronix et multimètres Simpson, dont l'achat avait été financé par l'UCL en 1959.

Les essais de laboratoire sont une occasion (périlleuse, car la tension d'alimentation est de 300 V) de se familiariser avec la technologie des montages et avec un équipement de mesure de niveau professionnel. Ils sont bien plus qu'une simple illustration du cours. Les montages étudiés sont souvent des montages utilisés dans des applications réelles (par exemple, un oscillateur FM).

Un carnet de laboratoire pour une séance de deux heures peut être épais de trente pages. Il comporte un protocole détaillant dans l'ordre les observations, mesures et calculs à effectuer — et bien plus que cela. Le carnet de labo applique une démarche d'analyse approfondie basée sur la décomposition du schéma en unités fonctionnelles. Il ne s'attarde pas sur celles-ci (elles ont été détaillées au cours) mais il explique comment elles interagissent entre elles dans le montage complet. Ce n'est pas une explication de livre de classe, qui aurait pour unique objectif de montrer « comment ça marche ». Il y a fatalement des limites de performances au delà desquelles cela ne marche plus. C'est là que l'on apprend vraiment, en débusquant les mécanismes idéalement négligeables qui prennent le pouvoir au delà d'un certain point.

Vers 1960 — Schéma de l'oscillateur FM extrait d'un carnet de laboratoire préparé par la bande des quatre.

Les annotations manuscrites sont de la main de l'auteur (1968), alors étudiant en dernière année.

(page suivante)

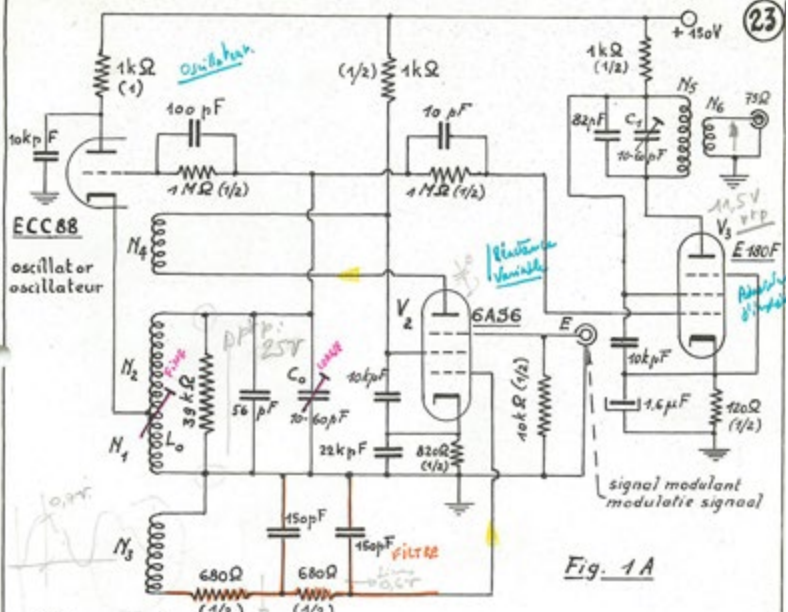


Fig. 1 A

Chassis A

Spires-Windungen

- N₁ 1
- N₂ 39
- N₃ 4
- N₄ 20
- N₅ 40
- N₆ 2

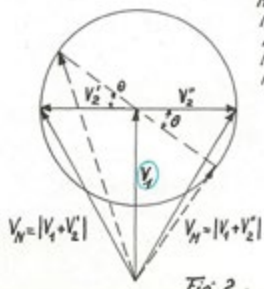


Fig. 2

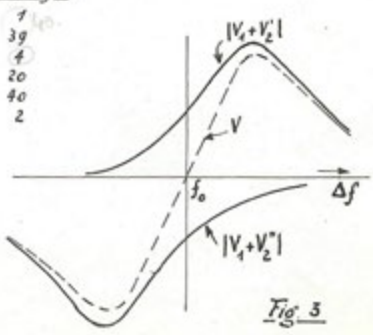


Fig. 3

Le protocole qui guide l'étudiant par la main est sans doute regrettable (en 1980, il aura largement disparu). Un protocole ne suffit pas. Quelqu'un qui voit apparaître sur l'oscilloscope la courbe attendue ne la reconnaîtra même pas s'il ignore ce qu'il attend, et ne pourra pas l'interpréter s'il ignore pourquoi il l'attend. Le carnet demande de prédéterminer beaucoup de choses avant de les mesurer sur le montage. Il est clair qu'il a été écrit par quelqu'un qui a du métier, quelqu'un qui sait, comme Louis Pasteur, « que dans les champs de l'observation le hasard ne favorise que les esprits préparés ».

L'étudiant — Qu'est-ce que cela veut dire, focus, pourquoi écrit-on en latin sur les oscilloscopes ?

L'assistant — C'est assez normal, dans une université catholique ...

La bande des quatre crée tout à flux tendu et l'activité de recherche se met en place simultanément. Le premier doctorat conféré à la FSA pour des travaux dans le domaine de l'électronique est attribué le 22 avril 1963 à un ingénieur de Bell Telephone (Anvers), M. Pe-Tsi Chu, dont le promoteur est P. Jespers. Il introduit « un nouveau principe pour le calcul de la fonction de corrélation, applicable à des signaux non gaussiens, développé au Laboratoire d'électronique de l'Institut d'Électrotechnique de l'Université de Louvain avec la collaboration de Bell Telephone Mfg. Co. » qu'il publie en 1962². Albert Fettweiss, coauteur de cet article, sera promu docteur à l'UCL le 21 novembre 1963. Le promoteur est le Pr Vitold Belevitch. Quant à André Vander Vorst, il sera le premier assistant didactique en électronique à être promu docteur, le 11 avril 1965, suivi par Marc Davio le 10 novembre 1967, tous deux avec H. P. Debruyne pour promoteur.

2. *A New method to compute correlation functions* Dr P. Jespers, Université catholique de Louvain, Belgium, P. T. Chu et A. Fettweis, Bell Telephone Mfg Co. Antwerp, Belgium. IRE Transactions on Information Theory, Vol. 8 Issue 5, September 1962

La préface d'un livre[†] édité en 1966 commence par cette phrase : « Au début de la T. S. F, lorsqu'il nous fallait concevoir un appareil, nous consultions notre petit recueil de schémas ». Elle annonce que le livre lui-même fait mieux que le recueil car « Il contient toutes les données indispensables à la solution des problèmes les plus courants. Quelques retouches sont seules nécessaires... ». Fort heureusement, le livre dément largement la préface. L'électronique, dit l'auteur, est une technique à évolution extrêmement rapide. Il présente à la fois des solutions basées sur des tubes et d'autres, très différentes, basées sur des transistors.

En 1965, Hofstein organise à Las Vegas une conférence improbable qui réunit tout ce que les USA comptent de spécialistes en silicium et en transistors. En 1966, en même temps que le livre (qui n'en dit pas un mot), les transistors MOS sortent sur le marché.

Devenus ingénieurs, les étudiants qui ont réalisé les essais de laboratoire de la bande des quatre n'ont probablement jamais conçu un oscillateur FM à tubes. Peu importe. Les essais leur ont donné l'occasion d'apprendre beaucoup de choses durables.

† J. P. Oemichen, *Circuits électroniques à transistors*,
Société des éditions radio, 1966.

En 1961-1962, quatre cours spécifiques à la section électronique sont au programme de la cinquième année : Compléments d'électronique, Technique des impulsions, Compléments de télécommunications, et Dispositifs électroniques de calcul. Le Pr Jaspers en est le titulaire. Tous ceux qui ont suivi un cours de Jaspers ont appris qu'une vue système, une perception intuitive globale, était un solide préalable à l'étude et au calcul du détail de la réalisation.

Aucun étudiant ne passait ses soirées devant un écran d'ordinateur à cette époque mais plusieurs étudiants de candidatures avaient pour hobby l'électronique. Radioamateurs, audiophiles, modélistes, ils construisaient émetteurs-récepteurs, amplificateurs à haute fidélité, télécommandes, détecteurs de passage et autres gadgets. Les transistors leur étaient parfois familiers avant même qu'ils n'arrivent au premier cours d'électronique. Dans les livres de leurs bibliothèques, « les transistors qui faisaient une timide apparition à la fin de la première édition (1957) tendent à remplacer un peu partout les tubes électroniques »³. Ils ne tarderont pas à envahir les cours spécifiques à la section électronique de l'UCL.

LE CAMBOUIS

Lors d'une soirée étudiante dans un café de Louvain, on parle de la carrière des ingénieurs. Le Pr Nicolas Rouche explique qu'il y aura à l'avenir deux types d'ingénieurs : les uns, avec les mains dans le cambouis, construiront des systèmes ; les autres seraient les utilisateurs de ces systèmes. Jaspers choisit son camp, le cambouis, c'est-à-dire les circuits. Il sait que jamais les tubes à vide ne permettront la construction de grands systèmes mais les circuits intégrés, oui. Le temps est venu de se tourner résolument vers les semi-conducteurs.

La croissance rapide de cette technologie met les ingénieurs devant une demande de compétences nouvelles sans précédent. En 1963, la société Motorola prend une décision inédite dans l'histoire de l'industrie électronique : elle met elle-même sur pied un vaste programme de cours intensifs en circuits intégrés, au niveau du graduat. Cette formation est basée sur une interaction étroite

3. Raymond Brault, *Basse fréquence et haute fidélité*, Librairie de la Radio, Paris, 1964.

entre ingénieurs spécialisés en circuits, en dispositifs et en matériaux, que seule l'industrie peut mobiliser rapidement. Le cours a été répété à plusieurs reprises aux USA et en dehors, notamment à Paris. Paul Jespers y assistait. Le livre⁴ réalisé par le staff de Motorola à partir de ce cours sera bientôt une bible dans son laboratoire.

L'arrivée de Paul Jespers est un événement majeur dans la vie de la FSA. Elle doit beaucoup aux jalons qu'il a plantés loin devant lui et au mépris qu'il a manifesté pour les obstacles réalistes que ne manquaient pas de lui opposer le bon sens, les restrictions de toute nature et les procédures administratives. À force de ruer dans les brancards face à des collègues conservateurs qui l'accusaient de mettre en péril la formation des ingénieurs, il est parmi ceux qui ont changé le plus de choses.

Il défendait une proposition inimaginable : commencer à différencier les programmes de spécialité dès la troisième année, aux dépens des cours communs.

Aujourd'hui, la différenciation est largement entamée dès le milieu de deuxième année. L'évolution des sciences de l'ingénieur a fait exploser le programme d'ingénieur civil électricien : la section « courants faibles » s'est diversifiée en huit options du master : télécommunications, traitement de l'information et du signal, réseaux de communication, hyperfréquences, circuits et systèmes électroniques, nanotechnologies, micro- et nano-systèmes électromécaniques (MEMS, NEMS), technologies photovoltaïques, cryptographie et sécurité de l'information. Il n'y a pratiquement plus de cours commun à toutes les spécialités d'ingénieur au delà de la deuxième année de baccalauréat.

4. D. K. Lynn, C. S. Meyer, D. J. Hamilton, ; *Analysis and Design of Integrated Circuits* ; Mc Graw Hill, 1967

1967

L'UCL ENGAGE FERNAND VAN DE WIELE

1968

PAUL JESPERS EST CONVAINCU QUE LA FIN DU SIÈCLE SERA MOS
OU NE SERA PAS

SOLID STATE CIRCUITS

L'ISSCC (International Solid-State Circuits Conference) est la conférence vedette dans le domaine des circuits intégrés. L'engagement formel de l'Europe dans son organisation, concrétisé par la création d'un comité de programme européen, a lieu en 1965. Au même moment, l'UCL est une des premières universités européennes où le domaine des semi-conducteurs devenait un objectif prioritaire. Dès 1966, un poste de professeur est ouvert dans le domaine de la physique du solide et des dispositifs électroniques. Il est attribué à Fernand Van de Wiele. Ce choix manifeste clairement la volonté d'une approche universitaire fondamentale. Van de Wiele n'est pas un homme de circuits, ni même un ingénieur. Il est licencié en mathématiques et en physique et docteur en Sciences Physiques de l'Université de Gand.

Avec son collègue Roger Van Overstraeten (régime flamand), il démarre une activité de recherche à propos des états d'interface dans les jonctions⁵. Ensemble, ils rédigent les notes du cours de Physique de l'état solide, un épais volume en anglais accompagné d'un formulaire de 40 pages d'équations sans un mot de texte. Pour les étudiants, c'est une randonnée dont ils garderont toujours le souvenir. Ils grimpent au départ des équations de Shrödinger, franchissent les équations d'Ebers et Moll et atteignent des hauts sommets peuplés de quasi-niveaux de Fermi. Il n'est plus question aujourd'hui de faire l'économie des modèles mathématiques des dispositifs !

5. F. Van de Wiele F. and R. Van Overstraeten R, *Influence of interface states on the capacitance of homo- and heterojunctions*, Electronics Letters, Volume 3, issue 9, p. 218- 220, 1967.

Les assistants du Professeur Van de Wiele habitaient un grand bureau où il aimait passer chaque jour parler de nos travaux et de physique électronique de l'état solide. C'était une habitude agréable sinon qu'il arrivait au début de la pause de midi, alors qu'il était temps de filer pour trouver place à table. Jusqu'au jour où il repère sur le tableau d'affichage un étrange petit panneau bleu citant l'Assimil :
Когда я голоден, я не могу работать.

— Qu'est ce que cela veut dire ?

— Cela veut dire : « Quand j'ai faim, je ne peux pas travailler ».

Il n'a rien changé à son agréable habitude, sinon qu'il arrivait désormais un peu plus tôt...



Bureau des assistants du Pr Van de Wiele, 12h30 (1970)

Tout le monde est parti manger.

On voit un étrange petit panneau bleu en haut et à droite du tableau d'affichage.

Par la suite, Van de Wiele donnera ce cours en co-titulature avec Eric Demoulin, Charles Trullemans puis Jean-Pierre Colinge avec il publiera les notes sous forme d'un livre⁶.

En coordonnant leur politique d'achat d'équipements, Jespers, Van de Wiele et Van Overstraeten mettent sur pied un laboratoire de fabrication de semiconducteurs. Circonstance favorable, il existe déjà un laboratoire expérimental à la Manufacture Belge de Lampes et de matériel Électronique (MBLE, Bruxelles), dirigé par Thierry Neuhuis, où l'on fabrique des transistors bipolaires. Cyril Yansouni et Michel Bélanger, assistants et pionniers du laboratoire UCL, ramènent d'un stage à la MBLE un précieux carnet de notes et une première expérience de fabrication de dispositifs.

Malgré des dons de matériel par la MBLE, les budgets mis en commun sont à peine à la hauteur de l'entreprise. L'ingéniosité des assistants et techniciens fait apparaître des moulins à café dans le rôle de centrifugeuses pour résine de photogravure, des fers à repasser devenus

6. Jean-Pierre Colinge et Fernand Van de Wiele, *Physique des dispositifs semi-conducteurs*, De Bouck 1996.

Il s'agit de signer la commande d'un microscope métallographique haut de gamme. Sur quel budget ?

— Aimes-tu signer des bons de commande ? demande Van de Wiele.

— Pas du tout ! répond Jespers.

— Alors signe celui-ci, tu ne pourras plus en signer beaucoup d'autres cette année.

plaques de cuisson thermostatiques, des cocottes minutes métamorphosées en enceintes de stockage sous vide. Tout est à inventer. C'est une fabuleuse période d'apprentissage.

Les étudiants ne sont pas oubliés : une des séances de laboratoire est une longue après-midi durant laquelle, près d'une hotte de chimie, autour d'un ancien four MBL et en utilisant une technologie MESA sur silicium (Texas Instrument, 1957), les étudiants en électronique fabriquent et, quand tout va bien, mesurent, des diodes. Les étudiants de Van de Wiele ont pour livre de chevet le livre d'Andrew Grove⁷ qui vient de paraître. Entre 1965 et 1970, 16 travaux de fin d'études sont consacrés à la physique des dispositifs et aux circuits à transistors.

Le prodigieux et légendaire pont Boonton quittait parfois le laboratoire de recherche pour le laboratoire didactique. Un groupe d'étudiants est occupé à mesurer la caractéristique de capacités MOS.

Étudiant 1 (gesticulant derrière la table)

— You-you ! Je suis la capacité parasite !

Étudiant 2 (sans lever le nez, les yeux rivés sur l'équilibre du pont)

— Tais-toi, tu n'es que le parasite sans capacités !

Le parasite expert en électrostatique et l'expérimentateur capable seront tous deux un jour de très bons assistants.

7. A. S. Grove, *Physics and Technology of Semiconductor Devices*, John Wiley and Sons, 1967

Le premier travail consacré aux structures MOS démarre en 1966⁸. On voit apparaître la légendaire grille de rasoir Braun, pilier de la méthode de caractérisation des oxydes, le mieux que l'on puisse trouver si l'on cherche une feuille métallique très fine, percées de petits trous réguliers, à travers laquelle évaporer l'aluminium pour réaliser les électrodes métalliques à la surface de l'oxyde. La qualité de l'interface oxyde-silicium est très sensible au procédé de fabrication. La mesure des capacités MOS, entrée au laboratoire avec ce TFE pratiquement en même temps que la publication du livre de Grove, va devenir une mesure de routine, l'assurance qualité de la chaîne de fabrication.

UN CLUB DE GENTLEMEN

En même temps qu'à Louvain, l'intérêt des universités pour les circuits intégrés s'est éveillé partout en Europe. À la fin des années 1960, plusieurs laboratoires universitaires se sont groupés dans le *Semi-conductors University Bulletin* (SUB). Lors d'une réunion du SUB à Budapest en 1990, le Pr Oscar Memelinck le définira un jour comme « un club de gentlemen possédant une chambre propre ». Ce club éditait un bulletin et organisait des réunions où des bricoleurs de génie échangeaient leurs meilleures trouvailles. Les mêmes, mais dans d'autres rôles, parlaient de leurs travaux de chercheurs et de l'enseignement des procédés de fabrication, de la physique des dispositifs et de la conception des circuits.

8. Anne-Marie Anckaert, Remy Bayens ; *Capacité du système métal-oxyde-semiconducteur et application à l'étude des causes d'instabilité des oxydes de silicium* ; TFE UCL, juin 1967 ; Promoteur F. Van de Wiele

Le SUB est probablement à l'origine de l'*European Solid-state Circuit Conference* (ESSCIRC) fondée par Paul Jespers avec les professeurs Oscar Memelink (Twente), et Walter Engl (Aix-la-Chapelle). La première édition aura lieu en septembre 1975 à Canterbury, ensuite chaque année dans un pays différent.

Souvenir d'une réunion du SUB à
Twente, 1974



Première conférence ESSIRC,
Canterbury
du 2 au 5 septembre 1975[†]



[†] *First European Solid-State Circuits Conference (ESSIRC)*, IEE Conference publication No. 130, Institution of Electrical Engineers, Savoy Place, London, WC2, England.

PLAN QUINQUENNAL, JUIN 1967

Les recherches en physique de l'état solide et dispositifs semiconducteurs sont pluridisciplinaires. Van de Wiele engage un physicien, Guy Doucet⁹, et un chimiste, Guy Nolet¹⁰. Ils partageront avec les électroniciens le grand bureau où se trouve son équipe. Ce sera un lieu permanent de séminaires improvisés.

Dans le plan quinquennal publié par la commission facultaire d'électricité en juin 1967, on peut lire : « En jetant des ponts entre théorie et expérience on se prépare à l'étude des structures intégrées, un point de convergence possible pour les sections de circuits, d'hyperfréquences et de physique électronique de l'état solide. A cet effet, le professeur Jespers travaillera six mois (de septembre 1967 à février 1968) dans le laboratoire du professeur Linvill à Stanford University. »

9. Doucet, G, Van de Wiele, F. ; *Experimental and theoretical characteristics of MOS transistors non uniformly doped by SILOX technique* ; International Electron Devices Meeting (IEDM), 9-11 Dec. 1974 ; pp 390-393

10. Nolet, G. ; *Kinetics of Decomposition of Silane (Diluted in Argon) in a Low Pressure Glow Discharge* ; J. Electrochem. Soc. 1975 Vol. 122, no 8, p. 1030-1034

En 1966, l'équipement du labo était sommaire ; fabriquer des diodes PN convenables était une première étape importante à franchir ! Les premiers travaux de recherche et doctorats avaient pour objet la technologie et la théorie des jonctions PN. L'étude ultérieure de dispositifs de type MOS a permis d'étendre plus largement le champ d'action et de récolter de nombreux résultats.

Fernand Van de Wiele

Jespers trouve à Stanford un laboratoire similaire à celui de Louvain, occupé aux mêmes types d'explorations. Il se familiarise avec la physique des structures MOS et la technologie de fabrication. De manière inattendue, il observe un courant de fuite inexpliqué dans un transistor MOS, en présence d'impulsions sur la grille. Il explique le phénomène par analogie avec un circuit qui transforme une fréquence en courant par pompage de charges, que lui avait expliqué V. Belevitch longtemps auparavant. Il signe une publication importante¹¹, non seulement parce qu'elle sera la base de méthodes de mesure des charges d'interface, mais surtout parce qu'elle met en œuvre des concepts de circuits au niveau de la physique du semi-conducteur et marque un tournant décisif dans son activité. Quelques années plus tard, le même type de raisonnement à propos d'injection de charges sera à l'origine des matrices de lecture de caractères dont le développement sera le thème fédérateur des activités du laboratoire.

11. Brugler, J. S., Jespers, P. G. A. ; *Charge pumping in MOS devices*, IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 16, no 3, p. 297-302, 1969

Pour effectuer une mesure de routine de capacités MOS à la fin des années 1970, il faut déposer la tranche sur le support chauffant, sous le flux d'azote sec. Il faut poser la pointe de la sonde avec délicatesse ET fermeté sur un des petits cercles métallisés à la surface de l'oxyde.

Il faut mesurer sans trop bouger car les vibrations font varier les capacités parasites de manière sensible, même si les connexions ont été réalisées en tube de cuivre rigide. L'aiguille du traceur réagit en suivant fidèlement la valeur de la capacité. Elle répond à tout mouvement sur le sol.

La plume du traceur avance lentement car la polarisation varie lentement pour garder la capacité dans un état de quasi-équilibre. Les opérations de mesure sont longues, des heures de patience et d'appréhension du verdict.

Soudain, le tracé plonge : la tension de seuil est atteinte. Quel bonheur de la voir à l'endroit espéré, et de la voir stable même à chaud !

Yves Leduc

La vie des collaborateurs de Jespers n'était pas exempte de surprises. Une surprise de taille attendait Michel Declercq, alors assistant au laboratoire. Il était occupé à développer un récepteur de télécommunications spatiales dans le cadre de collaborations avec Bell Téléphone et préparait une thèse de doctorat consacrée aux récepteurs à verrouillage de phase. À son retour, Jespers lui annonce ses perspectives : développer des circuits intégrés.

— Intéressant, dit Declercq, quand comptez-vous commencer ?

— Demain ! répond Jespers.

En effet, dès le lendemain, Jespers entraînait tout le monde dans sa passion pour la microélectronique. Nous y sommes encore. Michel Declercq présentera sa thèse en 1972. Elle était intitulée : « Étude des pertes à la commutation dans les transistors MOS ». Il sera ensuite professeur à l'EPFL (École Polytechnique Fédérale de Lausanne) — où il enseignera la conception des circuits intégrés.

Lorsque Jean-Noël Decarpigny, spécialiste de l'acoustique sous-marine, décidera en 1980 de démarrer un enseignement de microélectronique à l'Institut Supérieur d'Électronique du Nord (ISEN, Lille), il fera appel à l'aide du labo UCL. Il sera lui-même le pilier de cette orientation et plusieurs membres du labo verront les membres de l'équipe de l'ISEN, selon le mot de P. Jespers, comme des « amis et collaborateurs plus lointains ». Selon le même scénario qu'à Louvain en 1968, les thèses de doctorat sont réorientées vers la microélectronique. La première promotion sera diplômée à l'ISEN en 1983. Durant plus de dix ans, des professeurs de Louvain feront régulièrement le voyage à Lille pour aller partager avec les étudiants une journée marathon de six heures de cours et avec les professeurs un déjeuner rapide dans un bistrot voisin. Les liens entre le labo UCL et l'ISEN, puis l'Institut d'Électronique de Microélectronique et de Nanotechnologie, (IEMN, Lille), et l'ISEP (Paris) sont encore très vifs aujourd'hui.



À partir de 1980, Paul Jaspers a collaboré à la mise en place d'un enseignement en microélectronique dans notre école. J'étais l'un des doctorants avec lesquels il a impulsé le développement de la recherche sur la conception de circuits analogiques MOS basse fréquence. Aujourd'hui, nous travaillons à leur application dans le domaine des térahertz.

Pr Andreas Kaiser, directeur de l'ISEN, 2012

UN TRANSISTOR MOS

En ce temps-là, les étudiants ne choisissaient pas le sujet de leur travail de fin d'études. Toujours au retour de Stanford, Jespers démarre le premier pas d'un projet à long terme : réaliser un système de lecture automatique de caractères. Il explique à deux étudiants qu'ils auront à fabriquer un pixel de matrice photosensible à transistors MOS. Jamais, ni au cours, ni dans une revue d'électronique, ni dans un livre, ni ailleurs, ils n'avaient entendu parler d'un transistor MOS. Mais Jespers ne s'encombrait pas de détails. Il rentrait d'une année sabbatique et était convaincu que la fin du siècle serait MOS ou ne serait pas, en tout cas dans son laboratoire.

Quand on ouvre aujourd'hui un catalogue d'appareils photographiques grand public, on voit qu'une matrice décente contient 16 millions de pixels à 14 bits. L'incroyable et superbe ambition de ce travail de fin d'études, un unique pixel à un seul bit, mais en 1968, était de se situer exactement là où l'explosion des technologies d'aujourd'hui était en train de naître. Encore fallait-il fabriquer avec succès un simple transistor. C'est ce qu'ils ont fait et le travail s'arrêta là.

Jespers rentre de Stanford les poches pleines de protocoles de fabrication. Ils avaient la saveur des recettes venues d'un pays lointain, où le seul nom des ingrédients est déjà un mystère.

L'une d'elles recommandait un nettoyage au Q-Tip. Acide ? Solvant ? Personne au laboratoire, aucun catalogue de produits chimiques ne permet de lever le mystère jusqu'au jour où l'épouse d'un technicien — il s'appelait Pierre — ramène à la maison un bébé tout neuf et avec lui, parmi les accessoires, une boîte de cotons-tiges.

Transistor N MOS

$W, L = 50 \mu\text{m}$

Masques :

- I Diffusion
- II Oxyde mince
- III Trous de contact
- IV Aluminium

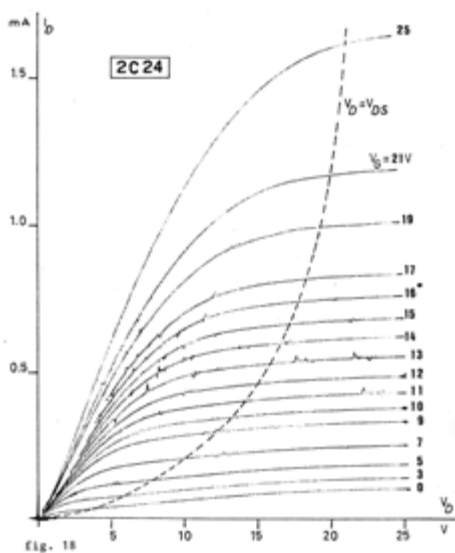
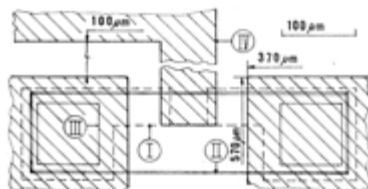
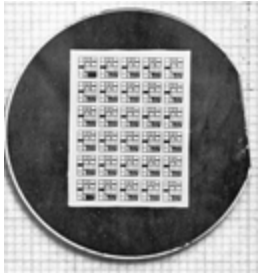


Fig. 18

Caractéristiques du premier transistor MOS fabriqué au Laboratoire de microélectronique.

Juin 1969

CRÉATION — 58



Heverlee, 1969

Première tranche portant des transistors MOS fabriquée au laboratoire.

Transistors MOS canal N, grille aluminium

4 niveaux de masques

Diamètre : standard, 1 pouce 1/4

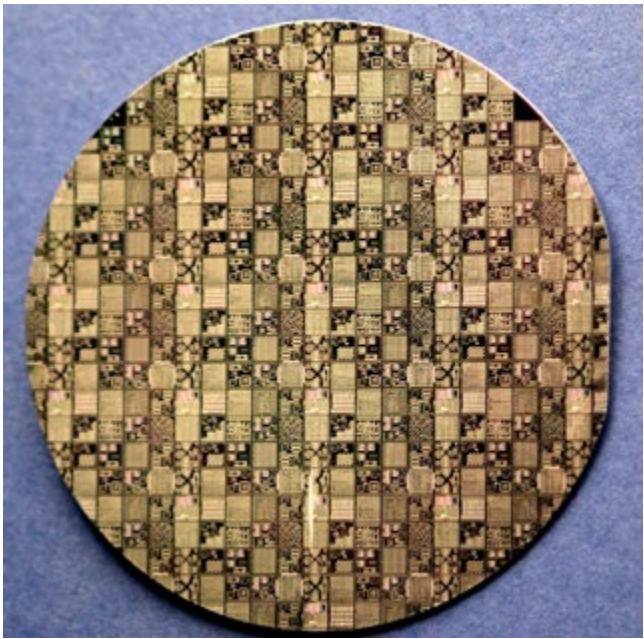
Circuits / tranche : 30

Transistors / circuit : 3

Longueur de canal : ≥ 50 microns

Épaisseur d'oxyde : 100 nm

Tension de seuil : - 3 V



Louvain-la-Neuve, 2012, Winfab

Tranche portant des MEMS et des circuits analogiques CMOS sur SOI

14 à 17 niveaux de masques

Diamètre : 3 pouces, découpée dans
une tranche standard de 8 pouces

Circuits / tranche : environ 300

Transistors / circuit : maximum 50 000

Longueur de canal : ≥ 1.5 microns

Épaisseur d'oxyde : 30 nm, minimum 6 nm

Tension de seuil : $\pm 0, 2V, \pm 0, 4V$ ou $\pm 0, 7V$, selon le dopage

Ce sera le premier transistor MOS fabriqué en Belgique¹².

En 1969, Yves Jongen avait défini le projet de son travail de fin d'études avec le Pr Pierre Macq. Il voulait fabriquer une diode à jonction profonde utilisable comme détecteur en physique nucléaire. Le laboratoire de physique du solide était un bon endroit pour mener cela à bien mais comme la diode devait être dopée au lithium, on avait exilé Jongen au laboratoire didactique où il y avait un petit four et qui n'était pas utilisé toute l'année. Presque chaque jour, il venait dans le bureau des assistants avec une idée nouvelle. Il nous racontait le problème insoluble qui l'avait arrêté la veille (le lithium avait réduit le quartz du tube de four, la capsule où l'on avait tout scellé pour protéger le four avait gonflé et s'était encastrée dans le tube). P. Macq ne s'y est pas trompé. Avant même la délibération, il l'engage comme directeur du nouveau Cyclotron de Louvain-la-Neuve. Yves Jongen sera un des fondateurs d'IBA en 1986.

Une nouvelle équipe de techniciens se constitue. Paul Thibaut se voit attribuer comme première mission de suivre le travail de fin d'études de Trullemans et Kivits ; ce sera son écolage de la technologie des dispositifs semi-conducteurs. Bernard Hérent s'installe sous les combles du laboratoire d'électronique, Pierre Loumaye dans une cave lointaine où il monte le premier atelier de mécanique, Louis Jamar dans le bureau des assistants de F. Van de Wiele. En compagnie d'Eric Demoulin, Charles Trullemans et d'autres, ils installeront à Heverlee « la plus petite chaîne techno de l'histoire de l'humanité ».

12. Guy Kivits, Charles Trullemans ; *L'intégration des transistors MOS* ; TFE UCL, juin 1969 ; Promoteur : P. Jespers.

1970

LES FRANCOPHONES CONSTRUISENT UNE CHAMBRE PROPRE DANS UN LOCAL DE 50 M²

Le 18 septembre 1968, le plan de transfert de la section francophone de l'UCL est approuvé par le pouvoir organisateur. La collaboration avec H. P. Debruyne et R. Van Overstraeten, et plus généralement avec les membres de la section flamande, devient inéluctablement compétition. L'aimable technicien Pierre arrive un matin au laboratoire en déclarant aux étudiants « Ik heet Piet ».

En 1970, les francophones quittent le laboratoire commun. Ils déménagent l'équipement qui leur appartient à l'autre extrémité de l'Institut d'Électrotechnique construisent une chambre propre et son annexe technique dans un local de 50 m². En vue du déménagement à Louvain-la-Neuve, ils apposent soigneusement, sur chaque appareil de mesure, une petite étiquette bleue attestant de son régime linguistique.



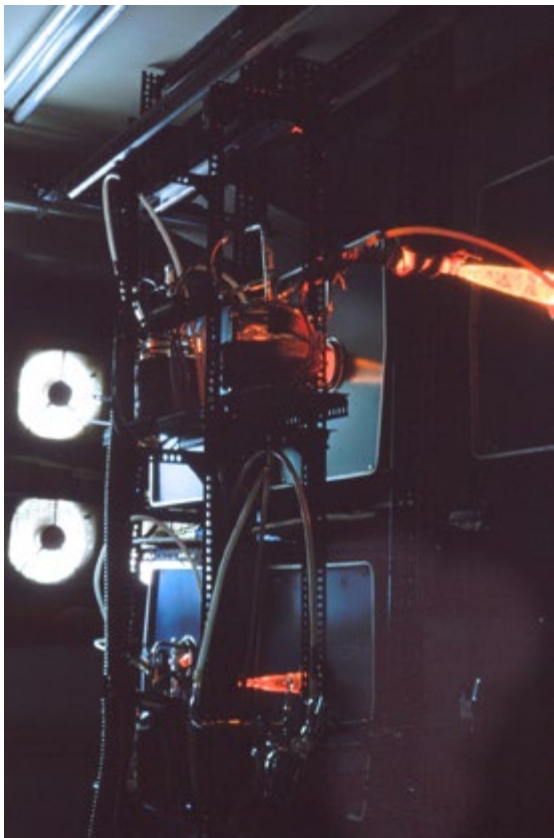
Appareil pour le test de stabilité des oxydes et la mesure des caractéristiques des capacités MOS.

Conçu et réalisé au Laboratoire d'électronique UCL, n° d'inventaire F24
(Francophone 24)



Petite chambre propre d'expression française, Heverlee, 1970

Sur le mur de droite, la centrale d'eau désionisée.



L'envers du décor : fours de diffusion, d'oxydation (avec les bouilloires pour l'oxydation humide) et de recuit.

Les 30 kW dissipés par les fours sont évacués par les ventilateurs placés dans la fenêtre.



Microscope d'alignement.

L'erreur de positionnement des masques ne peut dépasser quelques microns



Le coin des photorésines, maintenu hors poussières par un flux laminaire.

LES PIONNIERS



Dès 1971, les habitués de promenades dominicales à Louvain-la-Neuve voient une université neuve sortir peu à peu de terre.

Le premier bâtiment occupé Place du Levant sera le bâtiment Maxwell.

1971

INTEL CORPORATION COMMERCIALISE LE PREMIER MICROPROCESSEUR À 4 BITS

1972

LE LABORATOIRE D'ÉLECTRONIQUE S'INSTALLE À LOUVAIN-LA-NEUVE

En juillet 1972, le laboratoire emménage sans attendre que le mortier sèche ou presque.

Il était prévu de confier le déménagement de la chambre propre à une firme spécialisée, en régie. Mais aucune firme belge n'a l'expérience de ce type de laboratoire. Celles qui ont été contactées ont toutes décliné la proposition après avoir vu l'équipement. Le déménagement des francophones d'un bout à l'autre de l'Institut d'Heverlée n'était donc qu'une répétition générale, il faudrait rejouer la pièce ? Pas du tout, le déménagement à Louvain-la-Neuve est une chance car nous décidons de ne pas reconstituer le laboratoire à l'identique.

Une fois de plus, tout était à faire. On était dans du neuf et on voyait un avenir.

La mission est simple.
Déballer, remonter ...



Ce déménagement allait être une chance énorme. Notre première expérience, la construction de la chambre propre à Heverlee, nous avait appris beaucoup de choses. Cette fois nous ne sommes plus contraints par un local exigü. Construisons de nouvelles chambres propres !

Nous trouvons au bâtiment Maxwell 500 m² de locaux hors poussières — mais il s'en faut de beaucoup qu'ils soient hors poussières dès le premier jour, encore une fois, tout est à faire. Une petite avant-garde de quatre personnes prend position dès le mois de juillet. Ils installent l'atelier et entament la reconstruction du laboratoire.

Ce sera un formidable travail d'équipe. Chercheurs et techniciens réinstallent le laboratoire didactique d'électronique. Ils rampent dans les faux-plafonds, percent les murs pour faire passer des câbles, posent des conduites pour les gaz, pour l'eau désionisée, pour les circuits de refroidissement, construisent des gaines d'aspiration pour les fours. Ils transportent les équipements et les réinstallent peu à peu. Les chambres propres commencent à mériter leur nom.

Toutes les activités ne sont pas bloquées pour autant. Jacques Talbot et Pierre de Ponthière remontent rapidement le laboratoire de bande L qui n'a pas besoin de locaux spécialement aménagés. En collaboration avec la MBLE, ils continuent les travaux qui les amèneront, en 1975, à étudier des transmissions à spectre étalé.



... raccorder, nettoyer,
redémarrer. Percer les
murs s'il le faut.

Le début de la collaboration industrie-université avait créé quelques problèmes car elle était subsidiée par l'IRSIA qui ne finançait normalement pas les universités (par la suite, les collaborations industrie-université ont été encouragées et sont devenues normales).

Contrairement à son état en 1958, le laboratoire didactique d'électronique n'était pas vide d'équipement en 1971 et cette fois, il fallait le déménager.

Éric Demoulin présente sa thèse¹ le 18 septembre 1972. Le matin même, on avait collé à la hâte des cartons noirs sur les fenêtres de la salle de séminaire pour lui permettre de projeter des diapositives. C'est le premier doctorat attribué par la FSA à Louvain-la-Neuve.

Dès 1970, je ne dessinais plus uniquement des circuits, je participais aussi aux travaux des architectes en vue de la construction du laboratoire de microélectronique de Louvain-la-Neuve. Elle ne se terminerait qu'en 1973. La préparation de mon doctorat en a été retardée d'au moins un an. Qu'importe ! C'était l'année triomphale des pionniers !

Charles Trullemans.

1. Demoulin E ; *Étude de la zone d'inversion présente à l'interface de jonctions à semiconducteur* ; Thèse de doctorat UCL, 8 septembre 1972 ; Promoteur : F. Van De Wiele,



Application expérimentale de la mobilité des porteurs à la dérive d'un flux laminaire.



Montage du laboratoire didactique par deux ingénieurs en électronique et un technicien chimiste.

Louvain-la-Neuve, août 1972.

Les représentants des fournisseurs de matériel étaient prêts, dès le premier jour, à conquérir la ville de Louvain-la-Neuve toute entière au départ de notre laboratoire. En réponse à une demande de prix pour des raccords et robinets peu courants, nous avons vu arriver quelqu'un qui avait reçu pour consigne : « Faites tout ce que ces messieurs vous demanderont ! ».

Les visiteurs non sollicités furent rapidement un fléau qui nous paralysait. Refusant d'admettre qu'ils s'étaient trompés d'interlocuteurs, ils nous présentaient longuement le contenu de leur catalogue.

Nous les adressions à M. Lambert dont le bureau se trouvait « quelque part au premier étage de l'aile B ». Les habitants de l'aile B pensaient qu'un M. Lambert pouvait peut-être y avoir un bureau quelque part mais que lui non plus ne l'occupait sans doute pas souvent. Le central téléphonique de l'UCL connaissait plusieurs M. Lambert, sans jamais réussir à identifier le nôtre.

Nous devons à ce personnage de fiction de longues heures de travail ininterrompues.

Jusqu'aujourd'hui, une bonne centaine de membres du laboratoire de microélectronique obtiendront un doctorat à Louvain-la-Neuve, dont Anne-Marie Trullemans-Anckaert qui sera, le 7 juin 1974, la première femme promue par la FSA au grade de docteur en Sciences appliquées².

Le 14 février 1973, pour la première fois à Louvain-la-Neuve, une plaquette de silicium est introduite dans un four. Six mois après l'arrivée de l'avant-garde en juillet 72, le laboratoire redevient opérationnel.

Il abritera une chaîne pilote capable de maintenir en permanence toutes les étapes d'un procédé industriel, la fabrication de circuits intégrés MOS, depuis la réalisation des masques jusqu'à l'encapsulation des circuits. Ce ne sera pas sans mal.

2. Trullemans-Anckaert A. M. ; *Algorithme de stabilisation dynamique de systèmes linéaires. Application aux amplificateurs opérationnels. Thèse de doctorat UCL, 7 juin 1974 ; Promoteur : P. Jespers.*

Début de la réinstallation d'un réacteur de déposition d'oxyde par décomposition du silane dans un plasma (ou : étape inattendue dans la préparation de la thèse de Guy Nolet)



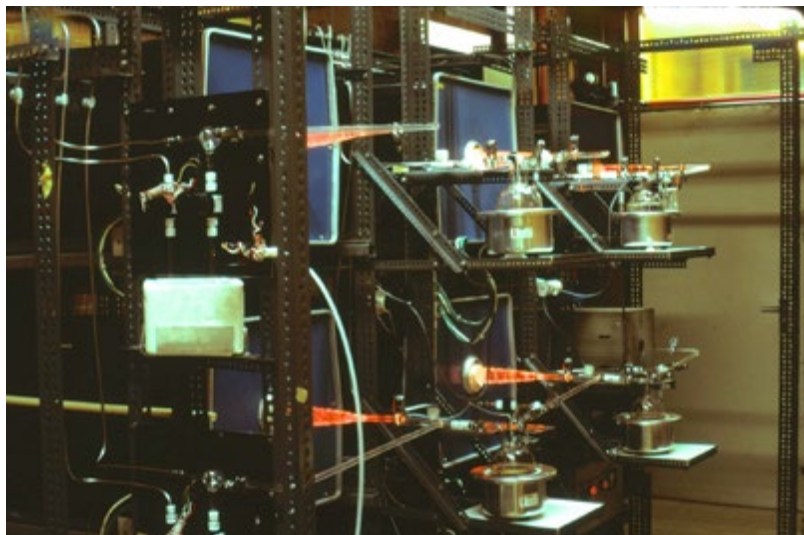
De nombreux assistants et chercheurs contribueront à faire fonctionner cette machine complexe. Le fonctionnement du laboratoire reposait sur un échange de services mutuels, parfois obligés.

Concevoir un circuit intégré, c'était alors faire tous les métiers à la fois, tantôt ingénieur électronicien pour concevoir les système, mettre au point des circuits, dessiner des masques, tantôt ingénieur des procédés pour mettre au point et réaliser la fabrication, tantôt installateur ou technicien de maintenance pour installer, modifier, maintenir les équipements du laboratoire, tantôt biologiste pour repérer les bactéries dans les filtres, tantôt physicien des dispositifs pour imaginer des méthodes d'extraction des paramètres à partir de mesures caractéristiques des transistors. Réaliser un circuit intégré, faire tous les métiers à la fois, une immersion totale dans la résolution de problèmes. On en retrouverait un jour l'écho dans la détermination de certains artisans de Candis 2000.



Chambre propre ou « Chambre jaune »

Louvain-la-Neuve, 1973



L'envers du décor (1970).

Fours de diffusion, d'oxydation (avec les bouilloires pour l'oxydation humide) et de recuit (en bas à droite, un ancien four MBLE dans le rôle du four de recuit).



Le canon à électrons de l'évaporateur, aux bons soins de Louis Jamar.

LE RÉACTEUR D'ÉPITAXIE

L'épitaxie consiste à déposer une couche cristalline sur un substrat cristallin dont elle prolonge l'arrangement. Par épitaxie en phase vapeur, on peut obtenir une couche de silicium relativement épaisse, de dopage homogène, à la surface d'un substrat de dopage différent.

Longtemps avant de devenir en 2009 le directeur exécutif d'Artémis (entreprise commune de recherche à l'échelon européen), longtemps avant de s'occuper de systèmes informatiques embarqués, Eric Schutz commençait sur le terrain son apprentissage des semiconducteurs en prenant en charge un réacteur d'épitaxie. Cette machine était arrivée au laboratoire dans le cadre d'un contrat IRSIA-ACEC pour l'étude de semi-conducteurs de puissance. Elle aurait peut-être été banale aux yeux d'un chimiste mais c'était un voisinage inattendu dans un laboratoire d'électronique. Le cœur d'un réacteur d'épitaxie est un four à haute température où l'on souffle divers gaz toxiques et explosifs. Les effluents étaient traités par le *scrubber*, un brûleur abrité dans un mystérieux cabanon en briques construit sur le toit du bâtiment — exception tolérée par les urbanistes qui avaient soigneusement veillé à limiter à deux étages la hauteur des bâtiments de la Place du Levant.



Le four du réacteur d'épitaxie.

La bobine de chauffage haute fréquence est un tuyau de cuivre où circule l'eau de refroidissement.

Le tube en quartz du réacteur était prévu pour accueillir des tranches de silicium de 1 1/4 pouces de diamètre. Pour les travaux des ACEC confiés à Norbert Bajot et aussi pour les besoins du doctorat d'Yves Leduc, il fallait le porter à deux pouces, tout en respectant les contraintes du système de chauffage à haute fréquence et celles du refroidissement par circulation d'eau. La solution proposée par Yves demande qu'on réalise une bobine de section rectangulaire faite d'un tuyau de cuivre où circule l'eau de refroidissement. Le tuyau de cuivre lui-même est isolé par une gaine plastique thermorétractable. Mais comment plier à angle droit un tuyau de cuivre sans l'écraser et sans le chauffer, avant que la bobine ne soit en forme, au delà de la température à laquelle la gaine se rétracte ? Le problème est insolite pour des chercheurs en électronique.

Yves se souvient d'un article qu'il a lu dans... le Scientific American, décrivant une technique utilisée... pour la fabrication des trompettes : avant le pliage, remplir le tube de cuivre de plomb fondu, après le pliage, le chauffer au four pour liquéfier le plomb qui s'écoule hors du tube. Yves trouve une soudure fondant à basse température, une énorme étuve qui servira de four, un entonnoir en cuivre à souder sur le tuyau pour y introduire la soudure fondue. Le tuyau est mis en forme avec des angles droits formés dans un étau. L'opération se passe sans déchirure ni aplatissement. La gaine est enfilée. Une seconde passe en étuve fait fondre la soudure que l'on peut éliminer, et rétracte la gaine. La célèbre trompette de Bajot-Leduc est née !

Il fallait aussi revoir le générateur à hautes fréquences, placer une citerne et un groupe hydrophore pour l'eau de refroidissement, tirer des mètres de tuyau en acier inoxydable, serrer mille raccords et connecter mille fils sertis de cosses (raccords Swagelok et cosses AMP, éléments culturels fondamentaux du labo).

Et ça marche³ ! Un suscepteur de graphite chauffé à blanc, des bulles de vapeur dans l'eau, le quartz à la limite de l'éclatement, des vibrations partout et... de l'hydrogène pur dopé au silane, phosphine, arsine ou diborane passant à flot.

La première préoccupation dans une ligne de production de semi-conducteurs est la stabilité du processus, gage d'un bon rendement de fabrication. C'est un environnement contraint où un jeune ingénieur doit s'en tenir à regarder sans toucher. Mais pas au labo, qui était un terrain d'expérimentation favorable à l'apprentissage de tous les aspects de la conception et de la réalisation.

C'est la raison pour laquelle Siemens y avait envoyé en stage de formation l'ingénieur Gerhard Grassl. Il contribua à l'étude théorique et expérimentale d'un nouveau dispositif à injection de charge fonctionnant comme cellule de mémoire RAM⁴.

3. Leduc, Y. ; *Dispositif à transfert vertical de charges, une cellule pour mémoire RAM dynamique à très haute densité* ; Doctorat UCL, 1979 ; Promoteur : P. Jespers.

4. Grassl, G. ; Leduc, Y. ; Jespers, P. G. A. ; *The 3T-CID cell, a memory cell for high-density dynamic RAM's* ; IEEE Transactions on Electron Devices, Vol. 26 no 3, p. 865-870, 1979

Quand il expérimentait la croissance de couches à la surface de tranches de silicium, Gerhard pesait les tranches avant et après dépôt pour en évaluer l'épaisseur. Il le faisait avec une minutie extrême, procédant au tarage de la balance avant chaque mesure ; cela rendait les séances de pesée interminables.

Il l'a parfaitement exprimé par une phrase que son accent a rendue historique : « *Ce fait maintenant teux heures que che bèse et che commence a en afoir chusque là* ». À ces mots, la timide laborantine qui l'assistait avec une patience inlassable est brusquement devenue pivoine.

Un tel événement se grave instantanément dans les annales d'un laboratoire.

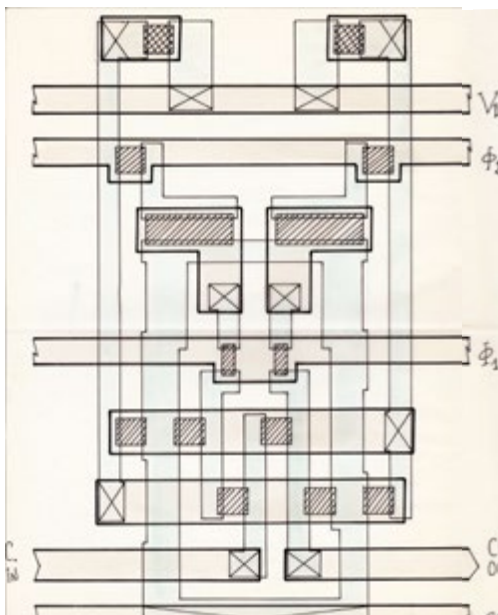
Yves Leduc

LA MACHINE GYREX

Dans une technologie simple à grille aluminium, une dizaine de rectangles répartis en quatre masques suffisent pour dessiner un transistor MOS. Si un circuit ne comprend que quelques transistors, on peut réaliser à la main un modèle des masques à grande échelle. D'abord on trace tous les rectangles au crayon sur une grande feuille de papier millimétré. Ensuite on relève les cotes de chaque côté de chaque rectangle, masque par masque. Enfin on reporte chaque masque sur la pellicule colorée qui recouvre une feuille de Mylar en y incisant, avec le couteau d'une table à tracer, chaque côté de chaque rectangle. Il suffit alors de décoller la pellicule colorée de l'intérieur du rectangle pour faire apparaître le dessin du masque qui pourra être mis à l'échelle et répété par un procédé photographique.

Dessin sur papier calque
des masques d'une cellule
de compteur

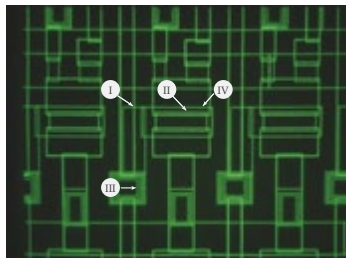
(197 ?)



Quand l'opérateur est un être humain normal, il est possible, après quelques dizaines de rectangles, qu'il ait un geste maladroit. Il décolle la pellicule vers l'extérieur du rectangle. Ce n'est pas grave. On reprend à zéro le tracé du masque en cours jusqu'à réussir un sans-fautes et on passe au masque suivant.

Le projet de lecture automatique de caractères implique une augmentation importante du nombre de transistors par circuit. Le moment est venu de changer de méthode. Un mini-ordinateur VARIAN avait été acquis dès 1970 dans le cadre de ce projet. Grâce à deux travaux de fin d'études successifs, il était doté d'un terminal alphanumérique et d'un écran graphique à rémanence. Cette petite machine était donc capable de supporter un logiciel de conception de masques de circuits intégrés, hautement interactif, alors que l'ordinateur IBM du Centre de calcul n'était pas à même de répondre à une telle demande. En 1975, Alain Fontaine démarre le développement du *Mask Generation System*, logiciel entièrement codé en assembleur, aussi efficace que les produits commerciaux de l'époque.

Les deux écrans et la tablette qui font du mini-ordinateur Varian une machine de CAO interactive.



Détail d'un circuit sur l'écran de la Varian, 197?.

- I Diffusion
- II Oxyde mince
- III Trous de contact
- IV Aluminium

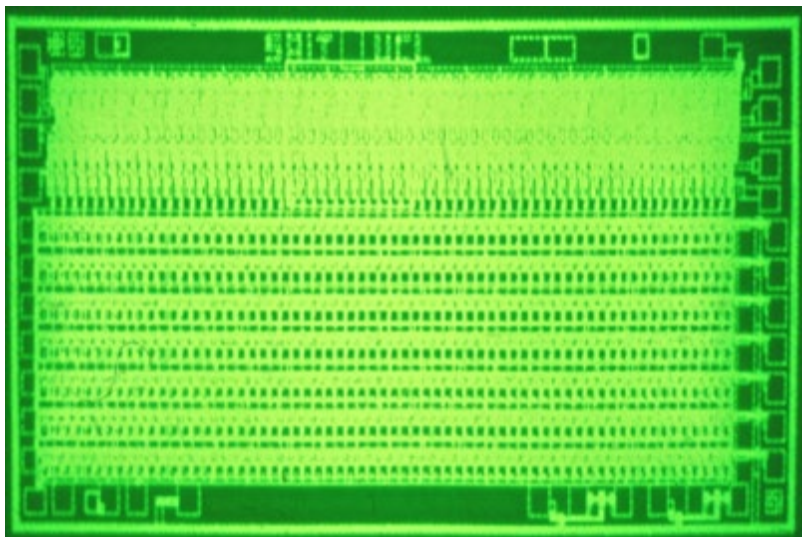
Le procédé de développement des masques photographiques donnait pas mal d'ennuis. Grâce à un contact établi avec un ingénieur d'une filiale de Philips, située dans la campagne anglaise à l'ouest de Londres, je lui rends visite. Nous discutons longuement du procédé. Pour me permettre de faire des essais, il me donne de précieuses plaques photographiques Agfa de 2 x 2 pouces, enfermées hors poussières dans des boîtes en plastique noir, sans étiquette, scellées par une bande collante.

Il me les donne, c'est-à-dire qu'aucun document ne les accompagne. Comment franchir la douane à l'aéroport avec ces colis anonymes éminemment suspects qu'on ne peut ouvrir sans ruiner leur contenu ?

Heureusement, une équipe sportive accompagnée d'un bataillon de supporters, brailant et gesticulant dans le délire de la victoire, rentrait à Bruxelles dans le même avion. Les douaniers les regardent passer en riant et, avec eux, moi qui m'étais glissé dans le groupe.

Ils avaient gagné le match. J'étais aussi content qu'eux : j'avais gagné assez de plaques Agfa pour assurer mes essais et plusieurs semaines de production au laboratoire.

Charles Trullemans



Masque d'une matrice de lecture de caractères affiché sur l'écran graphique de la Varian.

La Varian ne pouvait imprimer que sur une Teletype ASR33 à 10 caractères par seconde.

Un jour, j'ai voulu sortir un listing du programme MGS en cours de développement. Cela a pris plus de 24 heures et dégagé une odeur d'huile chaude digne des pompes à vide de la chambre propre. Je ne l'ai fait qu'une fois.

Alain Fontaine

Bande papier contenant les commandes de réalisation d'un masque, produite par le programme MGS sur la Varian



Les masques photographiques sont fragiles. Le laboratoire achète une machine qui permet de les copier sur des masques métalliques. La machine arrive aux Douanes belges. Ils nous téléphonent pour demander de l'aide afin d'établir la taxe d'importation.

– Nous avons une liste de catégories d'équipement et nous devons cocher la bonne case... Je vois qu'il y a une pompe à vide et un écran dans cette machine, Que dois-je cocher ? Pompe à vélo ou téléviseur ?

– Les taux de taxation ne sont pas les mêmes ?

– Effectivement, les taxes pour un téléviseur sont beaucoup plus élevées.

– C'est une pompe !

– OK, merci beaucoup.

La Gyrex ne donnait pas satisfaction. Le patron de la société (apparemment de fraîche date) est venu en personne passer plus d'une semaine au labo.

Nous passons plus de douze heures par jour au labo, démontant, nettoyant, remontant et relubrifiant la mécanique entre chaque plaque de test. Ces actions n'avaient bien sûr aucun effet sur l'électronique de commande mal conçue.

Alain Fontaine



La machine Gyrex

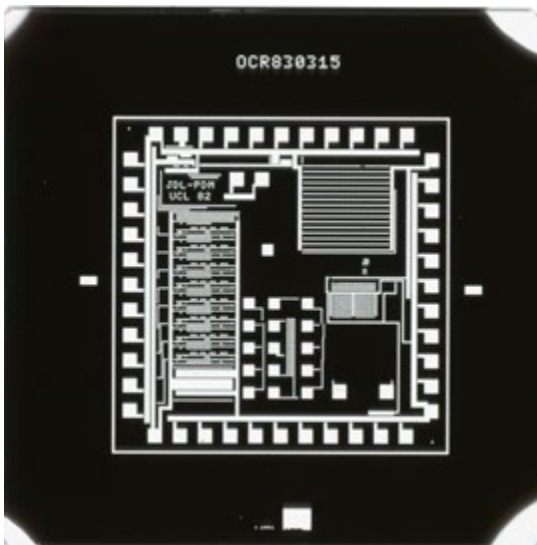
Le laboratoire organise pour des industriels belges une journée de formation à la microélectronique. Alain Fontaine présente la fabrication des masques.

Il n'aime pas la Gyrex. Il provoque de vigoureuses réactions en déclarant devant un nombreux auditoire, que cette machine « est basée sur de l'électronique de mécanicien ».

Le MGS sera utilisé jusqu'au début des années 1980 par tous les étudiants et chercheurs qui dessineront des masques au laboratoire. Alain Fontaine ira lui-même à Ottawa pour l'installer à la Carleton University chez le Pr Copeland.

Hormis le terminal, le seul moyen de communication de la Varian avec le monde extérieur est de lire et perforer des bandes de papier. Le Centre de calcul est équipé d'une table traçante Xynetics qui peut produire les dessins des masques à grande échelle sur papier, mais uniquement si les données lui sont présentées sur bande magnétique. Par bonheur, dans le but de réaliser en temps réel l'acquisition de mesures de propagation de signaux à travers la pluie, le laboratoire d'hyperfréquence avait également installé une machine Varian. Celle-ci est capable de transférer le contenu d'une bande de papier perforé sur une bande magnétique. Par beau temps, on nous permet aimablement d'y accéder.

Masque de métallisation
pour un circuit OCR



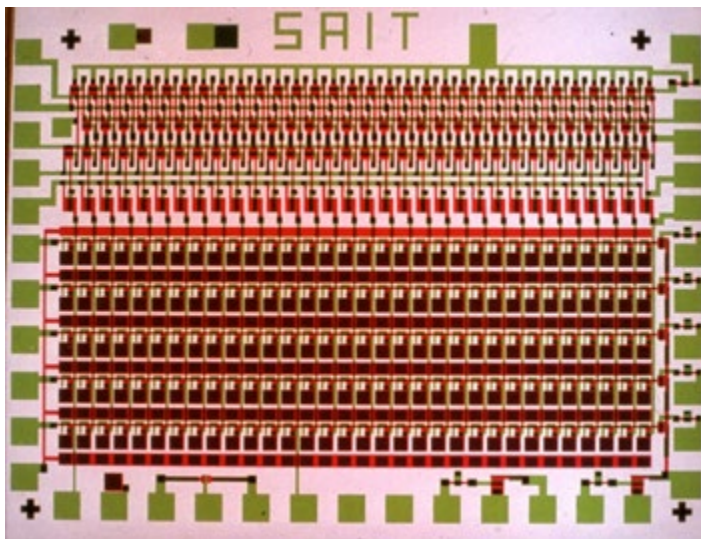
Après avoir dessiné un jeu de masques avec l'aide de MGS, après avoir attendu la fin de la pluie pour le transférer sur bande magnétique, après avoir attendu un jour ou deux pour que la bande soit lue par les opérateurs du Centre de calcul, un certain temps pour que la tête de tracé soit calibrée pour quatre plumes et le dessin terminé, on peut en attaquer fébrilement l'examen, rectangle par rectangle. Il faut vérifier qu'il correspond bien au schéma du circuit et que la disposition relative des rectangles est partout correcte.

Pour éliminer le délai dû à la production d'une bande magnétique, le labo établira un réseau informatique avant l'heure en connectant la Varian à un ordinateur du Centre de calcul, à travers un long câble tiré du bâtiment Maxwell au Pythagore à travers un tunnel technique. Durant la nuit, les opérateurs assistent au ballet saccadé de la tête de tracé. Elle dessine des milliers de rectangles enchevêtrés, hiéroglyphes colorés incompréhensibles à leurs yeux. Cette attraction incontournable devint un point de passage obligé pour tous les visiteurs du centre qu'elle mystifiait.

La machine Gyrex lit les commandes sur les bandes papier. Pour chaque rectangle, elle déplace pas à pas la table qui supporte la plaque photographique et ajuste les dimensions d'une fenêtre rectangulaire qu'elle projette sur cette plaque. Mais la fiabilité du système n'est pas totale et les conséquences d'une erreur sont très lourdes car on ne pourra les découvrir que par le test des circuits, après les avoir fabriqués en vain.

Le microprocesseur 8 bits Motorola arrive sur le marché, à point nommé pour permettre à Alain Fontaine d'envoyer aux oubliettes l'électronique de la Gyrex. Il conçoit un système micro-informatique. En 1977, Bohdan Katchmarskyj obtient le poste d'ingénieur technicien ouvert au laboratoire grâce au fait que, comme il le dit lui-même, Jaspers a sélectionné « le petit cosaque » parmi les candidats. La première mission qu'on lui confie est la construction du nouveau module de commande de la Gyrex. Il comporte une série de cartes glissées dans un rack. Le plus spectaculaire est la connexion des dizaines de bornes wire-wrap entre les connecteurs des cartes.

On avait dit à Bohdan qu'il en aurait pour des semaines. Alors le slave parieur se réveille en lui. Il annonce avec défi qu'il y mettra beaucoup moins de temps. Du matin au soir, il coupe et connecte des fils. Peu à peu, son ouvrage commence à ressembler à un petit matelas de plusieurs centimètres d'épaisseur, fait d'innombrables fils entrecroisés. Quelqu'un (que l'on soupçonne mais sans certitude) profite d'une absence de Bohdan pour ajouter un fil qui part d'une borne, passe en zigzag à travers tout le matelas et revient se connecter à la même borne. Mais Bohdan vérifie son câblage au fur et à mesure qu'il progresse. Les deux connexions surnuméraires sur cette borne ne lui échapperont pas. Cette histoire se termine par des hauts-faits qui marquent l'entrée de Bohdan au labo : le câblage est correct, il a effectivement été réalisé en beaucoup moins de temps que prévu, le test du système micro-informatique est un succès.



Matrice de lecture SAIT (vers 1978)

Une longue série de contrats IRSIA financeront des recherches exploratoires confiées par Bell Telephone à l'UCL. Elles débutent en 1975 lorsque Charles Trullemans est engagé dans ce cadre. La première demande concerne des mémoires RAM, juste au moment où paraissaient, souvent en allemand, les premiers articles à ce sujet. Viendront ensuite les transistors DMOS, un circuit de test pour lignes téléphoniques basé sur les fonctions de Walsh⁵, des filtres analogiques à capacités commutées pour un Codec⁶, le développement du premier amplificateur opérationnel intégré utilisé par ITT Intermetall (Freiburg im Breisgau), l'intégration à un simulateur de circuits du modèle de transistor MOS basé sur le calcul du potentiel de surface⁷, dû à F. Van de Wiele, la machine de décision binaire de Marc Davio, la vérification automatique de règles de conception⁸.

5. C. A. Trullemans, J. R. Taeymans, P. Guebels ; *An Integrated Line Continuity Test System for Four Wire Telephone Channels* ; ESSCIRC '78, 4th Solid-state Circuits Conference, 1978

6. Y. Therasse, P. Guebels, P. Jaspers ; *An Automatic CAD Tool for Switched Capacitors Filters Design : A Method based on the Generalized Orchard Argument* ; ESSCIRC '82, 8th European Solid-state Circuits Conference, 1982

7. P. P. Guebels, F. Van de Wiele ; *A charge sheet model for small geometry MOSFET's*, International Electron Device Meeting 1981

8. J. Wénin, J. Verhasselt, M. Van Camp, P. Guebels, J. Leonard ; *Rule-Based VLSI Verification System Constrained by Layout Parasitics* ; 26th Conference on Design Automation, 1989

Jacques Wénin (ingénieur de recherches de Bell Telephone) et moi-même (chercheur UCL) étions deux à travailler ensemble au même projet. L'effet de « brain-storming » a joué pleinement ; travailler en équipe décuple les possibilités individuelles. Cela a augmenté considérablement nos chances de mener à bien le projet qui était en outre bien défini, planifié dès le départ et soumis à un suivi régulier : tous les quinze jours, nous avions des contacts avec nos « patrons » à Anvers.

Le logiciel que nous avons développé est un succès. Il a permis la vérification de nombreux circuits CMOS conçus par Bell Téléphone dont un circuit de 80, 000 transistors. Les résultats ont été présentés à la prestigieuse *Conference on Design Automation*.

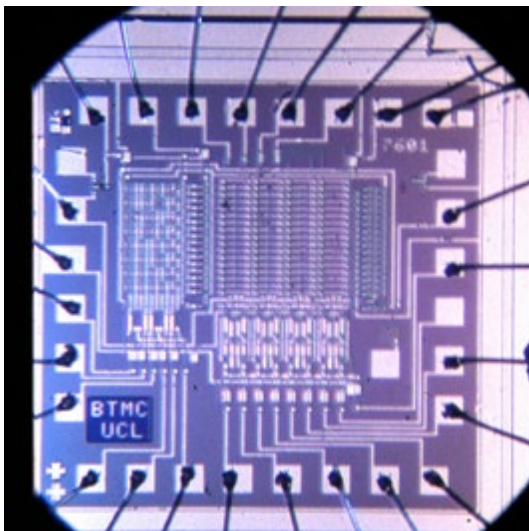
Ce projet ambitieux réalisé à l'UCL est un exemple d'une collaboration industrie-université qui a concilié les demandes industrielles de rentabilité et le souci universitaire de recherche scientifique fondamentale.

Jean Léonard
Décembre 1987

Comme tous les contrats industriels à venir, les contrats IRSIA Bell ont beaucoup apporté au laboratoire : ils ont enrichi l'enseignement et le milieu de travail des doctorants, ils ont contribué significativement à l'équipement du laboratoire et notamment à des acquisitions majeures comme l'ordinateur Prime ou l'implanteur Balzers. La régionalisation de la Belgique y mettra fin un jour car Anvers n'est pas en Région wallonne. Pour la Commission européenne, la Flandre n'est pas non plus un pays étranger. Les règles du jeu allaient changer.

Mémoire RAM
BTMC-UCL

Janvier 1976

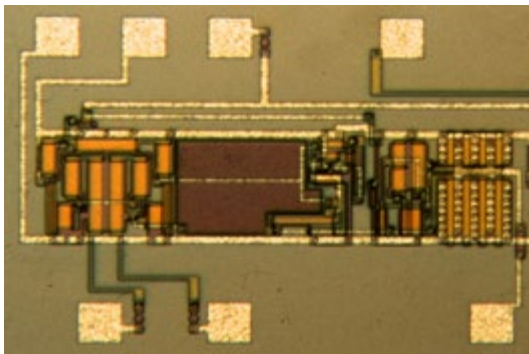


L'implantation d'ions est un procédé de génie des matériaux qui consiste à injecter des ions dans un matériau. En technologie des semi-conducteurs, on l'utilise pour injecter dans un substrat de silicium une dose de dopant au voisinage de la surface. Il est possible de mesurer avec une grande précision les grandeurs électriques donc le courant du faisceau qui détermine la dose de dopant injectée et la tension d'accélération qui détermine le profil de concentration en profondeur. L'arrivée d'un implantateur allait nous permettre d'agir sur une caractéristique importante des transistors MOS, la tension de seuil, et d'avoir ainsi accès à des procédés de fabrication plus performants et à de nouvelles architectures de circuits.

Un implantateur est une machine longue de plusieurs mètres constituée d'une source d'ions, d'un accélérateur, d'une ligne de faisceau et d'une chambre à cibles. La source est enfermée dans une chambre de plomb fortement ventilée. Les ions sont en effet produits par ionisation de composés gazeux (phosphine, diborane, arsine) tristement célèbres de par leur emploi dans des armes chimiques. Les radiations ionisantes imposent le port de dosimètre. Le service de radio-protection contrôle régulièrement l'efficacité du blindage en plomb. Bohdan Katschmarskyj devient le grand maître de cette machine

Amplificateur
opérationnel
BTMC-UCL pour ITT
Intermetall

198 ?



Venues par camion du Lichtenstein, les quelques tonnes de l'implanteur sont arrivées à Louvain-la-Neuve en fin d'après-midi. Le camion était dépourvu de tout système de levage. Malgré l'heure tardive, il restait heureusement assez de monde au laboratoire de Génie civil pour manœuvrer le pont roulant.

Pour la première fois, et à son grand désespoir, le livreur a assisté au déchargement d'un camion par une équipe composée exclusivement de professeurs d'universités, docteurs en sciences appliquées et ingénieurs civils diplômés.

Le lendemain, les membres du labo, spécialistes des circuits subminiatures, avaient emprunté des engins de manutention et retroussé leurs manches afin de mettre en place les éléments de l'énorme machine.

Je me souviens très bien du déchargement de l'implanteur. Marc Lejeune était aux commandes du pont roulant. Nous attachions chaque caisse avec force liens redondants. Le chauffeur bouillait dans son coin.

Soudainement, il pointe chacun de nous du doigt en disant : « Professor, professor, professor... ». Puis il lève les bras au ciel en signe de total désespoir.

Alain Fontaine

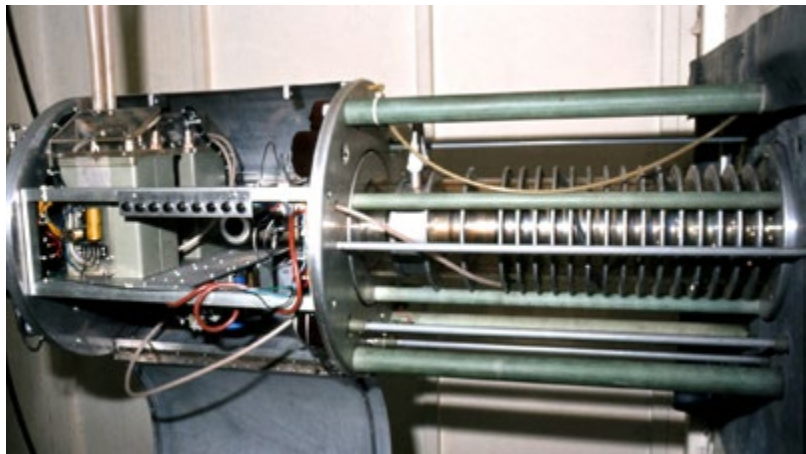


L'implanteur Balzers, 1976.

À gauche, la chambre de plomb. Le vase de Dewar cryogénique contient l'azote liquide utilisé par le piège de la pompe à vide.

Au centre, la ligne de faisceau qui assure la séparation des ions d'après leur masse et le balayage de la cible.

À droite, sous le flux laminaire, la chambre à cibles.



À l'intérieur de la chambre de plomb : le compartiment de la source d'ions.

À gauche, les condensateurs haute tension.

À droite, les électrodes de champ de l'accélérateur, étagées de 0 à 200 kV.

Prévenus d'un départ d'incendie dans le local de l'implanteur, les pompiers arrivent rapidement. Ils pénètrent en marche arrière dans la cour intérieure du bâtiment. Le chef entrouvre précautionneusement la fenêtre du camion et me demande :

– C'est bien ici que vous utilisez des gaz de combat ?

– Oui.

– Etes-vous ingénieur ?

– Oui.

– Avez-vous éteint l'incendie ?

– Oui.

– Signez ici, s'il vous plaît.

Les pompiers repartent alors, droit devant, à tout berzingue.

Yves Leduc

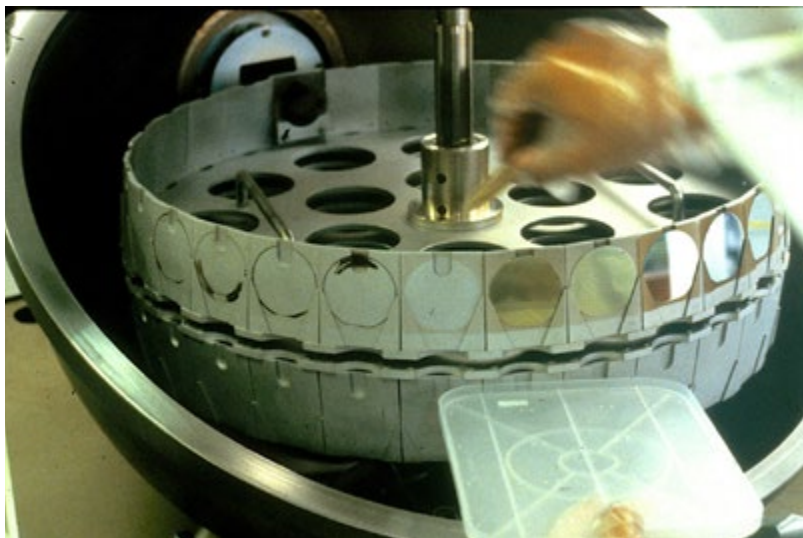
La source, la ligne de faisceau et la chambre à cibles sont maintenues en permanence sous haut vide de manière classique par une pompe primaire à palettes suivie d'une pompe à diffusion d'huile. Les pannes sur un implanteur ont souvent un effet spectaculaire. C'est le cas de *la fuite d'eau du siècle*. À l'intérieur de la pompe à diffusion, un tuyau d'eau de refroidissement s'était rompu soudainement pendant la nuit. La pompe à palettes continue à pomper courageusement, non plus quelques molécules d'air résiduel, mais des flots d'eau et d'huile qu'elle brasse en une fine émulsion. C'est cette espèce de mayonnaise qu'elle chasse dans le tuyau de refoulement, vers la cheminée de ventilation prévue pour évacuer les gaz dangereux en cours d'implantation. Mais la ventilation ne peut pas aspirer l'eau huileuse qui retombe dans la chambre de plomb où le niveau monte, jusqu'à ce que la porte se déforme, livrant passage à l'émulsion qui se répand sur le sol du local.

Le lendemain matin, le programme d'Yves Leduc était de réaliser des photogravures de verre dopé au phosphore, une opération qui ne peut réussir que dans un air très sec. Il comprend rapidement qu'il devra changer de programme et que d'ailleurs le taux d'humidité de l'air n'est pas le vrai problème. De malheureuses femmes de ménage, piégées dans l'océan huileux qu'elles avaient attaqué bravement, glissent comme les Dupondt sur les carrelages cirés du Roi de Syldavie. Elles n'ont plus pour ambition que de ne pas s'étaler. Nous venons à la rescousse ; le nettoyage ne fut pas une mince affaire. Seul avantage : il suffisait de s'appuyer d'une main au mur pour faire glisser de l'autre main, sans effort, les armoires sous lesquelles l'émulsion s'était infiltrée. Balzers avait envoyé un technicien pour la remise en service des pompes et de la source. Après avoir démonté, séché, remonté et regarni d'huile propre la valeureuse pompe à palettes, il constate avec orgueil que cette excellente pompe produite par son excellente entreprise fonctionnait toujours parfaitement, sans qu'on ait dû en changer une pièce.

Mais le pire était à venir. Quelques jours après la fuite d'eau du siècle, Yves Leduc et Bohdan Katschmarskyj procèdent à une implantation à forte énergie. Un incendie se déclare dans la chambre de plomb, peut-être dû à la présence de

traces d'huile laissées par l'inondation de mayonnaise sur les condensateurs à haute tension de la source. Ils coupent aussitôt l'alimentation à 20 kV. Pendant que l'un des deux appelle les pompiers, l'autre se précipite dans son bureau où il savait qu'il trouverait un extincteur – sans s'apercevoir de la présence d'un extincteur dans le local même de l'implanteur. Ils prennent leur courage à deux mains, ouvrent la porte et voient l'extincteur dans la chambre. Fin d'alerte.

En 1995, lorsque l'implanteur Balzers fut remplacé par un implanteur plus récent, l'UCL en fit don à l'Institut physico-mécanique Karpenko à Lvov. Bohdan Katschmarskyj, d'origine ukrainienne, eut le bonheur d'aller y diriger l'installation de cette machine qu'il connaissait alors dans ses moindres recoins.



La chambre à cibles.

ET L'EAU REVIENT. . .

Nous avons assemblé nous-mêmes la centrale d'eau désionisée. C'était un système complexe contenant pompes, électrovannes, circuit fermé de distribution, filtres, résines échangeuses d'ions, stérilisateur à ultra-violet, appareil de mesure de la résistivité de l'eau, jauges de niveau, le tout commandé par un système électronique de contrôle construit au laboratoire. Nous avons fait circuler du chloroxylenol dans le système pour éviter la colonisation par l'indésirable bactérie *pseudomonas aeruginosa*. Nous avons rincé longuement.

Après un long travail de conception, de montage et de préparation vint enfin le moment de la mise en service. Notre centrale d'eau fonctionnait impeccablement. Nous pouvions pousser le cri de l'ingénieur : « Ça marche ! »

Alors, un lundi matin, les premiers arrivés doivent s'équiper de bottes et de raclettes car ils trouvent les chambres propres inondées. Le ballast d'eau désionisée a débordé. La coupable aurait pu être une soupape montée à l'envers. Après correction, une semaine d'utilisation et d'observations attentives montre que le système fonctionne de nouveau à merveille.

Et l'eau revient, le lundi suivant, l'eau revient, c'est encore inondé. . . La coupable aurait pu être une colonie de bactéries. Quelques microélectroniciens transformés en biologistes avaient appris à colorer au bleu de méthylène des cultures réalisées à partir d'échantillons d'eau. Le comptage ne révèle rien de suspect ; tout est néanmoins désinfecté par précaution. Remise en service, la centrale fonctionne impeccablement.

Et l'eau revient, le lundi suivant. . . Les sondes de niveau, de conception maison, étaient peut-être en cause ? Elles sont basées sur des thermistances parcourues par un courant suffisant pour les échauffer légèrement quand elles se trouvent dans l'air. Plongées dans l'eau, elles refroidissent, la valeur de leur résistance change. Détecter cette variation est un jeu d'enfant pour une équipe d'électroniciens enfin sur son terrain. Mesures et essais ne montrent rien d'anormal. À l'occasion, on améliore cependant le circuit puis on remet en service.

Et l'eau revient, le lundi suivant... Yves Leduc qui ne s'en tenait pas aux demi-mesures décide de passer au labo la nuit de vendredi à samedi, la journée du samedi et la nuit de samedi à dimanche. La centrale d'eau fonctionne impeccablement. Le dimanche à 4 heures du matin, rien. Yves craque, il rentre chez lui plus mystifié que jamais.

Et l'eau revient, le lundi suivant... On ajoute, en double protection, un relais qui bascule le contrôle d'un mode automatique à un mode mécanique.

Et l'eau revient, le lundi suivant... plus d'eau que jamais. Le boîtier en bakélite du différentiel qui alimentait le circuit de la centrale d'eau a fondu à cause d'un magnifique arc électrique entre phases dans le relais. Un électricien des services de maintenance de l'université vient remplacer le différentiel. Il est stupéfait : « Je n'ai jamais vu ça de ma vie ! Que s'est-il passé ? ». Il n'a jamais su. Les techniciens du laboratoire feignent la surprise avec un air d'angelots innocents.

La centrale d'eau fonctionnait impeccablement mais uniquement les jours ouvrables. Chaque lundi matin, hélas, le laboratoire était inondé. Chaque semaine, nous y trouvions une nouvelle parade, hydraulique, électronique, biologique... On découvrit enfin que la cause était thermique. Pendant le week-end, personne ne consomme d'eau désionisée. La température de l'eau pompée en circuit fermé augmente très lentement. Les sondes de niveau, sensibles à la température, étaient aveuglées. Quand l'eau est assez chaude, rien ne commande plus la fermeture de la vanne de remplissage qui provoquait un afflux d'eau froide et en même temps le débordement. L'eau froide effaçait les indices de la panne et ramenait le système dans l'état parfaitement stable qu'il montrait tous les autres jours.



Centrale d'eau désionisée
vers 1978

Nous ne connaissons pas la source miraculeuse de Butgenbach, ni Butgenbach d'ailleurs, dont Maria Rompen était originaire. Elle en était très étonnée.

Alors, à côté du robinet d'eau désionisé ultrapure, dans le flux laminaire qui était un haut lieu de la propreté au laboratoire, nous avons apposé un petit écriteau en guise d'ex-voto :

*Eau de la source
de Ste Odile*



Collègues, amis, voisins

de g. à dr. : Anne-Marie Trullemans Anckaert,
Eric Demoulin, Maria Rompen

Juillet 1976

DÉPÔT CHIMIQUE EN PHASE VAPEUR À BASSE PRESSION (LPCVD)

Un four de dépôt LPCVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) est, comme les autres fours du laboratoire, un tube de quartz chauffé à une température variant entre 600 et 1050 °C. Le bâti du LPCVD contient quatre fours, dont deux fours Hydrox où la vapeur d'eau est synthétisée à partir d'oxygène et d'hydrogène. Un échangeur placé au dessus des fours et refroidi par de l'eau glacée évacue la chaleur.

L'installation du bâti LPCVD Tempress n'est pas un chantier anodin. Il faut tirer une ligne d'alimentation électrique de forte section qui lui apportera environ 20 kW et les canalisations d'eau glacée assurant un débit suffisant pour évacuer ces 20 kW. Les gaz à injecter dans les fours sont toxiques, inflammables – parfois auto-inflammables, explosifs. La sécurité demande que l'on stocke les bonbonnes dans un local éloigné, ventilé, depuis lequel on tire des conduites en acier inoxydable. Pour éviter tout risque de fuite à un raccord, chaque conduite, longue de 50 mètres, est d'une seule pièce de bout en bout. Les gaz recueillis à la sortie des fours sont évacués par un conduit qui traverse la hauteur du bâtiment jusqu'au toit, comme pour le réacteur d'épitaxie ou l'implanteur.

Console de commande
des fours LPCVD



Le contrôle de l'atmosphère des fours est critique : on n'injecte pas impunément de l'hydrogène dans un tube de quartz de 2 mètres de long porté à 1000° et rempli d'oxygène. Le rapport stœchiométrique doit être respecté — ou l'explosion n'est pas loin.

Les fours du LPCVD ne sont pas du tout des fours identiques aux autres fours du laboratoire. Leur constructeur ne fournit pas uniquement la machine, il fournit également le procédé de réalisation des dépôts. Le contrôle de ce procédé et de la sécurité sont largement automatisés. L'arrivée du LPCVD annonce en fait la fin de l'ère des pionniers et le début d'une professionnalisation beaucoup plus poussée.

Le LPCVD permet de déposer du nitrure de silicium ou du polysilicium, ce qui était impossible avant son arrivée. Ces couches sont irremplaçables pour la réalisation de certaines étapes de fabrication : oxydations locales, grille des transistors auto-alignées en polysilicium en lieu et place des grilles en aluminium alignées par photogravure. Il réalise l'oxydation en présence de vapeur d'eau synthétisée à partir d'oxygène et d'hydrogène pur par le procédé Hydrox, produisant des oxydes de qualité très supérieure à ce que l'on pouvait obtenir précédemment par oxydation en présence de vapeur d'eau obtenue par ébullition d'eau désionisée.

On m'avait demandé de quitter de temps à autre l'informatique et l'écriture de programmes d'aide à la conception de circuits pour m'occuper du LPVCD. J'avais bien deviné que je m'en occuperais surtout quand il irait mal.

La source des maladies se trouvait parfois dans la « chambre à gaz » où l'acide chlorhydrique gazeux, enfermé dans une armoire ventilée, faisait lentement rouiller les robinets en acier inoxydable et surtout où l'infernal silane profitait de chaque molécule d'oxygène pour ensabler ses conduites.

Un jour, en venant observer par sécurité l'extrémité d'une petite conduite dans un autre local, j'y trouve deux chauffagistes. Ils allaient entreprendre le démontage d'un radiateur. Je les préviens que nous allons faire un test et qu'ils ne risquent rien.

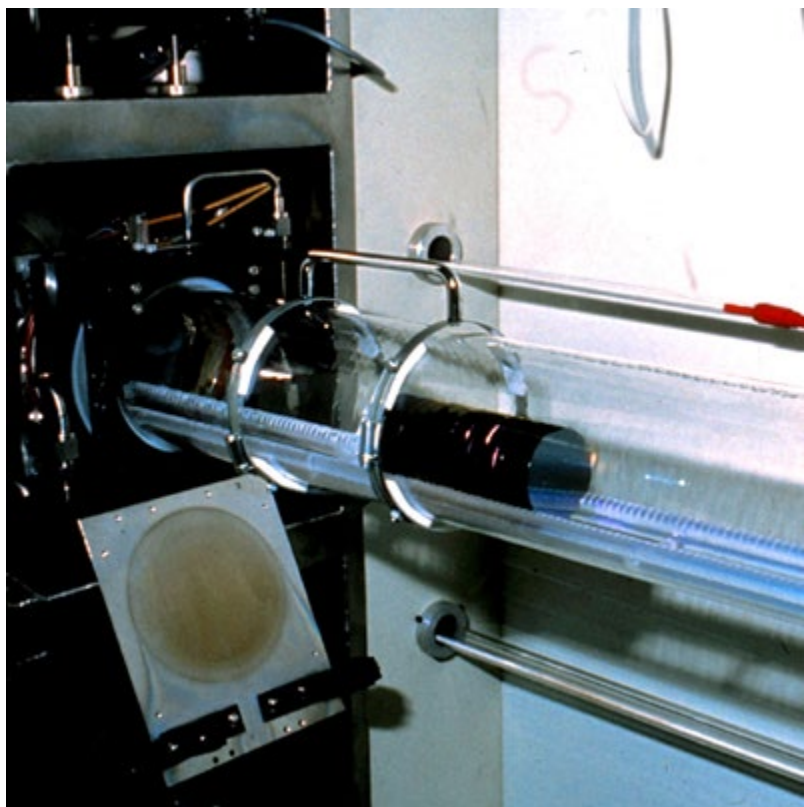
Dans la chambre à gaz, quelqu'un ouvre alors une vanne comme convenu pour provoquer un petit débit de silane. Arrivé dans l'air, le silane (SiH_4) s'enflamme spontanément. Un nuage de vapeur d'eau (H_2O) s'échappe de la conduite en même temps que la flamme, pendant que du sable (SiO_2) tombe de cette flamme.

Ce prodige impressionne énormément les deux chauffagistes. Ils remettent en hâte leurs outils dans leur coffre et me quittent discrètement en disant à mi-voix : « On repassera un autre jour ».

Anne-Marie Trullemans



Réacteur de dépôt APCVD (Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition),
Précurseur du LPCVD utilisé pour la dépôt d'un oxyde de passivation en fin de process.



Enfournement d'une nacelle dans un tube du LPCVD

1978

LE LABO RÉALISE UN CRAYON LECTEUR
QUI CONDUIT À LA FONDATION
DE LA SOCIÉTÉ IRIS.

SYSTÈME SUR SILICIUM

En entendant Nicolas Rouche, Jespers avait eu l'intuition qu'un jour des systèmes complets pourraient être réalisés sur une unique puce de silicium. C'est à la réalisation d'un tel système que le laboratoire allait s'attacher, réalisant une matrice photosensible pour la lecture de caractères, associée à un circuit de reconnaissance. Le premier objectif était un crayon lecteur destiné à la saisie des inscriptions sur les étiquettes de prix d'un supermarché. L'effet de bord intéressant était de fédérer les travaux de nombreux chercheurs et étudiants.

Cette activité se déroulait simultanément sur deux plans, selon un modèle similaire à celui des programmes américains d'*Industrial affiliates* :

- une activité de développement de prototypes fonctionnels avec des échéances précises,
- et une activité de recherche, explorant le terrain avec la liberté de penser à plus long terme en bénéficiant de l'environnement établi grâce aux contrats industriels.

Les développements sont réalisés typiquement dans le cadre de contrats IRSIA pour un partenaire industriel (SAIT, Bruxelles). Le mot « développement » est cependant bien en dessous de la réalité. Les objectifs sont constamment choisis juste un peu au delà des possibilités du laboratoire. Les échéances créent une atmosphère de champ de bataille.

La recherche est confiée à des doctorants, dont le premier travail consiste à dénoncer, avec une ardeur sacrilège, les faiblesses des solutions développées jusque là. Jean-Marie Millet puis Yves Leduc imaginent des circuits de détection de charge plus performants pour les matrices de photodiodes. Après dix ans de progressions accumulées, Michel Rahier reconstruit sur des bases nouvelles tout ce qui avait été fait jusqu'alors. Il conçoit et fabrique un système

dédié de prétraitement de l'image binaire issue du capteur, réalisé sous forme d'un circuit intégré à grande échelle (10 000 transistors, une prouesse pour les chambres propres). Le circuit de prétraitement exécute à grande vitesse la détection et le codage du contour des caractères. Libéré de cette tâche, un microprocesseur standard pouvait ensuite exécuter l'algorithme de reconnaissance.

Les étudiants réalisaient les travaux de fin d'études par groupes de deux. En 1980, Charles Trullemans convainc facilement Paul Jespers de grouper six étudiants autour d'un projet de grande envergure, couvrant tous les aspects de la conception d'un circuit intégré : étude de l'algorithme, réalisation sous forme d'un système logique, conception du circuit jusqu'au détail du dessin des masques. Six étudiants, *le groupe des six*, choisissent de s'associer pour ce travail. On leur attribue un local où ils installent aussitôt une cafetière, préfigurant sans le savoir les locaux de groupe de Candis 2000. Ils vivent dans le laboratoire où ils interagissent avec tout le monde, ils côtoient l'équipe du crayon lecteur.

On les encourage vivement à penser le problème de façon originale. Ils décident d'analyser l'image des caractères en une seule passe, ils constituent une banque de données d'images en connectant le crayon lecteur SAIT et l'ordinateur 32 bits du labo, ils utilisent les méthodes de synthèse systématiques exposées dans le cours de Marc Davio. Ils écrivent en PL/1 une description de leur algorithme sous forme d'un programme structuré puis la description de la machine à transferts entre registres qui le réalise. Ils mettent au point le schéma des cellules de base en technologie NMOS et les dessinent au niveau des masques.

Ils innovent beaucoup, ils se fixent des objectifs hors d'atteinte, ils abattent un travail considérable. En conclusion, « ils osent espérer que leur travail constitue une bonne base pour ceux qui continueront à travailler dans la voie qui fût la leur ».

En février 1987, deux d'entre eux, Pierre de Muelenaere et Jean-Didier Legat défendent leur thèse de doctorat⁹ et font la démonstration d'une nouvelle machine de reconnaissance optique des caractères (OCR). En avril de la même année, ils fondent la société IRIS. Vingt-cinq ans plus tard, elle emploie cinq cents personnes. L'article de Jean-Didier Legat, Pierre Demuelenaere et Paul Jespers¹⁰ paru en 1985 dans le *Journal of Solid-State Circuits* décrit le résultat final de près de quinze ans de travaux consacrés à la lecture optique de caractères. En filigrane du résumé, on peut discerner une démarche typique de la culture du laboratoire, préoccupée à la fois de développement d'outils de conception, d'architectures de circuits numériques évoluant vers les machines algorithmiques et de technologie de fabrication. La complexité du circuit le place à la limite des performances de la chaîne pilote. On peut y discerner également le legs qui a conduit à la fondation de la société IRIS.

9. Chan Kuo Chang, Michel Dauw, Benoît Demelenne, Pierre De Muelenaere, Jean-Didier Legat, Françoise Van Simaey, *Étude et implantation d'un algorithme de reconnaissance des caractères. Conception d'un circuit intégré NMOS de test*. mémoire présenté en vue de l'obtention du grade d'ingénieur civil électricien, UCL Laboratoire de microélectronique, Juin 1981.

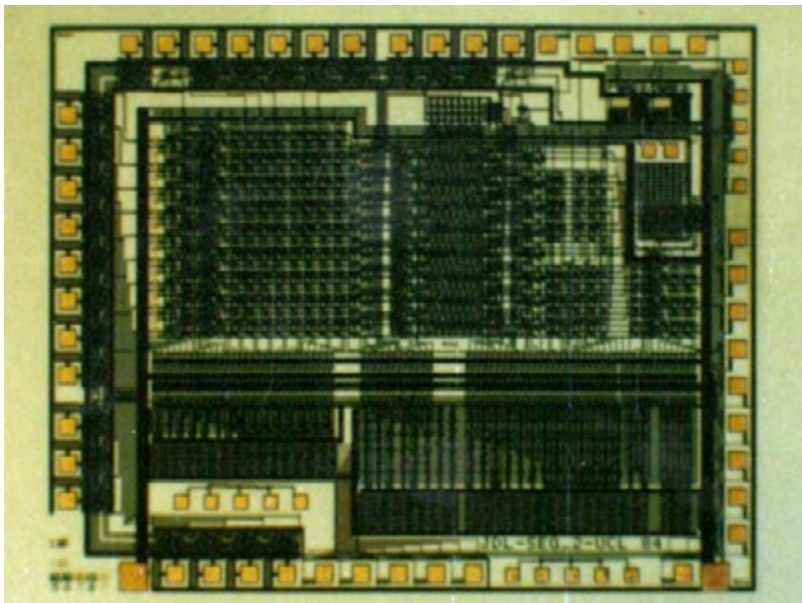
10. Legat, J.-D, De Muelenaere, P. ; Jespers, P. G. A. ; *A Full Custom Integrated Circuit for Document Analysis Systems* ; IEEE Journal of ; Solid-State Circuits ; Vol. 20, n° 3, p. 730-740 ; June 1985

Abstract

This paper describes the architecture and design methodology used to produce a new custom IC intended for automatic document analysis. The circuit implements the entire operative part of a dedicated micro-programmed processor for the next generation of page readers which include items such as Optical Character Recognition (OCR) and different codings for graphics and images. The chip provides a wide range of powerful functions, performing up to three operations per cycle. It includes about 10 000 transistor sites and occupies an area of 20 mm². A standard 6- μ m NMOS technology was used. Typical clock frequency is 2 MHz. The layout was obtained using a highly regular architecture and some automatically generated structures. New CAD tools provided an efficient and short design procedure.

Extrait de l'article

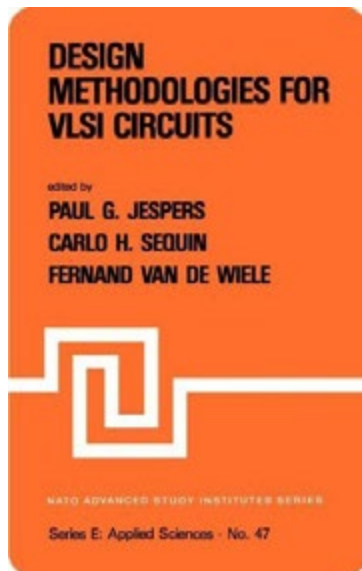
A Full Custom Integrated Circuit for Document Analysis System



A Full Custom Integrated Circuit for Document Analysis Systems

1985

Jespers et Van de Wiele cherchent tous les modes d'emploi possibles de Louvain-la-Neuve. Ils organisent des cours d'été, successivement : *Solid-state Imaging*, en 1975, *Process and Device Modelling for Integrated Circuit Devices*, en 1977 et *Design Methodologies for VLSI Circuits* en 1980. Les cours ont lieu sur le site pour que tous les chercheurs du laboratoire puissent en tirer un maximum d'avantages. Les matériaux rassemblés et formalisés à l'occasion enrichiraient l'enseignement. Encore fallait-il espérer que le charme de Louvain-la-Neuve compenserait le manque d'infrastructures. Partout en Europe, on rencontrera des gens qui se souviennent de leur séjour à Louvain-la-Neuve durant l'été 1980. Pendant toute la durée du cours, il n'a plu qu'une fois, sans interruption, quinze jours d'affilée. Nous étions réfugiés dans les auditoires de la Faculté d'Agronomie pour partager le privilège du chauffage avec les plantes en serres.



Une conséquence indirecte du cours d'été de 1980 est la rencontre avec Altamiro Suzim, alors doctorant à l'Institut national polytechnique de Grenoble chez le Pr François Anceau, ensuite professeur à l'Universidade Federal do Rio Grande do Sul, (UFRGS, Brésil) où Paul Jaspers et Charles Trullemans effectuèrent plusieurs séjours. Ils y seront séduits par l'extraordinaire enthousiasme des étudiants. Ils y rencontreront de jeunes professeurs ayant séjourné l'un aux États-Unis, l'autre en France, ou en Allemagne, ou ailleurs, occupés à créer un lieu riche de ces expériences diverses. Dans leurs bagages, ils ramèneront à Louvain-la-Neuve plusieurs doctorants qui travailleront dans le domaine de la synthèse de systèmes numériques en collaboration avec Marc Davio. Tous sont aujourd'hui professeurs dans une université brésilienne (UnB, Brasilia ; UFRGS, PUCRS, Porto Alegre ; UFV, Viçosa)

peu de le 26 octobre 1981

Mr Charles Trullemans

Merci de vos corrections sur le manuscrit de thèse.
J'ai fait de mon mieux pour les prendre en compte.

Au sujet de l'introduction, ça a été un peu plus difficile : c'est une autre façon de la voir. J'ai parlé avec Mr Anceau qui m'a dit qu'il vaudrait la peine de la refaire. J'espère qu'elle vous plaît.

Encore une fois merci.

Avec mes compliments à toute votre équipe.

Altamiro

En 1981, dans le cadre de missions pour l'UNESCO, pour l'UNIDO, puis avec le support du secrétariat à la coopération de l'UCL, commence une longue série de séjours à Pilani (Rajasthan, Inde) pour des membres du labo, ou à Louvain-la-Neuve pour le Dr Shandra Shekhar, actuellement directeur du Central Electronics Engineering Research Institute (CSIR-CEERI, Pilani) et ses collaborateurs. Le laboratoire et le CEERI ont conclu un accord d'échange ayant pour buts premiers d'aider le groupe de concepteurs de Pilani à acquérir l'expertise nécessaire à la conception de circuits intégrés complexes et de lui donner les moyens de les réaliser. Le CEERI obtient un résultat spectaculaire : le premier circuit *full custom* du pays est réalisé dans le cadre de cet accord. C'est un processeur 16 bits conçu pour la commande PWM de moteurs à courant alternatif à fréquence variable, notamment pour la traction électrique.

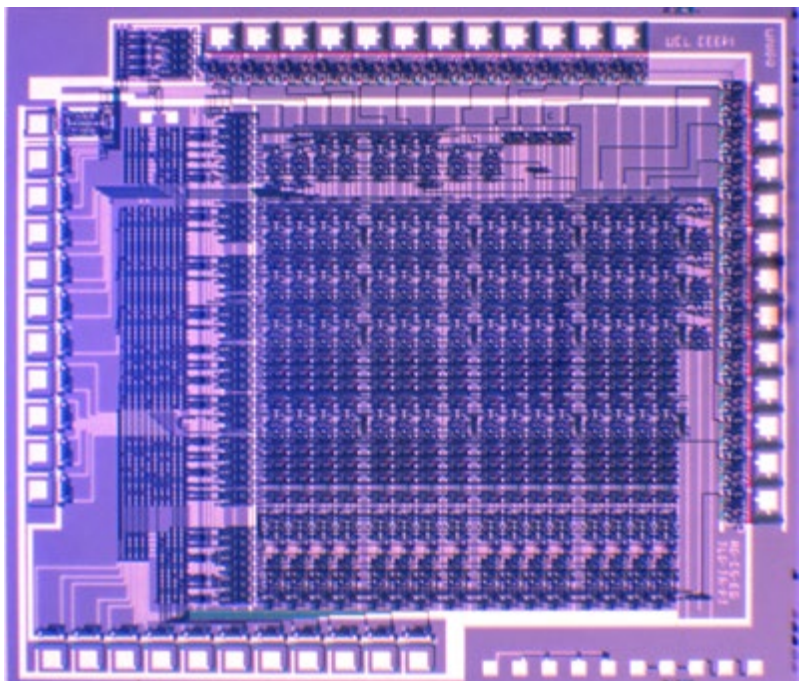
À Louvain-la-Neuve, dans le cadre de leur travail de fin d'études, trois étudiants (Jean-Louis D'Août, Alain Dumont et Éric Gilson) sont associés à ce projet. La conception d'un processeur est une vaste entreprise qui fait appel à plusieurs domaines : algorithmes de calcul, architecture de processeurs, conception de circuits, architecture de circuits intégrés, dessin de masques... Un processeur doit être accompagné d'un environnement suffisamment attrayant où l'utilisateur peut le programmer à partir d'un langage proche de son domaine. Alain Dumont écrira un compilateur basé sur les outils classiques de Unix, LEX et YACC ; ce métier-là n'est plus exactement de la physique des dispositifs semiconducteurs ! Éric Gilson fait de la réalisation d'un contrôleur intégré dédié à la commande de systèmes de puissance le sujet de son doctorat, qu'il présente en novembre 1990. Shandra Shekhar sera un des membres du jury.

Les circuits intégrés et les transistors MOS poursuivent leur conquête de l'électronique. Ils s'implantent peu à peu en électronique de puissance. Une volonté de coopération est exprimée par plusieurs personnes des laboratoires de microélectronique, d'électrotechnique et d'automatique. Les circuits dédiés peuvent résoudre des problèmes de commande en temps réel inaccessibles aux microprocesseurs standards. L'expérience acquise au départ du projet du CEERI ouvre la voie à une collaboration entre les laboratoires d'électronique et d'élec-

trotechnique¹¹. Celui-ci est un partenaire de recherche de la SABCA.

L'histoire du processeur BRISC ne s'arrête donc pas là. En 1997, la SABCA développe une nouvelle version du processeur qui sera utilisée principalement dans l'A320. D'autres versions suivront, adaptées aux exigences de fiabilité du domaine spatial. En 2012, il est utilisé dans le lanceur européen VEGA. L'Agence spatiale européenne peut en disposer sans dépendre de limites à l'exportation imposées par les USA. Il est toujours l'objet d'une intense activité de développement.

11. de la Vallee Poussin, H, Grenier, D, Labrique, F, Legat, J. D. ; *Looking into the implementation of AC motor control on a fixed point processor*, International Conference on Electric Machines and Drives IEMD '99, p 519-521



Le processeur BRISC développé conjointement par l'UCL et le CEERI

1986

J'ai longtemps eu la faiblesse de penser que la conception des circuits et systèmes intégrés était une activité superflue dans les pays en voie de développement. Il a fallu que je remplisse une mission en Inde pour le compte de l'UNIDO pour que je réalise que, tout compte fait, c'était un point de vue assez colonialiste.

L'éventail des activités en Inde va des industries traditionnelles à la mise sur orbite de satellites de télécommunications propulsés par des lanceurs construits en Inde. Le Brésil fabrique des avions et la Chine n'est certainement pas en reste. Nous devrions nous interroger peut-être un peu plus sur l'avenir de notre société occidentale. En Inde, on trouve des équipes d'ingénieurs qui mettent au point des logiciels d'aide à la conception de systèmes intégrés qui sont vendus par les dix entreprises spécialisées européennes et américaines les plus connues au monde.

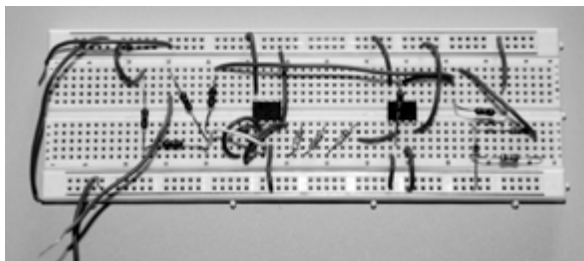
Il n'y a pas de raison de croire que le développement technologique du Tiers Monde ne se fera pas à un rythme accéléré. Les compétences nécessaires s'acquièrent rapidement et les moyens, pour importants qu'ils soient, sont trouvés sans difficultés, car ils ne représentent en fait qu'une petite part du PNB de ces pays.

Paul Jaspers, 20 décembre 1994

1978

LES LABORATOIRES DIDACTIQUES SONT RENOUVELÉS DANS LE CADRE D'UN CONTRAT DE FORMATION CONTINUE

Une société de constructions électriques se rend compte fort à propos que ses électroniciens ont besoin de remettre leurs connaissances à jour. Elle confie au laboratoire l'organisation d'une formation. Cette occasion sonne le glas des châssis précâblés à tubes (exit l'alimentation à 300 V) et des notes de laboratoire à protocole (exit le volumineux carnet qui prenait l'étudiant par la main). Elle provoque le renouvellement de tous les essais. Ils sont conçus dans le but de donner aux étudiants une grande autonomie, possible grâce aux *breadboards*, des plaques percées de trous où l'on peut enficher les composants qui se connectent sans soudure. Et quels composants !



Chaque groupe reçoit un *breadboard* et une boîte de composants.

On peut les emporter pour préparer les essais chez soi et arriver en séance avec un montage déjà prêt. En plus des conseils dont le but est d'éviter l'apprentissage par destruction massive de composants, le carnet ne comporte que quelques pages par séance de deux heures. On y trouve le schéma à étudier — on renvoie au cours pour comprendre comment il fonctionne. On y trouve les mesures à réaliser et les données nécessaires aux prédéterminations — il reste vrai que le hasard ne favorise que les esprits préparés.

Résistances, condensateurs et transistors, bien sûr, mais aussi des blocs fonctionnels disponibles sur le marché : amplis op, interrupteurs analogiques CMOS, oscillateur à modulation de fréquence (VCO), boucle verrouillage de phase (PLL). Le gros châssis de l'oscillateur FM de 1960 peut être remplacé par un petit boîtier occupant à peine 1 cm³ et assez peu coûteux pour qu'un étudiant puisse le malmener !

Le cours d'électronique ne dit plus rien des tubes ni des liaisons capacitives entre étages ; il se tourne résolument vers les architectures typiques de circuits intégrés. Les bases des circuits actifs n'ont pas changé, la contre-réaction introduite par Harold Black a toujours les qualités qu'elle avait en 1927. Mais elle se présente maintenant sous des formes diverses, mises en oeuvre dans un contexte en évolution rapide. Voilà l'objectif du cours : acquérir les réflexes d'un expert, à qui les bonnes idées viennent instinctivement face à une technologie nouvelle. L'électronique ne donne d'autre choix que de réaliser un tel apprentissage. L'étudiant dont le seul talent est de reproduire à l'examen un extrait du syllabus n'a pas grand-chose à espérer.

La reproduction du syllabus n'apporte pas non plus d'atouts aux nombreux étudiants qui suivent ce cours mais n'auront jamais à l'appliquer durant leur carrière professionnelle. Si par contre ils ont eu l'occasion de goûter à l'attitude d'un expert, ils la transposeront naturellement à d'autres domaines.

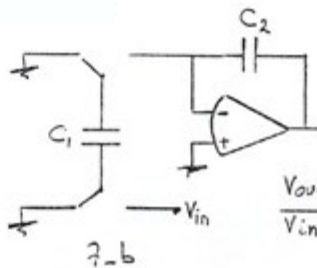
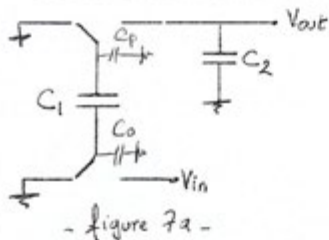
Filtres à capacités commutées, extrait du carnet de laboratoire (1981)

Cours de Circuits linéaires actifs, en avant-dernière année du programme. Ce montage typique des circuits intégrés peut fonctionner à basse fréquence sur un breadboard. Le carnet donne un schéma de principe mais laisse aux étudiants le soin de dessiner le plan de câblage.

Honte aux électriciens lecteurs de ce livre qui ne donneront pas rapidement la réponse à la question 3 (les autres ne se soucieront pas de la question).

(page suivante)

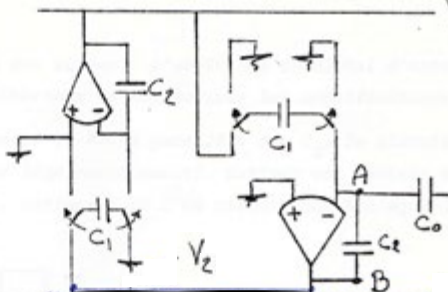
MONTAGE INTEGRATEUR A AMPLI OP

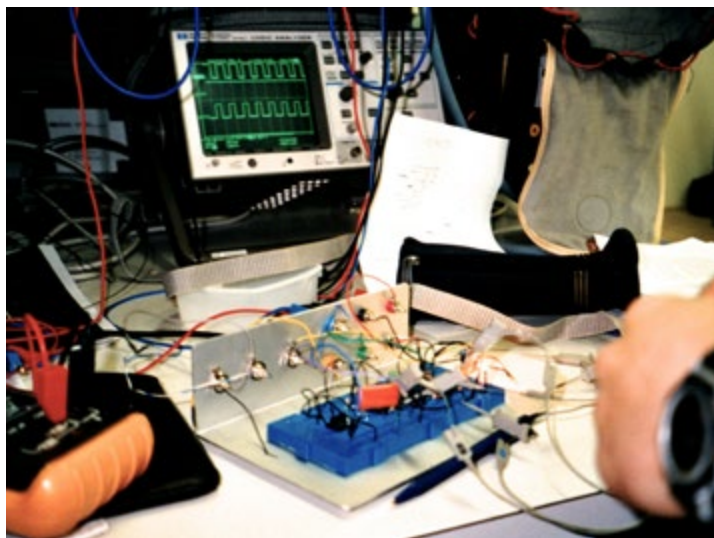


Mesures :

1. Réaliser d'abord le montage de la figure 7a. Vérifier le bon fonctionnement. Ce circuit réalise la même fonction de transfert que RC du premier essai.
2. Réaliser le montage de la figure 7b. Observer V_{out} . Vérifier le fonctionnement de l'intégrateur.
3. Vérifier que ce montage est insensible à C_p et C_s . Expliquer.

BOUCLE DU 2eme ORDRE





Le mouvement lancé grâce aux *breadboards* et aux blocs fonctionnels ne s'arrêtera pas.

Il ouvrira la voie au remplacement progressifs d'une partie des essais de labo par des projets. Même les étudiants de candidature découvriront un jour les concepts de base des systèmes électroniques en les expérimentant sur des *breadboards*.

Photo : projet FSA1015, 2^{ème} candidature, années 1990,
contrôle électronique de température.

1978

FERNAND VAN DE WIELE DÉMARRE UN PROJET DE RECHERCHE
CONSACRÉ À DES CELLULES SOLAIRES
QUI CONDUIRA À LA FONDATION DE LA SOCIÉTÉ SUNPOWER

Dans les années 1980, les travaux de Pierre Verlinden au Laboratoire de Microélectronique ont été à la base du développement d'une des technologies photovoltaïques de pointe, actuellement la plus performante des technologies au silicium.

En 1978, avec la participation financière de la société Électro-Navale et Industrielle (ENI, Anvers), Fernand Van de Wiele démarre un projet consacré à des cellules solaires à haut rendement. Quelques étudiants de dernière année pendant leur travail de fin d'études¹², quelques chercheurs IRSIA, deux ingénieurs d'ENI, commencent à développer des cellules solaires d'un type particulier où les contacts se trouvent sur la face arrière (*Interdigitated Back Contact, IBC solar cells*). Elles requièrent un procédé de fabrication très propre qui garantit la longue durée de vie des porteurs générés. À ce stade du développement, la fabrication demandait plusieurs étapes de photolithographie. Les procédés traditionnels de fabrication de cellules solaires étaient peu ou pas adaptés aux cellules IBC. Par contre, les procédés utilisés en microélectroniques et disponibles au laboratoire étaient un bon point de départ.

Des outils de modélisation analytique ou numérique étaient indispensables pour simuler le comportement des cellules IBC et pour optimiser leurs paramètres physiques. Aucun outil approprié n'était disponible. En plus du développement des technologies de fabrication, ils entreprennent donc une grande activité de simulation numérique à deux dimensions et de modélisation des cellules IBC. Après de nombreuses fabrications infructueuses, les premiers rendements acceptables apparaissent. Les procédés de nettoyage des tranches de silicium, les techniques de diffusion d'impuretés et les méthodes de

12. Dina Brughmans, Pierre Verlinden ; *Conception et réalisation d'une cellule solaire implantée* ; TFE UCL, juin 1979 ; Promoteur : F. Van de Wiele.

passivation de surface qui ont été progressivement mis en place se sont avérés plus performants que ceux qui étaient requis pour la fabrication des circuits intégrés.

En 1985, grâce aux travaux de Pierre Verlinden¹³, le Laboratoire de Microélectronique se trouve à la pointe de la technologie photovoltaïque avec des cellules IBC dont le rendement atteint 27% sous un ensoleillement concentré de 100 soleils. En 1991, Verlinden est avec Swanson un des fondateurs de SunPower Corporation (Californie).

D'autres anciens du Laboratoire de Microélectronique, Denis De Ceuster (en 1994) et Akira Terao (en 1996), rejoindront Pierre Verlinden chez SunPower. SunPower est aujourd'hui une filiale du pétrolier français Total et une des dix plus grosses sociétés photovoltaïques au monde. Ses panneaux solaires IBC sont les plus performants sur le marché, un record inégalé depuis presque 10 ans. La voiture solaire Dream de Honda, l'avion Hélios de la NASA et l'avion SolarImpulse ont été équipés de cellules de SunPower. Pierre Verlinden est actuellement Chief Scientist à Trina Solar (Changzou), troisième plus gros producteur de panneaux solaires en Chine. Denis De Ceuster est quant à lui devenu CEO de TetraSun, une start-up californienne. Akira Terao est toujours R&D Engineering Manager à SunPower Corporation.

13. Pierre Verlinden ; *Modélisation de cellules solaires pour lumière concentrée. Analyse des cellules à contacts sur la face arrière* ; Doctorat UCL, 1885 ; Promoteur : F. Van de Wiele.



Fête de St Nicolas au labo,
1978.

Pierre Verlinden (à g.),
Charles Trullemans (à dr.)

LA CHAÎNE PILOTE



Les chambres propres en 1978, entrées des fours.

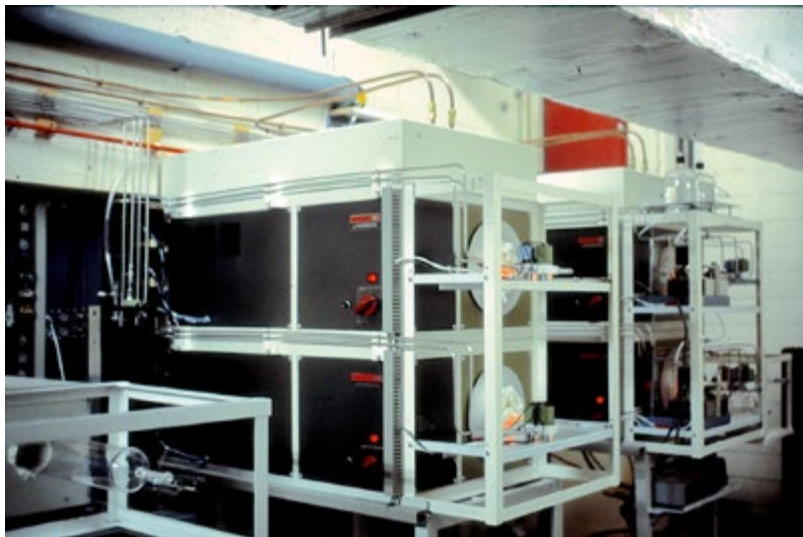
À droite, le stand de rinçage à l'eau déionisée et de séchage sous azote.

Page suivante : Local des fours. La verrerie a cédé la place à l'inoxidable pour les canalisations de gaz. Le refroidissement est assuré par des échangeurs à eau froide intégrés aux fours.

1980

ÉTUDE ET MODÉLISATION DES PROCÉDÉS DE FABRICATION ET DE LA PHYSIQUE DES DISPOSITIFS

Une chaîne pilote est une chaîne expérimentale de fabrication de prototypes. À partir de la fin des années 1970, l'organisation des chambres propres évolue vers celle d'une chaîne pilote. L'objectif est de maintenir de manière routinière un procédé de fabrication fiable en assurant la répétabilité des paramètres électriques des composants fabriqués. En réalité, cet objectif était hors de portée en 1980. L'objectif ne sera atteint qu'en 2007 lorsque Winfab assurera les conditions environnementales de température, d'humidité et de classe de propreté nécessaires. Grâce à l'expérience accumulée depuis la création du laboratoire, il sera cependant atteint très rapidement lors du démarrage de Winfab.



Les premiers succès sont apparus dès le début des années 1980 avec la réalisation des circuits intégrés de lecture et de reconnaissance de caractères contenant 10 000 transistors. Parallèlement, l'environnement informatique de simulation et d'aide à la conception se développe pour accompagner le développement de technologies, de dispositifs, de circuits et de systèmes analogiques et numériques plus complexes.

Le standard industriel a évolué vers des tranches de deux pouces de diamètre. Augmenter le diamètre des tranches répond à la demande des chaînes de production. A priori, ce n'est pas une bonne nouvelle pour un laboratoire expérimental qui ne produit que des échantillons et n'a que faire de grands volumes et de productivité. Pour des tranches plus grandes, il faut de plus grands bains de nettoyage ; ils consomment davantage de produits. Les frais de fonctionnement augmentent. Pire : les équipementiers s'adaptent au nouveau standard, les machines développées pour les technologies récentes déclassent les petites machines des pionniers.

Pour d'autres raisons, c'est pourtant une excellente nouvelle. Les nouveaux équipements promettent une répétabilité accrue des paramètres de fabrication. Par exemple, la régulation en trois zones indépendantes assure une meilleure uniformité des températures dans les nouveaux fours où un bras automatique contrôle de la vitesse lors de l'introduction et du retrait des tranches de silicium. L'implanteur ionique Balzers installé en 1976 est le premier venu d'une génération d'équipements qui accompagnent l'introduction de techniques nouvelles. Avec un implanteur d'ions il est possible de contrôler finement la tension de seuil des transistors MOS. On peut obtenir des transistors à déplétion et grâce à cela des structures du circuits auparavant inaccessibles. Avec un four de déposition en phase vapeur à basse pression (LPCVD), on peut réaliser des grilles en polysilicium. On peut déposer un meilleur oxyde d'isolation entre les transistors, donc augmenter la densité d'intégration et fabriquer des systèmes plus complexes. Grâce à l'implanteur, au bâti LPCVD et à d'autres équipements lourds acquis par la suite, la technologie CMOS deviendra accessible au laboratoire. Leur installation impliquera des modifications importantes dans l'affectation des locaux et la construction d'une nouvelle chambre propre. Tout cela n'est justifié que dans le cadre d'une politique d'ensemble qui coordonne non

seulement les achats mais aussi les projets de plusieurs promoteurs et rend possible l'intervention simultanée de plusieurs sources de financement¹.

Nommé professeur au retour d'un séjour post-doctoral à Stanford, Éric Demoulin imprime une nouvelle direction au développement de la technologie. Avec Paul Jespers, il démarre en 1980 un projet ARC consacré à l'étude et à la modélisation des procédés de fabrication et de la physique des dispositifs. Assurer les fondements scientifiques nécessaires est une activité de recherche à part entière, que le laboratoire entreprend dans le cadre du projet ARC. Cette activité crée immédiatement des liens avec des centres de compétence internationaux dans le domaine de la technologie et de la modélisation, en particulier le Centre national d'études des télécommunication (CNET, Grenoble), le Philips Natuurkundig Laboratorium, (NATLAB, Eindhoven), l'ISEN (Lille), les universités de Stanford, Twente, et Vienne.

1. Notamment le Fonds national de la recherche scientifique (FNRS), les services de programmation de la Politique scientifique (SPPS) – en général via des Actions de Recherche Concertée (ARC), la Loterie nationale, l'Institut pour l'Encouragement de la Recherche scientifique dans l'Industrie et l'Agriculture (IRSIA) avec des partenaires industriels, la Fédération des Entreprises de l'Industrie des Fabrications Métalliques, Mécaniques, Électriques et de la Transformation des Matières Plastiques (Fabrimétal).

Au retour d'une année sabbatique à Stanford en 1968, Paul Jespers avait ramené un précieux carnet de recettes pour la fabrication de transistors MOS.

Dix ans plus tard, les choses ont changé à Stanford. Eric Demoulin, rentrant à son tour d'une année sabbatique en 1976, ramène une version du programme Suprem, *mother of all process simulators*, un simulateur de procédé de fabrication de dispositifs semiconducteurs dont le développement vient de commencer.

La mise en oeuvre des technologies n'est plus possible en effet qu'à condition de pénétrer en profondeur les mécanismes physico-chimiques des procédés de fabrication et la physique électronique des dispositifs.

En plus de son intérêt scientifique propre, le projet ARC contribue à la mise en place d'une vraie structure de ligne pilote. Il contribue au financement d'équipements proches des standards industriels : lithographie g-line, dépôts CVD et PVD, gravure par plasma... Le personnel technique de la salle blanche est formé avec l'aide des équipementiers. Maurice Lobet, ingénieur civil, André Crahay, ingénieur industriel, Maria Rompen, laborantine, viennent renforcer l'équipe. Le Saint des Saints du laboratoire est « la salle blanche » où l'on transforme des plaques de silicium en circuits intégrés. Entrer en salle blanche exige de se revêtir d'abord d'une combinaison lavée à l'eau désionisée, de surbottes, gants et protection faciale afin de ne pas émettre de poussières dans le laboratoire. La vie en salle blanche et ses rites deviennent le quotidien des chercheurs impliqués dans les nombreux projets qui bénéficient de cet environnement. Ils sont aussi le quotidien des nombreux étudiants qui recevront, à l'occasion de leur travail de fin d'études, le statut de membre du laboratoire à part entière, presque à temps plein pendant



Maurice Lobet, lors d'un dîner de Labo.

« Louis Jamar affirme à l'assistant que le stock de solvants est normal. Mais il sait que c'est faux. Il monte immédiatement frapper à la porte du patron pour lui faire signer de toute urgence une commande de solvants — de simple routine, lui dit-il. »

une bonne partie de leur dernière année. En interaction constante avec les chercheurs et techniciens, ils contribueront significativement aux développements successifs de technologies aux dimensions caractéristiques de plus en plus petites (8 μm , 6 μm , 3 μm , 2 μm), permettant une plus grande densité d'intégration.

Akira Terao est l'un de ces étudiants, passablement impressionné par son entrée en salle blanche. Il raconte : « Ainsi donc, dès le début de l'année, je comparus devant Momo Ier (Maurice Lobet, responsable des salles blanches), puis fus présenté à ses hommes. J'enfile un *bunny suit* et j'entre dans le Saint des Saints. L'initiation était intimidante : des acides qui rongent les nerfs sans que l'on s'en aperçoive, des appareils à haute tension et des gaz qui tuent instantanément (je me suis toujours demandé comment on sait qu'ils sentent le chocolat et le poisson pourri) ou qui explosent spontanément ». Il découvre chaque jour de nouvelles choses. Il apprend à purger l'eau désionisée et à vérifier qu'elle est suffisamment pure, à rincer tous les bacs, pincettes et autres petits instruments, à préparer les trois bacs de nettoyage des tranches et les bacs

Il faut aussi parler de la cafeteria. Voilà qui demande un préambule. L'expérience accumulée par les techniciens est un facteur déterminant de l'amélioration des performances de la chaîne pilote.

L'équipe en place mérite d'être présentée : Bernard Hérent, Bohdan Katschmarskyj, Pierre Loumaye, Louis Jamar, Jacques Iserentant, Maurice Lobet, André Crahay, Maria Rompen et bien d'autres. Les techniciens engagés à durée indéterminée travaillent avec des chercheurs qui ne restent au laboratoire que quelques années. Ils étaient là avec leurs prédécesseurs, ils seront encore là avec leurs successeurs. Pourtant, si un chercheur qui entre dans le jeu a tout à apprendre, cela ne l'empêche pas de développer rapidement des idées nouvelles qu'il confronte aux pratiques maîtrisées par les techniciens.

La cafeteria est un haut lieu de confrontation et d'apprentissage. Une expérience se prépare avec l'enthousiasme que produit son idée de départ, l'impatience d'en voir le résultat et la rage d'être retardé. Pour tout cela, la cafeteria est un haut lieu de contagion. Un laboratoire expérimental impose ses propres règles. Un simple caprice du LPCVD (four de déposition en phase vapeur à basse pression) peut retenir un chercheur et un technicien au laboratoire, ensemble, jusque deux heures du matin. Les mésaventures de ce genre et les victoires partagées fondent un vigoureux compagnonnage. Les compagnons ont de temps à autre besoin d'un café.

de rinçage... Chaque opération nécessite un entraînement avant que tous ses détails ne deviennent automatiques. Rares sont celles que l'on maîtrise suffisamment pour pouvoir les effectuer sans l'aide d'un technicien. Si transporter une cassette pleine de vingt-cinq tranches de silicium représentant trois semaines de travail n'est pas suffisamment stressant, les pincer une à une sur un carrousel avec de petits clips métalliques ou allumer la torche à hydrogène du four d'oxydation humide sans la faire exploser sont des tâches qui peuvent en décourager plus d'un.

Avec la curiosité et, sans doute, avec l'insouciance de la jeunesse, Akira Terao essaye un peu de tout : préparer tous les bains chimiques, aligner les petites tranches de silicium sur des bateaux en quartz qu'il faut ensuite pousser dans des fours tubulaires, également en quartz et chauffés à 1000°C, aligner les mêmes tranches sur une platine en graphite pour une déposition d'oxyde ou sur une platine métallique pour une gravure par plasma. Dans la lumière jaune de la salle de photolithographie, il apprend à réaliser l'enduction de photorésine, l'alignement des motifs au microscope, le développement. En fin de chaîne, il prend plaisir à découper des tranches en petits circuits individuels et à les connecter à des fils microscopiques d'aluminium.

Quand j'étais en primaire, un copain m'avait pris à l'écart pendant la récréation et m'avait montré deux petits objets noirs pleins de pattes grises. Il m'expliqua sur un ton de conspirateur : « Mon père me les a donnés, ils ont envoyé ça sur la lune. » Malheureusement, il n'en savait pas plus. Pourquoi fallait-il envoyer ces petits blocs à pattes sur la lune pour en ramener des pierres ?

Plusieurs années plus tard, en première candi, je revis ces étranges petites bêtes anguleuses à pattes. Je m'étais inscrit à un club pour construire une horloge digitale à partir des premiers microprocesseurs à quatre bits. Mais après la programmation en langage machine il ne restait plus de temps pour prendre en main le processeur et construire le circuit. C'est donc avec un grand étonnement mêlé de joie que j'apprends, plus tard encore, qu'il y a, caché sur le campus de Louvain-la-Neuve, un laboratoire où l'on fabrique ces petites puces électroniques. Mieux : on peut le faire soi-même. À mes yeux, les séances de laboratoire avec oscilloscopes et voltmètres passent d'un coup au rang d'enfantillages. Sans hésitation, je m'inscris pour un travail de fin d'études en microélectronique.

Ainsi donc, je suis entré en chambres propres. Les problèmes abondent dans ce petit laboratoire aux ambitions plus élevées que son budget. Quoi, fabriquer tout un circuit CMOS avec cinq permanents et une bande d'étudiants ? Cela tient du miracle ! On arrivait pourtant à produire ce miracle quelques fois l'an. Chaque fois lors du solstice ? Je ne serais pas surpris de l'apprendre.

Ce petit laboratoire est une bonne école. On y apprend à ne pas faire confiance à une mesure si on n'arrive pas à la répéter trois fois et avec deux appareils différents, à ne pas croire qu'un appareil — ou un technicien — va faire quelque chose uniquement parce qu'on lui a dit de le faire. On y apprend à vérifier et vérifier encore. Dans un labo voisin, au Réaumur, mon copain Jean-Pierre apprenait de mon père une leçon semblable : « Le plus difficile n'est pas de faire une expérience pour la première fois mais de la refaire une seconde fois. »

En métallurgie comme avec les semiconducteurs, les théories déterministes sont sans cesse mises à l'épreuve. C'est plutôt la mécanique statistique qui joue et j'eus tôt fait de concevoir des rudiments du Statistical Process Control (SPC), une technique que je ne découvris que beaucoup plus tard. Malheureusement, le nombre de lots était insuffisant pour faire réellement des études statistiques. Sans que je ne le sache, cette frustration me préparait à l'étude des neurones dans le cerveau, où il y a trop de données pour suivre à la trace les causes et les effets mais pas assez pour résumer le tout avec des variables statistiques comme la température ou la pression.

Autre chose qui me vienne du labo ? Mon épouse, Pascale Francis, dont j'ai eu la chance d'encadrer le mémoire de fin d'études. C'est une toute autre histoire, une histoire qui se prolonge avec nos deux garçons. L'un est féru de sciences et de mathématiques, l'autre d'art, avec une imagination débordante : deux aspects indispensables à un ingénieur pour rester à la pointe d'un domaine comme la microélectronique. Qui sait, un jour rejoindront-ils le Labo aussi ? Tout ce que je leur en aurai raconté leur semblera sans doute bien archaïque !

Akira Terao

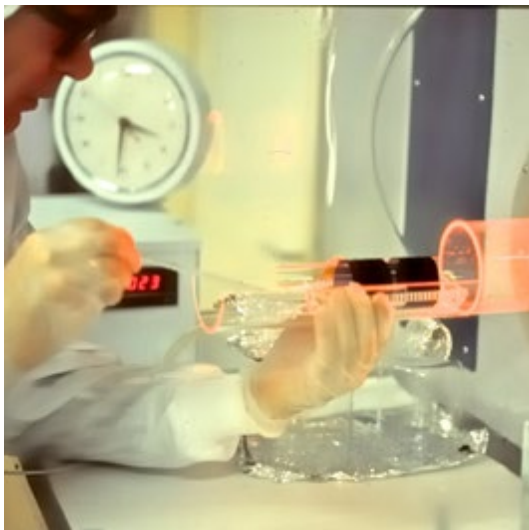
R&D Engineering manager, SunPower Corporation

Ces étapes mènent à l'instant tant attendu où l'on peut emmener au laboratoire de caractérisation les circuits que l'on a conçus. Il est peuplé d'appareils électroniques en tous genres : sources de tension ou de courant, oscillateurs et oscilloscopes, appareils de mesure... Il y a là aussi des appareils de caractérisation physique pour la mesure des épaisseurs de couches, de la résistivité, des profils de dopage du silicium, etc. Ce laboratoire de caractérisation établit des fondements du laboratoire Welcome qui viendra vingt ans plus tard.

Dans la chaîne pilote, l'équipe de Maurice Lobet met tout en place pour contrôler la reproductibilité des opérations de fabrication et réduire la durée des cycles de fabrication. Les « journées MOS » commencent tôt, dès cinq heures du matin. L'équipe arrive à l'heure des croissants frais achetés sur la place des Wallons. Leur but est d'enchaîner toutes les opérations les plus critiques du procédé jusqu'au dépôt du polysilicium, souvent tard dans la soirée. Une « journée MOS » s'achève tard, à l'Estaminet, à nouveau sur la place des Wallons, par une petite bière bien méritée...

Quelques années après
la tranche de la Saint
Valentin.

On enfourne des tranches
dans un des nouveaux
fours (vers 1978).



Le contrat ARC ouvre les portes à de nombreux autres projets de recherche tant en technologie qu'en conception de circuits car il donne accès à la fabrication de prototypes fonctionnels. Dans le secteur technologique, le projet phare des premières années est la participation au projet européen ESPRIT Spectre. Il nous met en relation directe avec des partenaires industriels majeurs tels que ST Microelectronics, Philips, MHS Electronics et avec les laboratoires européens les plus avancés : British Telecom, CNET, IMEC. Le laboratoire développe des techniques d'isolation² et des techniques d'interconnexion, compatibles avec une technologie 1 μ m. Il entreprend des recherches exploratoires pour le développement de technologies 3D par recristallisation d'une couche de polysilicium³.

2. Figueras, Eduardo ; Coppée, Jean-louis L. ; Van de Wiele, Fernand ; *A New Isolation Process for VLSI Devices* ; 17th European Solid-State Device Research Conference, 1987. p. 473-476

3. Colinge, Jean-Pierre ; Demoulin, Eric ; Lobet, Maurice ; *Stacked Transistors CMOS (ST-MOS), an NMOS Technology Modified to CMOS* ; IEEE Journal of Solid-State Circuits, 1982, Vol. 17, no 2, p. 215-219

Envoyée par l'ISEN au laboratoire de l'UCL pour réaliser un projet de fin d'Études en Technologie, je découvre le « petit monde » de Louvain la Neuve et m'y adapte très vite. Seuls certains mots de vocabulaire me laissent coite : kot (piaule), valves (babillards), auditoire (amphi), copions (pompes).

Bien dirigée dans le travail de recherche par Edouardo Figueras, doctorant de l'Universitat Autònoma de Barcelona venu à l'UCL préparer sa thèse, je travaille à la mise au point des techniques d'isolation des transistors submicroniques par oxyde enterré (BOX). En juin, alors que je m'apprêtais à quitter la laboratoire dans les quinze jours, on me propose de prolonger ce travail dans le cadre du projet ESPRIT Spectre. Temps de réflexion : deux heures ; j'ai accepté pour six mois. Six mois pendant lesquels nous continuons notre étude du BOX. Avec l'aide du CNET, partenaire du projet, nous avons pu réaliser à Grenoble l'étape primordiale du process sur une machine alors inexistante à Louvain-la-Neuve.

Sabine Hazebrouck

PRODUCTION COMPLÈTEMENT STOPPÉE

Micro News est une feuille d'information interne au labo. Elle paraît environ tous les quinze jours de juin 87 à décembre 91. Elle apporte à chacun des nouvelles du fonctionnement de l'unité, les visites prévues, les conférences de la semaine... et aussi – et ce n'est pas sa moindre fonction – les petits potins de l'unité. C'est un réseau social sur papier : les nouveaux membres du labo s'y présentent. On y trouve l'écho du CdS, la réunion hebdomadaire des académiques et scientifiques permanents. Il annonce les projets en préparation, les achats de grands équipements, les papiers publiés par les membres du labo et les participations à des conférences. Les petits potins avaient parfois un parfum de nouvelles du front. Didier Rémion, successeur de Maurice Lobet, publie un jour une nouvelle dramatique : impossible de fabriquer encore des circuits dans la chaîne pilote !

On observait des taches en forme de goutte à la surface des tranches. On soupçonna d'abord les boîtes dans lesquelles on les transportait de propager la contamination. En fait, ces gouttes provenaient de la cloche à métallisation et de l'implanteur, où l'huile de pompe primaire remontait dans les enceintes à haut vide. Ceci n'expliquait pas pourquoi les tranches étaient contaminées de plus en plus gravement. Il restait à découvrir que l'huile pénétrait dans les parois en Teflon des bacs de nettoyage et s'y accumulait. L'énigme posée par ce double problème n'a été démêlée qu'après une longue série de tests, y compris une analyse spectrométrique effectuée par Shell, fournisseur de l'huile.

Le problème a été résolu en réparant les machines et en adoptant une méthode de nettoyage où un mélange d'acide sulfurique et de peroxyde d'hydrogène remplaçait l'acide nitrique. Mais le plus frappant dans cette histoire est sans conteste l'implication de l'équipe techno, restée de quart la nuit et le week-end.

Micro News, 25 janvier 1988

La production est complètement stoppée

La production est complètement stoppée suite à un problème de pollution observé sur la plupart des tranches. Celle-ci apparaît dans un premier temps, sous l'aspect de gouttes, puis après un ou deux jours, sous forme de cristaux ou de fougères.

De nombreux tests sont en cours pour déterminer la nature et l'origine de la pollution. Des analyses aux rayons X et dans l'infrarouge sont réalisées en collaboration avec le laboratoire de chimie et de physique des hauts polymères. Les tests les plus récents tendent à prouver que certaines boîtes de transport sont impliquées dans cette pollution.

J'espère pouvoir vous donner plus de renseignements d'ici une ou deux semaines. Je remercie les membres de l'équipe « techno » qui sont venus le week-end et la nuit pour faire avancer les tests.

Didier Rémission



UNE AUTO ENCORE PLUS GROSSE QUE
CELLE DE P.J. (SI ÇA EXISTE.)



UNE CHAMBRE PROPRE PROPRE
(C'EST UN NID À POUSSIÈRES)



UN SUPER DÎNER DE NOËL, AVEC UN
APERO, UNE ENTREE, DU COUSCOUS,
DU VIN, DU... DU...

Demandes collectées par le Père Noël dans l'unité FAI en décembre 1986.

Ah ! Si les chambres propres étaient propres ! On ne veut pas dire « sans un grain de poussière » — 25 microns. On veut dire « de classe 1000 » — moins de mille particules de plus de 0.5 microns de diamètre par pied cube.

Le Père Noël dira oui, avec Winfab, en 2007.

En 1969, il fallait 4 niveaux de masques pour réaliser un transistor PMOS. La mémoire, et éventuellement un petit carnet, suffisait à contenir tous les détails du procédé de fabrication. La technologie standard au labo à la fin des années 1970 est une technologie CMOS puits P à 11 niveaux de masques qui se décompose en près de 100 opérations élémentaires. La durée totale du procédé est 75 heures. La mise en fabrication commence par la rédaction des feuilles de process, écrites à la main, ce qui prend un temps fou. Elles détaillent chacune des sous-étapes de chaque opération dont elles donnent les paramètres et les durées. Akira Terao décide que ce boulot devait être fait par un ordinateur. Il écrit le programme Proco qui commence bientôt à imprimer des feuilles de process sur l'imprimante à aiguilles. Cette fois, l'utilisateur ne doit plus entrer le détail de chaque opération mais plutôt le résultat qu'il souhaite obtenir, par exemple l'épaisseur d'oxyde, la dose de phosphore qu'il veut implanter...

Proco calcule les paramètres et explicite tous les détails de chaque opération. La demande « nettoyage standard » produira par exemple la séquence : bain SC1, rinçage, bain SC2, rinçage, bain d'acide fluorhydrique, rinçage final, séchage. Si l'on spécifie un dépôt de polysilicium d'une épaisseur de 5 000 Å, le programme ajoute que le dépôt se fera dans le four LPCVD à 625°C avec un flux de silane de 90 cm³ standard/minute. Il calcule que le temps de dépôt sera de 47 minutes et indique que la durée totale de l'opération sera d'environ une heure. Toute modification des paramètres des équipements ou des procédures générales en chambre propres est introduite dans la base de données de Procop qui en tiendra compte automatiquement.

En 2012, le programme qui a succédé à Proco permet à chaque utilisateur d'encoder les feuilles de process en ligne, sur le site Web de Winfab.

34.	Attaque de l'oxyde Silice (1000 Å) (oxyde sur 8 vitres)	15 min
	<ul style="list-style-type: none"> • Buffer HF - - - - (1 min) <u>35 sec</u> • rinçage H₂O DI - - - - 10 min 	
35.	Stripping Nitrate	1H00
	<ul style="list-style-type: none"> • attaque ... H₂PO₄ 130°C ... (35) min • rinçage ... H₂O DI ... 10 min • lavoir ... 10 min • rinçage dégras 	
36.	Stripping oxyde 500 Å (oxyde sous le Nitrate)	15 min
	<ul style="list-style-type: none"> • Buffer HF - - - - 35 secondes ? • rinçage H₂O DI ... 10 minutes 	
37.	Néttoyage standard : nettoyage <u>CRITIQUE</u>	1H30
	→ nettoyage des <u>NOUVEAUX PRODUITS</u>	
38.	Oxydation de grille (oxyde Moyle, MOS)	1H00
	<p>oxyde 550 Å</p> <p>Four MOS (1100°C) C33</p> <ul style="list-style-type: none"> • entrée - - - - 2 min - - O₂ (18/min) • oxydation - - 25 min - - O₂ (18/min) + C33 (25cc/min) • balayage - - - 1 min - - O₂ (18/min) + C33 (VAGE) • Annealing - - 15 min - - N₂ (28/min) • sortie - - - 10 min - - N₂ (28/min) <p>C33 C₂H₂Cl₃ trichloréthane:</p>	

Feuille de process écrite à la main.

L'étape clé pour les transistors MOS est l'oxydation de grille, n° 38 ;

successivement : entrée des tranches dans le four, oxydation, balayage du C33, annealing, sortie des tranches.

On a noté que le C33 est du trichloréthane. Son rôle est d'apporter des atomes de chlore dont la présence améliore la qualité de l'interface oxyde-silicium et la stabilité de l'oxyde, une pratique ancienne qui s'est répandue, dit-on, suite à une rencontre discrète dans une piscine à Las Vegas.

- | | |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 1. Nettoyage standard | 20. Dégazage oxyde Silox |
| 2. Oxyde initial | 21. Photolithographie, niveau 3 |
| 3. Photolithographie, niveau 1 | N-field blocking mask |
| Définition du p-well | 22. Implantation de champ |
| 4. Gravure oxyde | - phosphore |
| 5. Stripping résine | 23. Stripping résine |
| 5b. Nettoyage standard | 24. Petit nettoyage (sans HF) |
| 6. Oxyde de pré-implantation | 25. Dégazage oxyde Silox |
| 7. Implantation du p-well | 26. Photolithographie, niveau 4 |
| 8. Petit nettoyage (sans HF) | P-field blocking mask |
| 8b. Profilage four Hydrox | 27. Implantation de champ - bore |
| 9. Diffusion sous azote puis oxydante | 28. Stripping résine |
| 10. Décapage des oxydes | 29b. Petit nettoyage (sans HF) |
| 11. Nettoyage standard | 30. Oxydation de champ |
| 12. Oxydation sous le nitrure | 31. Dépôt de résine, double couche |
| 13. Dépôt de nitrure | 31b. Recuit |
| 14. Dépôt Silox | 32. Décapage face arrière |
| 15. Densification oxyde Silox | 33. Stripping résine |
| 16. Photolithographie, niveau 2 | 34. Attaque de l'oxyde Silox |
| Composite mask | 35. Stripping nitrure |
| 17. Gravure oxyde Silox | 36. Stripping oxyde sous le nitrure |
| 17b. Stripping résine | 37. Nettoyage standard (critique) |
| 18. Gravure du nitrure | 38. Oxydation de grille |
| | 39. Photolithographie, niveau 5 |

Étapes du procédé de fabrication CMOS P-Well, vers 1978

La numérotation n'est pas continue car elle tient compte d'autres variantes du procédé.

Tension de seuil P-MOS

40. Implantation d'ajustement de la tension de seuil du P-MOS – bore

41. Stripping résine

42. Nettoyage standard

43. Dépôt du polysilicium

45. Prédéposition de phosphore

45b. Vérification de la résistivité du polysilicium

Décapage du verre phosphoreux

47. Photolithographie, niveau 6

Grille polysilicium

50. Gravure plasma

53. Petit nettoyage (sans HF)

55. Photolithographie, niveau 7

Source et drain P-MOS

56. Implantation source et drain P-MOS

57. Stripping résine

58. Petit nettoyage (sans HF)

58b. Dégazage

59. Photolithographie, niveau 8

Source et drain N-MOS

60. Implantation source et drain du N-MOS – phosphore

61. Stripping résine

62. Nettoyage standard

62b. Oxydation

63. Photolithographie, niveau 9

Trous de contact

65. Stripping résine

66. Nettoyage standard

67. Dépôt Sikox

68. Densification Silox

69. Photolithographie, niveau 10
Sur-trous

70. Gravure oxyde Silox

71. Stripping résine

72. Nettoyage standard

73. Déposition aluminium

74. Photolithographie, niveau 11
Aluminium

75. Gravure aluminium

76. Stripping résine

77. Nettoyage aluminium

78. Recuit aluminium

79. Métallisation à l'or de la face arrière

89. Recuit de l'or

Fin

J'ai visité le Labo pour la première fois, lors d'une journée portes ouvertes, quand j'étais en humanités. Le guide était Maurice Lobet. Il nous avait montré une machine compliquée, l'ordinateur Varian que l'on démarrait en entrant un code binaire précis avec de petits interrupteurs blancs. Mais dans les années 1980-90, c'était le système UNIX qu'il fallait apprendre et le langage C. Ah, quel beau langage, comparé au Fortran que l'on nous avait enseigné en Candi. Je programmai donc avec délectation et ainsi naquit Procompil pour Process Compiler ou, familièrement, Proco.

Tout ce que j'ai appris au Labo, je m'en suis servi plus tard, quand j'ai rejoint ma compagnie actuelle, SunPower en Californie où j'avais été appelé par Pierre Verlinden, autre ancien du Labo, . Le travail en salle blanche était très semblable, mais avec beaucoup plus de lots circulant en même temps : au lieu d'un lot à la fois, il y en avait cinquante. Comme le nombre de feuilles de process était également multiplié, j'eus tôt fait de réécrire mon programme Procompil, rebaptisé Runcard Generator et écrit en C++, mon nouveau langage favori. La sortie, au lieu d'aller sur une imprimante à aiguilles, était maintenant formatée par LaTeX et sortait sur une imprimante laser.

Akira Terao

La conception de la ville de Louvain la Neuve a été planifiée par une équipe d'urbanistes. Les bâtiments ont ensuite été dessinés par de nombreux architectes. La ville a été construite par des entrepreneurs. Pour un tout petit chantier, il se peut que le concepteur de l'ouvrage prenne lui-même la truelle en mains. C'est ainsi que les choses se passaient pour les premiers circuits réalisés au labo — et d'ailleurs partout ailleurs dans le milieu universitaire à cette époque, où la complexité des circuits ne dépassait pas quelques milliers de transistors et où les concepteurs étaient eux-même des technologues. Mais qu'arrive-t-il au delà de quelques dizaines de milliers de transistors ? Qu'arrive-t-il lorsque des architectures de machines informatiques trouvent place sur une puce de silicium ?

L'alignement des niveaux de masques lors des étapes de photogravure est une étape particulièrement critique du procédé de fabrication. Une erreur d'alignement peut ruiner un chip. Au labo, en 1970, aucun chercheur n'aurait confié à qui que ce soit sauf lui-même le soin de réaliser un alignement. Puis les procédés et les machines sont devenus de plus en plus complexes et les chercheurs ont fini par se rendre compte qu'ils étaient irrémédiablement des apprentis débutants. Parallèlement, les techniciens accumulaient de l'expérience au fil des ans et devenaient plus habiles qu'eux. Mais les techniciens étaient trop peu nombreux pour répondre à la demande des étudiants, des chercheurs et des partenaires industriels, c'est une question banale de ressources indispen-sables et limitées.

Pourtant, les étudiants ne peuvent apprendre à concevoir des systèmes intégrés sans avoir fait l'expérience d'une démarche complète de conception, y compris le test après fabrication. Les chercheurs se heurtent à des comités de sélection de beaucoup de revues ou de conférences internationales qui commencent fréquemment l'analyse d'un papier soumis en posant la question : « Où est le silicium ? » ; ils ne publient pas un système dont les performances n'ont pas été mesurées sur prototype. Dans l'industrie, la complexité des systèmes réalisables augmente. On n'a pas essayé un prototype de la ville grandeur nature avant de construire Louvain-la-Neuve. Mais ici l'architecte de

Les architectes d'ordinateur concevaient traditionnellement leurs machines à partir de circuits standards ; ils avaient rarement participé à la définition et à la conception de ces circuits. Les programmes d'enseignement en électronique et en informatique reflètent cette tradition par des cours de physique des composants et de conception de circuits intégrés destinés à une population d'étudiants non orientés vers l'architecture des ordinateurs ou vers l'informatique.

Les publications dans le domaine de l'électronique intégrée ont eu pour tendance de fournir des informations détaillées sur une partie extrêmement restreinte du sujet global, comme par exemple la physique des composants ou bien la conception des circuits.

Nous avons choisi, au contraire, de fournir juste ce qui est nécessaire, à propos des composants, des circuits, des techniques de fabrication, des méthodes de conception et de l'architecture des systèmes pour appréhender globalement l'ensemble des concepts, de la physique sous-jacente jusqu'aux systèmes informatiques.

Une meilleure connaissance de la conception d'un système intégré est acquise plus rapidement en allant jusqu'à la réalisation et au test de plusieurs projets. Nous décrivons les procédures permettant d'organiser et de réaliser de nombreux petits projets en fusionnant leurs dessins dans un composant multiprojet.

Introduction aux systèmes VLSI

Carver Mead-Lynn Conway

(Extraits de la version française réalisée à l'initiative de François Anceau par l'équipe de l'École d'été du Forez).

Durant les années 1980, ceux qui maîtrisent la fabrication des circuits intégrés, abandonnent le monopole de la conception. On commence à les appeler des « fondeurs ». À côté des productions en grand volumes, ils se mettent à produire des prototypes et des petites séries à la demande des concepteurs, souvent dans des filières MPC.

La maturation de la technologie dans la chaîne pilote de l'UCL permet la diffusion des règles de dessin et des paramètres électriques. Dès sa création, les fondateurs de l'association Aramis pensent qu'il est impensable, en Belgique francophone, de doter quatre universités d'un équipement aussi coûteux.

La chaîne pilote de l'UCL assumera pour Aramis le rôle de « fonderie ». Elle sera accessible aux chercheurs et étudiants des trois autres universités.

chaque bâtiment, entendez le concepteur de chaque partie d'un système électronique complexe, doit faire fabriquer un prototype et le tester. Étudiants, chercheurs et concepteurs de systèmes partagent le même besoin d'une filière de prototypage.

Or la fabrication des circuits intégrés est fondamentalement une technologie de production de masse. Si l'on peut produire des centaines de milliers de circuits identiques pour un prix unitaire très bas, la fabrication d'une petite quantité de prototypes est extrêmement coûteuse.

En 1978, Mead et Conway développent une vision révolutionnaire⁴ de la formation à la conception de circuits intégrés. Ils introduisent le concept de MPC. Un circuit multi-projets (MPC, Multi project chip) est une puce conçue pour héberger plusieurs petits systèmes intégrés dus à des concepteurs différents. Chacun recevra un grand nombre de puces qui lui permettront de tester son système. Les circuits seront produits par une chaîne de fabrication standard (Mead et Conway l'appellent une « fonderie »).

4. Carver Mead, Lynn Conway ;
Introduction to VLSI systems,
Addison Wesley, 1980.

Les coûts de fabrication seront partagés entre de nombreux concepteurs. En faisant cohabiter sur la même tranche plusieurs projets, les MPC rendent donc le prototypage accessible, à la fois pour les étudiants, pour les chercheurs et pour les professionnels. Le recours à des filières MPC va se généraliser aux USA et en Europe.

Dans le domaine des technologies CMOS classiques, le labo met en place un véritable outil standardisé pour la conception de circuits, grâce à la définition précise des règles de dessin et des paramètres électriques. Cela lui permet d'offrir des possibilités d'intégration de circuits, à ses étudiants mais aussi à d'autres universités et centres de recherche. En 1980, François Anceau, professeur à l'Institut National Polytechnique de Grenoble, participait à un cours d'été à Louvain-la-Neuve. Quelques semaines plus tard, il animait lui-même en France l'École d'été du Forez. En 1981, il organise le premier MPC regroupant des grandes écoles françaises. Les puces seront réalisées à Louvain-la-Neuve en technologie nMOS 8 μm .

Cinq MPC vont être réalisés au labo d'ici la fin de l'année :

- MPC10 : nouvelle production du MPC ARAMIS de février 87 (comportant essentiellement des circuits UCL). Le but de celle-ci est d'obtenir un meilleur rendement.
- MPC12, 13 et 14 : MPC Espagnol (UAB). L'un d'entre eux (MPC12) est en techno NMOS 3. Ils seront réalisés en octobre.
- MPC15 : cuvée 87 du MPC-ARAMIS des chercheurs. Il comprend un circuit de Mons (FPMS), un véhicule de test (évaluation techno) et quatre circuits UCL.

Didier Rémon, MicroNews, Septembre 1987

Mon but[†] est la conception d'une carte coprocesseur dédiée à la matérialisation de réseaux systoliques. J'ai commencé par la recherche d'une méthode de passage d'un algorithme écrit sous forme d'équations récurrentes (par exemple : convolution, produit matriciel, décomposition LU) vers des matérialisations systoliques, par transformation matricielle de l'espace des indices.

Le cœur du processeur est un opérateur réalisant le produit intérieur $C+A*B$, classique en calcul matriciel. J'ai conçu un circuit de calcul du produit intérieur en techno CMOS 3 μ m. Il comprend environ 4 900 transistors. Les simulations permettent d'espérer une fréquence d'horloge de 25 à 30 MHz. Il sera fabriqué dans le cadre d'un MPC.

Bernard Steenis, octobre 87
actuellement Associate Professor,
University of Luxembourg

[†] Bernard Steenis ; *Une machine systolique pour la résolution de systèmes d'équations linéaires* ; Doctorat UCL, 1983 ; Promoteur : Charles Trullemans

Dans le cadre de mon projet IRSIA. j'ai réalisé le prototype d'un processeur général de traitement numérique du signal et de la parole[†]. Il utilise une arithmétique en virgule flottante de 22 bits pour atteindre une dynamique de 476 dB, une précision de 15 bits et des débits de calculs très élevés.

Le prototype compte 16 200 transistors sur 5.5 mm² en techno CMOS 3 microns. Les résultats du premier circuit de test et des simulations électriques permettent d'espérer des performances de calcul supérieures à celle du TMS 32010. Il est en cours d'intégration dans le cadre du MPC-15.

Bruno Yernaux, octobre 1987

[†] Bruno Yernaux, Paul Jaspers ; *A Novel RISC Architecture for High-Speed Floating-Point Signal Processing* ; Fourteenth European Solid-State Circuits Conference, ESSCIRC '88. 1988, p. 94-97

Bien que l'année académique soit terminée, les étudiants qui ont participé au MPC sont revenus pour tester les circuits qu'ils avaient conçus. Les premiers tests sont très positifs.

Le premier cadre standard contenait des cellules de base pour l'unité arithmétique et logique d'un processeur RISC. L'unité arithmétique et logique complète était contenue dans un deuxième cadre standard. Elle est constituée d'un assemblage de huit cellules de base dont les deux cellules du premier cadre. Elle compte 766 transistors. Toutes les opérations ont été testées avec succès. Les délais de propagation mesurés correspondent aux estimations SPICE.

Pierre de Marneffe, Professeur ULg
Septembre 1988

	ULg	Test techno
	FPMs	
	UCL ALU	UCL FFT

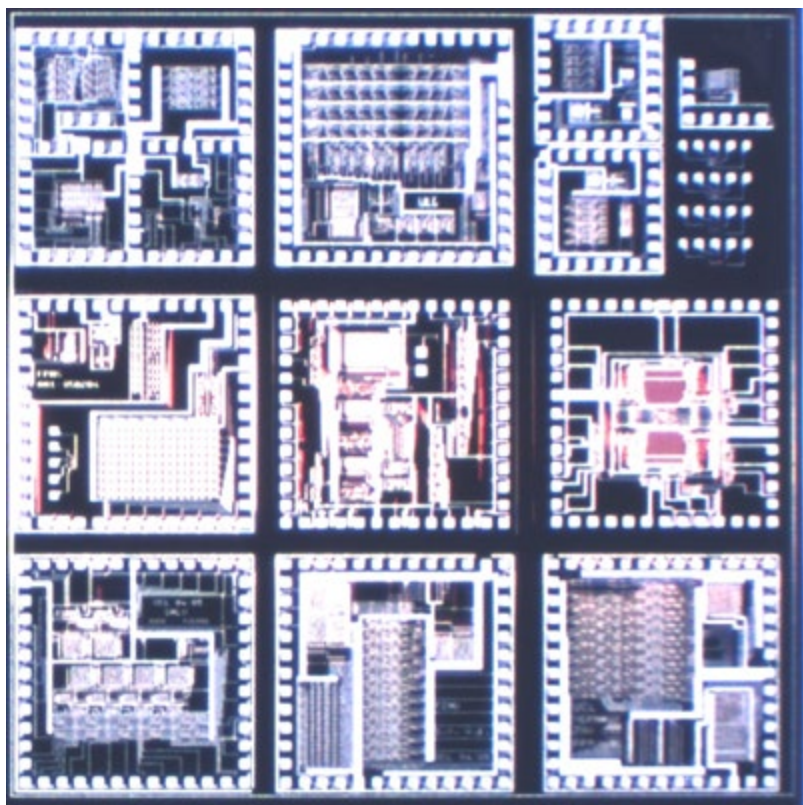
Circuit MPC, 1985

Techno CMOS 3 μm .

Il contient des circuits dessinés à l'ULg, à la FPMs et à l'UCL.

Les circuits UCL sont des travaux de fin d'études : ALU de grande dimension (D'Hoe et Pierre), processeur FFT en virgule flottante (Yernaux et Zou).

(page suivante)



En 1981, avec l'aide de fonds publics, les ACEC et SAIT créent la Société de Microélectronique (SdM) à Loverval. La direction est confiée à André Dumont. Son objectif est la conception de circuits intégrés à la demande mais elle n'en assure pas la fabrication qui sera sous-traitée à une « fonderie ». C'est ce qu'on appelle une *Design house* en Californie . Si le laboratoire UCL n'a joué aucun rôle direct dans la création de la SdM, celle-ci doit néanmoins en partie son existence à ce voisin qui exerce le même métier. On demandera d'ailleurs à Paul Jespers de faire partie de son Conseil d'administration. La SdM engage plusieurs diplômés ou chercheurs formés à l'UCL, dont Christian Jusseret, vétéran des matrices de lecture de caractères SAIT. Dès son retour d'un séjour à Caltech, elle engage Thierry Watteyne, dont le travail de fin d'études réalisé au labo a produit un corrélateur intégré⁵.

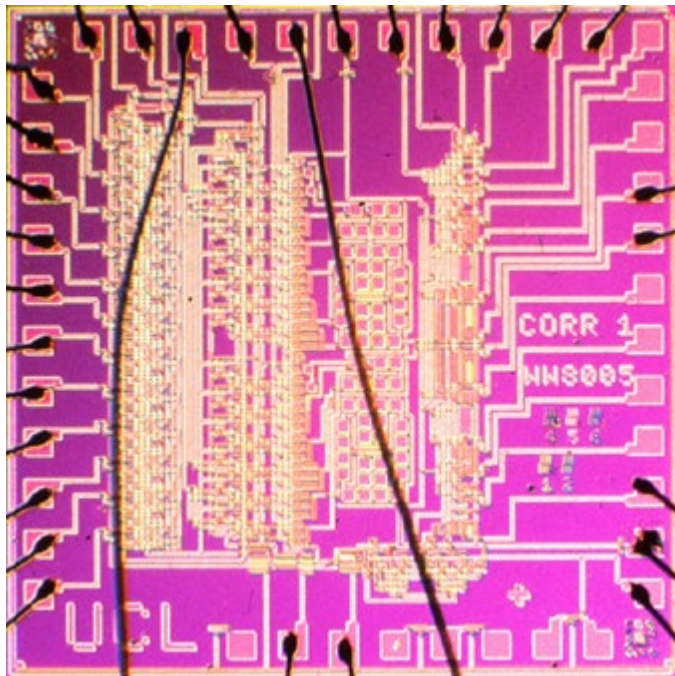
La SdM développera de nombreux circuits intégrés à la demande pour des applications en télécommunication, des libraires de cellules destinées à des *gate arrays* et utilisées dans plusieurs projets industriels. Grâce à son infrastructure de fabrication, le Laboratoire de microélectronique est à même de mettre en place pour la SdM un procédé de personnalisation de ces *gate arrays*.

Les perspectives de réalisation de circuits à la demande pourraient cependant être révolutionnées par la création en France de la Société ES2. Grâce à un procédé d'écriture directe par faisceau d'électrons qui remplace les masques, elle a pour objectif la réalisation, en petites séries, de circuits intégrés complexes. La suite de l'histoire met en jeu de nombreux personnages familiers. Eric Demoulin et Maurice Lobet rejoindront ES2 où ils prendront ce procédé en charge. André Dumont signe un contrat avec ES2. Pour en commercialiser les produits il crée une filiale, Euridice, dont Thierry Watteyne devient le directeur. Aramis est au nombre de ses clients.

5. Jespers, P. G. A. ; Windael, M. G. ; Watteyne, T. G. ; *An integrated binary correlator module*, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 18 no 3, 1983, p. 286-290

En 1988, la SdM sera dissoute et son équipe partagée entre les ACEC et Alcatel. Euridice deviendra Silex, puis en 1995 Barco Silex. Elle poursuit sous ce nom une existence autonome et développe des *Systems on chip*, dont celui qui équipe les lecteurs de cartes de banque Banksys omniprésents en Belgique.

Elle emploie aujourd'hui 40 personnes, à Louvain-la-Neuve et à Aix-en-Provence.



Corrélateur numérique intégré MOS

Circuit issu du travail de fin d'études de Thierry Watteyne et Pierre Windael,

Promoteur : P. Jespers, 1980

1983

LES LABORATOIRES D'ÉLECTRONIQUE
DE L'UCL, L'ULB, L'ULG ET LA FPMS
FONDENT L'A. S. B. L. ARAMIS

Aramis résulte d'un pari pris par les Pr Raymond Crappe (FPMS) et Paul Jespers (UCL), aussitôt rejoints par les Pr Jean-Louis Van Eck (ULB), et Guy Cantraine (ULg). Ils exposent leur projet à Mlle Dehoux, directrice des Services de programmation de la politique scientifique. Elle ne cache pas sa surprise en recevant « pour la première fois quatre professeurs d'universités différentes qui se sont mis d'accord ». Avec l'accord des Recteurs, ils ont décidé de se grouper en une association. Ils veulent créer partout un enseignement dans le domaine des circuits et systèmes électroniques intégrés, basé sur ce qui a été fait à l'UCL.

Ils veulent entreprendre de façon concertée recherche et enseignement. Les moyens de cette association doivent permettre à tous les étudiants d'acquérir une formation couvrant l'ensemble des aspects de la conception et de la réalisation de systèmes intégrés ; le laboratoire de fabrication de circuits à Louvain-la-Neuve (la fonderie) sera accessible aux étudiants et chercheurs des trois autres universités.

Mlle Dehoux jeta d'abord un regard incrédule sur ces quatre « collègues » qui étaient parvenus à s'entendre et proposaient un programme commun sans qu'on les y force. Rapidement, la confiance s'établit et se concrétisera peu après par la création d'Aramis. Nous n'oublierons jamais cette mémorable soirée à l'issue de laquelle Mlle Dehoux nous prépara un repas improvisé dans les locaux du SPPS.

Paul Jespers

Le Ministre responsable de la politique scientifique était alors Philippe Maystadt. Il est immédiatement favorable au projet qui se concrétise rapidement. L'asbl Aramis est fondée en 1983. On sait déjà que l'équipe des fondateurs possède des trésors de génie inventif. Ils se révèlent une fois de plus dans l'avion qui emmène Raymond Crappe et Charles Trullemans à la Conférence ISSCC à San Francisco. La durée du vol leur suffit pour décrypter l'acronyme ARAMIS.

Désormais, il signifiera pour eux : *Association pour la Recherche Avancée en Microélectronique et Intégration de Systèmes* — sans cesser d'évoquer les idées de risque partagé et d'idéal commun chères au héros d'Alexandre Dumas. Avant d'être un acronyme, Aramis était le nom choisi pour l'association, un nom qui ne doit rien au hasard.

Il est important que les mêmes logiciels d'aide à la conception soient installés sur des configurations informatiques identiques dans les quatre sites. Il est important que les questions d'achat, de maintenance, de formation et de mise à jour soient centralisées. Par contre, regrouper des stations de travail informatique en un même lieu ne représenterait pas une économie réelle. La suite montrera à quel point la structure répartie d'Aramis est au contraire un point fort.

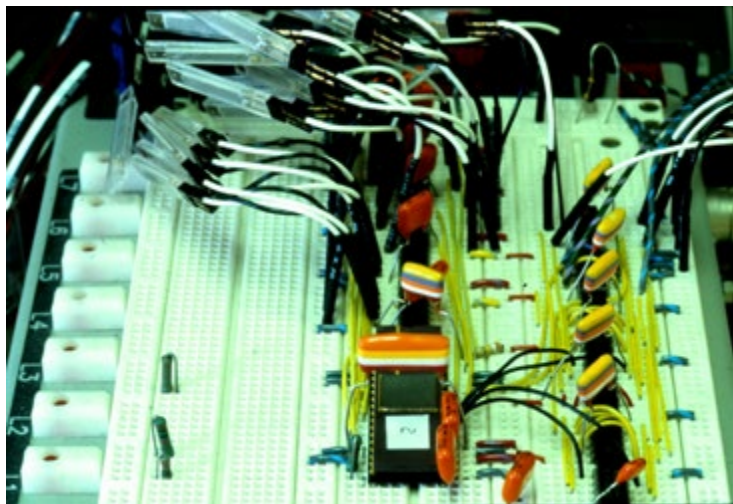
Des membres des laboratoires d'électronique de la FPMs, l'ULB et l'ULg viennent suivre les cours de microélectronique à l'UCL et font l'apprentissage

L'équipe Aramis occupe à Edimbourg des chambres dans une résidence universitaire. Chaque matin, ils se retrouvent au petit déjeuner autour des œufs brouillés et des saucisses. Paul Jaspers apprécie les kippers qui lui valent parfois de faire table à part. Le programme de la conférence les amène à découvrir le charme de la plage de St Andrews sous un ciel écossais de septembre. Au retour, ils sont un peu plus une équipe.

de la conception d'un circuit intégré. En 1984, le Conseil d'administration décide d'envoyer à Édimbourg plusieurs représentants de chacun des laboratoires membres pour participer à la conférence ESSCIRC, rendez-vous annuel de la communauté scientifique européenne en électronique. À travers Aramis, la culture microélectronique diffuse dans toutes les Universités francophones de Belgique. Elle touche chaque année 200 ingénieurs initiés par Aramis à cette technologie de pointe. Des chercheurs financés par l'intermédiaire d'Aramis renforcent les équipes des quatre laboratoires, une assistante administrative et un ingénieur de support informatique travaillent au bénéfice de tous. Présente dans quatre universités, Aramis peut créer un réseau de partenariat très diversifié. Pour concevoir un système intégré qui commandera un robot, il ne suffit pas de maîtriser l'électronique : un partenariat avec un spécialiste de la robotique est un sérieux atout. Il en va de même en électrotechnique, en traitement d'images, en électronique médicale ou dans tout autre domaine.

Pour une infrastructure lourde comme la fonderie, pas question de structure répartie. C'est au contraire la mise en commun qui est reconnue comme un point fort. La lorsque les quatre laboratoires membres introduiront conjointement la demande de financement d'un nouvel implantateur d'ions pour la fonderie d'Aramis, ils rencontreront un accueil favorable auprès du FNRS.

La régionalisation de la Belgique impliquera le transfert de certaines compétences du SPPS, dont le financement d'Aramis, vers la Région wallonne. L'accent est alors mis sur une mission d'aide directe aux petites et moyennes entreprises. Celles qui développent des produits de haute technologie savent qu'ils impliquent une part de recherche importante mais que leur durée de vie est courte ; la rapidité de mise sur le marché est capitale. Si on leur apporte de l'aide, elles ont besoin que ce soit selon une formule souple, qui n'entraîne aucun retard, aucune surcharge administrative, et qui réduise au maximum le risque financier. Le rêve d'Aramis est de conclure avec un organisme national ou régional un contrat-cadre qui lui permettrait de mettre à la portée des entreprises sa technologie et son savoir-faire et de leur donner accès à une aide financière rapidement et sans complications. Elle propose une formule où les projets soumis par les entreprises sont approuvés par le Conseil d'Administration d'Aramis et la Région. Le délai d'approbation est combiné avec la



Circuit monté sur la plaque de connexion d'une station de test développée par le laboratoire de l'ULB et distribuée dans tous les laboratoires Aramis.

Aramis dispose d'équipements complets pour le test physique, analogique et logique des circuits : microscopes optiques et électronique, bancs de caractérisation électrique, testeurs sous pointes.



« Trois mousquetaires » d'Aramis
prenant la pose, Pékin, 1996.

Comme l'a voulu Alexandre Dumas, ils
sont quatre.

De g. à dr. : Jacques Destiné (ULg),
Raymond Crape (FPMs), Charles
Trullemans (UCL), Jean-Louis Van Eck
(ULB).

Seuls quelques rares passants qui ne
se sont rendu compte de rien on pu
voir un soir les mêmes « professeurs
d'universités différentes » chavauchant
ensemble les chevaux de bois du
carrousel de la Grand Place de Mons.
Les associations étudiantes n'avaient
pas été informées de cet événement.

pré-étude et le tout ne dure pas plus
de deux mois. Dans la suite, Aramis
assure l'administration du projet et
la rédaction des rapports. À l'initia-
tive du Ministre Liénard, la Région
wallonne confiera effectivement à
Aramis cette mission d'aide aux PME,
préfigurant de peu les Special Actions
de la Commission européenne. Les
projets agréés bénéficieront d'un
subside qui peut couvrir 85% du coût
de fabrication de prototypes, selon la
formule d'avances récupérables.

En mars 1991, quelque cent
personnes issues du monde univer-
sitaire et industriel assistent à deux
Journées d'information organisées
par Aramis. Ils découvrent quelques
réalisations qui concrétisent le rêve
de l'association — rendre les circuits
intégrés accessible aux PME. BMT
(circuit d'encryptage pour terminaux
de paiement), Telindus (matrice de
commutation pour modem), IAL
Space (mesure de position de véris
pour Ariane V) ont réalisé grâce à
la microélectronique des produits
nouveaux dont l'existence même
est inimaginable en électronique
classique. Les participants aux
journées d'information rencontrent
aussi les chercheurs et découvrent
le potentiel de certains résultats de

学术报告会

比利时微电子学研究现状
与 ARAMIS 的策略 ——
SOI 技术及 ASIC 设计方法

报告人 新鲁汶大学 ch. TrullemanS 教授
布鲁塞尔自由大学 J-L. VanEck 教授
列日大学 J. Destine 教授
莫斯理工学院 R.G. Croppe 教授

时间 96.5.17 (周五)
下午: 2点15分

地点 所楼 1-308 教室

主办单位 微电子学研究所

Présentation de l'association Aramis et du développement de la technologie SOI dans la chaîne pilote lors d'une mission pour la Région wallonne.

(Pékin, mai 1996).

recherche, comme par exemple la technologie SOI développée à l'UCL. Elle permet de fabriquer des capteurs intelligents utilisables sous des températures extrêmes ou capables de résister à de hauts niveaux d'irradiation. Ici aussi, la structure répartie d'Aramis se révèle être un atout : la proximité est favorable quand il s'agit de collaborer avec des petites et moyennes entreprises.

Aramis sera longtemps un lieu de concertation dans le paysage universitaire de la Communauté française de Belgique. Une association regroupe des hommes. Aramis doit sa cohésion au bon fonctionnement de son conseil d'administration, où les responsables des différents laboratoires se réunissent plus ou moins une fois par mois pendant presque trente ans. La diffusion de la culture microélectronique dans l'ensemble des universités de la région était l'un des objectifs fondamentaux. Aramis a largement contribué au développement de cet enseignement, notamment en assurant localement un environnement professionnel de CAO pour la conception de circuits intégrés et en favorisant les contacts entre professeurs et chercheurs des quatre laboratoires membres.

Pourtant, bien qu'Aramis ait largement rempli son rôle, qu'elle ait soutenu des activités de formation et de recherche et conduit à de nombreux développements industriels directs ou indirects, qu'elle ait participé à des projets européens de transfert de technologie aux PME, force est de constater qu'au début des années 2000 elle ne rencontre plus d'accueil favorable auprès de la Région Wallonne. La structure d'Aramis ne correspond plus à l'évolution de l'environnement et aux possibilités de financement en Communauté française. Après 28 ans d'existence, l'Assemblée générale procède à la dissolution de l'ASBL en mars 2011.

LE PROGRAMME COMETT

En 1987, la Commission européenne lance le programme COMETT qui vise la formation conjointe Industrie-Université. Aramis dépose un projet qui regroupe, outre ses membres, les Écoles d'Ingénieurs industriels (ISI) francophones et ES2 en Belgique, des organisations similaires en France via l'ISEN et en Espagne via l'UAB.

Le projet démarre au début de l'année académique 1988-89. De nombreux professeurs des ISI et quelques ingénieurs issus de PME participent chaque vendredi, avec les étudiants UCL, aux cours, et travaux pratiques de Circuits intégrés (Paul Jespers) et d'Organisation et architecture de systèmes intégrés (Charles Trullemans). Les assistants doivent répéter trois fois certaines séances de travaux pratiques pour accueillir « les Comett ». Ceux-ci découvrent la microélectronique (c'est le bien le but !), le logiciel VTI d'aide au dessin des circuits et les logiciels de simulation SPICE et ARAMOS.

L'année suivante, le cours de Circuits intégrés est organisé en partie sous forme de conférences à propos des circuits analogiques CMOS, données par Jean-Paul Bardyn, (ISEN, Lille), Eric Vittoz (CSEM, Neuchâtel) et Paul Jespers. « Les Comett » feront ensuite un stage chez SdM où un ingénieur les guide dans la réalisation d'une horloge avec alarme grâce à SOLO, un logiciel destiné aux PME. Il permet de personnaliser des circuits prédéfinis.

Au second semestre, ils sont répartis dans les quatre universités d'Aramis. AEBelgium, petite entreprise animée par une solide volonté d'innovation, a inscrit deux ingénieurs au cours Comett. Jean Noël et Pierre Bertrand, professeurs à l'ECAM, travaillent à l'UCL en leur compagnie. On leur demande de réaliser un circuit en déterminant chaque élément de façon à obtenir un temps de réponse maximum donné tout en occupant la plus petite surface possible. Ils dimensionnent chaque transistor à l'aide de simulations Spice et dessinent le détail de chaque niveau de masque.

Quelques années plus tard, AEBelgium réussira, avec l'aide de Jean Noël, à intégrer sur une seule puce une centrale d'alarme d'intrusion qu'on pourra dissimuler, avec sa batterie, dans un tout petit boîtier. Aujourd'hui, cette société est devenue Dinec International. Elle emploie environ 25 personnes, développe et fabrique une large gamme d'équipements électroniques de sécurité et gestion de bâtiment et exporte près de 30% de sa production.

M. Decornet, directeur de l'ECAM, veut démarrer un enseignement de microélectronique sans attendre que les suites du programme COMETT lui permettent d'acquérir du matériel et des logiciels. Il décide de partager avec la microélectronique les stations de travail utilisées à l'ECAM pour la CAO mécanique. Dès septembre 1990, l'option microélectronique accueille six étudiants. La visite des salles blanches de l'UCL par les étudiants de l'ECAM deviendra un rite annuel.

Des restrictions budgétaires entraîneront plus tard la disparition des options. Le programme d'électronique ne retournera cependant pas à son passé. Les cours de logique et de systèmes numériques reprendront une grande partie du contenu de l'option. L'évolution de la technologie et de la CAO rendra possible la conception de grands systèmes en VHDL, un langage informatique qui permet de les décrire et de simuler leur comportement. En électronique traditionnelle, on peu terminer la mise au point d'un système au laboratoire et de ne penser au test qu'après coup. C'est impossible pour un système intégré où les dés sont jetés dès la fin de la conception sur ordinateur, y compris pour la procédure de test à l'issue de la chaîne de production. À l'ECAM, l'aspect fondamental de la testabilité des circuits prendra place dans le programme d'électronique normal. Leur professeur et les FPGA permettront aux étudiants d'apprendre par l'expérience qu'à partir d'une certaine complexité, on n'arrive jamais à un circuit fonctionnel sans penser au test dès le début de la conception.

Plusieurs étudiants de l'ECAM réaliseront leur TFE au laboratoire UCL, notamment sous la direction de Jean-Didier Legat. Quelques uns y prépareront une thèse et obtiendront un doctorat.

Cette initiation à la microélectronique a eu beaucoup d'influence sur mon parcours. J'ai ensuite participé à la conception d'ASICs, notamment pour AEBelgium et dans le cadre de TFE. Enfin, le directeur de l'ECAM, Gaston Decornet, m'a proposé de réaliser un doctorat en microélectronique. J'ai donc commencé, de septembre 91 à janvier 93, par une licence probatoire au cours de laquelle j'ai calculé un circuit de point mémoire RAM avec précharge et ampli de lecture. et réalisé un ASIC destiné à une prothèse visuelle. De janvier 93 à septembre 97 j'ai préparé une thèse de doctorat. Le point de départ était de créer une puce dédiée à la robotique mais, comme souvent, c'est un autre problème sur lequel j'ai buté qui est devenu le sujet de ma thèse. Pour préciser l'architecture du processeur de calcul que devait contenir cette puce, je devais résoudre des problèmes complexes d'ordonnancement d'opérations. Ils m'ont conduit à apprendre le langage Prolog et des techniques d'intelligence artificielle à partir desquelles j'ai développé une méthode d'ordonnancement appropriée, la méthode MOMO[†].

J'ai ainsi passé pas mal d'heures à l'UCL et je garde un excellent souvenir de cette période d'apprentissage, de travail et de collaboration avec les enseignants, avec le personnel et aussi avec les étudiants.

Jean Noël, Professeur ECAM

† J. Noël ; *Un modèle d'architecture basé sur le concept de macro-opérations* ; doctorat UCL, 1997. Promoteur : Ch. Trullemans

LE LABORATOIRE ACQUIERT
UN ORDINATEUR 32 BITS

Le projet ARC de 1980 porte également sur la modélisation de dispositifs, le domaine de Fernand Van de Wiele. Sa méthode de travail allie la rigueur du mathématicien à la compréhension en profondeur des phénomènes physiques, démarche qu'il accompagne d'études analytiques aussi longtemps que possible, remplissant de son écriture soignée des pages d'équations. Cette manière de travailler l'amène à s'intéresser davantage aux problèmes qu'il estimait pouvoir résoudre, au détriment de demandes immédiates, ce qu'il compense par des choix mûrement réfléchis qu'il prend toujours avec une longueur d'avance.

Arrive alors l'ordinateur Prime, financé en partie par le projet ARC et par des contrats IRSIA. Il a par rapport au centre de calcul tous les avantages de la voiture individuelle par rapport à l'autobus : ce sont les utilisateurs qui fixent les priorités selon les nécessités du laboratoire. Le système est interactif : les terminaux remplacent les lectrices de cartes perforées. Un calcul simple reçoit sa réponse sans attendre.

La puissance de calcul et la disponibilité du Prime ouvrent la voie à l'évaluation des modèles par simulation numérique. Le premier gestionnaire en sera Erich Palm que Van de Wiele, son promoteur de thèse, salue le matin par la question énigmatique : « Qu'y a-t-il au programme aujourd'hui, M. Palm ? »

Erich Palm est l'auteur de la première d'une série de publications⁶ qui auront bénéficié du confort apporté par la machine Prime. Brigitte Dupont est engagée dans le cadre de ce projet pour prendre en charge les logiciels de simulation de procédés et de dispositifs, les logiciels d'extraction de paramètres, et les interfaces graphiques mis à la disposition de tous. Ce n'est que le point de

6. Palm, E. ; Van de Wiele, F. ; *Current lines and accurate contact current evaluation in 2-D numerical simulation of semiconductor devices* ; IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, Vol. 4, no 4, 1985, p. 496-503

1970 – L'ordinateur Varian
Acheté pour simuler
des algorithmes de
reconnaissance de caractères
en temps réel.



1981 – L'ordinateur Prime
Nommé Ezéchiel tel un
prophète du comportement
des dispositifs et des
procédés de fabrication.



1985 – L'ordinateur VAX
Support de l'environnement
de CAO d'Aramis à l'UCL
Nommé Zacharie tel un
prophète du comportement
des circuits



départ de son activité au laboratoire où elle assumera plus tard la gestion de tout le parc informatique.

À Heverlee, 700 mètres séparaient le laboratoire du centre de calcul. L'informatique faisait de vous un homme de fer, physiquement grâce à la pratique de la bicyclette entre son bureau et la salle des perforatrices de cartes, et moralement car on ne pouvait espérer qu'une, parfois deux exécutions de programme par jour. Souvent, en moins d'un demi-jour, on se rendait compte que le dernier job déposé contenait une erreur : il n'y aurait rien à espérer avant le lendemain. Pire encore : on ne soupçonnait rien. L'erreur sournoise était une virgule mal placée. Elle pouvait coûter 24 heures d'attente entre le dépôt des données et le résultat du calcul.

Le panneau de commande de la
Varian.

Alain Fontaine aimait démontrer sa maîtrise en y chargeant de mémoire le code binaire du programme de démarrage.



Le choix d'un ordinateur 32 bits au moment où ils apparaissent sur le marché n'est pas un problème facile. On le confie à Eric Demoulin, Charles et Anne-Marie Trullemans, et Erich Palm. Elie Milgrom accepte de leur apporter son aide et s'embarque avec eux pour une longue tournée des firmes qui les commercialisent, en France et aux Pays-Bas.

Nous découvrons une loi que cette expérience n'a jamais contredite et qui pourrait s'appeler *Loi des profiteroles* : l'intérêt d'un ordinateur est inversement proportionnel à la qualité du lunch offert par ceux qui le vendent.

À Louvain-la-Neuve, le Centre de Calcul, devenu notre voisin de palier, occupe provisoirement des locaux au Bâtiment Maxwell. Une petite camionnette, promue périphérique de l'ordinateur central, assure pour les boîtes de cartes perforées et les listings la navette vers Heverlee. Le Centre s'installera Place des Sciences. La distance depuis le labo est bien plus courte qu'à Heverlee et le délai entre le dépôt des données et la réception du résultat bien plus bref. C'est néanmoins un ordinateur doté d'une mémoire centrale de 250 MB avec un cycle d'une microseconde que toute l'université se partage, et non un PC actuel doté d'une mémoire 50 fois plus grande et mille fois plus rapide. Bien que les terminaux alphanumérique fassent leur apparition, il s'agira encore longtemps principalement de traitement par lot.

L'assistance au processus de conception doit être interactive. Or un programme interactif était une chose incroyable en ces temps de cartes perforées. Le laboratoire devait nécessairement se doter de moyens de calcul. Un mini-ordinateur VARIAN avait été acquis dès 1970 parce qu'on ne pouvait pas connecter une matrice photosensible à l'IBM du

centre de calcul et que l'objectif était de simuler des algorithmes de reconnaissance de caractères en temps réel. Son utilisation la plus importante sera cependant d'être le premier support des programmes de CAO. Sa mémoire vive est de 32 kB. Il ne pouvait servir qu'un seul utilisateur à la fois. C'est pourtant lui qui héberge les deux premiers programmes interactifs utilisés par tous les concepteurs de circuits du labo, chercheurs et étudiants : MGS, le programme de dessins de masques écrit par Alain Fontaine, et AMOS, le simulateur de circuits écrit par Anne-Marie Trullemans.

L'ordinateur Prime possède en comparaison des ressources gigantesques qu'il distribue généreusement sur une demi douzaine de terminaux. En plus de la simulation de dispositifs et de procédés, il supporte des programmes d'aide à la conception de circuits et des simulateurs ad hoc développés à leur propre usage par des concepteurs de systèmes (notamment pour la reconnaissance de caractères).

Le Prime peut en plus rivaliser avec le secrétariat, mettre soigneusement des textes en page et les imprimer directement sur la machine à écrire — tant qu'il y a une machine à écrire ! En « 1984 », année mythique pour Apple, le labo achète un Macintosh. Son écran graphique fait oublier les lignes de commande et ouvre l'ère du *desktop publishing*. Quelques professeurs vont ranger leur stylo et cesser de rédiger des syllabus de cours en gribouillant des pages de manuscrits.

Une des premières entreprises communes d'ARAMIS est le choix des machines informatiques qui seront installées dans les quatre sites, selon des configurations identiques, pour supporter l'environnement de conception assistée par ordinateur (CAO). Le choix se porte sur le VAX de Digital Equipment, une machine 32 bits bien introduite dans le monde de la CAO en microélectronique. Son parc informatique confère au labo une situation assez exceptionnelle à l'UCL à cette époque. Plus tard, il évoluera vers des stations de travail SUN et un parc croissant de PC et de serveurs. La décentralisation des ressources informatiques deviendra la norme.

BEAUCOUP DE BIENS, C'EST BEAUCOUP DE MAL

Alain Fontaine connaissait tout du hardware de la Varian — il lui arrivait de venir modifier une connexion dans les entrailles de la machine, sans un mot, pendant qu'un utilisateur quelque peu surpris continuait à travailler. Il connaissait aussi tout du logiciel système qui, à vrai dire, tenait dans une petite collection de bandes en papier perforé.

Le Prime est doté d'un système d'exploitation qui occupe cette fois une collection de bandes magnétiques. Eric Palm et Anne-Marie Trullemans vont à Southampton suivre chez Prime une formation d'une semaine à la gestion de la machine. Tout en préparant son doctorat, Éric Palm peut assurer sa part de la maintenance et des mises à jour du système qui ne sont pas trop lourdes. Il ne faut cependant pas longtemps pour que les tâches les plus difficiles deviennent la gestion des utilisateurs, le partage des quelques centaines de MB de l'espace disque, l'arbitrage entre la demande de traitement par lot des programmes de calcul qui ont besoin de plus d'heures que n'en compte la nuit, et la demande interactive envahissante durant la journée.

L'arrivée de Macintosh pose peu de problèmes car leur système d'exploitation est conçu pour passer inaperçu, en cette époque de rêve où il n'y a pas de connexion Internet, pas de virus, pas de pirates informatiques et où le mot « hacker », que personne ne connaît, désigne quelqu'un qui refend du bois à la hache. Lorsque les VAX Aramis sont installés, ils sont interconnectés mais dans un réseau privé, par des lignes téléphoniques louées.

C'est une imposante collection de bandes magnétiques et de manuels qui accompagne le VAX et la suite de CAO qu'on y installe. Les informaticiens rejouent alors le scénario des pionniers : ils retroussent leurs manches, ils se mettent ensemble à la tâche. Les pionniers ne tiennent pas compte de l'heure. Les pionniers informaticiens sont pires : ils ignorent purement et simplement l'heure qu'il est. C'est le temps des salles de terminaux, conviviales et bénéfiques pour l'apprentissage et l'entraide mutuelle. On apprend à se connaître pendant qu'on attend le résultat d'une simulation, on partage les rhumes, on sait à quoi chacun travaille. Le partage de connaissances face à un problème d'écriture

La surprise provoquée aux SPPS par « les quatre professeurs d'universités différentes qui ont réussi à s'entendre » n'est rien, comparée au choc qu'ont éprouvé les représentants des firmes d'ordinateurs lorsqu'ils voient se présenter quatre acheteurs promettant un marché unique regroupant tous les laboratoires universitaires de microélectronique francophones. À Bruxelles, Liège, Louvain la Neuve ou Mons, tout le monde leur parle le même langage, leur présente le même cahier des charges à satisfaire avec le même budget.

Ce marché prestigieux est une citadelle qu'ils doivent conquérir. La bataille sera rude. On les invite à présenter leur matériel devant une salle où sont réunis des membres des quatre équipes. Ils y retrouvent les cauchemars oubliés de leur vie d'étudiant. Ils font face à un jury d'une quinzaine de personnes où plusieurs professeurs d'université les interrogent tour à tour.

À l'issue de la procédure de marché public, le choix se porte sur le VAX. À l'invitation de Digital Equipment, Jean-Louis Van Eck et Charles Trullemans représenteront ARAMIS au Palais des Festivals de Cannes, lors de l'exposition DECWorld, pour y signer le bon de commande.

de code ou d'interprétation de résultats est facile et très courant. Le compte-rendu d'une réunion tenue en novembre 1990 rappelle que différents systèmes d'exploitation et logiciels d'utilité publique doivent être maintenus dans le labo. En accord avec les intéressés, il propose un partage des tâches qui met en jeu douze personnes.

La grande révolution arrivera d'une part avec Internet, et d'autre part avec l'apparition massive des PC. Un *personal computer*, comme son nom l'indique, tout le monde en veut un sur son bureau ! Et tout le monde veut aussi communiquer avec tout le monde, pour échanger des mails, mais aussi pour partager des fichiers, pour partager l'utilisation de programmes, pour consulter des informations ... tout cela bien sûr en toute sécurité, voire en assurant la confidentialité. Un PC ne peut pas faire tout ce dont un technologue, un physicien des dispositifs, un concepteur de circuits ou de systèmes électroniques a besoin. Il faut donc en plus lui permettre de travailler, depuis son PC, sur les serveurs qui hébergent les programmes lourds de simulation et de conception et leurs bases de données.

Le temps où une même salle abritait tous les terminaux est un temps révolu. Le tête à tête de chaque utilisateur avec son PC se joue seul. Le métier des gestionnaires change. Il faut faire preuve d'imagination pour créer une base de données centrale pour les logins et mots de passe, ne pas dupliquer à foison les informations, ne pas installer plusieurs fois les mêmes programmes, faire front aux attaques venant du réseau. Le pire est que les systèmes d'exploitation des différents types d'ordinateurs se multiplient (Primos, Unix, Solaris, Linux ...) et se mettent à évoluer à une vitesse affolante ; aux gestionnaires de veiller sans cesse à la portabilité des outils d'un environnement à un autre.

Quand tous les ordinateurs se trouvaient dans la même salle, un gestionnaire savait où il devait agir en cas de souci. Aujourd'hui il faut chercher d'abord dans quel bureau se trouve le PC sur lequel il doit intervenir. Par ailleurs, s'il n'y avait rien à faire ou presque pour un terminal, l'utilisateur dispose maintenant d'un ordinateur où il faut gérer le système, les droits d'accès, les applications et leurs licences. Cette tâche est insurmontable si on ne limite pas fortement les droits d'accès des utilisateurs sur leur propre machine.

Encore que les jeunes utilisateurs, plus innovants que les gestionnaires chevronnés, les poussent toujours en avant pour les amener à revoir leurs pratiques et leurs politiques de gestion.

Mon voisin ôte son alliance qui l'embête quand il travaille sur un terminal. Il la pose sur une touche du clavier.

Mais il est jeune marié : l'oublier là l'embêterait encore plus.

Il me demande de la lui rappeler le soir, quand il quittera le labo.

Brigitte Dupont

J'ai réussi à contacter Bruno Yernaux qui est dans sa troisième année de recherche subventionnée par l'IRSIA et présentera donc bientôt son doctorat. Peut-être ne le connaissez-vous pas, si vous ne passez jamais au Maxwell la nuit.

Le coin de la concierge
Micro News, 20 octobre 1987

1972

BERKELEY PUBLIE LA PREMIÈRE VERSION
DU SIMULATEUR SPICE

NAISSANCE D'UN SIMULATEUR INTERACTIF À L'UCL

On ne peut imaginer la conception et la réalisation d'un circuit intégré sans une aide informatique qui apparaît peu à peu à toutes les étapes de la conception. Un circuit composé d'un grand nombre d'éléments tous non linéaires donne fatalement lieu à un système contenant un grand nombre d'équations différentielles. Le travail de mise en équation du circuit à lui seul est très lourd et la solution n'est accessible qu'au calcul numérique. L'équipe de l'UC Berkeley est le pionnier du développement de simulateurs de circuits. En 1972, elle rend publique une version du simulateur SPICE. Aucun circuit intégré ne sera plus jamais produit sans avoir été simulé à l'aide de SPICE ou de l'un des innombrables programmes dérivés.

À la même époque, Anne-Marie Trullemans Anckaert met au point successivement un programme de calcul de la réponse en fréquence de circuits linéaires et un programme d'optimisation de la stabilisation d'amplificateurs opérationnels. Elle écrit ensuite un simulateur de circuits particularisé aux circuits MOS et, surtout, interactif et utilisable sur la Varian. Un simulateur sert à prévoir le comportement d'un circuit ; le simulateur de l'UCL reçoit donc le nom d'un prophète, AMOS.

Diffusé auprès de tous les membres d'Aramis aux premiers jours de l'association, il devient ARAMOS. On peut au besoin l'adapter à des exigences spécifiques. L'amplificateur conçu pour ITT Intermetall ne fonctionne pas. Pour quelles raisons ? Aramos le dira, mais pour cela il faut y insérer le calcul des pôles et zéros de la fonction de transfert d'un circuit. On diagnostique ainsi la cause du mal et la seconde version de l'ampli est un succès.

En 1969, le Pr Ron Rohrer (UC Berkeley) applique avant la lettre l'apprentissage basé sur le projet. Il est convaincu que les étudiants apprendront bien plus de choses en mettant eux-mêmes la main à la pâte plutôt qu'en l'écoutant donner un cours sur la conception et l'analyse de circuits. Il leur demande de développer les composants d'un simulateur complet. La règle est qu'ils réussiront le cours si le Pr Donald Pederson approuve leur résultat. C'est un formidable succès. Ils écrivent un algorithme de traitement de matrices creuses pour résoudre les équations du circuit, grâce auquel ils augmentent de plusieurs ordres de grandeur la taille des circuits que l'on peut simuler. Ils utilisent des algorithmes d'intégration implicite beaucoup plus robustes pour l'analyse transitoire. Comme ils désirent tous réussir, ils confient à Laurence Nagel, probablement parce qu'il a déjà travaillé pour lui, le soin de présenter les résultats au Pr Pederson. Il les approuve chaleureusement.

Pederson deviendra plus tard le promoteur de la thèse de doctorat de Nagel à qui il demandera de développer un simulateur de circuits d'usage général qu'il veut rendre librement accessible dans le domaine public. Ce sera le programme SPICE[†] dont la première version sera distribuée à partir de 1972.

† L. W. Nagel and D. O. Pederson ; *Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis (SPICE)* ; presented at 16th Midwest Symp. on Circuit Theory, Ontario, Canada, April 12, 1973.

Parce qu'il est bien connu, il est assez facile d'ajouter à ce simulateur maison les modèles de transistors MOS à commande par la charge développés par F. Van de Wiele, ou des modèles spécifiques à la technologie SOI⁷. On peut tirer d'ARAMOS des versions exécutables sur de petites configurations de PC ou de Macintosh, au bénéfice des étudiants de l'UCL et de plusieurs universités de par le monde. ARAMOS figurait au catalogue des logiciels de CAO du programme ESPRIT de la Commission européenne.

Au cours du temps, des versions successives des programmes de conception assistée par ordinateur (CAO) sont écrites dans différents langages (assembleur, Basic, Fortran, PL/1, C...). Ils sont disponibles pour les étudiants, mais uniquement pour un petit nombre d'entre eux, en dernière année, dans le cadre du travail de fin d'études. Aujourd'hui, le programme des majeure et mineure en électricité du 2^{ème} Baccalauréat comprend le cours de Circuits électriques et le projet qui lui est associé. Les quelque quatre-vingts étudiants qui y sont inscrits téléchargent gratuitement sur leur ordinateur personnel la version de démonstration de la suite professionnelle Orcad de Cadence qui contient le simulateur PSpice ; 500 MB d'espace disque suffisent (250 fois le contenu du disque de la Varian, deux millièmes du contenu du disque de leur PC).

Au début des années 1980, les outils professionnels de CAO étaient financièrement inaccessibles pour le labo. Leur accord dote les membres d'Aramis d'un pouvoir de négociation suffisant vis-à-vis des fournisseurs. Le premier logiciel installé sera la suite de CAO fournie par VTI. La Commission européenne prendra par la suite la relève des programmes nationaux. Les programmes EUROCHIP puis EUROPRACTICE mettront à la portée des universités les programmes de CAO les plus répandus dans l'industrie et l'accès à des services de fonderie. VTI sera remplacé par le logiciel CADENCE.

7. Denis Flandre ; *Étude de faisabilité d'une nouvelle technologie CMOS sur isolant dans le domaine des circuits digitaux* ; Doctorat UCL, 18 décembre 1990, promoteur : F. Van de Wiele.

Partout au monde, l'activité de recherche liée au développement de la CAO a été profondément affectée par l'apparition de quelques grandes suites de CAO qui ont monopolisé le marché. Au labo, les activités orientées vers la production de programmes de service se sont arrêtées au moment où des programmes commerciaux ont pris la relève.

Quand il n'existait pas d'amplificateurs miniatures et consommant très peu de puissance, les filtres électroniques étaient réalisés à partir de selfs et condensateurs de précision. Dans une technologie CMOS courante, il n'y a ni self ni composants dont on connaisse la valeur avec précision mais il y a des amplificateurs et des interrupteurs ; pour des condensateurs intégrés sur une même puce, les rapports entre les valeurs, eux, sont précis. Ces ingrédients sont la base d'une nouvelle technologie de réalisation de filtres : les filtres à capacités commutées. Yves Therasse et Pierre Guébels développent le programme Vitold⁸, un des premiers programmes de synthèse spécifique pour filtres à capacités commutées, ces curieux filtres discrets réalisés à partir de circuits analogiques. Brigitte Dupont finalisera la documentation du programme et son portage vers des ordinateurs plus récents. La société Mietec en achètera les droits.

La Bell Telephone confie à Jacques Wénin et Jean Léonard la mission de développer un programme dont la fonction est de vérifier, à partir de données extraites du dessin des masques d'un circuit, si ce circuit respecte bien un ensemble de règles de conception – c'est en quelque sorte un correcteur orthographique pour dessin de circuits intégrés où la base de règles de grammaire s'enrichit progressivement en accumulant la mémoire du savoir-faire accumulé lors de la conception des circuits précédents. Après un an, ils ont développé un prototype de leur programme LIVE. La faisabilité du projet est démontrée. Ils reçoivent le feu vert pour réaliser une version de production. LIVE⁹ permettra la vérification de nombreux circuits dont un circuit de 80 000 transistors.

8. Therasse Y, Guebels P, Jaspers P. ; *An Automatic CAD Tool for Switched Capacitors Filters Design : A Method based on the Generalized Orchard Argument*, 8th European Solid-state Circuits Conference, p. 41-44 ; 1982

9. Wenin, J, Verhasselt, J, Van Camp, M, Guebels, P, Leonard, J. ; *Rule-Based VLSI Verification System Constrained by Layout Parasitics* ; 26th Conference on Design Automation, 1989 ; p. 662-667

La thèse de doctorat de Frank Vos¹⁰ explore une approche formelle de la vérification. À partir du schéma d'interconnexion des transistors, son programme SYMSYM reconstruit les équations Booléennes du circuit qu'il utilise pour en simuler le comportement. Frank est aussi connu pour avoir ajouté le LISP à la liste des nombreux langages informatiques utilisés au labo.

10. Vos, F, Trullemans, C. ; *A switch level symbolic simulator* ; Proceedings of the 15th European Solid-State Circuits Conference, 1989 ; p. 244-247



Salle des terminaux, vers 1985.

De g. à dr. : Akira Terao, Tony De Nayer, Eric Gilson.

Marc Davio avait quitté ses fonctions à temps plein à l'UCL en 1969 pour rejoindre le *Philips Research Laboratory Belgium* (PRLB), tout en continuant à assurer son enseignement à l'Université. Il est nommé professeur extraordinaire en 1990. En 1991, à la fermeture du PRLB, Marc Davio et Jean-Jacques Quisquater rejoignent le labo. J.-J. Quisquater y développera le « UCL Crypto Group ».

À l'occasion d'un cours d'été organisé en 1968 par H. P. Debruyne, Marc Davio avait contribué à la rédaction d'un monumental cours de Circuits et systèmes logiques orienté vers des méthodes de synthèse directement programmables. Les méthodes de synthèse automatiques de circuits logiques et particulièrement les synthèses multi-couches qui sont déjà abordées dans ce cours ne prendront leur essor que dans les années 1990.

Marc Davio sera reconnu comme un des véritables pionniers de la synthèse logique. Automatiser la synthèse de circuits logiques combinatoires et séquentiels : c'était son programme d'activité en 1966, c'est encore le sujet de la dernière thèse de doctorat¹¹ qu'il a encadrée à l'UCL.

Pour les étudiants qui ont suivis les cours de Marc Davio, pour ceux qui ont travaillé avec lui et aujourd'hui pour tous les concepteurs de systèmes logiques, l'approche systématique de la synthèse est le choix évident. Synthèse d'unité de contrôle, réalisation de machine de calcul à partir d'une description en C++, minimisation du nombre d'états pour automates finis, synthèse en logique multicouche, ordonnancement, synthèse de circuits combinatoires, sont autant de sujets que l'on trouvait depuis longtemps dans ses cours. Ils ont été pris pour thème par Jean Remy (1988), Arnold Ginetti (1990), Ney Calazans (1993), Qin Hai Zhang (1995), João Netto (1995) et Ricardo Ferreira (1999), dans les doctorats qu'ils ont réalisés à l'UCL avec Marc Davio ou d'autres promoteurs.

11. Ney Laert Vilar Calazans ; *State Minimization and State Assignment of Finite State Machines : their relationship and their impact on the implementation* ; Doctorat UCL, 1993 ; Promoteurs : A.-M. Anckaert Trullemans et M. Davio (in memoriam),

Cette activité a valu au Laboratoire de Microélectronique d'être associé au projet LINK (ESPRIT Basic Research Action, 1992 à 1995) regroupant des universités, des sociétés et des centres de recherches européens : IMEC Leuven, Université catholique de Louvain, Universität Dortmund, Universität Karlsruhe, Institut Polytechnique de Grenoble, Compass Design Automation, Dassault Électronique, Technische Universiteit Eindhoven.

Vitold Belevitch est le directeur du Philips Research Laboratory of Brussels (PRLB). On a dit de lui que le prix Nobel de Théorie des Circuits lui aurait très certainement été décerné si seulement ce prix avait existé. Sa production scientifique couvre quatre mille pages, dont un monument, l'ouvrage *Classical Network Theory*, publié en 1968.

À partir de 1953 et durant près de trente ans, le professeur Vitold Bélévitch a enseigné à l'UCL, notamment le cours de Synthèse des circuits passifs et filtres, un cours à option difficile et exigeant auquel ne s'inscrivait pas n'importe quel étudiant.

Pierre Guébels et Yves Therasse ont assisté au début des années 1980 à ses derniers cours. Ils sont les auteurs de l'un des premiers programmes de synthèse automatique de filtres à capacités commutées, qu'ils ont développé au Laboratoire de microélectronique de l'UCL. En hommage à leur professeur, ils avaient baptisé ce programme « Vitold ».

L'article *Charge pumping in MOS devices* publié par Paul Jespers avec Joseph Brugler lors de son année sabbatique à Stanford a été cité 147 fois. C'est un record qu'il a lui-même battu en publiant, avec Fernando Silveira et Denis Flandre, un article cité 275 fois qui introduit la méthode basée sur le quotient g_m/I_D pour la synthèse de circuits analogiques¹².

Elle est particulièrement adaptée à la conception de circuits à faible puissance. Elle se base sur le quotient g_m/I_D qui est une caractéristique universelle pour tous les transistors fabriqués par un même procédé ; il peut être représenté par un modèle analytique simple. Paul Jespers consacrera un livre à cette méthode née à l'UCL¹³. Elle fera école.

Pour l'anecdote, la requête « g_m/I_D methodology » adressée à un moteur de recherche sur internet ramène des milliers de résultats. Fernando Silveira, qui a obtenu successivement un master et un doctorat¹⁴ à l'UCL, est aujourd'hui professeur au département d'électronique de l'Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.

12. Silveira F, Flandre D, Jespers P. G. A, A g_m/I_D based methodology for the design of CMOS analog circuits and its application to the synthesis of a silicon-on-insulator micropower OTA, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 31, no 9, p. 1314-1319, 1996

13. Paul Jespers, *The g_m/I_D Methodology, a sizing tool for low-voltage analog CMOS Circuits*, Springer US, 2010.

14. F. Sliveira, *Low-power analog IC design and optimization in bulk and SOI CMOS technologies in view of application to pacemakers*, Doctorat UCL, 2002 ; Prom. Denis Flandre

Il arrive que l'on produise des outils de CAO à jeter, conçus pour un usage unique, comme un échafaudage construit sur mesure pour supporter le développement d'un système.

Bruno Yernaux écrit VECTEUR (simulateur switch-level), WELLTEST (polarisation des puits et contrôle des alimentations), CCNAMES (recherche de noeuds en court-circuit ou non connectés), CAPA (évaluation de la capacité parasite en un noeud du circuit). Son véritable objectif est un processeur de traitement de signal en virgule flottante¹⁵ plus performant que les processeurs de traitement de signal du commerce.

Pour assembler leur circuit de traitement d'images en temps réel basé sur une organisation systolique¹⁶, Etienne Van Zielegem et Tony Denayer écrivent un programme paramétrable qui produira les fichiers pour la réalisation des masques d'un circuit multiprocesseurs contenant 90 000 transistors et capable d'exécuter 50 millions d'opérations par seconde.

Lorsqu'ils publient leur circuit de reconnaissance de caractères¹⁰, Jean-Didier Legat et Pierre De Muelenaere mentionnent : « *New CAD tools provided an efficient and short design procedure.* » Il s'agit des outils maison qu'ils ont développés lors de leur thèse.

15. Yernaux, B, Jaspers, P. G. A. ; *A Novel RISC Architecture for High-Speed Floating-Point Signal Processing* ; Fourteenth European Solid-State Circuits Conference, 1988 ; p. 94-97

16. Denayer, T. ; Vanzielegem, E. ; Jaspers, P. G. A. ; *A class of multiprocessors for real-time image and multidimensional signal processing* ; IEEE Journal of Solid-State Circuits ; Vol. 23, no 3, p. 630-638, 1988

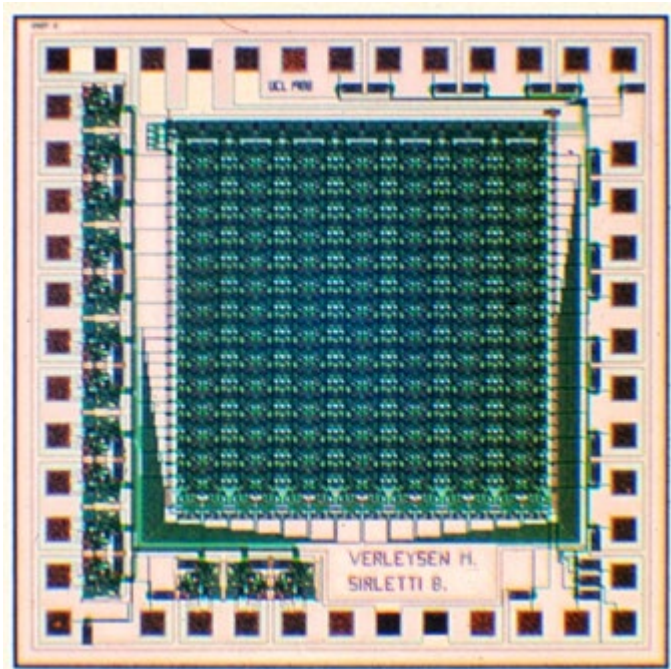


Enduction d'une tranche.

Un film de résine photosensible d'épaisseur uniforme est formé sur la tournette par centrifugation.

Chaîne pilote, années 1980.

L'EXPANSION



Processeur de traitement vocal basé sur un réseau de neurones analogique, 1987

UN TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉPARE INCIDEMMENT
LA FONDATION DU MACHINE LEARNING GROUP

En 1987, Paul Jespers a une idée qui sort des sentiers battus : réaliser des « réseaux de neurones artificiels », en d'autres mots des systèmes adaptatifs basés sur un certain degré d'inspiration neuromimétique. La lecture de quelques articles dans des magazines scientifiques avait donné à Paul Jespers l'intuition qu'il « fallait » travailler sur ce sujet, même s'il était à ce moment fort loin des centres d'intérêt de la FSA. Un travail de fin d'études¹, puis deux bourses sont lancées (Michel Verleysen et Bruno Sirletti) ; c'est le point de départ d'une activité croissante depuis vingt-cinq ans sous l'impulsion de Michel Verleysen. Il fonde le « Neural Networks Group » de l'UCL. Depuis 1993, il organise chaque année une des conférences les plus importantes dans ce domaine en Europe.

La motivation de départ résultait d'une idée simple : le cerveau humain est capable de prouesses cognitives avec des processeurs (les neurones et synapses) élémentaires et lents ; c'est leur grand nombre et le parallélisme qui fait la puissance. L'idée est d'exploiter ce concept (le « neuromimétisme ») dans des structures artificielles, informatiques ou électroniques. Les premiers algorithmes basés sur les réseaux de neurones artificiels nécessitaient déjà une puissance calcul difficilement compatible avec les moyens informatiques de l'époque ; le besoin de développer des processeurs spécifiques, exploitant le parallélisme, était évident. C'est donc ce besoin qui a motivé les premiers travaux à la FSA, au laboratoire de microélectronique : le développement de circuits intégrés spécifiques exploitant un parallélisme de calcul.

Au cours des ans, les recherches en FSA ont évolué fortement. Les moyens informatiques se sont accrus, rendant le besoin de processeurs spécifiques parallèles moins criant. Surtout, l'interfaçage parfois difficile des circuits spécifiques limite leur utilisation à des domaines d'application où les proces-

1. Sirletti B. ; Verleysen M. ; Arimont B, Javaux D. ; *Conception et réalisation d'un processeur de traitement vocal et application à un répondeur téléphonique numérique*. Travail de fin d'études, UCL 1987

seurs génériques ne peuvent les remplacer, par exemple dans des applications embarquées. Mais les recherches en FSA ne se sont pas arrêtées là : fort d'une expérience en développements algorithmiques acquise par assimilation avec les circuits électroniques parallèles, le « neural networks group » de l'UCL a petit à petit conquis une place importante en continuant les recherches tant sur le plan théorique (développements algorithmiques et mathématiques, à la croisée de la théorie de l'information, du traitement de signal et des statistiques) que sur le plan applicatif (applications industrielles, contrôle de qualité, applications médicales et biomédicales).

Les idées initiales d'inspiration neuromimétique ont petit à petit été abandonnées par la communauté scientifique au profit de méthodes exploitant des outils mathématiques plus avancés ; on parle aujourd'hui de « machine learning » (apprentissage automatique). Le « Machine Learning Group » actuel de l'UCL regroupe cinq académiques et une quinzaine de chercheurs, principalement regroupés au sein de l'institut ICTEAM, tant en électricité qu'en mathématiques appliquées et en informatique.

1990

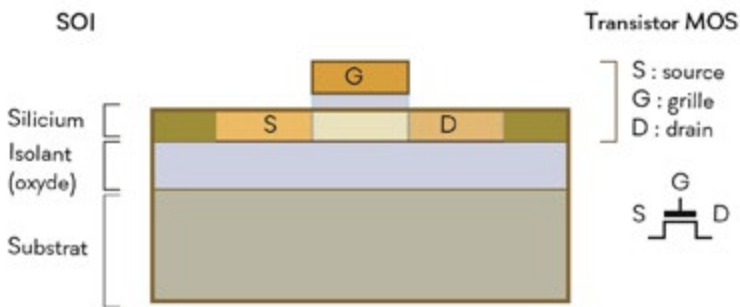
JEAN-PIERRE COLINGE FAIT DU LABO
UN PIONNIER DES TECHNOLOGIES SOI

En 1980, dès son travail de fin d'études, Jean-Pierre Colinge entame des travaux exploratoires sur la technologie SOI (silicium sur isolant), aujourd'hui à la base des technologies les plus avancées. Ce n'est donc pas un hasard si Jean-Pierre Colinge, (cet étudiant qui quittera plus tard les shorts pour la tige) a reçu en 2012 le prix Andrew Grove de l'IEEE pour sa contribution remarquable aux dispositifs et à la technologie SOI. Jean-Pierre Colinge sera nommé chargé de cours à l'UCL en 1990, professeur en 1996. Avec lui, technologues, spécialistes des dispositifs et concepteurs de circuits feront du labo un centre d'excellence dans l'étude de transistors et circuits SOI. La conception de circuits en technologie SOI se développera et donnera naissance à CISSOID, spin-off de l'UCL.

En 1980, le silicium cristallin sur isolant était obtenu à partir d'une fine couche de silicium polycristallin déposé sur de l'oxyde à la surface d'un substrat de silicium. On la faisait fondre grâce à un gros laser, un peu comme celui qui va découper Sean Connery en deux dans le film « Goldfinger », mais qui émettait un faisceau vert et non rouge, très spectaculaire en tout cas. . .

Le gros laser était le support de la thèse de doctorat² d'Akira Terao, dont la première phrase nous apprend que « La tridimensionnalité dans les circuits électroniques semble faire rêver depuis déjà un certain temps ». Où pourrait-on rêver, si ce n'est dans un laboratoire d'électronique universitaire, en cette fabuleuse fin du XXe siècle ? Le dernier paragraphe de la thèse annonce : « Du point de vue technologique, le concept de tridimensionnalité a déjà apporté beaucoup de développements pouvant être exploités dans d'autres projets ».

2. Akira Terao ; *Circuits intégrés tridimensionnels : concepts fondamentaux et étude de la recristallisation par laser* ; Doctorat UCL, 1989 ; Promoteur : F. Van de Wiele.



Technologie SOI (*Silicon On Insulator*) : les transistors sont réalisés sur une mince couche de silicium isolée du substrat par un oxyde épais.

Le substrat ne joue qu'un rôle de support mécanique. Grâce à l'oxyde épais, il n'y a pas de courant de fuite entre les jonctions source et drain et le substrat. Les capacités parasites sont négligeables. Le transistor est insensible à la polarisation du substrat.

Et puis, il y avait le laser. Un laser de 20 Watt continu, donnant une superbe couleur turquoise. Je fus conquis dès la première fois, malgré le danger qu'il représentait : pour les yeux, les cheveux, la peau, les vêtements. Toutefois, le pire qui me soit arrivé en cinq ans (une année de travail de fin d'études, quatre de doctorat), c'est un petit trou dans une chemise un jour où j'avais perdu de vue le rayon réfléchi par l'échantillon.

Je passai des heures à essayer de recristalliser du silicium, le balayant avec le faisceau laser en variant les paramètres. La pièce assombrie s'illuminait des réflexions du faisceau bleu, bouillonnant du silicium en fusion.

Partant d'un système basé sur des oscillateurs pour créer le balayage, j'avais introduit le contrôle par ordinateur, un petit tour de force à une époque où les ordinateurs personnels tournaient à peine à quelques megahertz. Grâce à l'ordinateur, je pouvais programmer le balayage en des termes qui avaient du sens, comme la vitesse linéaire du front de recristallisation, plutôt qu'en fréquences de balayage. J'avais aussi introduit des routines de calibration et de caractérisation du faisceau.

Akira Terao

Très vite, des plaques SOI de bonne qualité deviennent disponibles commercialement, ce qui facilitera le développement de circuits SOI au labo. Vingt ans plus tard, la réalisation de circuits intégrés à trois dimensions en technologie SOI est toujours un sujet de recherches actif.

Pierre Loumaye connectait avec précision des fils de 10 μm de diamètre entre des circuits intégrés et leur boîtier. Il se souvient alors qu'il est aussi mécanicien à plus grande échelle. Il construit l'énorme support métallique de la table anti-vibration nécessaire au montage optique qui accompagne le laser. Le plateau de la table est un monolithe de trois tonnes en marbre poli, livré par un marbrier soudain promu au rang de fournisseur d'appareillage de laboratoire.

Les propriétés des transistors SOI tombaient à pic pour bon nombre de gens du laboratoire de microélectronique. En 1991, Paul Jespers effectue un séjour de six mois à l'Université de Berkeley où il renoue en profondeur avec sa vraie passion : les circuits analogiques. Or la technologie SOI présente des avantages significatifs pour la conception de circuits analogiques à faible consommation³. Les transistors SOI présentent moins d'effets parasites et une meilleure linéarité que les transistors conventionnels, ils résistent aux hautes températures jusque 400 °C. Ceci permit à Paul Jespers et Denis Flandre de développer des circuits analogiques et digitaux défiant toute concurrence⁴.

Le SOI fut une mine d'or pour les technologues, les spécialistes des dispositifs et les concepteurs de circuits qui feront du labo un centre d'excellence dans l'étude de transistors SOI complètement déplétés et la conception de nouvelles architectures de transistors et de circuits.

3. Eggermont J. P., Flandre D., Francis P., Jespers P. G. A., Colinge J. P. ; *Potential of SOI for analog and mixed analog-digital low-power applications* IEEE International Solid-state Circuits Conference, 1995. Digest of Technical Papers, 1995

4. D. Flandre, J.-P. Eggermont, D. De Ceuster, P. Jespers ; *Comparison of SOI vs Bulk performances of CMOS micropower single-stage OTAs* ; Electronics Letters, 30 (1994) 1933-1934

Le cas le plus fameux est probablement le transistor GAA « Gate-all Around » dans lequel l'électrode qui contrôle le passage du courant se trouve tout autour du transistor au lieu d'être simplement posée au-dessus de lui, ce qui lui confère des propriétés électriques idéales, jamais surpassées depuis par aucune autre structure de transistor. Cette structure imaginée par Jean-Pierre Colinge à l'IMEC a été démontrée à l'UCL. Le labo possède la souplesse nécessaire pour accueillir son projet de fabrication d'un transistor étrange et la maîtrise nécessaire pour le faire avec succès.

Le transistor GAA s'est révélé extrêmement résistant aux hautes températures et aux radiations ionisantes. Des mémoires SRAM CMOS de 1 kilobit contenant environ dix mille transistors GAA ont été fabriquées dans la salle blanche et irradiées aux rayons gammas et aux ions lourds accélérés par le cyclotron « Cyclone » de l'UCL.

Une collaboration entre la doctorante Pascale Francis et G. Berger du cyclotron eut pour résultat le développement d'un banc d'irradiation et de caractérisation in situ des circuits irradiés qui est depuis utilisé par l'European Space Agency.

En 1995-1996, Colinge développe à l'UCL des transistors SOI « nanofils » où la grille couvre trois côtés du transistor. Il les nomme « quantum wire transistors ». Xavier Baie, alors doctorant, est le premier à observer des oscillations de transconductance dans de tels dispositifs⁵. Ces effets sont dus au confinement quantique des électrons dans les dispositifs unidimensionnels. Une autre doctorante, Xiaohui Tang, réussit à fabriquer des *single-electron transistors*⁶ et un transistor nanofil contenant un nanocristal de silicium dans lequel on peut stocker un seul électron, créant ainsi une cellule mémoire flash où

5. Baie, X. ; Colinge, J. P. ; Bayot, V. ; Grivei, E. ; *Quantum-wire effects in thin and narrow SOI MOSFETs*; Proc. of the IEEE International SOI Conference, p. 66-67, 1995.

6. Xiaohui Tang ; Baie, X. ; Bayot, V. ; Van de Wiele, F. ; Colinge, J. P. ; *An SOI single-electron transistor*. Proc. of the IEEE International SOI Conference. p. 46-47, 1999.

Un des investissements les plus mémorables du laboratoire fut l'achat d'un implantateur ionique EATON pour la salle blanche. Avec les progrès de la technologie de production, le diamètre des tranches de silicium commercialement disponibles était passé à 3 pouces, hors de portée de l'implanteur Balzers.

Au laboratoire, les recherches portaient sur des technologies SOI où les couches à implanter ont moins de 100 nm d'épaisseur. Capable d'implanter des ions à basse énergie dans une couche de moins de 100 nm d'épaisseur, le nouvel implantateur est cependant un monstre de six mètres de long, trois de large et deux de haut, truffé d'électronique et de mécanique délicate, doté d'une alimentation de 200 000 volts et d'une chambre à évaporation pour arsenic et autres composés toxiques.

Une pièce du labo fut entièrement modifiée, avec plancher renforcé, pour accueillir le monstre. Pour le faire entrer dans le labo, on dut abattre un mur externe et louer du matériel lourd de levage.

On achetait l'implanteur d'occasion à une compagnie de semi-conducteurs française qui s'en débarrassait pour la modique somme d'un million de dollars. Par un beau jour de décembre, il prit le camion en direction de LLN. La veille du grand jour, tout était prêt, sauf la météo. Le gel et la neige bloquèrent le camion et l'installation dut être retardée.

La plus mauvaise nouvelle vint cependant lors de la facturation : au million de dollars fut ajoutée une TVA de 21% car un implantateur ionique est soumis au taux TVA applicable aux articles de luxe, même lorsqu'il est acheté en seconde main.

Jean-Pierre Colinge
Professor University College Cork

l'on peut stocker un seul électron. Tous ces nouveaux dispositifs furent publiés dans de grands journaux scientifiques internationaux, mais dans l'indifférence générale. Ils étaient trop en avance sur leur temps.

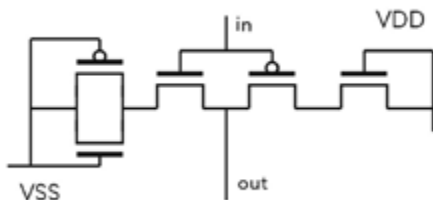
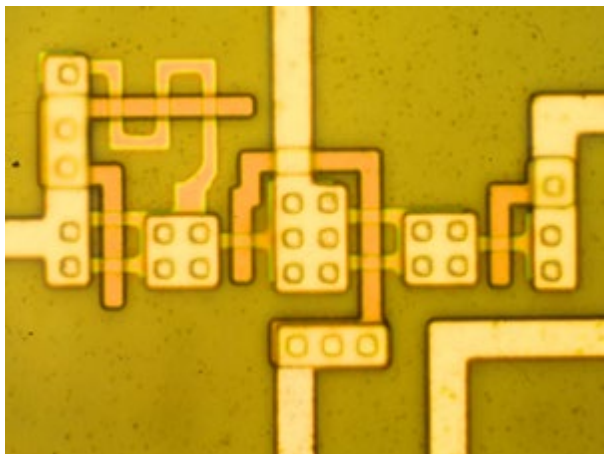
Les *quantum wire transistors* ont depuis été rebaptisés *trigate transistors* par Intel et sont à la base de toute leur récente campagne publicitaire. Les transistors SOI complètement déplétés ont été dénigrés par l'industrie pendant quinze ans avant de devenir le nouveau fer de lance d'IBM et de ST-Ericsson.

Jean-Pierre Colinge sera ensuite professeur à l'University of California et à l'University College Cork. Il travaille actuellement à TSMC (Taiwan). Le labo UCL, un petit laboratoire belge qui était en avance sur son temps ? En tout cas un endroit de grande sympathie entre doctorants, techniciens et professeurs. Il y repense souvent avec nostalgie.

C'è bin bia d'ècrire des tchinisses su du silicium qu'a sti fondu avou in laser, mais i'n faudreu nin d'roublîi les djins qui m'ont ne branmin aidé pindin trwès ins.

Premiers mots de la thèse de doctorat[†] de Jean-Pierre Colinge : C'est bien beau d'écrire des balivernes sur du silicium qui a été fondu avec un laser, mais il ne faudrait pas oublier les gens qui m'ont pour sûr beaucoup aidé pendant trois ans.

[†]JP Colinge, *Electrical properties of polycrystalline silicon*, doctorat UCL, 1984 ; Promoteur : F. Van de Wiele.



Inverseur CMOS en technologie SOI[†].

VSS, VDD : tensions d'alimentation.

L'inverseur est optimisé par des techniques de circuit pour accroître sa résistance aux radiations.

[†] P. Francis, C. Michel, D. Flandre, J. P. Colinge ; *Radiation-Hard Design for SOI MOS Inverters* ; IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 41, No. 2, Apr 1994

En 1996, immédiatement après notre travail de fin d'études, Jean-Pierre Colinge engage Pascale Francis et moi-même dans le cadre d'un contrat de recherches de cinq ans subsidié par la Région wallonne. L'objectif est de développer des composants et des circuits SOI, et particulièrement d'étudier leur résistance à des environnements hostiles. Pascale soumettra des mémoires RAM SOI à des radiations intenses et moi, des amplificateurs opérationnels à de hautes températures.

Jean-Pierre Colinge avait engagé son équipe dans une approche complète du monde du semi-conducteur. Pour arriver à nos fins nous sommes passés par un parcours qui commençait par la conception de structures de transistors, dont les fameux transistors Gate-all-around (GAA). Nous avons défini et dessiné les masques d'un circuit de test contenant différents composants, un oscillateur en anneau, un point mémoire, un amplificateur OTA.

Nous avons réaménagé les salles propres pour accueillir de nouveaux équipements (comme j'étais le plus petit de l'équipe, on m'a envoyé tirer des lignes dans les faux-plafonds. Je me disais que c'était sans doute cela qu'ils entendaient par « polyvalence »). Nous avons mis au point de nouveaux modules du procédé de fabrication (nouvelle machine de gravure plasma, amélioration des performances du photo-stepper, ...), nous avons participé activement à la fabrication des lots de test.

Nous avons écrit des programmes de mesure automatique pour la collection de statistiques de mesure et développé des modèles Spice adaptés à nos transistors. Nous avons mesuré les caractéristiques des échantillons de test. Sur base de ces résultats, nous avons conçu des circuits plus complexes (mémoires RAM résistant à de fortes doses

de radiations, amplificateurs opérationnels résistant à des températures élevées). Nous avons fabriqué ces circuits et mesuré leurs caractéristiques.

Jean-Pierre Colinge était un promoteur formidable. Il nous laissait la pleine liberté sans pression. Il savait toutefois vous insuffler l'inspiration sans en avoir l'air tout en vous laissant récolter entièrement les palmes récompensant votre travail. Un jour — je m'en souviendrai toujours — je mesurais sous pointes mon premier amplificateur SOI. Jean-Pierre est passé trente secondes et m'a dit : « Tu devrais essayer de le mesurer en température ». Le temps de me retourner, il était parti. Sur le moment même, je n'ai pas relevé l'importance de ce conseil. Je l'ai pourtant suivi et cela m'a valu le chapitre le plus important de ma thèse et de multiples publications[†] ! Nous avons pu ainsi assurer une présence systématique avec plusieurs papiers du labo aux conférences SOI aux Etats-Unis ainsi qu'aux conférences ESSDERC puis ESSCIRC en Europe.

J'ai accepté bien volontiers ma part de travail d'encadrement pour les cours d'électronique et les travaux de fin d'études, bien conscient que cela me permettrait d'asseoir mes bases en électronique et ne pas perdre pied au moment de passer à l'industrie. Une fois en entreprise, j'ai eu un accès plus rapide à des responsabilités grâce à mon doctorat et ce sans vraiment l'avoir cherché. Je suis sorti du labo encore plus passionné que quand j'y suis entré. Je suis toujours dans le domaine aujourd'hui et ne changerais pour rien au monde. Bref, on ne pouvait pas rêver mieux comme début de carrière. Je me suis retrouvé au bon endroit et au bon moment. Vingt ans après, je mesure toujours cette chance !

Cette équipe très soudée faisait aussi du jogging dans le bois de Lauzelles et autour du lac de Louvain-la-Neuve. Elle improvisait des soirées spaghettis (chez Philippe Lenoble ou Christian Hallet, jamais deux fois la même sauce). Elle allait observer la migration des grenouilles, tritons et crapauds et sauver, avec Pascale Francis, ceux qui s'exposent à une mort affreuse en traversant la route. Elle part la nuit en forêt (interdit) avec Jean-Luc Voz pour écouter le brame du cerf et faire face successivement, dans l'obscurité totale, à la rencontre d'un sanglier bourru et passablement énervé puis d'un garde de la même humeur. Au grand jour et plus paisiblement, elle découvre avec moi les oiseaux du Zwin. Avec l'aide précieuse de Pierre Loumaye, elle construit un vélo pour les vingt-quatre heures de Louvain-la-Neuve. Rappelez-vous : à l'arrière, une grande tranche de silicium où les motifs photorépétés comme sur une vraie tranche sont les bouilles de nos professeurs ; à l'avant : un panier plein de composants électroniques. En selle : un cycliste en tenue de salle propre. À l'entrée de la nuit, réparation de fortune du vélo qui n'a pas résisté aux coups de boutoir de Bernard Ginetti et Damien Macq. Nous avons terminé bien classés, vannés et heureux !

On n'engage pas des chercheurs pour qu'ils fassent uniquement ce qui est déjà écrit dans les livres. Si on les envoie, un jour de sortie de labo, sur des draisines dans la vallée de la Molignée, ils passent de draisine en draisine (interdit), provoquent des chocs violents entre draisines (interdit), se tiennent debout et se penchent à l'extrême (interdit). Toute cette créativité n'est pas sans risques : ils font dérailler un de ces lourds engins. Anne Adant mesure subitement les dangers auxquels s'expose la secrétaire d'une équipe de recherche. Elle se trouvait bien sûr sur la mauvaise draisine et se foule le poignet.

Quelques jours plus tard, elle passe au responsable du laboratoire l'appel téléphonique du propriétaire de la draine. Il exige avec rage qu'on lui rembourse le remplacement d'une roue de draine (ah ! confie le responsable à la secrétaire, si les pièces de rechange pour les machines du labo étaient au même tarif !). Bilan général : beaucoup d'adrénaline, beaucoup de fous rires, beaucoup d'excellents souvenirs et un merveilleux team building.

J'ai appris à vivre et travailler avec un large spectre de profils humains comme on n'en rencontre pas partout : hommes ou femmes, belges ou étrangers, jeunes ou moins jeunes, dans un large éventail de niveaux d'études mais tous compétents et passionnés. C'était une équipe de vrais professionnels où régnait généralement une très bonne entente. Il faut dire que les gens étaient d'une grande éducation, gage à mon sens de tolérance. Il y avait clairement un espace pour la socialisation et par la même pour l'obtention d'une équipe soudée (petit café le matin, drinks réguliers après les réunions techniques, dîners ensemble, sorties de labo organisées par les nouveaux afin de favoriser leur intégration). Bref, des années d'or où nous avons appliqué avant la lettre et avec succès le récent concept de Google : laisser 20% de leur temps libres aux employés pour favoriser leur développement et leur créativité.

Bernard Gentinne,
Design Manager, ON Semiconductor

† Eggermont, J.-P. ; De Ceuster, D. ; Flandre, D. ; Gentinne, B. ; Jaspers, P. G. A. ; Colinge, J. ; *Design of SOI CMOS operational amplifiers for applications up to 300°C* ; IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 31, No 2, p. 179 – 186 (1996)

Aknowledgments[†]

I would like to devote these few lines to express my thanks and gratitude to the numerous people who have contributed to my work.

First of all, I am most sincerely grateful to Prof. J. P. Colinge for his clever guidance, his active encouragements, his formidable energy, his efficient organization, and numerous enlightening and far-reaching discussions. I am indebted to Prof. F. Van de Wiele, Prof. S. Cristoloveanu, Dr. G. E. Davis, and Dr. J. Ladrière who accepted to devote part of their precious time to review my dissertation very conscientiously. Because they pointed out a number of inadequate formulations and provided inestimable comments and suggestions, the text was greatly improved.

I am grateful to many present and former scientific members of the Laboratory for their help and assistance. Deserving special thanks are Denis Flandre and Akira Terao for their constructive criticism, helpful advice and insightful suggestions. I also enjoyed many fruitful discussions with my colleagues and close companions, Bernard Gentinne, Jean-Paul Eggermont, Xavier Baie, Jian Chen, and Denis de Ceuster. Their generous collaboration sustained me through many difficult and challenging moments. Special thanks are due to our former students, Christophe Michel, Sylvie Lacroix, Didier Fobe and Anne Vandooren, for their painstaking work and their creativity.

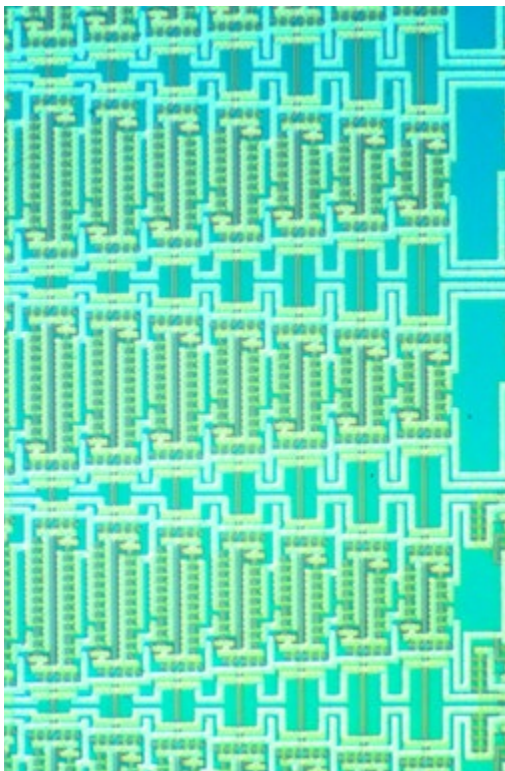
I greatly appreciate the outstanding work of the technical team which restlessly processed the devices and strove to keep the clean room alive. My grateful thanks go to the following : André Crahay, Bohdan Katschmarskyj, Pierrot Loumaye and Patricia Proesmans. Without their personal investment and their will to get the job done,

this research would not have been possible. My special thanks also to Pierrot Loumaye for patient device packaging, to Vinciane Scheuren and David Spote for device characterization, to Bernard Herent for clever advice during the development of tests benches and to Hubert Sablain for taking wonderful SEM pictures. I would like to express my gratitude to Mr. C. Semal for his generous help and support during so long ^{60}Co irradiations, and to Guy Berger whose patience and mastery made possible memorable heavy ion irradiations.

The maintenance of the softwares was done excellently by Brigitte Dupont and Pascal Maes. Owing to their competence, we profit from a very efficient and user-friendly working environment. I am also grateful to the key person of our Laboratory, Anne Adant, who is mainly responsible for creating this incomparable atmosphere made of friendship, reliability and laugh which are the necessary ingredients for a work to be profitable.

Pascale Francis
Sr Engineering Manager, Texas Instruments

† Extrait de : Pascale Francis, *Double-gate SOI/MOS devices and circuits in hostile environments*, Doctorat UCL, 1996 ; Promoteur : JP Colinge.



Véhicule de test pour une mémoire statique à six transistors en technologie GAA[†].

Pour les besoins du test, le nombre de doigts mis en parallèle pour constituer les transistors pMOS dans les différentes cellules est variable.

[†] Francis, P. ; Colinge, J.-P. ; Berger, G. ; *Temporal analysis of SEU in SOI/GAA SRAMs* ; IEEE Transactions on Nuclear Science, Vol. 42, No 6, Dec 1995

1995

CRÉATION DE LA SOCIÉTÉ NEUROTECH

Depuis septembre 1979, Claude Veraart et l'équipe de recherche à l'origine du Laboratoire de génie de la réhabilitation neurale (Faculté de médecine) s'étaient spécialisés dans l'étude de la cécité et de la réhabilitation de la vision chez le non-voyant. Il collaborait avec Charles Trullemans à la réalisation de plusieurs projets de prothèse externe.

Il l'emmène un jour à Cleveland, pour rencontrer le Pr J. T. Mortimer à la Case Western Reserve University. Ils ont l'intention de proposer à la Commission européenne un projet de prothèse visuelle par stimulation du nerf optique. Au moment du départ, ils apprennent que l'échéance pour le dépôt d'un premier document n'est éloignée que de quelques jours. Ils le rédigent fébrilement dans une chambre d'hôtel et le font parvenir à la Commission, dans les délais mais en vain. Leur voyage n'est cependant pas inutile car le Pr Mortimer marque son adhésion au projet. À leur retour en 1995, avec Jean Delbeke et Michel Troosters, ils fondent la société Neurotech dans le but d'exploiter à moyen terme des résultats de recherche dans le domaine de l'électronique médicale.

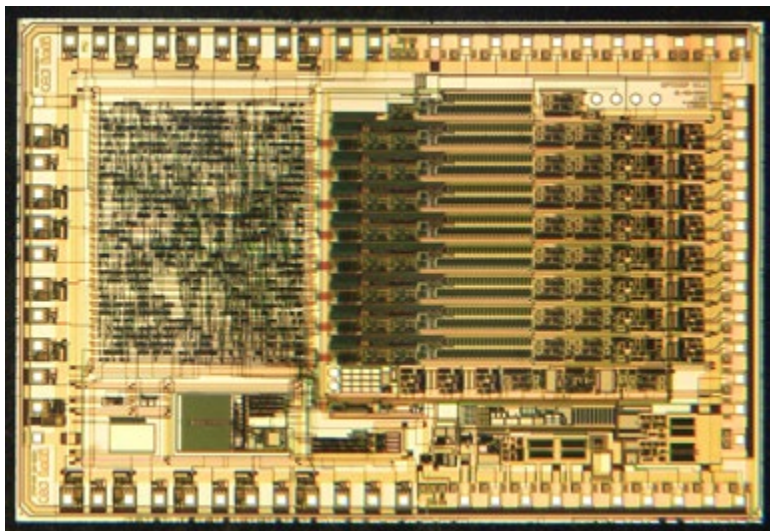
Le projet rédigé à la hâte à Cleveland deviendra en 1996 le projet MIVIP⁷ dans le programme ESPRIT Long Term Research (FP4) de l'Union européenne, ensuite OPTIVIP dans IST (FP6).

Avec la collaboration du Centro Nacional de Microelectrónica (CNM, Barcelone), puis du Laboratoire d'électronique des technologies de l'information (LETI, Grenoble), le Laboratoire développe le circuit intégré qui est le cœur du stimulateur. Celui-ci présente plusieurs caractéristiques originales : transfert d'énergie et canal de transmission de données à haut débit combinés dans un unique lien électromagnétique, production de formes d'onde de stimu-

7. Veraart, Claude ; Delbeke, Jean ; Wanet-Defalque, Marie-Chantal ; Vanlierde, Annick ; Legat, Jean-Didier ; Trullemans, Charles. *Chronic electrical stimulation of the nerve in a retinitis pigmentosa blind volunteer*. In : Investigative Ophthalmology & Visual Science, Vol. 40, p. 40 : S783, 1999.

lation arbitraires contrôlées de l'extérieur, gamme de courant de stimulation de 1 μ A à 3 mA par canal, interface pour 8 contacts d'électrodes indépendants, dispositif de récupération active de la charge à l'interface de l'électrode, canal de retour permettant la mesure de la tension sur chaque contact. Jean-Didier Legat et Michel Verleysen seront également impliqués dans le développement de la prothèse visuelle en contribuant à la réalisation des composants électroniques externes et à l'interprétation statistique des résultats expérimentaux.

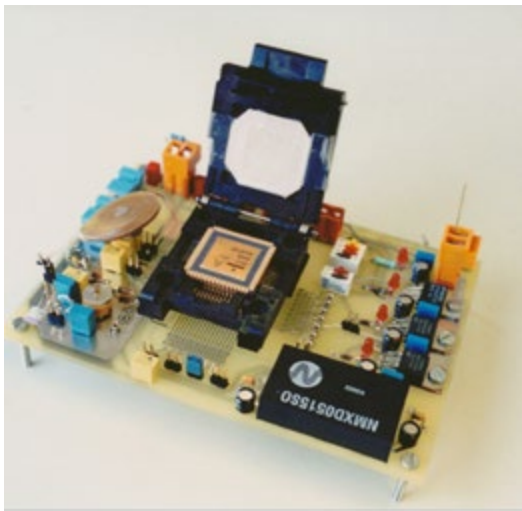
In 2002, Neurotech identifie un nouveau champ d'application : le traitement de l'épilepsie réfractaire. Le know-how accumulé et des versions ultérieures de différents composants de la prothèse visuelle seront à la base d'un nouveau stimulateur du nerf vague, l'ADNS-300, capable non seulement de stimuler mais aussi d'enregistrer les potentiels d'action composite du nerf vague dans le but de personnaliser le traitement.



Circuit intégré pour prothèse visuelle, projet OPTIVIP, 2003

Il ne restait plus qu'à terminer la mise au point technologique, l'industrialisation y compris les procédures de qualification et de traçabilité, les essais cliniques, la documentation, il ne restait qu'à obtenir le marquage CE qui permet l'utilisation à des fins thérapeutiques pour terminer le chemin long de quinze ans entre la première idée du stimulateur expérimental MIVIP et la disponibilité du produit ADNS-300 commercialisable. L'enregistrement chronique des potentiels d'action du nerf vague est une première mondiale réalisée par Neurotech.

En novembre 2012, la société Sorin Group, un des leaders mondiaux dans le domaine des maladies cardio-vasculaires, a acquis la société Neurotech dans le cadre de sa stratégie de croissance visant à entrer dans le marché de la neurostimulation.



Montage de test pour le circuit de la prothèse visuelle.

Le disque à gauche est l'antenne de transmission transcutanée de puissance et de données.

2000

CRÉATION DE LA SOCIÉTÉ CISSOID

Dix ans s'écouleront, entre 2002 et 2012, entre les premières rumeurs de développement du transistor Tri-Gate par Intel et la commercialisation, prévue en fin 2012, d'un microprocesseur basé sur ce transistor. La même échelle de temps s'applique au développement des sociétés Spin-Off issues du Laboratoire de microélectronique UCL.

Vers la fin des années 1990, Le laboratoire est à la pointe de la recherche sur le SOI. Il dispose de sa propre chaîne de fabrication pilote. Les professeurs Jean-Pierre Colinge d'abord et Denis Flandre ensuite estiment que la technologie est prête pour une exploitation industrielle. L'idée initiale est une fonderie de semi-conducteurs en région wallonne. Face au budget nécessaire, le projet se transforme petit à petit en un centre de développement de circuits électroniques analogiques qui fabriquera en sous-traitance.

Interviennent alors trois chercheurs à qui l'on confie le projet de création d'une Spin-Off. Ils suivent des formations complémentaires en économie. Avec Denis Flandre, leur promoteur de thèse, Laurent Demeüs, Pierre Delatte et Vincent Dessard créent en 2000 la société CISSOID, focalisée sur les applications de la technologie SOI. Pour favoriser un transfert de technologie plus rapide, elle est hébergée provisoirement dans les locaux de l'UCL.

La bulle internet explose quelques semaines plus tard. Les jeunes entrepreneurs s'accrochent. Les circuits SOI fonctionnent à plus de 225°C, bien au delà des 125°C offerts ailleurs pour les circuits les plus robustes. CISSOID se concentre sur un marché spécifique : l'électronique à haute température. Très vite, elle signe un projet de développement de produit en collaboration avec le numéro deux mondial des sociétés de services pétroliers. Quelques mois plus tard CISSOID décroche son premier contrat pour le développement d'un circuit spécifique pour un autre client de ce secteur qui, à cette époque, est à la recherche de nouvelles technologies pour atteindre des puits toujours plus profonds et à plus haute température. Il devient naturellement le premier client de CISSOID.

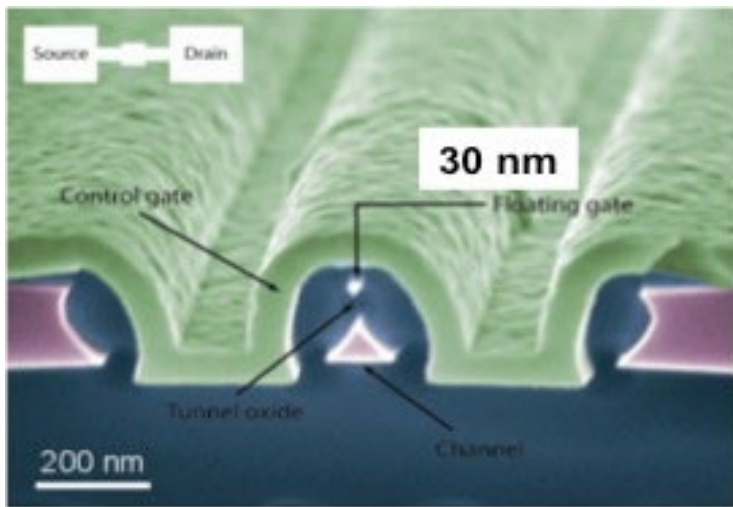
Le transistor GAA `gate-all-around' MOS device, apparaît en 1990 dans une communication signée par Jean-Pierre Colinge et des collègues de l'IMEC (Interuniversity Microelectronics Centre, Leuven). Elle sera abondamment citée, et notamment, treize ans plus tard, dans une autre communication signée par des chercheurs du département Logic Technology Development d'INTEL qui décrit pratiquement la même structure que le GAA sous le nom de "Tri gate" transistor.

En 2002, INTEL laisse filtrer des informations annonçant le développement d'un microprocesseur basé sur ce transistor pour la seconde moitié de la décennie. En mai 2011, INTEL annoncera « une percée majeure et une innovation historique dans l'histoire des microcircuits », le microprocesseur Ivy Bridge, qui sera le premier circuit intégré produit en masse basé sur les transistors 3-D.

Ils arriveront sur le marché en fin 2012, dix ans après la première publication par INTEL.

En 2008, CISSOID s'est développée, emploie huit personnes, propose cinq produits pour des applications à haute température. Les fondateurs décident de donner une impulsion plus forte. Ils engagent un nouveau CEO : Tony Denayer, ancien membre du Laboratoire de microélectronique UCL, riche de plus de 20 ans d'expérience internationale dans le monde du semi-conducteur. La société présente aujourd'hui une croissance à deux chiffres, son personnel a doublé, son catalogue propose quarante produits. Elle s'est diversifiée sur d'autres marchés comme l'aéronautique et l'électronique industrielle. Les liens restent étroits avec l'UCL où ont été formés 60% des membres du personnel. Plusieurs projets de R&D sont menés en collaboration.

En 1980, souvenez-vous : Jean-Pierre Colinge commençait son travail de fin d'études sous la direction de Fernand van de Wiele. Ils rêvaient de l'inspéré, introuvable et inaccessible.



Vue en coupe d'un transistor GAA.

On voit très bien la structure tri-gate et le quantum dot.

LES LABORATOIRES DE MICROÉLECTRONIQUE
ET D'HYPERFRÉQUENCES
S'ASSOCIENT DANS UN PROJET SOI

Le point de convergence entre structures intégrées et hyperfréquences, annoncé en 1967 dans le plan quinquennal des électriciens – un plan qui ne manquait certes pas de vision prospective ! — est établi en 1993 par un projet ARC de Jean-Pierre Colinge et Danielle Vanhoenacker.

La combinaison des compétences du laboratoire d'hyperfréquences et du laboratoire de microélectronique est un créneau porteur. Le projet initial comporte deux volets :

- la qualification haute fréquence, la mesure des paramètres et l'extraction du circuit équivalent des transistors MOSFET SOI fabriqués en microélectronique
- la modélisation, la synthèse et la mesure d'éléments passifs intégrés (capacités et inductances).

Une étroite collaboration entre les chercheurs des deux laboratoires permet d'accroître notablement les performances des transistors, notamment, à travers les thèses de doctorat de J. Chen, R. Gillon et J.-P. Raskin⁸ qui contribuèrent fortement au rapprochement. Ils sont des pionniers dans l'analyse et l'optimisation des technologies CMOS SOI pour répondre aux applications haute fréquence. Leurs travaux portent sur la siliciuration des contacts, les techniques d'extraction de circuits électriques équivalents, l'introduction d'un substrat SOI de haute résistivité. Aujourd'hui, ils sont toujours les travaux de référence au niveau mondial.

8. Raskin, J.-P. ; Gillon, R. ; Jian Chen ; Vanhoenacker-Janvier, D. ; Colinge, J.-P. ; *Accurate SOI MOSFET characterization at microwave frequencies for device performance optimization and analog modeling* ; IEEE Transactions on Electron Devices, Volume : 45, no 5, 1998

Ces résultats servent de base à J. P. Raskin et J. P. Colinge quand ils préparent le projet ESPRIT4 SPACE *SOI for portable applications and consumer electronics*, en collaboration avec Alcatel-Bell (B), LETI (F) et Thomson (F), 1997-1999. Grâce à ce projet, L'UCL aide le LETI à développer et à optimiser sa technologie SOI 0.25 μm . De nombreux contacts à long terme se nouent avec les partenaires français ainsi qu'avec l'IEMN (Lille). Ils concernent aujourd'hui la technologie SOI 22 nm. À l'échéance de ce projet, le LETI et aussi ST-Microelectronics (Crolles, France), introduisent la siliciuration des contacts de source et drain des transistors. Elle réduit fortement les résistances d'accès des transistors MOS SOI minces. En 2003, l'UCL invente un type de substrat SOI à haute résistivité où une couche riche en pièges est introduite sous l'oxyde enterré. Ce type de substrat haute fréquence de grande qualité est commercialisé aujourd'hui par la société SOITEC, leader mondial pour la production de substrat SOI.

Les modèles haute fréquence développés pour les transistors SOI MOSFET permettent de synthétiser de nouveaux types de circuits micro-ondes, tels que des amplificateurs, oscillateurs et mélangeurs. De nombreux circuits développés dans le cadre de projets financés par la Région Wallonne (4G-Radio, Crotale, Cormoran, etc.) donnent lieu à un grand nombre de thèses de doctorat et de collaborations internationales.

Une deuxième ARC (F. Van de Wiele, D. Flandre, V. Bayot, D. Janvier, 1998-2003) voit le développement de nouveaux dispositifs semi-conducteurs et nanoélectroniques. Elle est à l'origine du développement de nouvelles architectures de transistors MOS SOI, tels que les canaux à dopage graduel, des transistors double grille, des transistors suspendus au-dessus d'une cavité (*silicon on nothing*), des nanofils de silicium, des mémoires à un électron, etc. Ces travaux sont couronnés par plusieurs publications à haut impact ainsi que plusieurs brevets.

Lorsque Jean-Didier Legat rejoint l'UCL en 1990, il s'oriente résolument vers la conception de circuits numériques, d'implémentation d'algorithmes sur réseaux programmables (FPGA), de microprocesseurs, d'architectures d'ordinateurs⁹. Il collabore avec le groupe Crypto¹⁰, avec le laboratoire de traitement d'images, avec le laboratoire d'électrotechnique¹¹.

En 2001, le laboratoire de microélectronique lance, avec le laboratoire d'hyperfréquences, un projet de dispositifs intégrés en technologies SOI avancées pour systèmes de communication futurs¹², intégré dans un projet européen MEDEA+. Ces projets apporteront une moisson de résultats.

9. Desneux, P, Legat, J.-D. ; *A dedicated DSP architecture for discrete wavelet transform* ; Integrated Computer-Aided Engineering–Vol. 7, no. 2, p. 135-153 (2000)

10. Gilmont, T ; Quisquater, J.-J. ; Legat, J.-D. ; *Hardware security for software privacy support* ; Electronics Letters–Vol. 35, no. 24, p. 2096-2098, 1999

11. de la Vallee Poussin, H. ; Grenier, D. ; Legat, J.-D. ; Labrique, F. ; *A dedicated multiprocessor architecture for AC motors control*. Proc. of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, p. 1632 – 1637, 1998

12. 2001-2004 : Convention RW no. 114751 « 4G-RADIO »–Systèmes de communication dits de 3ème et 4ème générations, à fréquences et bandes passantes très grandes, circuits on-a-chip, technologie SOI CMOS sub-micronique (< 0.2 µm), promoteurs : Prof. J.-P. Raskin, Prof. D. Vanhoenacker, Prof. D. Flandre et Prof. J.-D. Legat.

En combinant les expertises et les équipements des deux laboratoires, les dispositifs et circuits SOI sont poussés à des performances extrêmes (bande passante de 110 GHz) grâce aux méthodes de mesure et de caractérisation mises au point. Une voie non prévue au départ du projet s'ouvre lors de l'étude des performances de photo détecteurs basés sur des diodes PIN SOI : l'intégration complète sur silicium de la photodiode et du circuit de lecture, applicables à la lecture de DVD Blu-ray et à des communications optiques à faible distance¹³.

Le projet produit des bibliothèques de cellules digitales et analogiques reconfigurables, utilisables pour la réalisation rapide des implémentations physiques de systèmes de communication *on-a-chip* aux applications très larges de type UMTS, HiperLAN, LMDS (*wireless indoor*), automobile, etc. L'amplificateur à faible consommation construit comme démonstrateur présente du gain à 250°C sur une bande de 15 GHz, ce qui est remarquable. Son produit gain bande passante très important, hors d'atteinte pour les autres circuits, fait de lui un candidat potentiel sans concurrent dans les applications exigeant une amplification à large bande tels que les récepteurs à large bande (UWB), les systèmes de communication, les radars à impulsions et l'instrumentation.

Quand les métiers de la microélectronique se sont diversifiés, une préoccupation majeure de Paul Jaspers était de maintenir une vision verticale de l'ensemble des aspects de la conception et de la réalisation des circuits intégrés. Cette préoccupation est fondamentale lorsqu'il s'agit de répondre à un défi technologique majeur de l'électronique numérique d'aujourd'hui : la consommation de puissance, particulièrement préoccupante dans les applications biomédicales et les réseaux de capteurs sans fil.

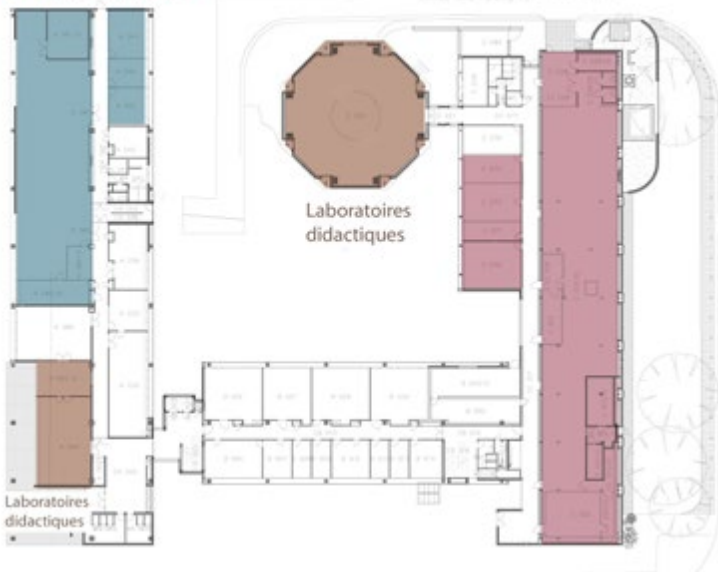
13. Aryan Afzakanian ; *Développement d'une caméra CMOS en SOI* ;
Doctorat UCL, 2000. Promoteurs : Jean-Didier Legat, Denis Flandre.

La bataille de la micro-puissance se joue en effet à tous les niveaux : technologie, dispositifs, cellules de circuits de base, architectures, algorithmes, spécification du système. Le laboratoire de microélectronique couvre l'ensemble de ces aspects. Il mise sur les atouts de la technologie SOI¹⁴.

L'électronique est partout. Elle envahit les voitures, les avions, les bâtiments, les dispositifs médicaux implantés ou externes, tous les objets de notre quotidien. Une immense variété d'applications basées sur des réseaux de capteurs se déploie pour établir des interactions entre le monde physique et le monde du traitement de l'information et de la communication.

Or La technologie SOI offre une excellente compatibilité entre des circuits à transistors MOS de haute qualité et de très basse consommation et des capteurs de haute performances ou des MEMS. Elle permet la réalisation de circuits micro-ondes. Elle résiste à de hautes températures, à des irradiations intenses. Face au développement des applications de l'électronique, le laboratoire peut bénéficier de son savoir-faire multidisciplinaire et des avantages de la technologie qu'il a développée.

14. De Vos, J. ; Flandre, D. ; Legat, J.-D. ; *Ultra-low-power high-noise-margin logic with undoped FD SOI devices* ; IEEE International SOI Conference, 2009



Réaménagement du Bâtiment Maxwell : Laboratoires didactiques, Winfab, Welcome

2002

LE DÉPARTEMENT D'ÉLECTRICITÉ
REGROUPE SES LABORATOIRES
DIDACTIQUES

L'étudiant proclame :

— Un circuit équivalent de Thévenin, c'est une façon de représenter une pile !

On lui répond :

— C'est bien plus que cela ! Le circuit de Thévenin est un modèle général qui représente une équation du premier degré. Or une équation du premier degré peut représenter le comportement de n'importe quel dispositif ou circuit linéaire enfermé dans une boîte noire et connecté par deux bornes seulement au monde extérieur.

C'est effectivement une toute autre histoire !

Le programme Candis 2000 fait place à l'électricité dès le premier quadrimestre de la première candidature en l'intégrant dans le cours de physique de base. Pourquoi ? Est-ce parce qu'il serait urgent que tout étudiant ingénieur apprenne la Loi de Biot et Savart et les équations de Kirchhoff dès les premiers mois ? Absolument pas. C'est parce que le programme attache une importance primordiale aux mécanismes de l'apprentissage. Tisser des liens entre les choses qu'on connaît est une bonne approche pour apprendre en profondeur. Il y a beaucoup à gagner à rencontrer d'emblée les concepts fondamentaux, par exemple énergie, puissance, potentiel, ou des méthodes de mise en équation et de calcul, par exemple l'algèbre vectorielle, dans des contextes différents.

C'est aussi parce qu'un objectif important du cours de physique est de donner l'habitude de la mise en équation et du raisonnement abstrait. Les tactiques d'évitement basées sur le raisonnement intuitif et limitées aux

outils mathématiques élémentaires sont plus souvent mises en échec en électricité. Or le but est précisément de décourager les étudiants de recourir à ces tactiques et d'éprouver le besoin d'apprendre du neuf même si l'on peut se débrouiller tant bien que mal avec ce que l'on sait déjà. Face aux champs et au modèle de Thévenin, il faut bien se résigner à acquérir des compétences nouvelles.

Candis 2000 est fondé sur l'apprentissage actif, par résolution de problèmes et par projets. Restituer des formules de mémoire est une prouesse assez vaine ; ce que l'on attend d'un expert, c'est qu'il ait les bons réflexes, qu'il se souvienne au bon moment, pendant qu'il construit une stratégie de solution, que la formule dont il a besoin existe et qu'il se trouve dans les conditions où elle pourrait s'appliquer. Comment devient-on un expert ? Sur le terrain, en s'attaquant à des problèmes et en gagnant de l'expérience.

À l'issue du premier cours de physique, les étudiants ont vu pas mal de choses en électromagnétisme et en circuits et ont été confrontés à des problèmes posés dans le contexte du cours.

Le courant dans une self ne s'établit pas instantanément. Pourquoi ? Parce que l'équation différentielle veut que cela soit ainsi ? Pas du tout. L'équation ne fait que décrire le phénomène, elle ne l'explique pas.

La raison fondamentale est que la quantité d'énergie contenue dans la self, pas plus que l'énergie cinétique d'une masse qui accélère, ne peut varier en un temps nul si on ne peut pas fournir une puissance infinie.

Accepter les descriptions sans s'inquiéter du pourquoi est une habitude qui conduit à devenir un ingénieur dangereux.

Le projet du quadrimestre suivant a pour but de rendre ces connaissances familières. Cela s'apprend en équipe, où l'on est sans cesse obligé d'expliquer sa propre démarche de solution, de la confronter à d'autres démarches, de la remettre en question.

Lorsqu'elle met en oeuvre le programme Bologne, l'UCL décide d'introduire la spécialisation dès le milieu de la seconde année de Baccalauréat ingénieur civil. Aujourd'hui, durant les quatre premières années qui conduisent au diplôme d'électricien (option en circuits et systèmes électroniques), la charge totale de projets équivaut environ à une demi-année. La moitié de la cinquième année sera consacrée au travail de fin d'études.

La spécialisation en électricité commence au deuxième quadrimestre de la deuxième année par le cours de Circuits et Mesures électriques associé à un projet. Cours et projet¹⁵ ont les mêmes titulaires et se déroulent en parallèle. Le cours et les exercices apportent en temps utile des éléments nécessaires à la réalisation du projet. Le projet met la matière du cours en oeuvre dans le contexte d'une application grand public : amplificateur classe D, optimisation de puissance pour panneau photovoltaïque, alimentation pour éclairage LED ...

Mais l'application n'est là que pour stimuler l'intérêt ; l'objectif n'est pas le produit. Il ne s'agit pas d'un projet d'application mais d'un support à l'acquisition de concepts et méthodes de base. L'objectif est l'apprentissage.

15. Trullemans, C. ; De Vroey, L. ; Sobieski, S. ; Labrique, F ; *From KCL to Class D Amplifier*; IEEE Circuits and Systems Magazine Vol. 9, no 1 , 2009, p. 63-74



Le projet mobilise les connaissances acquises par les étudiants, montre le besoin d'en acquérir d'autres, établit des liens entre différents cours, développe la créativité, la gestion du temps, la communication écrite et orale, le travail en équipe. Le projet fait la part belle au droit à l'erreur, composante essentielle à l'apprentissage et caractéristique du début de carrière d'un jeune ingénieur.

Le modèle cinématique vu au cours de physique et la programmation orientée objet prennent une autre saveur quand il s'agit de concevoir un robot et de le piloter par un programme JAVA. C'est avec étonnement, curiosité, que l'on voit les champs magnétiques et les circuits en jeu par exemple dans un portique antivol (une bobine voit passer l'objet volé et des amplificateurs opérationnels détectent le signal de la bobine) ou un moteur à courant continu sans collecteur (une bobine et des aimants permanents font tourner le moteur et des flip-flop commandent le passage du courant). C'est avec bonheur qu'on se découvre capable de les construire.

En 2002, Jean-Didier Legat, président du département d'Électricité, lance l'idée d'une mise en commun des laboratoires didactiques. L'ancienne salle d'essais à haute tension sera transformée pour les accueillir. Il ne s'agit pas simplement de déménager tous les laboratoires en un même lieu. Leur aménagement sera largement inspiré par l'expérience de pédagogie active instaurée par Candis 2000. Les nouveaux laboratoires seront prêts juste à temps pour accueillir les premiers étudiants en deuxième baccalauréat du programme Bologne.

On y trouve l'équipement de base, comme en 1959 : alimentation DC, générateur de fonctions et oscilloscope. La ressemblance s'arrête là. Les étudiants ont perdu l'habitude de la règle à calcul et du papier millimétré mais l'environnement informatique et le calcul par Matlab leur sont familiers. On y trouve donc aussi un PC intégré au réseau facultaire auquel chaque étudiant a accès. Il trouve sur ce PC un simulateur de circuits. Les notes de cours, les documents qui accompagnent les essais et les projets, les notices des appareils et les caractéristiques des composants sont disponibles sur Internet. Les étudiants peuvent les consulter depuis n'importe point de la planète, alors pourquoi pas ici ?

Devant chaque banc de laboratoire se trouve une table autour de laquelle on peut prendre place pour travailler en groupe. Les essais sont en effet rarement décrits sous forme d'un protocole donnant dans l'ordre toutes les manipulations à effectuer. Les heures de laboratoire associées aux cours d'électronique de master sont devenues en partie des heures de projet. Les documents contiennent alors autant de questions que de réponses. Le débat en groupe confronté à la simulation et aux résultats expérimentaux est une composante importante de l'apprentissage. L'aménagement du laboratoire a pour but de créer un environnement qui lui est favorable.



Laboratoire didactique et salle de projets,
Baccalauréat et Master Electricité et Électromécanique.



Aménagement du laboratoire pour un groupe de projet
Baccalauréat et Master Electricité et Électromécanique.

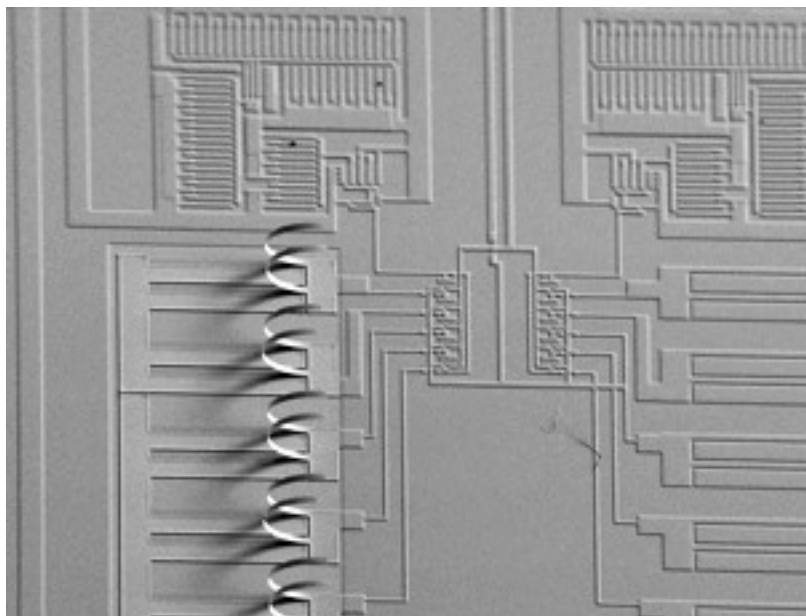
2006

LE PROGRAMME D'EXCELLENCE NANOTIC DE LA RÉGION WALLONNE RÉUNIT DES LABORATOIRES UCL DE TROIS FACULTÉS DIFFÉRENTES

Le Plan de développement arrêté par l'UCL en 2005 prévoira la création de Plates-formes technologiques, outils multidisciplinaires étroitement liés à l'enseignement, la recherche et le service à la société. Dès 2002, le Laboratoire de microélectronique et le Département d'électricité avaient largement anticipé cette démarche.

La décision de mettre en commun les laboratoires didactiques est un événement important qui modifiera profondément non seulement les locaux, mais aussi le mode de vie du département. Les équipements sont devenus trop complexes et trop coûteux pour que leur acquisition, leur maintenance et la maîtrise de leur mise en œuvre restent accessibles à de petites entités. Les frontières entre les domaines deviennent floues : les hyperfréquences ont partie mêlée avec les transistors SOI, les circuits intégrés reçoivent l'étrange voisinage de capteurs de pression, d'accéléromètres et de capteurs biologiques. Le département d'Électricité, dans ses murs et dans les modes de fonctionnement, devient progressivement le pôle ELEN de l'Institut ICTEAM. Le laboratoire d'Électrotechnique rejoint l'Institut IMMC au Bâtiment Stévin.

Avec le support de l'UCL et de la Région Wallonne, une même démarche de mise en commun donnera naissance aux nouveaux laboratoires didactiques d'électricité et d'électromécanique et aux plates-formes WINFAB (chambres propres), inaugurée le 7 décembre 2007 et WELCOME (caractérisation de dispositifs, circuits et systèmes électroniques et de télécommunications), inaugurée le 25 novembre 2010.



Capteur de flux sur base de capacité MEMS 3D[†], vue au microscope électronique.

À gauche, MEMS 3D : cinq paires de capacités interdigitées hors plan. Soumises à un flux de gaz, les électrodes hors plan se courbent vers le haut ou vers le bas.

À droite, structure de référence : cinq paires identiques mais maintenues dans le plan.

Au centre, disposés symétriquement, deux oscillateurs en anneau. La fréquence d'oscillation qui dépend de la valeur des capacités est une mesure du flux.

En haut : amplificateurs de sortie.

† J.-P. Raskin, F. Iker, N. André, B. Olbrecht, T. Pardoën and D. Flandre, *Bulk and surface micromachined MEMS in thin film SOI technology* (invited paper), Elsevier, *Electrochimica Acta*, vol. 52, issue 8, pp. 2850-2861, February 2007

À la fin des années '90, les chambres propres se sont ouvertes progressivement à des partenariats internes à l'UCL en diversifiant les domaines d'activité : transistors micro-ondes, avec le Laboratoire d'Hyperfréquences (1993), dispositifs quantiques, avec le laboratoire de Physique des matériaux (1996), assemblage macromoléculaire, avec le Laboratoire des polymères (1999). La maîtrise technologique s'étend au delà des technologies classiques de réalisation de circuits intégrés sur silicium, vers la réalisation de structures à trois dimensions, le dépôt de couches sensibles spécifiques sur les structures intégrées, la réalisation de systèmes micromécaniques (MEMS). Les chambres propres du Laboratoire de microélectronique évoluent vers le statut de plateforme technologique, plate-forme dont les possibilités, la polyvalence et la souplesse éveillent l'intérêt d'autres partenaires en Communauté française. Un projet interuniversitaire regroupe le laboratoire de biologie cellulaire des FUNDP et les laboratoires d'électronique de l'ULg, la FPMS et l'UCL. Il a pour sujet la détection électrique de l'hybridation du DNA¹⁶. La plate-forme UCL de micro- et nano-technologies (MNT) est en train de naître.

Quelques années plus tard, vingt projets de recherche sont conduits en parallèle sur la plate-forme UCL-MNT. Cinquante personnes y travaillent sous la responsabilité de douze professeurs et permanents FNRS. Les recherches menées dans cette plate-forme concernent dix laboratoires UCL. En 2003, elles donneront lieu à 200 publications scientifiques.

C'est le moment de donner l'alarme.

16. Moreno Hagelsieb, Luis ; Laurent, Géry ; Pampin, Rémi ; Fouttier, Boris ; Remacle, Jean-François ; Raskin, Jean-Pierre ; Flandre, Denis. *Electrical detection of DNA hybridization : three extraction techniques based on interdigitated Al/Al₂O₃ capacitors*. In : *Biosensors and Bioelectronics*, Elsevier Science, Pergamon, Vol. 22, no. 9-10, p. 2199-2207 (2007).

TROP PETIT

« Le laboratoire est trop petit, dit André Crahay à Jean-Didier Legat en fin 2003, il contient de plus en plus d'équipements, la maintenance est difficile et le travail devient dangereux ! ».

Denis Flandre traduit : « *To continue the convergence and give credibility to the positioning of our research efforts at the European level, as well as to sustain our education ambition in the micro- and nano-technologies field through the opening of the MEMS chair and of specialized masters and graduate schools, our present infrastructure is totally insufficient and must be extended and upgraded to up-to-date standards* ». Avec ses collègues du CeRMiN (Centre de Recherches de l'UCL en Matériaux et Dispositifs Électroniques Micro- et Nano-métriques, présidé par V. Bayot), il s'adresse au Conseil rectoral et à la Région wallonne.

La Région annonce en effet : « Afin de favoriser l'éclosion de futurs nouveaux pôles de compétitivité, il est prévu dans le Plan d'Actions prioritaires pour l'Avenir wallon (Plan Marshall) de soutenir des programmes d'excellence à destination des universités, à raison d'un programme par an. À cette fin, le mécanisme proposé est une dotation fixe de cinq ans permettant de mobiliser des moyens conséquents sur une thématique précise ».

L'un de ces programmes d'excellence est le programme NANOTIC. Il réunit neuf laboratoires de l'UCL (École polytechnique, Facultés des Sciences et Faculté de médecine) dans une grande diversité de disciplines : circuits et systèmes électroniques, hyperfréquences, physique et chimie des hauts polymères, chimie des interfaces, ingénierie des matériaux et des procédés, biochimie cellulaire, médecine interne. Il est doté d'un budget de plus de 12,5 millions d'euros pour une durée de cinq ans.

Le programme NANOTIC contribuera à la mise en place d'infrastructures ou plates-formes technologiques de recherche, aujourd'hui entièrement opérationnelles, dont l'impact et la pérennité sont bien plus larges : WINFAB (Wallonia Infrastructure Nano FABrication), WELCOME (Wallonia ELEctronics and COmmunications Measurements) et CTMA (Center for Applied Molecular Technologies). Ces infrastructures sont d'ores et déjà largement utilisées avec des partenaires wallons et internationaux dans le cadre de projets de recherche, de collaborations avec des entreprises et de services.



Une salle de caractérisation des dispositifs et de mesures sous pointes avant le regroupement dans la plate-forme Welcome.

La création des plates-formes WINFAB et WELCOME est un projet d'aménagement de grande envergure qui demande de transformer de fond en comble l'aile du bâtiment qui abritait la salle des machines électriques. Le rez-de-chaussée sera l'annexe technique, le premier étage contiendra les 500 m² de salles blanches posées sur une fondation indépendante et surmontées d'un étage entièrement consacré au plenum de distribution d'air. Un Comité de pilotage se réunit à partir d'octobre 2005 sous la direction de Dominique Opfergelt, chef de cabinet de l'Administrateur général. La suite n'est possible que grâce à une collaboration importante et aux compétences complémentaires du Service de gestion technique du patrimoine de Louvain-la-Neuve (Bernard Sine et Jacques Ninforge), des ingénieurs du Laboratoire (André Crahay et Christian Renaux) et des architectes d'un bureau d'études externe.

Les recherches envisagées dans Winfab couvrent des domaines très divers. Il faut donc concevoir et construire un bâtiment modulable, susceptible d'offrir à long terme les conditions environnementales de salles blanches exigées par une large gamme d'activités expérimentales. Cet objectif justifie l'investissement aux yeux de la Région wallonne.

David Spôte est la cheville ouvrière du déménagement des chambres propres qui mobilisera de nombreux techniciens.

Durant l'été 2006, on neutralise les conduites de gaz, on arrête les équipements, on les conditionne et on les protège dans l'attente des nouveaux locaux. On les redémarrera progressivement à partir du printemps 2008.

On constatera avec bonheur que les anciens équipements, une fois installés dans les locaux Winfab, présentent des performances et une fiabilité qu'ils n'avaient jamais montrées dans les anciennes chambres propres. Les machines sont les mêmes mais la climatisation, la qualité de l'air, les distributions de gaz et tous les paramètres environnementaux sont meilleurs et plus stables.

Le nouveau bâtiment tient ses promesses.



2007 : déménagement
des chambres propres vers
Winfab

La mission est simple.
Démonter, emballer,
transporter ...





... déballer, remonter,
raccorder



Sur le terrain, « mettre en place des plates-formes technologiques de recherche », c'est un fameux chambardement ! L'ancienne salle des machines électriques devient un bâtiment à trois niveaux : sous les salles propres, des locaux techniques et au dessus, un vaste plenum de ventilation.

Au moment du déménagement, le travail ne manquait pas. La tension était à son comble. Beaucoup d'équipements devaient être raccordés à l'étage du plenum. D. travaillait là, couché sur les gaines de pulsion et d'extraction d'air. Un technicien posté un étage plus bas avait pour mission de trouver, parfois assez loin, les outils nécessaires et de les lui passer à travers le plafond. D. demande un outil.

Après un bon moment, le technicien, l'outil à la main, appelle en direction du plafond. Il appelle plus fort puis, un peu inquiet, plus fort encore. D. s'était endormi profondément, emporté dans le sommeil par le ronronnement des ventilateurs pareil à celui d'un navire de croisière.





Chambre propre ou « Winfab », Louvain-la-Neuve, 2011



L'envers du décor (2011)

Locaux techniques, chauffage, ventilation et conditionnement d'air, production d'eau désionisée, distribution de gaz, pompes à vide ...

WELCOME

Ils avaient accumulé plus de quarante ans d'expérience : on mesurait au Laboratoire d'électronique les caractéristiques électriques des dispositifs semi-conducteurs, on observait le fonctionnement de circuits et systèmes analogiques et numériques, au laboratoire d'hyperfréquences on mesurait et observait de même des dispositifs et circuits micro-ondes, au laboratoire de télécommunications et télédétection on mesurait et observait le comportement des antennes et la propagation des signaux. Ils décident alors de regrouper leurs équipements de mesure en un lieu unique, dans le vaste espace de 350 m² laissé libre après le déménagement des chambres propres. Cette décision est à l'origine de la plate-forme Welcome. La mise en commun des équipements et du savoir-faire favorise les interactions entre techniciens, chercheurs et étudiants. Elle s'accompagne d'une politique concertée d'achats d'équipements. Elle rassemble en une approche unique une large gamme de techniques de mesures allant des molécules à la propagation des signaux, du comportement physique des matériaux, du comportement de capteurs, de dispositifs et de circuits au comportement de systèmes. Toutes les étapes d'un développement en électronique et télécommunications peuvent être couvertes, de la conception à la caractérisation des prototypes et à la qualification de la fiabilité.

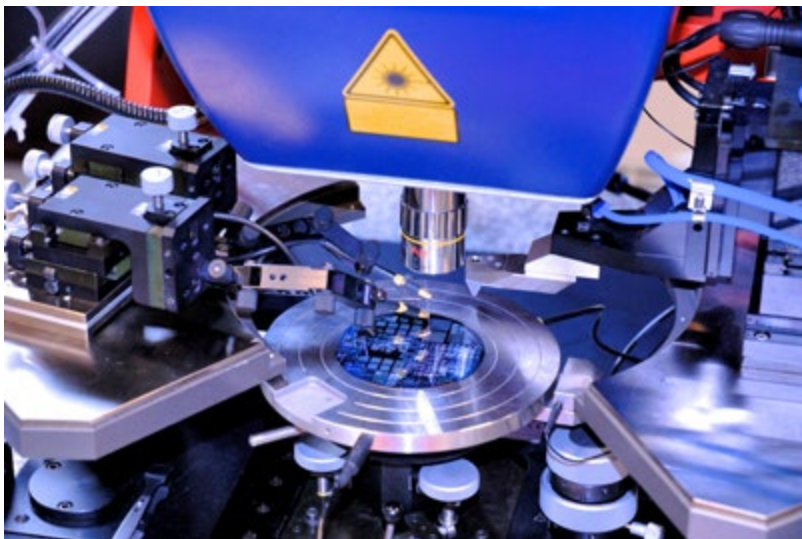
Welcome devient ainsi une plate-forme technologique de pointe, dotée d'équipements de mesure et de caractérisation ouverte à plusieurs domaines : matériaux et dispositifs en micro- et nano-technologies, micro- et nanosystèmes mécaniques, circuits radiofréquences et micro-ondes, capteurs biométriques et biologiques micro-puissance. On y rencontre des étudiants de Master et des doctorants. Par des contrats de recherche, de la consultation, des services, elle répond aux demandes de nombreux industriels, en Belgique et à l'étranger¹⁷.

17. BER, Melexis, nSilition, Nanocyl, CISSOID, IMEC, AGC-Flat Glass, Solvay, On Semi Belgium, Arcelor Mittal, Thalès Alenia Space Etca, Thalès Communications Belgium, ICOMS, SOITEC (F), RFMD (USA), ST-Microelectronics (F), IBM (USA), OKI (J), EADS (F, D), Thalès Systèmes aéroportés (F), Audi (D), ...

Plus particulièrement, elle remplit une mission de transfert de savoir-faire vers des PME de la région wallonne.



Plate-forme Welcome



Caractérisation de capteurs MEMS.

Cet appareil peut mesurer par vibrométrie laser des déplacements hors du plan avec une résolution de 10 nm, donc par exemple déterminer la fréquence de résonance de micro-poutres. Il est doté d'un système de mesure original développé au terme de deux ans de collaboration entre Welcome et les équipementiers Polytec et Karl Süss. Il peut tracer la topographie d'une membrane soumise à une pression comprise entre 1 mBar et 7 Bar dans une gamme d'amplitudes de l'ordre de 100 nm à 1 micron.

Le contexte général du programme NANOTIC est le diagnostic de dysfonctionnement de systèmes complexes (corps humain, écosystèmes, procédés industriels ...). Pour permettre le diagnostic, des micro- et nano-capteurs répartis spatialement dans le système réalisent en temps réel des observations de paramètres physiques, chimiques et biologiques. Nanotic est divisé en cinq projets qui contribuent à deux situations d'application : biodosimètres distribués sur le terrain et traçabilité de substances dangereuses ou précieuses.

Dans le cadre du programme Nanotic, le Laboratoire de microélectronique a développé une série de capteurs biologiques pour la détection de protéines et de bactéries.

Des sources d'énergie autonomes ont été réalisées par l'intégration, sans coûts de fabrication supplémentaires, de cellules solaires et du circuit de gestion de la tension dans une puce SOI¹⁸ de quelques mm².

Des interfaces CMOS intégrées de type conversion temporelle ou fréquentielle pour capteurs capacitifs et résistifs ont été conçues et testées, démontrant des consommations de l'ordre de quelques microwatts qui les situent parmi les meilleurs résultats de la littérature.

Associés aux techniques de conception ULP¹⁹ (Ultra Low Power) brevetées par l'UCL, ces résultats permettent d'envisager la réalisation de transpondeurs autonomes.

18. G. Gosset, O. Bulteel, P. Baijot and D. Flandre ; *Ultra-high-efficiency co-integrated photovoltaic energy scavenger* ; Proceedings of IEEE SOI Conference 2011, Tempe/AZ/USA, October 3-6, 2011

19. Hassoune, Ilham ; Flandre, Denis ; O'Connor, Ian ; Legat, Jean-Didier. *ULPFA : A New Efficient Design of a Power-Aware Full Adder*. In : IEEE Transactions on Circuits and Systems Part 1 : Regular Papers, Vol. 57, no. 8, p. 2066-2074 (2010).

Dès mon retour des USA, j'ai rencontré Thomas Pardoën, qui revenait lui aussi des USA, dans le bureau du doyen De Herde). Après avoir entendu les travaux de recherche de chacun ... on s'est regardé.

Nous sommes allés prendre une tasse de café ensemble au Réaumur et là, nous avons rédigé notre premier projet de recherche commun, un projet FSR. Pour les autorités, recevoir un projet FSR soumis par deux jeunes professeurs était une première.

En plus, l'un appartenait au département d'électricité et l'autre au département des matériaux et procédés. On avait compris qu'il fallait s'associer.

Jean-Pierre Raskin

L'option en nano technologie est commune aux masters ingénieur civil électricien, électromécanicien, physicien, en chimie et science des matériaux.

Elle a pour objectif d'introduire l'étudiant

- à la physique et à la simulation des matériaux et des dispositifs utilisés dans le domaine de la micro- et de la nano-électronique,
- aux propriétés et aux méthodes de fabrication et de caractérisation des micro- et nano-structures,
- aux modes de fonctionnement des nano-dispositifs,
- au développement et à l'intégration d'éléments (bio-) organiques dans les nano-systèmes.

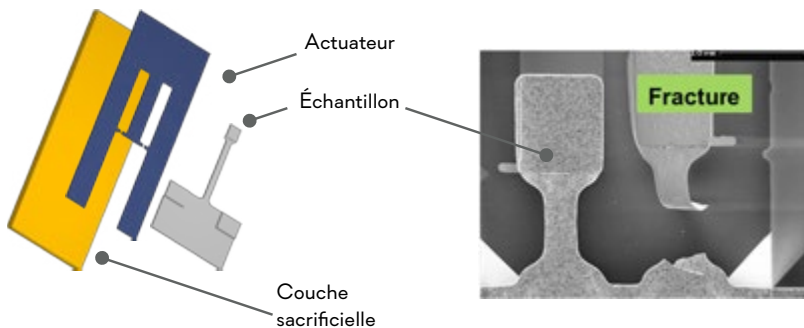
Programme des cours UCL 2012-2013

Le programme des ingénieurs électriciens courants faibles contenait en 1966 des cours de métallurgie et de métallographie. Au laboratoire, on pouvait regarder une imposante machine d'essai de traction briser des éprouvettes métalliques. Aujourd'hui, le programme de master contient une option en nanotechnologie, commune à plusieurs spécialités, où électroniciens et spécialistes des matériaux se rencontrent d'une façon beaucoup plus étroite que tout ce qu'on pouvait imaginer à l'époque.

En octobre 2000, Jean-Pierre Raskin, issu de l'unité d'électromagnétisme et d'hyperfréquences, rentre d'un séjour aux USA (The University of Michigan, Ann Arbor). Thomas Pardoën, issu du laboratoire d'ingénierie des matériaux et procédés, rentre d'un séjour aux USA (Harvard University). Ils perçoivent l'intérêt de sortir des murs de leur département et d'associer leurs compétences : microélectronique et microtechnologies d'un côté, de l'autre mécanique des films minces. Ils s'engagent à contre-courant par rapport à la littérature : au lieu de réduire les contraintes internes dans les films minces qu'ils déposent, ils font le choix de comprendre l'origine des contraintes et de les contrôler pour pouvoir s'en servir utilement. Ils réalisent ainsi une série de capteurs MEMS tridimensionnels²⁰. Ils ont ensuite l'idée d'utiliser les contraintes internes résiduelles dans des films minces déposés par les techniques classiques de la microélectronique pour développer un système de mesure des propriétés intrinsèques des matériaux à l'échelle microscopique, nanoscopique – voire atomique avec l'étude du graphène.

Dans une imposante machine d'essai de traction, on fait passer successivement les différents échantillons et on ajuste les paramètres avant chaque essai. Mais si la machine devient un dispositif microscopique ? Si tout le labora-

20. J.-P. Raskin, F. Iker, N. André, B. Olbrechts, T. Pardoën and D. Flandre, *Bulk and surface micromachined MEMS in thin film SOI technology*, (invited paper), Elsevier, *Electrochimica Acta*, vol. 52, issue 8, pp. 2850-2861, February 2007.



Dispositif d'essai nanoscopique.

L'épaisseur et la largeur de l'échantillon sont de l'ordre de quelques dizaines de nm. Lors de la fabrication, des contraintes thermiques s'établissent dans l'actuateur maintenu par la couche sacrificielle sur laquelle il est déposé. En enlevant ensuite cette couche, on active simultanément tous les dispositifs d'essai de la tranche. La tension se reporte sur l'échantillon. Les dimensions relatives de l'actuateur et de l'échantillon déterminent les paramètres de l'essai.

toire est un laboratoire *on-chip*, intégré sur une même puce de silicium ? En changeant de technologie, il faut changer de paradigme. Le plus grand avantage des technologies de fabrication héritées de la microélectronique est qu'elles se prêtent naturellement à la reproduction d'un très grand nombre de dispositifs²¹. Des milliers de dispositifs, un par essai, peuvent être réalisés sur une même tranche de silicium

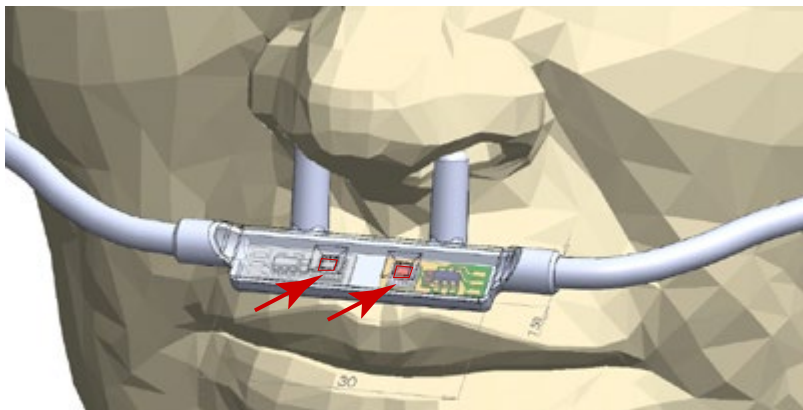
La collaboration entre Jean-Pierre Raskin et Thomas Pardoën a donné naissance à une activité très importante qui rassemble sept à huit chercheurs autour de projets communs et établit des collaborations avec un grand nombre de laboratoires au niveau mondial.

On peut faire beaucoup de choses hors des murs du Maxwell, surtout à partir d'une technologie qui permet de réaliser sur une même puce des capteurs microscopiques et la circuiterie associée, comme le fait la technologie SOI. Winfab a développé des techniques de fabrication grâce auxquelles on obtient des capteurs très sensibles, qui consomment une puissance extrêmement faible, de l'ordre de 0.1 microwatts, et n'occupent que quelques millimètres carrés. On peut en plus les produire à très faible coût et répondre ainsi à des besoins variés, par exemple loger dans des lunettes nasales un capteur miniature pour un système de monitoring respiratoire²².

21. V. Passi, U. K. Bhaskar, T. Pardoën, U. Sodervall, B. Nilsson, G. Petersson, M. Hagberg, J.-P. Raskin, *High throughput on-chip large-strained Si nanowires*, IEEE Journal of ElectroMechanical Systems, vol. 21, no. 4, pp. 822-829, August 2012

22. Nicolas André, Sylvain Druart, Pascal Dupuis, Bertrand Rue, Pierre Gérard, Denis Flandre, Jean-Pierre Raskin, and Laurent A. Francis ; *Dew-Based Wireless Mini Module for Respiratory Rate Monitoring* ; IEEE Sensors Journal, Vol. 12, No. 3, March 2012

Il est basé sur un condensateur couvert d'une couche sensible à l'humidité. Dans les conditions normales d'utilisation, il serait pratiquement impossible de mesurer à travers un câble, même très court, les variations de valeur d'une aussi petite capacité. Le problème est résolu par un oscillateur présent sur la même puce. Il convertit en fréquence la valeur de la capacité et délivre un signal robuste, facile à transporter sur le câble.



Capteur pour le monitoring respiratoire.

Le chip portant le capteur capacitif et l'oscillateur mesure 6 x 3 mm. Il trouve facilement place dans les lunettes nasales.

Le développement de détecteurs de particules sur des tranches SOI est un excellent exemple qui montre comment le labo peut répondre aux besoins futurs d'un industriel. La pratique courante en hadronthérapie est de mesurer le faisceau de protons avant d'irradier le patient. Le détecteur de particules est ensuite enlevé durant l'irradiation. IBA demandait un détecteur de particules qui puisse mesurer avec précision, en temps réel, la position du faisceau. Pour cela, la quantité de matière traversée par le faisceau dans le détecteur doit être la plus petite possible afin qu'il ne soit pas perturbé par des phénomènes de diffraction. La réponse est une première : une nouvelle génération de détecteurs à pistes de grande surface ($4,5 \times 4,5 \text{ cm}^2$) et cependant ultra mince ($10 \text{ à } 20 \text{ }\mu\text{m}$), fabriqués sur des tranches SOI. Ils présentent une grande sensibilité et un faible niveau de bruit²³.

Cette demande est devenue l'enjeu de la thèse de doctorat de Mohamed Bouterfa. En quatre ans, le labo a développé non seulement un nouveau dispositif mais également une nouvelle technologie de fabrication. Il a livré des résultats et des prototypes dont les performances démontrées sont au-delà de l'état de l'art.

Dans un tel cas, ce n'est pourtant qu'ensuite que les difficultés sont rencontrées. L'étape suivante est en effet l'industrialisation du concept. Elle ne viendra qu'au terme d'un long processus de décision associé à l'évaluation du potentiel industriel de la technologie concernée dans le domaine d'application pour lequel elle a été envisagée mais aussi au delà de ce domaine. De nombreuses années peuvent s'écouler entre les premiers développements de la technologie et les perspectives d'applications par transfert, brevet ou création de spin-off.

23. Bouterfa M. , Flandre, D ; *Ultra-thin silicon strip detectors for hadrontherapy beam monitoring* ; IEEE International Conference on Electron Devices and Solid-State Circuits (EDSSC), p. 1-2, (2012).

Mon activité actuelle chez IBA est l'innovation dans le domaine de la protonthérapie. Une spécification forte pour nos systèmes est de pouvoir délivrer les protons via des faisceaux extrêmement minces (quelques millimètres) afin d'optimiser la conformativité de la dose délivrée dans une tumeur. Pour prendre une analogie facile, on a plus de chance de colorier un dessin précis avec un crayon bien taillé plutôt qu'avec une pointe épaisse...

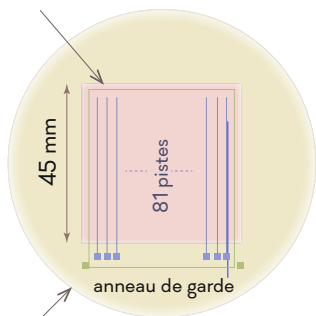
J'ai invité récemment Denis Flandre à rejoindre un projet de partenariat industrie-université dont l'objectif était le développement de moniteurs ultra-minces pour des faisceaux de protons.

Nos faisceaux doivent être contrôlés avec précision afin de garantir la sécurité des patients. L'idée du projet était de faire évoluer un concept de détecteur à pistes de manière à réduire au maximum la quantité de matière présente dans le faisceau et donc réduire les phénomènes physiques de diffusion.

L'équipe de l'UCL a développé un procédé original de lithographie, associé à une technique d'amincissement des tranches de silicium, afin de rencontrer cet objectif.

Damien Bertrand
Responsable de projets
Ion Beam Applications (Louvain-la-Neuve)

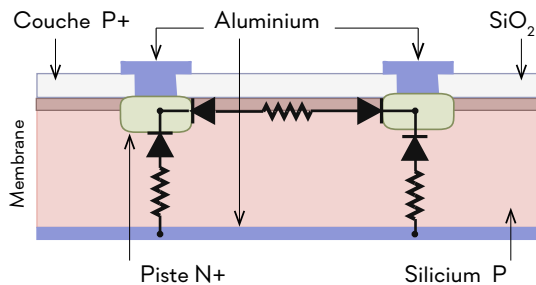
Membrane amincie
à 20 microns



Tranche de silicium Ø 3"

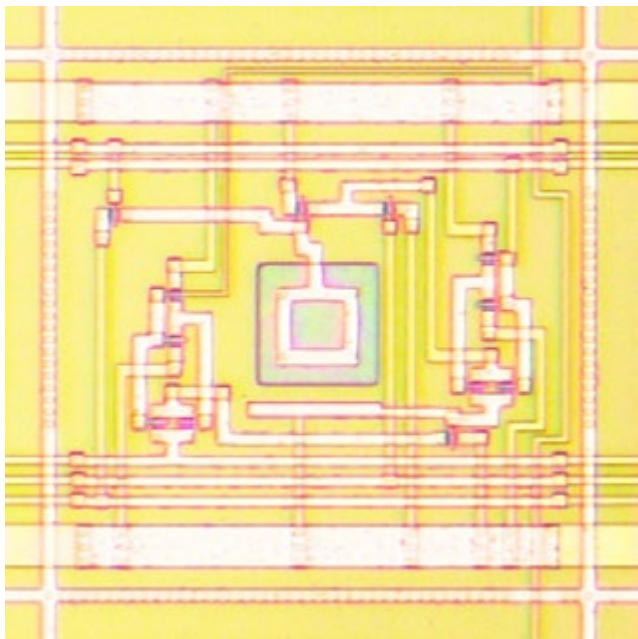
Détecteur de particules

En amincissant par une attaque chimique à partir de la face arrière la zone centrale de la tranche, on obtient une membrane de 20 μm d'épaisseur. Les 81 pistes du détecteur sont alignées sur la membrane.



Vue en coupe de l'espace entre deux pistes.

Les contacts sont pris par la bande d'aluminium déposée sur chaque piste et par la couche d'aluminium qui recouvre la face arrière. Le passage des particules génère des paires électron-trou qui contribuent au courant mesuré au travers des jonctions (symbolisées par les diodes sur la figure).



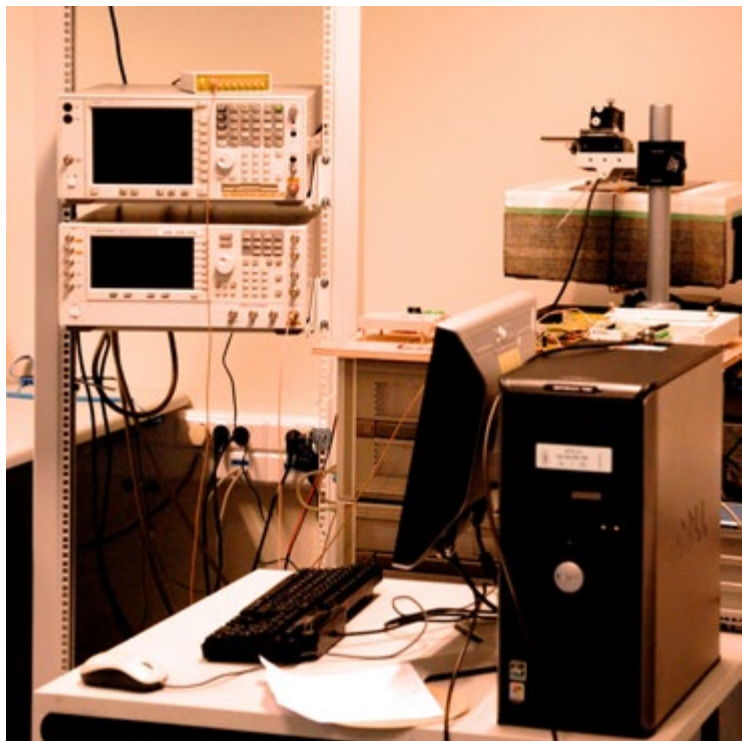
Cellule du circuit TRAPPISTe-1[†], le premier détecteur de particules réalisé par WinFab.

Un pixel de $60 \times 60 \mu\text{m}^2$, au centre, est entouré par la circuiterie de lecture. Le détecteur a été réalisé dans le cadre d'un doctorat du *Center for Particle Physics and phenomenology* de l'UCL associé au projet *Tracking Particles for Physics Instrumentation in SOI Technology* (TRAPPISTe). L'objectif est d'étudier la faisabilité de détecteurs en technologie SOI.

† Martin Maria-Elena, Soung Yee Lawrence, Cortina Eduardo, Renaux Christian, Flandre Denis ; *Radiation Hard Pixel Sensor with SOI technology* ; 2009 IEEE Nuclear Science Symposium and Medical Imaging Conference (NSS/MIC 2009)

Détecteurs de particules et doctorat de Bouterfa évoquent des souvenirs qui viennent à point pour clôturer ce chapitre. En 1969, un étudiant entrepreneur, expérimentateur infatigable et créatif, avait consacré son travail de fin d'études à développer un procédé de fabrication de diodes à jonction profonde, dopées au lithium. Son but était de réaliser des détecteurs de particules. Yves Jongen est devenu ensuite le fondateur d'IBA. Il y a près de trente ans, le père de Mohamed Bouterfa était lui-même doctorant au labo où il faisait un tout autre métier en concevant des circuits pour des processeurs de traitement de signal²⁴.

24. Youcef Bouterfa ; *Implantation des circuits fondamentaux de processeurs intégrés de traitement numérique des signaux* ; Doctorat UCL, 1984 ; Promoteur : F. Brouillard



Caractérisation de métamatériaux, Welcome, 2007.

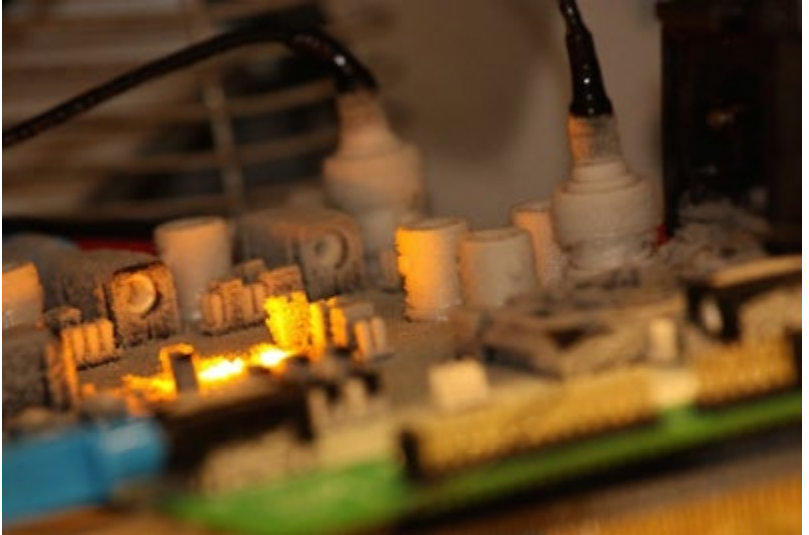
En haut : Synthétiseur de micro-ondes (jusque 20 GHz) à grande pureté spectrale et faible bruit de phase.

En bas: Analyseur de spectre.

À droite : Une plate forme XY équipée d'une sonde de champ proche permet de tracer la topographie du champ magnétique au voisinage de l'échantillon.

Les métamatériaux servent notamment à construire des lentilles à haute résolution utilisées en imagerie par résonance magnétique.

ÉPILOGUE



Une LED jaune s'allume, preuve que le système est fonctionnel

Photo Julien De Vos, 2011.

2012

L'UCL ENGAGE DAVID BOL

Comment fonctionne un aspirateur ? Son instituteur ne savait pas lui répondre. L'insatiable curiosité de David Bol l'a donc poussé à devenir ingénieur civil. Il vient d'être nommé chargé de cours, à partir de l'année académique 2012-2013, en circuits et systèmes électroniques. Il vient aussi de présenter un papier¹ à ISSCC (International Solid-State Circuits Conference), la tribune la plus prestigieuse dans son domaine. Comment résister à la tentation de lui donner la parole pour conclure ce livre ?

La vision de Paul Jaspers était une vision globale allant de la physique du solide à la conception d'ampificateurs opérationnels. Partages-tu cette approche ?

Je me place dans la même vision. Il faut continuer à maîtriser les bases physiques, sans en être pour autant un spécialiste. Le circuit présenté à ISSCC a été fabriqué dans une technologie industrielle CMOS 65 nm de ST Microelectronics. Pour diminuer la consommation, nous avons baissé la tension d'alimentation de 1.2 V à 0.4V, sous la norme d'utilisation normale de cette technologie. De ce fait, la sensibilité aux paramètres du process augmente, les variations de la tension de seuil ont plus d'influence sur le comportement du transistor, etc. Nous avons dû lancer une campagne de caractérisation et de modélisation.

1. Bol, David ; De Vos, Julien ; Hocquet, Cédric ; Durvaux, François ; Botman, François ; Boyd, Sarah ; Flandre, Denis ; Legat, Jean-Didier. A 25MHz 7 μ W/MHz Ultra-Low-Voltage Microcontroller SoC in 65nm LP/GP CMOS for Low-Carbon Wireless Sensor Nodes. International Solid-State Circuits Conference (San Francisco, du 19/02/2012 au 23/02/2012). In : IEEE International Solid-state Circuits Conference. Digest of Technical Papers. Vol. 55, no. 1, p. 490-491 (February 2012)

Notre objectif était cependant d'obtenir un circuit fonctionnel, robuste, et ce dès la première fabrication, comme dans des conditions industrielles. Les contraintes de délai et de budget ne nous offraient pas de seconde chance. Cela demande une bonne connaissance de la physique du transistor. Cela demande aussi de compenser les effets indésirables par des techniques de circuit originales.

Quelle réactions as-tu reçues à ISSCC ?

Nous avons comparé nos résultats à des références connues. À la même vitesse de fonctionnement, notre circuit consomme 20 fois moins de puissance que le microcontrôleur MSP430 de Texas Instruments. Le MIT a baissé comme nous la tension d'alimentation d'un circuit similaire à 0.4 V. Notre circuit fonctionne 50 fois plus vite. Nous avons donc reçu beaucoup de réactions, notamment de Texas. Nous avons poussé les performances de la technologie de ST au delà de ce qu'eux mêmes avaient fait. Ils envisagent de démarrer un contrat de collaboration avec nous dans le but d'appliquer nos techniques de compensation pour leurs propres circuits. Nous avons également eu des contacts prospectifs avec d'autres firmes qui ont marqué le même intérêt. Aux yeux des industriels, le laboratoire de l'UCL est un partenaire intéressant qui possède une bonne « bande passante » de 5 à 7 chercheurs sur contrat FNRS ou FRIA dont les travaux peuvent être orientés autour d'un projet fédérateur.

Cela ressemble à la situation à l'époque du crayon-lecteur. Depuis que tu connais le laboratoire, comment évolue l'activité de recherches en circuits et systèmes ?

En 2007, pendant le déménagement vers Winfab, il n'était plus possible de fabriquer des circuits à l'UCL. Nous sommes devenus des utilisateurs de technologies, choisissant des technologies industrielles bien adaptées à ce que nous voulions faire. En même temps, WINFAB a diversifié ses objectifs. La stabilité des technologies industrielles nous permet de réaliser plusieurs circuits d'affilée dans le même environnement de

conception, avec les mêmes paramètres, et donc de réutiliser des blocs conçus par un chercheur dans le système conçu par son successeur.

Depuis 2004, le doctorat n'est plus un travail en solo. Par exemple, nous développons une caméra CMOS alimentée par l'énergie lumineuse ambiante dans des conditions d'éclairage normales. Les chercheurs trouvent intéressant de se retrouver dans un groupe où il travaillent à divers aspects d'un système complexe, ici, l'optimisation des pixels, la récupération d'énergie, le processeur de traitement. Le système résultera de l'assemblage des parties conçues individuellement par chacun. Le groupe comprend des seniors et des débutants, le travail en équipe est avantageux pour tous et permet d'acquérir des compétences non techniques et des habitudes de travail en partageant le même objectif, des échéances communes, le stress à la réception des prototypes qui ne fonctionneront probablement pas à la mise en marche, et finalement le succès. Ils savent que cela leur permet d'acquérir une expérience précieuse pour leur carrière future.

Je me souviens de mon propre TFE, où le défi était de réaliser un unique pixel en 1969, et je m'amuse en t'entendant parler de cette caméra en 2012 ! Mais quel est ton projet, le domaine de recherche que tu as présenté en postulant ce poste académique ?

Paradoxalement, la recherche académique à propos de micro-circuits va être confrontée à des défis de développement durable. La technologie évolue vers des objets communicants, un nouvel Internet baigné dans un environnement intelligent peuplé de trillions de circuits. Dès maintenant, on observe que le volume des communications cellulaires croît exponentiellement suivant la loi de Cooper. Or l'énergie moyenne nécessaire au transport de l'information, en Joules/bit, est bien loin de décroître de façon exponentielle. En 2020, la consommation qui en découle devrait atteindre aux Etats-Unis 17% de la consommation électrique totale.

En 2004, David Bol termine son travail de fin d'études qui présente une méthode de synthèse de systèmes digitaux. Un exemple d'application est un noyau de microcontrôleur. C'est encore un microcontrôleur qu'il présente, huit ans plus tard à l'ISSCC.

C'est un travail de fin d'études qui introduit au laboratoire, dès 1967, la méthode classique de caractérisation de l'interface oxyde-silicium. Ce sont des travaux de fin d'études qui produisent à l'UCL le premier transistor MOS, la première cellule solaire, qui jalonnent les progrès des systèmes OCR jusqu'à la création d'IRIS, qui contribuent au développement des technologies dans la chaîne pilote, qui mettent au point le recuit Laser, premier pas dans le développement de la technologie SOI au labo, qui participent au développement du premier circuit full custom réalisé en Inde, qui réalisent le premier processeur du labo basé sur un réseau de neurones.

Tous ont bénéficié de l'infrastructure apportée par les projets de recherche et de leur interaction étroite avec les chercheurs engagés dans ces projets. En retour, ils ont largement contribué à l'activité de recherche du labo en explorant de nouvelles approches, dans un espace de liberté où il n'y a pas de comptes à rendre à une commission de sélection ou lors d'une revue de projet.

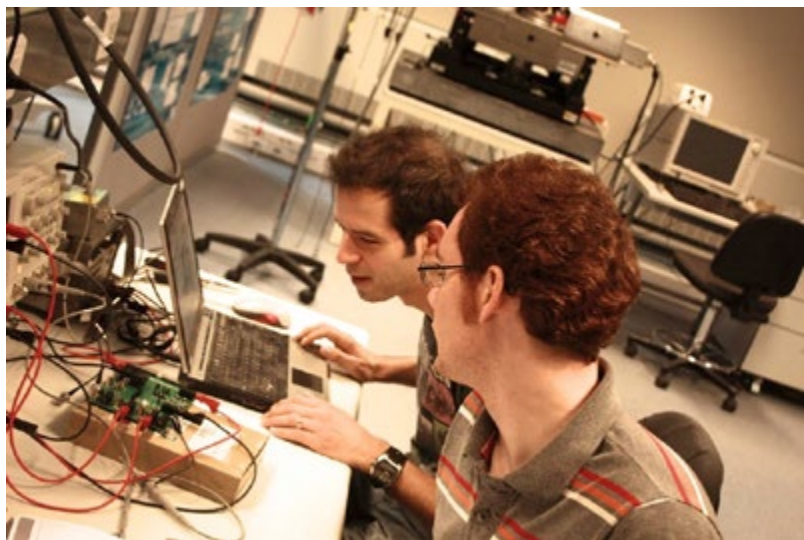
Il faut donc développer des circuits à très faible consommation, alimentés à partir de l'énergie ambiante, lumineuse, électromagnétique, mécanique, etc.

Le déploiement de trillions de circuits maintiendra une croissance rapide de l'industrie des semi-conducteurs, bonne affaire pour nous qui sommes du métier, mais pas pour l'empreinte carbone de la fabrication. Pour limiter cet impact, il faut diminuer la taille des circuits et augmenter la densité d'intégration afin de diminuer leur nombre.

Lors d'un séjour de quatre mois à l'U. C. Berkeley et chez P. E. International Inc, avec qui j'ai démarré une collaboration, nous avons comparé l'énergie demandée par différents types de processeurs pendant leur cycle de vie complet, en tenant compte de la fabrication et des périodes d'activité et de veille lors de l'utilisation. Selon le processeur envisagé, elle varie dans un rapport de 1 à 20000. L'analyse du cycle de vie doit donc être impérativement attentive au domaine d'utilisation des circuits.

Dans les années 60, le Laboratoire de microélectronique était une petite chambre propre, membre du SUB, un club de laboratoires universitaires européens. À quel niveau penses-tu que nous soyons aujourd'hui par rapport à eux ?

La visibilité de notre activité de développement de systèmes électroniques complexes est encore faible mais elle est croissante. J'espère augmenter le nombre de publications à l'ISSCC, le nombre de collaborations industrielles, d'une part avec des développeurs de nouvelles technologies, comme dans le cas de notre relation avec ST Microelectronics, d'autre part avec des développeurs de systèmes pour diverses applications. Les laboratoires démarrés par de jeunes professeurs, aux US ou ailleurs, mettent quelques années à se faire connaître. En rencontrant des collègues à la conférence ESSCIRC, je pense que l'UCL peut devenir un haut lieu dans le domaine de la conception de systèmes à basse consommation.



Test du circuit Sleep-Walker

Photo Julien De Vos, 2011.

Sur base des fondations solides et des lignes directrices mises en place par les pionniers de l'activité de recherche et d'enseignement en technologie, dispositifs, circuits et systèmes électroniques à l'UCL, l'équipe actuelle souhaite en maintenir et en développer l'excellence. Elle veut l'étendre aux domaines émergents de l'Internet des objets : capteurs, circuits et systèmes micro puissance d'interface et de traitement et transfert de l'information.

Denis Flandre
18 juillet 2012

AUJOURD'HUI

LE PÔLE INGÉNIERIE ÉLECTRIQUE

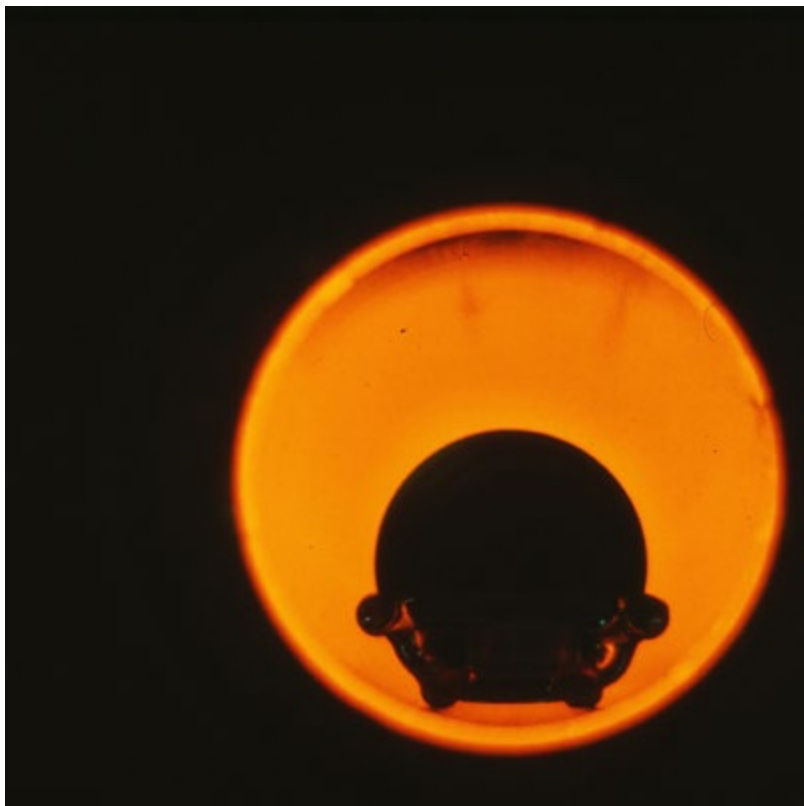
Le Professeur Morren ne s'était pas trompé.

Différents domaines issus du *Electronics Laboratory of the Institut d'Électrotechnique of Louvain University* de 1959 sont rassemblés aujourd'hui dans le pôle Ingénierie électrique de l'Institut des technologies de l'information et de la communication, électronique et mathématiques appliquées. Le premier acte officiel du pôle est la réunion du Conseil du 31 mars 2010 pour l'élection du Président qui sera Michel Verleysen.

Au groupe des quatre de 1959 ont succédé près de cent soixante personnes, dont dix-huit professeurs et plus de cent chercheurs. Une vingtaine de thèses de doctorats sont défendues chaque année. D'innombrables ingénieurs ont été formés aux circuits et systèmes électroniques au contact des technologies les plus récentes. Mais ces statistiques ne peuvent être qu'indicatives car l'organisation de l'Université a changé et parce que l'évolution des technologies a rendu incertaines les frontières entre les domaines compartimentés de jadis.

La stupeur de Paul Jaspers découvrant un grand laboratoire vide n'est plus de mise. Plus de cent chercheurs issus de laboratoires différents réalisent chaque année des milliers d'heures d'expérience dans la plateforme de mesure et caractérisation WELCOME. Les 50 m² de la chambre propre d'Heverlee sont devenus la plate-forme de micro et nano fabrication WINFAB qui comporte 1000 m² de salles propres et annexes techniques au service de la microélectronique, mais aussi de la science des matériaux, de la physique de l'état solide, de l'ingénierie biomédicale, de l'électronique organique, au service de nombreux domaines, d'une large gamme d'activités expérimentales auxquelles Winfab offre les conditions environnementales de salles blanches qui leur sont indispensables.

FIN DE L'ÉPILOGUE



La plaquette de la Saint Valentin

Première plaquette de silicium introduite dans le four d'oxydation MOS à Louvain-la-Neuve, le 14 février 1973.

TABLES

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS		1
PRÉFACE		5
PROLOGUE		7
Le tube triode	11	
Les électroniciens	14	
Le transistor bipolaire	17	
La technologie Planar	24	
Le transistor MOS	29	
LA CRÉATION		35
1958		
JACK KILBY (TEXAS INSTRUMENTS) INVENTE LE CIRCUIT INTÉGRÉ		
LE PR LUCIEN MORREN CONVAINC LE RECTEUR D'ENGAGER		
PAUL JESPEERS		36
1959		
PAUL JESPEERS ÉBAHI DÉCOUVRE		
UN GRAND LOCAL PRATIQUEMENT VIDE		36
La bande des quatre	38	
Le cambouis	44	
1967		
L'UCL ENGAGE FERNAND VAN DE WIELE		46

1968	PAUL JESPERS EST CONVAINCU QUE LA FIN DU SIÈCLE SERA MOS OU NE SERA PAS		46
	Solid state circuits	46	
	Un club de gentlemen	50	
	Plan quinquennal, juin 1967	52	
	Un transistor MOS	57	
1970	LES FRANCOPHONES CONSTRUISENT UNE CHAMBRE PROPRE DANS UN LOCAL DE 50 m ²		62
	LES PIONNIERS		67
1971	INTEL CORPORATION COMMERCIALISE LE PREMIER MICROPROCESSEUR À 4 BITS		68
1972	LE LABORATOIRE D'ÉLECTRONIQUE S'INSTALLE À LOUVAIN-LA-NEUVE		68
	Le réacteur d'épitaixie	77	
	La machine Gyrex	81	
	L'implanteur Balzers	90	
	Et l'eau revient...	100	
	Dépôt chimique en phase vapeur à basse pression (LPCVD)		104
1978	LE LABO RÉALISE UN CRAYON LECTEUR QUI CONDUIT À LA FONDATION DE LA SOCIÉTÉ IRIS.		109

Système sur silicium	109
Le reste du monde	114

1978	LES LABORATOIRES DIDACTIQUES SONT RENOUELÉS DANS LE CADRE D'UN CONTRAT DE FORMATION CONTINUE	120
1978	FERNAND VAN DE WIELE DÉMARRE UN PROJET DE RECHERCHE CONSACRÉ À DES CELLULES SOLAIRES QUI CONDUIRA À LA FONDATION DE LA SOCIÉTÉ SUNPOWER	124

LA CHAÎNE PILOTE 127

1980	ÉTUDE ET MODÉLISATION DES PROCÉDÉS DE FABRICATION ET DE LA PHYSIQUE DES DISPOSITIFS	128
	Naissance de la ligne pilote	131
	Production complètement stoppée	140
	Feuilles de process	143
	Les circuits multi-projets	148
1981	<i>Design House</i> DANS LE PAYSAGE BELGE	156
1983	LES LABORATOIRES D'ÉLECTRONIQUE DE L'UCL, L'ULB, L'ULG ET LA FPMS FONDENT L'A. S. B. L. ARAMIS	158

Le programme Comett 165

1981

LE LABORATOIRE ACQUIERT
UN ORDINATEUR 32 BITS 168
Beaucoup de biens,
c'est beaucoup de mal 173

1972

BERKELEY PUBLIE LA PREMIÈRE VERSION
DU SIMULATEUR SPICE 177
NAISSANCE D'UN SIMULATEUR INTERACTIF À L'UCL 177
VITOLD, LIVE, SYMSYM 181
Méthodes de conception de circuits et systèmes logiques 183
Le quotient g_M/I_D 185
CAO à usage unique 186

L'EXPANSION 188

1987

UN TRAVAIL DE FIN D'ÉTUDES PRÉPARE INCIDEMMENT
LA FONDATION DU MACHINE LEARNING GROUP 189

1990

JEAN-PIERRE COLINGE FAIT DU LABO
UN PIONNIER DES TECHNOLOGIES SOI 191

1995

CRÉATION DE LA SOCIÉTÉ NEUROTECH 206

2000

CRÉATION DE LA SOCIÉTÉ CISSOID 209

2001	LES LABORATOIRES DE MICROÉLECTRONIQUE ET D'HYPERFRÉQUENCES S'ASSOCIENT DANS UN PROJET SOI	212
2002	LE DÉPARTEMENT D'ÉLECTRICITÉ REGROUPE SES LABORATOIRES DIDACTIQUES Les laboratoires Faraday et Marconi	222
2006	LE PROGRAMME D'EXCELLENCE NANOTIC DE LA RÉGION WALLONNE RÉUNIT DES LABORATOIRES UCL DE TROIS FACULTÉS DIFFÉRENTES	225
	Nanotic	227
	Trop petit	228
	Winfab	230
	Welcome	236
	Diagnostic et capteurs	239
	Hors les murs du Maxwell	241
	ÉPILOGUE	251
2012	L'UCL ENGAGE DAVID BOL	252
AUJOURD'HUI	LE PÔLE INGÉNIERIE ÉLECTRIQUE	259

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES ILLUSTRATIONS

TABLE DES ACRONYMES

TABLE DES ILLUSTRATIONS

- 3 Phénomène curieux
- 8 L'amplificateur, pierre philosophale de l'électronique
- 11 Récepteur de radiotélégraphie à détecteur Audion, brevet déposé par Lee de Forest en 1907.
- 15 Modèle très simple de transistor à effet de champ.
- 16 Le transistor à effet de champ de Lilienfeld, brevet soumis en 1926.
- 18 Le transistor à pointes de Bardeen et Brattain, né officiellement l'avant-veille de Noël 1947.
- 19 Figure 3, extraite du brevet déposé le 26 juin 1948 par William Schockley : le transistor bipolaire à jonctions.
- 21 Le premier transistor au silicium, produit par Texas Instruments en 1954.
- 22 1954 : La radio de poche Regency TR 1 de Texas Instruments, prête à diffuser les nouvelles de la Guerre froide et le Rock 'n Roll.
- 23 1972 : La calculette scientifique HP 35, conçue pour entrer dans la poche de chemise de M. Hewlett.
- 25 Transistor à jonction fabriqué par double diffusion, procédé Planar
- 27 Schéma du premier circuit intégré : l'oscillateur de Jack Kilby, septembre 1958
- 30 Dispositif semiconducteur commandé par un champ électrique,
- 35 Récepteur de mesure, Paul Jespers, 1957.
- 37 Institut d'Électrotechnique, Heverlee, 1964
- 38 Le chœur des esclaves au CI
- 39 Naissance d'un calculateur analogique, Heverlee, printemps 1962
- 40 Vers 1960 — Schéma de l'oscillateur FM extrait d'un carnet de laboratoire préparé par la bande des quatre.
- 47 Bureau des assistants du Pr Van de Wiele, 12h30 (1970)
- 51 Souvenir d'une réunion du SUB à Twente, 1974
- 51 Première conférence ESSIRC, du 2 au 5 septembre 1975[†]
- 58 Caractéristiques du premier transistor MOS fabriqué au Laboratoire de microélectronique.
- 59 Heverlee, 1969
- 59 Première tranche portant des transistors MOS fabriquée au laboratoire.
- 60 Louvain-la-Neuve, 2012, Winfab

- 62 Appareil pour le test de stabilité des oxydes et la mesure des caractéristiques des capacités MOS.
- 63 Petite chambre propre d'expression française, Heverlee, 1970
- 64 L'envers du décor : fours de diffusion, d'oxydation (avec les bouilloires pour l'oxydation humide) et de recuit.
- 65 Microscope d'alignement.
- 66 Le coin des photorésines, maintenu hors poussières par un flux laminaire.
- 67 Le premier bâtiment occupé
Place du Levant sera le bâtiment Maxwell.
- 68 La mission est simple. Déballer, remonter ...
- 69 ... raccorder, nettoyer, redémarrer. Percer les murs s'il le faut.
- 71 Application expérimentale de la mobilité des porteurs à la dérive d'un flux laminaire.
- 71 Montage du laboratoire didactique par deux ingénieurs en électronique et un technicien chimiste.
- 73 Début de la réinstallation d'un réacteur de déposition d'oxyde par décomposition du silane dans un plasma
- 74 Chambre propre ou « Chambre jaune »
- 75 L'envers du décor (1970).
- 76 Le canon à électrons de l'évaporateur, aux bons soins de Louis Jamar.
- 77 Le four du réacteur d'épitaxie.
- 81 Dessin sur papier calque des masques d'une cellule de comp-
teur
- 82 Les deux écrans et la tablette qui font du mini-ordinateur Varian une machine de CAO interactive.
- 82 Détail d'un circuit sur l'écran de la Varian, 197?.
- 84 Masque d'une matrice de lecture de caractères affiché sur l'écran graphique de la Varian.
- 85 Bande papier contenant les commandes de réalisation d'un masque, produite par le programme MGS sur la Varian
- 86 La machine Gyrex
- 87 Masque de métallisation pour un circuit OCR
- 89 Matrice de lecture SAIT (vers 1978)
- 92 Mémoire RAM BTMC-UCL
- 93 Amplificateur opérationnel BTMC-UCL pour ITT Intermetall
- 95 L'implanteur Balzers, 1976.
- 96 À l'intérieur de la chambre de plomb : le compartiment de la source d'ions.
- 99 La chambre à cibles.
- 102 Centrale d'eau désionisée

- 103 Collègues, amis, voisins
- 104 Console de commande des fours LPCVD
- 107 Réacteur de déposition APCVD (Atmospheric Pressure Chemical Vapor Deposition),
- 108 Enfournement d'une nacelle dans un tube du LPCVD
- 113 A Full Custom Integrated Circuit for Document Analysis Systems
- 118 Le processeur BRISC développé conjointement par l'UCL et le CEERI
- 120 Chaque groupe reçoit un *bread-board* et une boîte de composants.
- 121 Filtrés à capacités commutées, extrait du carnet de laboratoire (1981)
- 123 Le mouvement lancé grâce aux *breadboards* et aux blocs fonctionnels ne s'arrêtera pas.
- 126 Fête de St Nicolas au labo, 1978.
- 127 Les chambres propres en 1978, entrées des fours.
- 132 Maurice Lobet, lors d'un dîner de Labo.
- 137 Quelques années après la tranche de la Saint Valentin.
- 142 Demandes collectées par le Père Noël dans l'unité FAI en décembre 1986.
- 144 Feuille de process écrite à la main.
- 145 Étapes du procédé de fabrication CMOS P-Well, vers 1978
- 154 Circuit MPC, 1985
- 157 Corrélateur numérique intégré MOS
- 161 Circuit monté sur la plaque de connexion d'une station de test développée par le laboratoire de l'ULB et distribuée dans tous les laboratoires Aramis.
- 162 « Trois mousquetaires » d'Aramis prenant la pose, Pékin, 1996.
- 163 Présentation de l'association Aramis et du développement de la technologie SOI dans la chaîne pilote lors d'une mission pour la Région wallonne.
- 169 1970 — L'ordinateur Varian
- 169 1981 — L'ordinateur Prime
- 169 1985— L'ordinateur VAX
- 170 Le panneau de commande de la Varian.
- 182 Salle des terminaux, vers 1985.
- 187 Enduction d'une tranche.
- 188 Processeur de traitement vocal basé sur un réseau de neurones analogique, 1987
- 192 Technologie SOI (*Silicon On Insulator*) : les transistors sont réalisés sur une mince couche de silicium isolée du substrat par un oxyde épais.

- 198 Inverseur CMOS en technologie SOI[†].
- 205 Véhicule de test pour une mémoire statique à six transistors en technologie GAA[†].
- 207 Circuit intégré pour prothèse visuelle, projet OPTIVIP, 2003
- 208 Montage de test pour le circuit de la prothèse visuelle.
- 211 Vue en coupe d'un transistor GAA.
- 217 Réaménagement du Bâtiment Maxwell : Laboratoires didactiques, Winfab, Welcome
- 223 Laboratoire didactique et salle de projets,
- 224 Aménagement du laboratoire pour un groupe de projet
- 226 Capteur de flux sur base de capacité MEMS 3D[†], vue au microscope électronique.
- 229 Une salle de caractérisation des dispositifs et de mesures sous pointes avant le regroupement dans la plate-forme Welcome.
- 231 2007 : déménagement des chambres propres vers Winfab
- 234 Chambre propre ou « Winfab », Louvain-la-Neuve, 2011
- 235 L'envers du décor (2011)
- 237 Plate-forme Welcome
- 238 Caractérisation de capteurs MEMS.
- 242 Dispositif d'essai nanoscopique.
- 244 Capteur pour le monitoring respiratoire.
- 247 Détecteur de particules
- 247 Vue en coupe de l'espace entre deux pistes.
- 248 Cellule du circuit TRAPPISTe-1[†], le premier détecteur de particules réalisé par WinFab.
- 250 Caractérisation de métamatériaux, Welcome, 2007.
- 251 Une LED jaune s'allume, preuve que le système est fonctionnel
- 257 Test du circuit Sleep-Walker
- 260 La plaquette de la Saint Valentin
- 274 Microscope d'alignement Electro-glas ...
- 274 Création, années 60
- 274 Enduction de résine photosensible et développement
- 275 Pionniers, années 1970
- 275 Aligneur Kasper
- 275 Chaîne pilote, années 1970
- 275 Aligneur Canon
- 276 Aligneur K&W
- 276 Winfab, 2007
- 276 Système d'enduction et de développement Süss Microtec

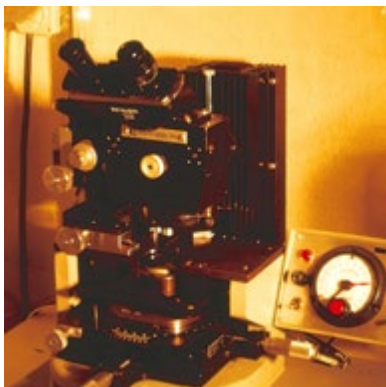
TABLE DES ACRONYMES

AC	<i>Alternating current</i>	CSIR	<i>Council of Scientific & Industrial Research</i>
ACEC	Ateliers de constructions électriques de Charleroi	CTMA	<i>Center for Applied Molecular Technologies</i>
ARAMIS	<i>Association pour la Recherche Avancée en Microélectronique et Intégration de Systèmes</i>	DICE	Unité des dispositifs et circuits électroniques
ARC	Action de recherche concertée	DC	<i>Direct current</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>	DNA	<i>Deoxyribonucleic acid</i>
CAO	Conception assisté par ordinateur	DSP	<i>Digital Signal Processor</i>
CdS	Conseil des Sages	ELEN	Pôle en ingénierie électrique (<i>Electrical Engineering</i>)
CE	Communauté européenne	ENI	Électronavale & industrielle
CEERI	<i>Central Electronics Engineering Research Institute</i>	EPL	Ecole polytechnique de Louvain
CMOS	<i>Complementary MOS</i>	ESPRIT	<i>European Strategic Program on Research in Information Technology</i>
CNM	Centro Nacional de Microelectrónica	ESSCIRC	<i>European Solid-state Circuit Conference</i>
CeRMiN	Centre de Recherches de l'UCL en Matériaux et Dispositifs Electroniques Micro- et Nano-métriques	FAI	Unité des courants faibles
CNET	Centre national d'étude des télécommunications	FD SOI	SOI complètement déplété (<i>Full depleted SOI</i>)
CSEM	Centre suisse d'électronique et de microtechnique	FNRS	Fonds national de la recherche scientifique
		FPGA	<i>Field programmable gate array</i>
		FPMS	Faculté Polytechnique de Mons

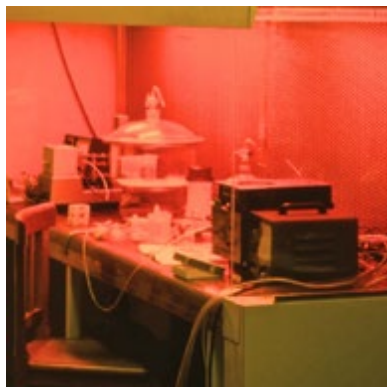
FRIA	Fonds pour la formation à la Recherche dans l'Industrie et dans l'Agriculture	ISEN	Institut supérieur d'électronique et du numérique
FSA	Faculté des Sciences appliquées	ISEP	Institut supérieur d'électronique de Paris
FUNDP	Facultés universitaires Notre-Dame de la Paix	ISI	Institut Supérieur Industriel
GAA	<i>Gate All Around</i>	ISSCC	<i>International Solid-State Circuits Conference</i>
IBA	<i>Ion Beam Applications</i>	IST	<i>User-friendly information society</i>
IBC	<i>Interdigitated Back Contact</i>	KCL	<i>Kirchhoff Circuit Law</i>
ICTEAM	<i>Institute of Information and Communication Technologies, Electronics and Applied Mathematics</i>	LED	<i>Light Emitting Diode</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>	LETI	Laboratoire d'électronique des technologies de l'information
IEMN	Institut d'Electronique de Microelectronique et de Nanotechnologie	LMDS	<i>Local Multipoint Distribution Service</i>
IMCN	Institut de la matière condensée et des nanosciences	LPCVD	<i>Low Pressure Chemical Vapor Deposition</i>
IMEC	<i>Interuniversity Microelectronics Centre</i>	MBLE	Manufacture Belge de Lampes et de matériel Électronique
IMMC	<i>Institute of Mechanics, Materials and Civil Engineering</i>	MEDEA	<i>European programme for innovation and advanced cooperative research and development in nano and microelectronics</i>
IRIS	<i>Image Recognition Integrated Systems</i>	MEMS	<i>Microelectromechanical systems</i>
IRSIA	Institut pour l'Encouragement de la Recherche scientifique dans l'Industrie et l'Agriculture	MGS	<i>Mask Generation System</i>
		MHS	<i>MATRA HARRIS Semiconductors</i>

MIT	<i>Massachusetts Institute of Technology</i>	SPICE	<i>Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis</i>
MIVIP	<i>Microsystems based Visual Prosthesis</i>	SPPS	<i>Services de programmation de la Politique scientifique</i>
MOS	<i>Metal Oxide Semiconductor</i>	SRAM	<i>Static RAM</i>
MOSFET	<i>Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor</i>	ST	<i>ST Microelectronics (ex SGS-Thomson)</i>
MNT	<i>micro- et nano-technologies</i>	SUB	<i>Semi-conductors University Bulletin</i>
MPC	<i>Multi Project Chip</i>	TFE	<i>Travail de fin d'études</i>
NANOTIC	<i>Nanotechnologies et technologies de l'information (TIC)</i>	TMSC	<i>Taiwan Semiconductor Manufacturing Company</i>
NMOS	<i>N-channel MOS</i>	UAB	<i>Universitat Autònoma de Barcelona</i>
NATLAB	<i>Philips Natuurkundig Laboratorium</i>	UCL	<i>Université catholique de Louvain</i>
OCR	<i>Optical Character Recognition</i>	ULg	<i>Université de Liège</i>
OPTIVIP	<i>Optimization of a Visual implantable Prosthesis</i>	ULB	<i>Université libre de Bruxelles</i>
PIN diode	<i>P-type/Intrinsic/N-type diode</i>	ULP	<i>Ultra Low Power</i>
PLL	<i>Phase Locked Loop</i>	UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i>	UWB	<i>Ultra-wideband</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>	VCO	<i>Voltage Controlled Oscillator</i>
RCA	<i>Radio Corporation of America</i>	VLSI	<i>Very Large Scale Integration</i>
RW	<i>Région wallonne</i>	WINFAB	<i>Wallonia Infrastructure Nano Fabrication</i>
SABCA	<i>Société Anonyme Belge de Constructions Aéronautiques</i>	WELCOME	<i>Wallonia Electronics and Communications Measurements</i>
SAIT	<i>SAIT Electronics</i>		
SILOX	<i>Silicon Oxide</i>		
SOI	<i>Silicon On Insulator</i>		

Création, années 60



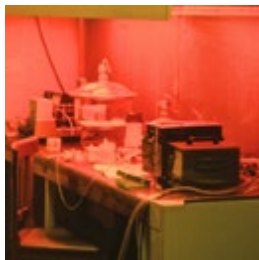
Microscope d'alignement Electroglas ...



Enduction de résine photosensible et développement



Pionniers, années 1970



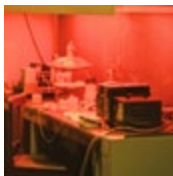
Chaîne pilote, années 1970



Aligneur Kasper



Aligneur Canon



Winfab, 2007



Aligneur K&W

Système d'enduction et de développement Süss Microtec

J'ai rassemblé beaucoup de matériaux à propos de l'histoire du labo. On m'a encouragé à faire de tout cela un livre qui pourrait occuper dans la bibliothèque la place des archives manquantes

- Bonne idée !

Jean-Didier Legat

- Je te renvoie ton texte avec quelques remarques et quelques pistes. C'est super !

Yves Leduc

- Merci pour cette histoire passionnante où j'ai trouvé une mine d'informations.

Denis Flandre

- J'ai lu avec un immense plaisir l'historique du labo.

Avec le temps, il était devenu pour moi un empilement de souvenirs et de faits précis. C'est maintenant une histoire structurée. Je me dis que si ce travail n'avait pas été fait c'eût été un grave manquement.

Merci de l'avoir fait avec le souci constant de montrer les contributions et initiatives de tant de personnes enthousiastes et de l'avoir fait avec la même vision depuis la création du labo jusqu'à aujourd'hui.

Paul Jaspers

- Ce que l'on voit naître, tout au long de cet ouvrage, c'est avant tout le goût de l'expérimentation, du laboratoire, de la main à la pâte, au sein d'installations munies d'un équipement d'avant-garde.

Marcel Crochet

Dès sa sortie du four de recuit, une tranche de silicium est déposée fébrilement sur le plateau du testeur sous pointes.

Le microscope permet d'amener les pointes exactement sur les plages de contact. L'opération n'est pas sans risques. Il faut appliquer une pression suffisante pour assurer un bon contact mais assez légère pour ne pas détruire la fine couche de métallisation.

Quand toutes les pointes sont déposées, la fièvre monte. Voici l'instant du test.

Archives photographiques du laboratoire, 1991



Charles Trullemans est promu par l'UCL Ingénieur civil à Louvain en 1969 et Docteur en Sciences appliquées à Louvain-la-neuve en 1974. Entre ces deux dates, il prend activement part au déménagement et à la réinstallation du Laboratoire de microélectronique UCL où se déroulera toute sa carrière.

Avant d'être admis à l'éméritat en octobre 2010, il exerce successivement plusieurs métiers de la microélectronique: physique des dispositifs, fabrication de circuits intégrés, circuits analogiques, conception assistée par ordinateur, systèmes numériques, et enfin développement d'applications bio-médicales. Il est un promoteur et un praticien de l'apprentissage par problèmes et par projets.

