

INTRODUCTION

SYSTÈMES ÉLECTRIQUES ET ÉLECTRONIQUES

EE295 Prof. Carlotta Guiducci and Dr. Adil Koukab
EPFL STV Cycle bachelor 5

Sujets

- Qu'est-ce que on entend par systèmes électriques et par systèmes électroniques?
- Notions de systèmes embarqués, électronique grand publique
- Exemples des systèmes utilisés dans les domaines des sciences du vivant.
- Transformation et électronique de puissance
- Liens entre la notion de signal électrique et la notion d'information
- Moore's law

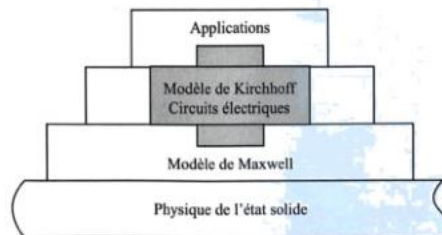
Systèmes Electriques

L'électricité est un domaine scientifique et technique relativement récent qui a écloé au 19^e siècle et qui s'impose dans de très nombreuses réalisations techniques. Divers sous-domaines sont apparus, qui tous s'appuient sur des applications de l'électricité, allant des communications à l'énergie :

- l'électronique qui elle-même se distingue entre électronique de contrôle et électronique de puissance ;
- l'informatique technique qui inclut le domaine des circuits intégrés, cerveaux du traitement de l'information ;
- la télétransmission (téléphone, télévision, GPS) ;
- l'énergie électrique incluant génération, transmission, distribution et conversion ;
- les mesures, leur transmission et leur gestion.

L'électricité, en tant que chapitre des sciences physiques, s'appuie principalement sur un ensemble de modèles capables de représenter, à des degrés divers, le comportement de la matière, de notre environnement et de leurs phénomènes. Si la physique tend vers un modèle le plus performant possible, la technique se base plus sur des modèles orientés de façon à permettre un choix et une conception de composants ou d'objets techniques répondant à un cahier des charges incluant des performances. Le présent ouvrage se situe principalement au niveau des modèles techniques communs à toutes les applications de l'électricité.

La figure ci-après permet d'illustrer la perception de ces modèles. La largeur des divers rectangles illustre le caractère plus ou moins universel des modèles. L'axe vertical met en évidence le passage des connaissances scientifiques (à la base) à leurs applications techniques.



La physique de l'état solide recourt à des modèles microscopiques (à l'échelle de l'atome, comme un électron dans un conducteur) et macroscopiques (à l'échelle de la matière apparente, comme un conducteur). C'est un ensemble ouvert de modèles, qui s'enrichit au fur et à mesure des progrès scientifiques.

Le modèle de Maxwell est un modèle macroscopique de l'ensemble du domaine de l'électricité en considérant les milieux comme continus et traitant des grandeurs locales.

Le modèle de Kirchhoff est un modèle intégral qui traite de grandeurs globales, comme la résistance d'un conducteur ou une source de tension. Dans ce domaine, le modèle d'un circuit imprimé a une topologie très proche de sa réalisation technique.

La réalisation de composants ou d'objets techniques recourt à ces modèles, orientés vers la conception.

1.1 Préambule – Bases de l'électricité

1.1.1 Électricité

L'*électricité* est un concept bien connu, mais impliquant plusieurs interprétations.

C'est tout d'abord un chapitre de la physique, domaine scientifique construit d'abord sur l'électrostatique, puis sur l'électromagnétisme. La maîtrise de ces connaissances permet d'aborder tous les domaines d'application en découlant.

L'électricité recouvre également la dénomination de tout le domaine des applications techniques y relatives, allant de la microélectronique aux générateurs de grande puissance. Parfois on substitue le vocable *électronique* à celui d'électrique : on vend une machine à laver ou une perceuse électronique, bien que dans les deux cas la partie moteur est bien sûr électrique.

Enfin l'électricité est un produit énergétique, caractérisé par l'unité de vente d'énergie électrique qu'est le kWh.

1.1.2 Électrotechnique

L'appellation *électrotechnique* a une signification double selon les pays :

- En France, l'électrotechnique est le domaine de l'énergie électrique, incluant *génération*, transport et distribution, et utilisation de tous types.
- Dans les pays anglo-saxons, l'électrotechnique est plutôt l'ensemble des connaissances et des méthodes de base en vue du développement des applications de l'électricité.

C'est dans le second sens que nous utiliserons principalement ce terme, soit :

Électrotechnique = bases de l'électricité

1.2 Électrotechnique et société

1.2.1 Importance de l'électricité

L'électricité a connu un développement relativement récent puisqu'il remonte, pour l'essentiel, au milieu du 19^e siècle. Toutefois de nos jours,

Electrotechnique. M. Jufer – Y. Perriard. PPUR

ce développement est devenu extrêmement rapide et conditionne de nombreux secteurs de l'activité humaine.

Peu de domaines ont été aussi fertiles en réalisations ayant autant d'influence sur l'économie des pays et le comportement social des individus que l'électricité. Il suffit, pour s'en convaincre, de répertorier tous les dispositifs électriques et électroniques qui environnent chacun dans sa vie de tous les jours. Nous dépendons aujourd'hui de l'électricité pour nos besoins quotidiens, que ce soit dans le domaine des transports, des loisirs, du travail, de la santé, de l'information, pour la conservation des aliments, et pour bien d'autres applications encore dont nous ne savons plus nous passer.

1.2.2 Énergie et information

On peut, pour l'essentiel, regrouper toutes les applications de l'électricité en deux domaines principaux :

- celui du traitement de l'énergie électrique ;
- celui du traitement de l'information électrique.

Le traitement de l'énergie électrique recouvre l'ensemble des techniques liées à la production, à la distribution et à l'utilisation (en particulier par des dispositifs électromécaniques, électrothermiques et électrochimiques) de l'énergie électrique. Le traitement de l'information électrique, pris ici dans son sens le plus large, comprend les techniques d'acquisition (mesures), de transmission (télécommunications) et d'exploitation (ordinateurs, systèmes automatisés, etc.) de l'information portée par des signaux électriques. Chacun de ces domaines est à l'origine d'une véritable révolution industrielle ayant de profondes répercussions sur la vie économique et sociale.

La première révolution industrielle, consécutive à la domestication de l'énergie, date du 19^e siècle. Elle s'est caractérisée par le remplacement progressif de la force de travail humain par la machine. Très tôt, l'énergie électrique s'est avérée être l'un des éléments moteurs de cette évolution prodigieuse. L'énergie électrique a vu sa consommation croître à l'allure du doublement tous les dix à quinze ans environ. Cet extraordinaire succès est dû au fait que l'électricité est produite de façon simple et relativement économique et que, presque sans pertes, elle se transporte, se transforme et se divise pratiquement sans limite.

La seconde révolution industrielle, qui doit beaucoup aux premiers développements des télécommunications et de la radioélectricité, a débuté après la Deuxième Guerre mondiale. Elle se traduit aujourd'hui de plus en plus par la mise en œuvre d'équipements qui ont pour tâche d'amplifier les aptitudes intellectuelles de l'homme et de lui permettre de communiquer avec ses semblables, ou avec ses nouveaux esclaves : les machines. L'électronique et l'informatique jouent un rôle dominant dans cette évolution nouvelle, l'illustration la plus spectaculaire en étant l'ordinateur qui permet des investigations et des recherches difficilement imaginables il y a quelques décennies seulement.

1.2.3 Électricité et nuisances

L'influence positive des applications de l'électricité dans la vie économique, scientifique et culturelle, ainsi que dans l'organisation des loisirs est évidente. L'évolution technologique moderne et future ne peut que confirmer cette influence en renforçant son importance. Toutefois, cette évolution soulève de nombreux problèmes : atteinte à la vie privée, pouvoir contraignant sur les individus, centralisation excessive, nouvelles possibilités si dangereuses par leur nature même qu'elles ont de grandes chances d'être utilisées de façon désastreuse, enfin changements trop rapides pour être assimilés sans heurt.

Toute activité industrielle, si bénéfique soit-elle, contient en elle-même des germes de nuisance. L'électrotechnique, bien qu'elle soit l'une des disciplines techniques les moins controversées en raison de l'aide efficace qu'elle apporte aux hommes dans de nombreuses tâches, n'échappe pas à cette règle.

On peut en effet s'interroger sur le bénéfice réel qu'apporte à l'humanité un progrès technologique en croissance si rapide. Si l'électricité n'est pas, par elle-même, une forme d'énergie polluante, sa production massive requiert la transformation d'une énergie primaire (chute d'eau, charbon, gaz, pétrole, uranium) grâce à des installations techniques (barrages hydro-électriques, usines thermiques à combustible fossile ou nucléaire) dont la multiplication pose de sérieux problèmes écologiques. Les lignes à haute tension servant au transport de cette énergie déparent souvent nos plus beaux sites. La prolifération des gadgets électroniques qui envahissent notre vie, professionnelle et privée, porte en elle-même des risques de pollution subtile, agissant non sur le milieu naturel, mais peut-être sur l'avenir de notre culture. L'explosion des moyens électroniques d'information, qui rendent pourtant des services immenses, risque fort de contribuer à l'asservissement de l'homme, s'il n'y prend garde.

Il importe, en définitive, que les futurs développements technologiques de l'électricité soient orientés vers des aspects fondamentaux utiles à l'épanouissement de l'homme et à l'amélioration de son milieu. C'est à la fois un pari à gagner et une responsabilité à assumer.

Electrotechnique. M. Jufer – Y. Perriard.
PPUR

Systèmes Electroniques. Semi-conducteurs

Paul Horowitz & Winfield Hill

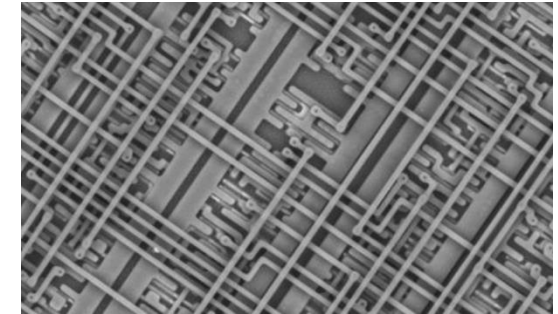
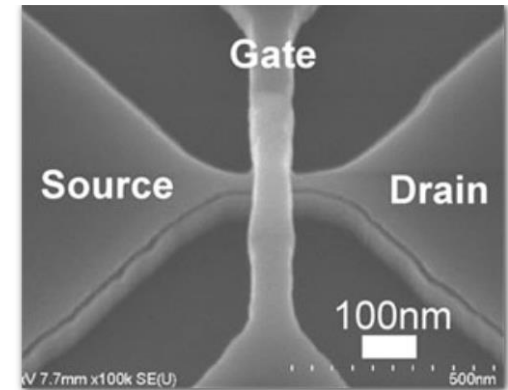
TRAITÉ DE L'ÉLECTRONIQUE
ANALOGIQUE ET NUMÉRIQUE

VOLUME 1 : TECHNIQUES ANALOGIQUES

INTRODUCTION

Les développements dans le domaine de l'électronique ont constitué une des grandes épopées de ce siècle. Après les émetteurs rudimentaires à arc et les détecteurs à galène du début du siècle, nous avons traversé la période des tubes à vide, avec leur complexité considérable, pour arriver à l'ère du semi-conducteur, dans laquelle le déferlement d'avancées stupéfiantes ne semble pas se ralentir. La technologie d'intégration à grande échelle LSI (*LSI, Large Scale Integration*) rend banale la fabrication, sur une même puce de silicium, de calculatrices, d'ordinateurs et même de machines parlantes avec un vocabulaire de plusieurs centaines de mots. L'évolution de la technique d'intégration à très grande échelle (*VLSI, Very Large Scale Integration*) promet des composants encore plus étonnants.

Il faut peut-être relever la tendance, sympathique, à l'augmentation constante du rapport prestations/prix. Le coût d'un micro-circuit électronique décroît régulièrement jusqu'à une fraction de son coût initial du fait du perfectionnement des procédés de fabrication (voir la figure 8.87, dans le tome 2, par exemple). En fait, il arrive souvent que le coffret d'un appareil, avec ses organes de commande, coûte plus cher que l'électronique qu'il abrite. En lisant toutes ces choses passionnantes sur l'électronique, vous pourriez croire que vous êtes à même de construire de petits gadgets puissants, élégants, mais bon marché, pour accomplir quasiment toutes les tâches imaginables, à la seule condition de savoir comment fonctionnent tous ces composants miraculeux. Si vous avez cette impression, ce livre est fait pour vous. Nous avons tenté de transmettre à travers lui un certain savoir-faire et une passion pour l'électronique.



quelques μm

On microchips, Taiwan,
and AI:
<https://www.nytimes.com/2023/04/04/opinion/e-zra-klein-podcast-chris-miller.html>

Equipements électriques et électroniques

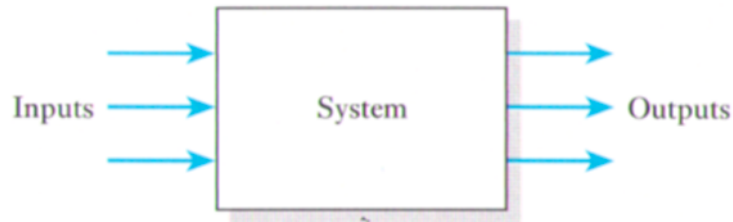
Un équipement électrique ou électronique est défini comme un équipement **dépendant d'une grandeur électrique ou d'un champ magnétique** pour fonctionner correctement, ainsi que l'appareil permettant la génération, le transfert ou la mesure de signaux électriques. Exemples:

- Gros appareils électroménagers
- Petits appareils électroménagers
- Équipement informatique ou de télécommunication
- Équipement lumineux
- Outils électriques et électroniques
- Jouets, équipements de sport et loisir
- Dispositifs médicaux
- Instruments de contrôle et de surveillance
- Distributeurs automatiques

Systemes électriques et électroniques

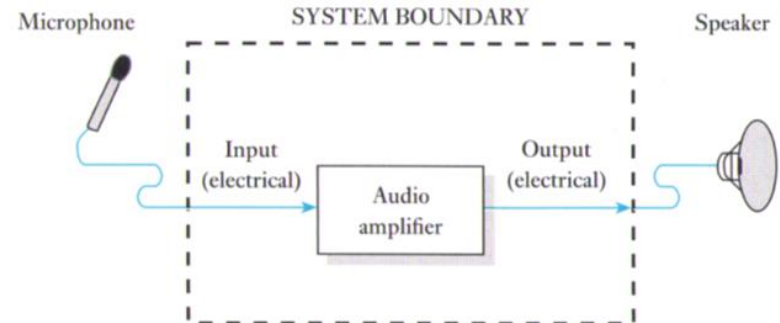
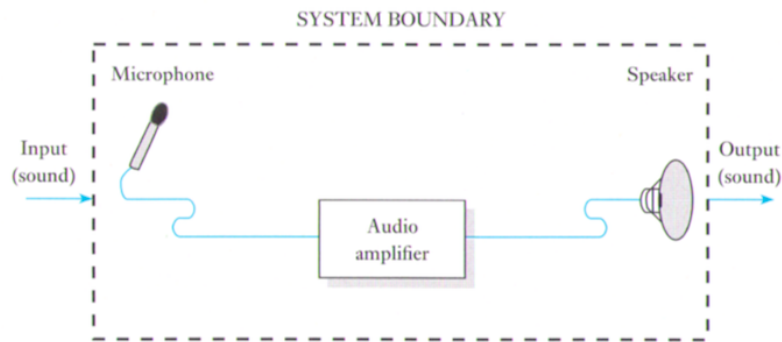
- Ils sont des ensemble d'éléments passifs (R, L, C) et actives (diodes et transistors) connectés pour
 - Élaborer, stocker et transmettre l'information sous la forme de grandeurs électriques (courants et tensions).
 - transformer la forme (AC ou DC) et amplifier les signaux électriques
- Ils ont une ou plusieurs entrées et une ou plusieurs sorties.
 - Les entrées et sorties (signaux) sont en général définies par des 'portes', qui consistent chacune des deux extrémités de conducteurs indépendants (même si souvent on représente les signaux avec une seule extrémité).
 - Chaque sortie est une fonction mathématique des entrées.

Système et sous-système



Un système est défini par ses entrées et sorties, et par la fonction qui le relie.

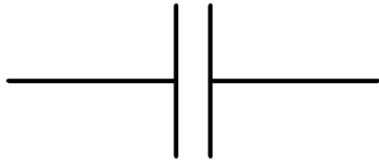
Différents systèmes peuvent être isolés et définis à partir du même ensemble en fonction du choix des limites que l'on trace.



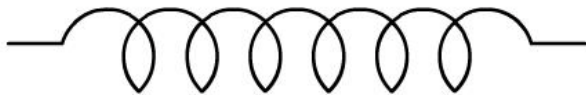
Les elements d'un circuit



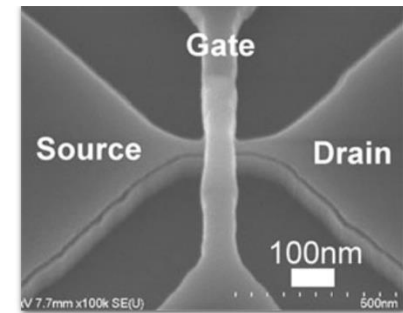
résistance



capacitance



inductance



transistor



diode

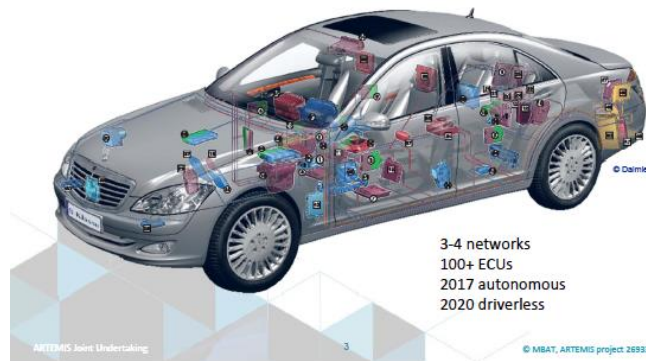
ÉLECTRONIQUE GRAND PUBLIC ET SYSTÈMES EMBARQUÉS

Facteurs de marché (drivers)



Systèmes embarqués

- L'électronique n'est pas seulement dans les équipements traditionnellement identifiés comme électroniques, mais partout, sous la forme de systèmes embarqués



Système chirurgical Da Vinci.

L'usage d'électronique embarquée est très répandu. Les composants électriques et électroniques représentent 40% du coût total d'une voiture.

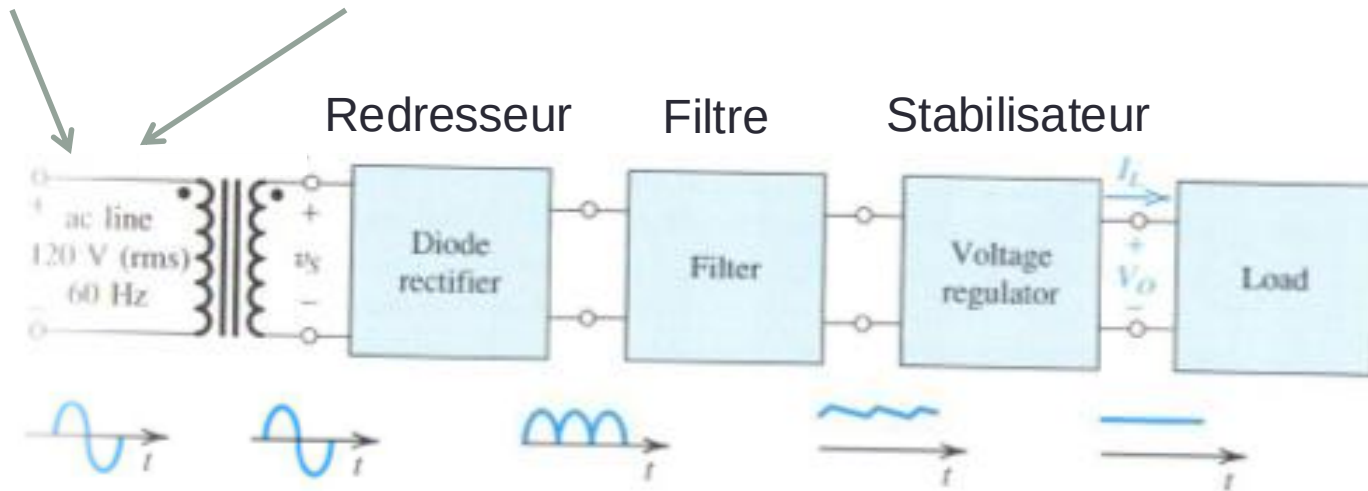
Système dans le domaine médical fonctionnant grâce à la présence des plusieurs systèmes électroniques embarqués.

TRANSFORMATION ET ÉLECTRONIQUE DE PUISSANCE

Schéma bloc d'une alimentation DC : conversion de AC (courant alternatif) à DC (courant continu)

Tension de ligne
standard
Européenne:
220V
50 Hz

Tension de ligne
standard Nord-
américaine:
120V
60 Hz



Tension d'amplitude
abaissée par rapport à
celle de la ligne

Quelques Watts de puissance

L'ÉLECTRONIQUE POUR LES SCIENCES DU VIVANT

Contextes

Equipements
biomédical

Appareils
implantés

Dispositifs
ingérables

Diagnostic
in vitro

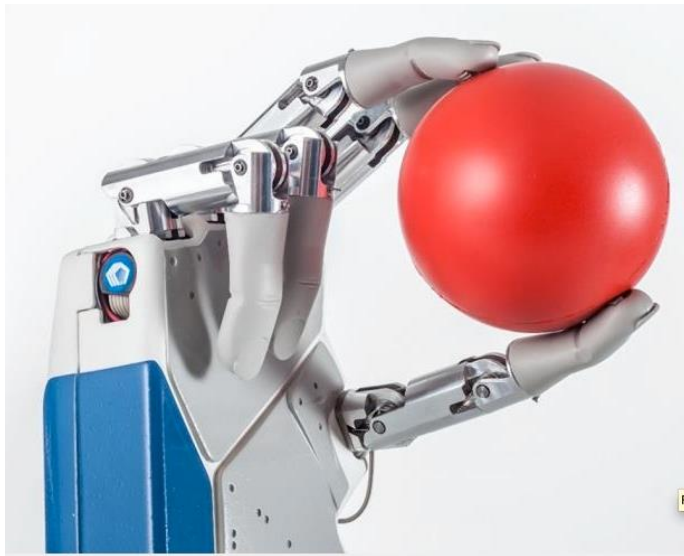
Interfaces
neuronales et
neuroprotheses

Neuroprothèses avancées.

Sensing

Main bionique

Restaure le sens du toucher



Implantation d'électrodes dans les réseaux de nerfs ulnar et median dans l'avant-bras.

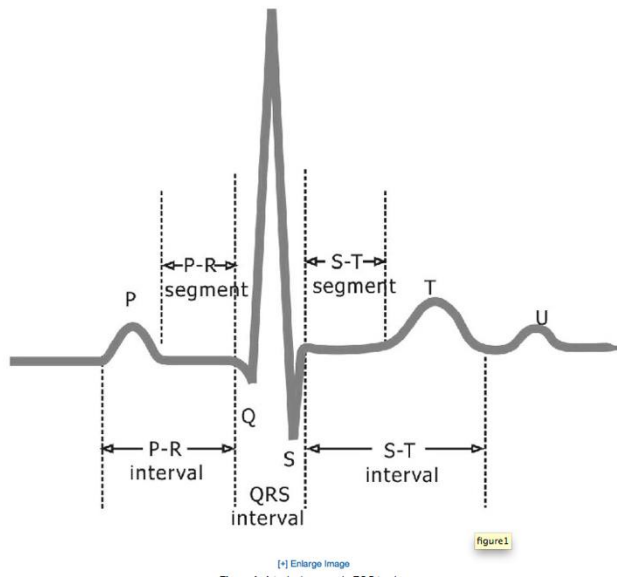
Les électrodes sont connectées à des capteurs de pression sur les doigts et la paume de la main robotique prothétique via des câbles parcourant l'extérieur du bras.

<http://actu.epfl.ch/news/amputee-feels-in-real-time-with-bionic-hand/>

Electronique pour les sciences du vivant

Equipements
biomédical

ECG



Smartcardia ECG

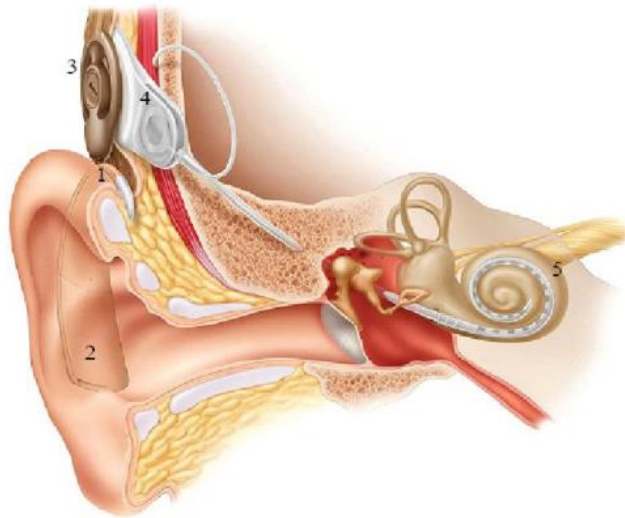
Rythme cardiaque de Bertrand Piccard pendant la simulation des 72 heures de vol pour traverser l'océan Atlantique.

Electronique pour les sciences du vivant

Dispositifs implantables

Pacemaker

Stimulation électrique directe des muscles du coeur.



Cochlear Implant

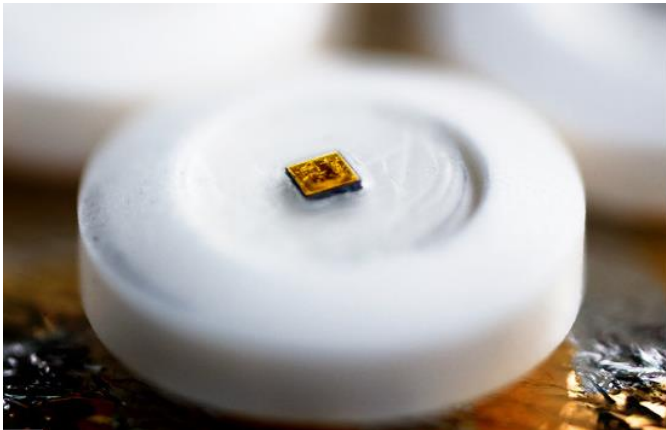
Stimulation électrique directe du nerf auditif grâce à des électrodes implantées chirurgicalement.

Electronique pour les sciences du vivant

Dispositifs
ingérables

Puce digestible

Envoie des informations hors du corps grâce à une connection wireless.



Proteus Biomedical

Caméra endoscopique

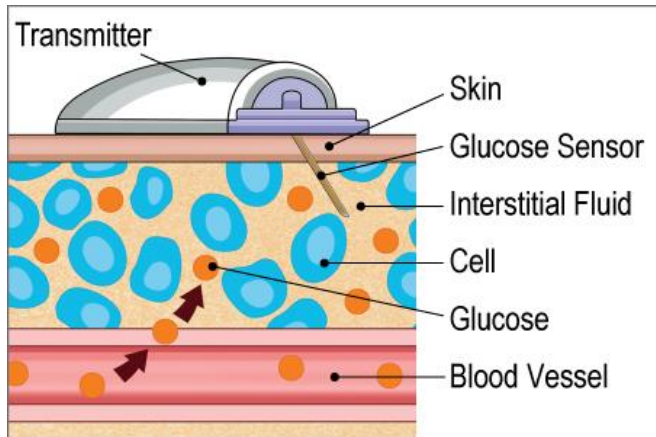
Doit être avalée, enregistre des images.



Electronique pour les sciences du vivant

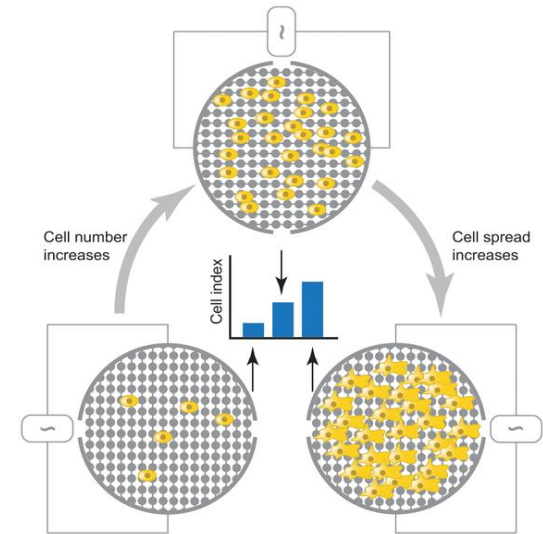
In vitro
diagnostics

**Glucomètre et
surveillance continue du
taux de glucose**



Columbia

ACCU-CHEK® Roche

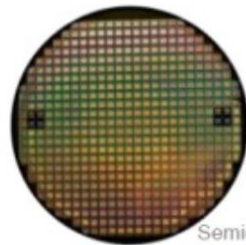


**Tests sur des cellules vivantes basés
sur la spectroscopie d'impédance**

Viabilité et motilité des cellules

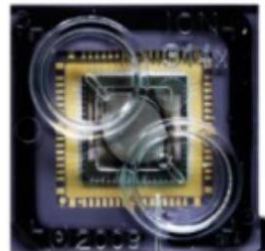
Electronique pour les sciences du vivant

In vitro bioanalytics



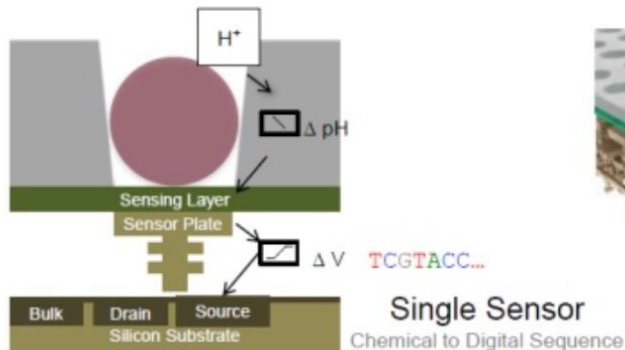
Wafer

Semiconductor Manufacturing



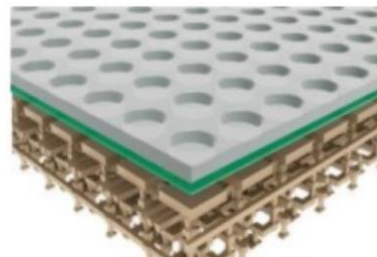
Chip

Semiconductor Packaging



Single Sensor

Chemical to Digital Sequence



Millions of Sensors

Semiconductor Design

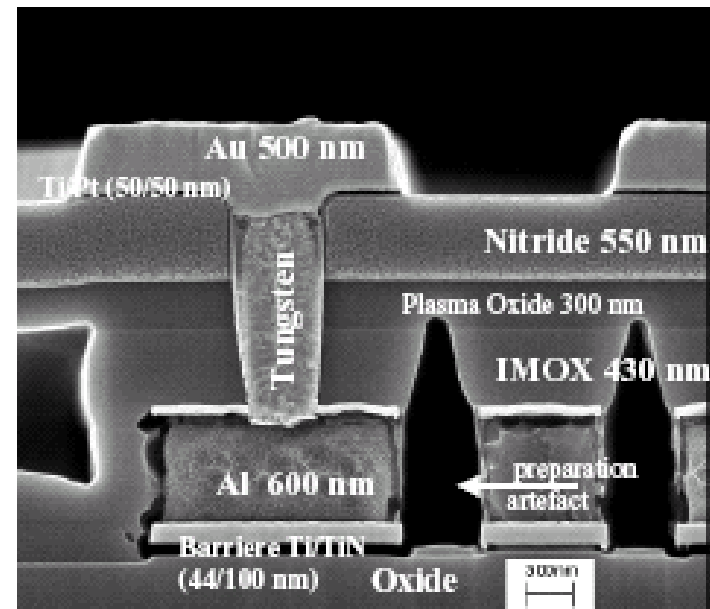
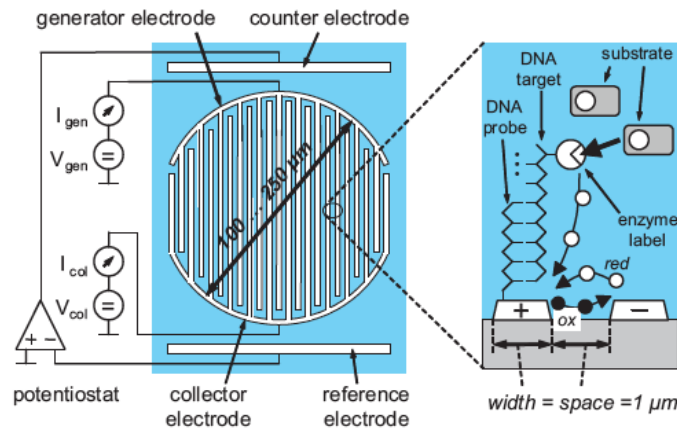
<https://www.thermofisher.com/ch/en/home/brands/ion-torrent.html>

Electronique pour les sciences du vivant

In vitro bioanalytics

Analyse AND. Detection des réactions électrochimiques

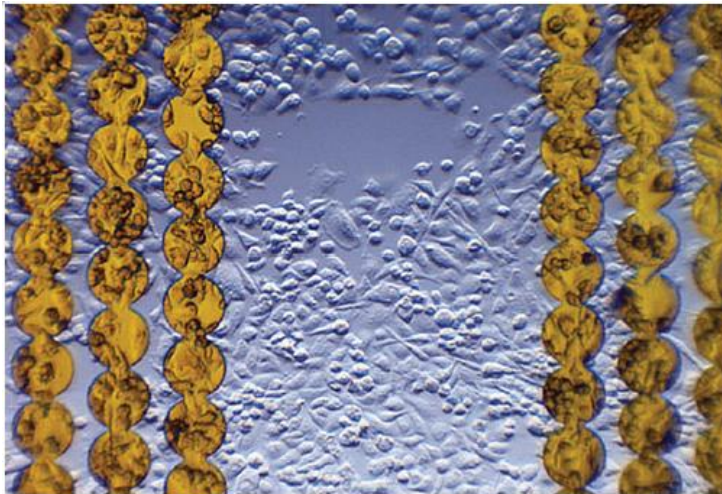
Microélectrodes intégrées



Electronique pour les sciences du vivant

Analyse cellulaire

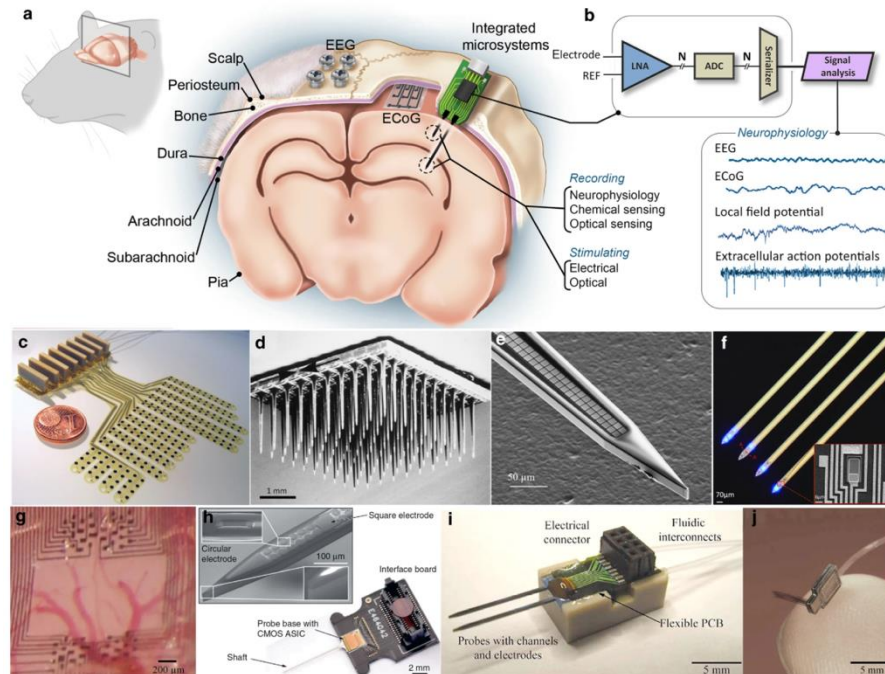
Les microélectrodes



Roche Diagnostics and Acea Biosciences

Interfaces neuronaux

<https://www.nature.com/articles/micronano201666>



Recording and stimulating technologies vary across scale and degrees of invasiveness. (a) Illustration of the rodent brain and a variety of technologies from electroencephalogram (EEG) to intracortical microelectrodes. (b) High-density systems will increasingly require built-in active electronics to serialize large data streams and reduce the size of the connectors. Sample electrical signals show the amplitudes of various signal sources. The intracortical arrays are often microelectrodes but may also include chemical and optical sensors. (c) Polyimide electrocorticogram (ECoG) for large area mapping⁶⁷. (d) A "Utah array" with 400 μm shank spacing and 100 channels has been used in human studies⁵⁰. (e) Close-packed recording sites with $9 \times 9 \mu\text{m}$ area and a pitch of $11 \mu\text{m}$ ¹⁷⁸. (f) MicroLED optoelectrode made from GaN on silicon¹⁷⁶. (g) Parylene ECoG with greatly improved resolution over EEG and even single-cell capabilities²³. (h) CMOS integration on probe shaft and backend⁴⁰. (i) Fluidic probe for drug delivery⁴⁵. (j) Active 3D silicon recording system with flexible parylene interconnect¹⁸².

Microélectrodes intégrés

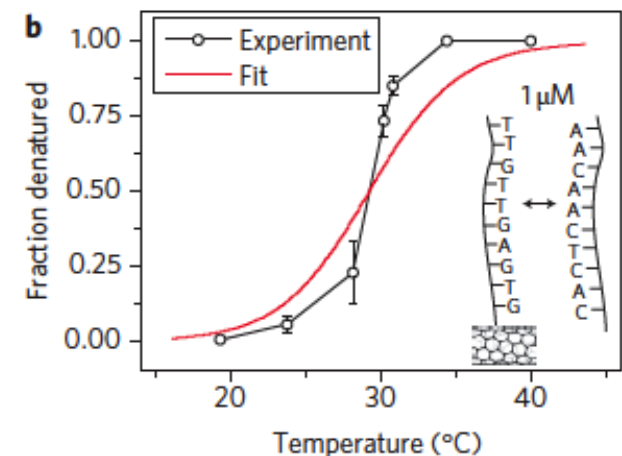
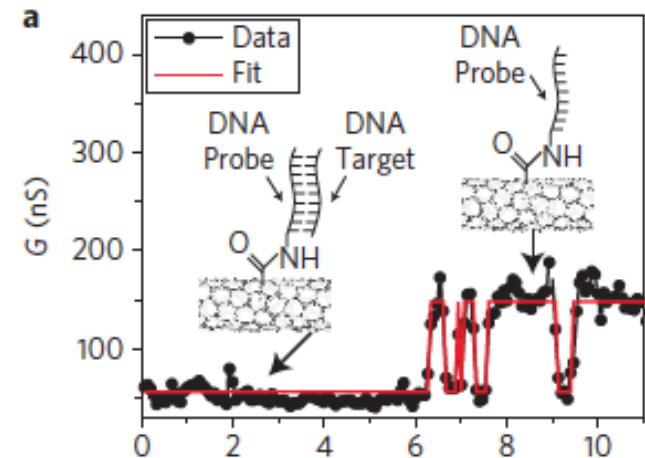
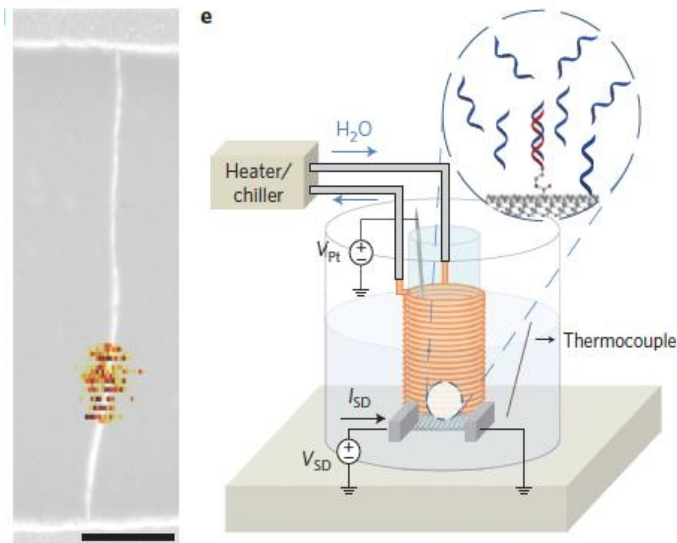
2011: milestone avec HD-USEA (High density Utah Slanted Electrode arrays) pour stimulations et enregistrements neuronaux in vitro et in vivo.
25 électrodes/ mm^2

Electronique pour les sciences du vivant

Biophysique

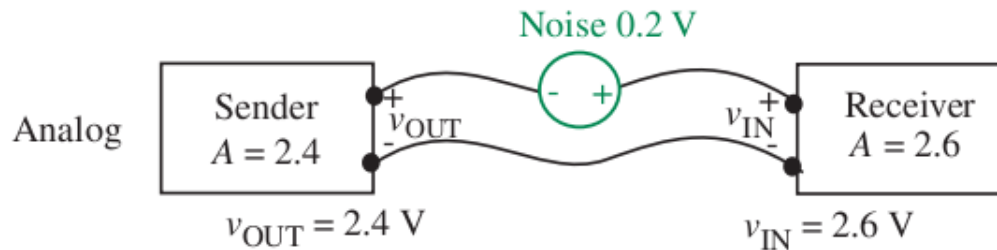
Observation de l'hybridation des deux brins d'acides nucléiques sans aide de marqueurs fluorescents.

Transducteur: dispositif à nano-tuyau

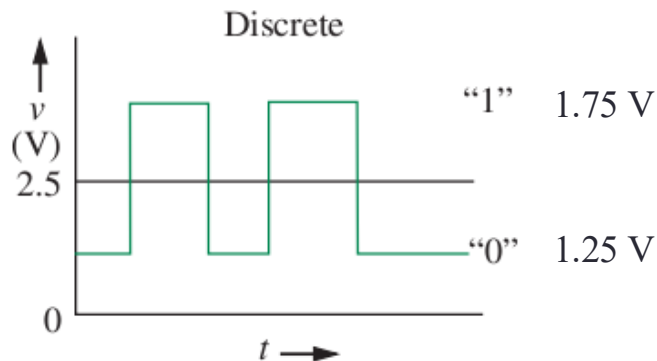
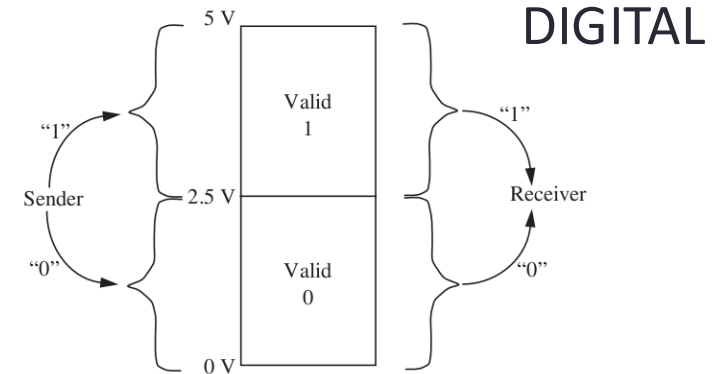
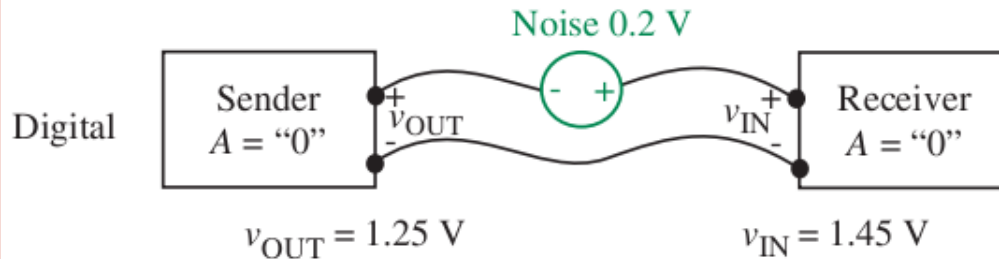


ELABORATION DE L'INFORMATION

“1” et “0” représentés physiquement par des signaux “haut” et “bas”, respectivement



ANALOG

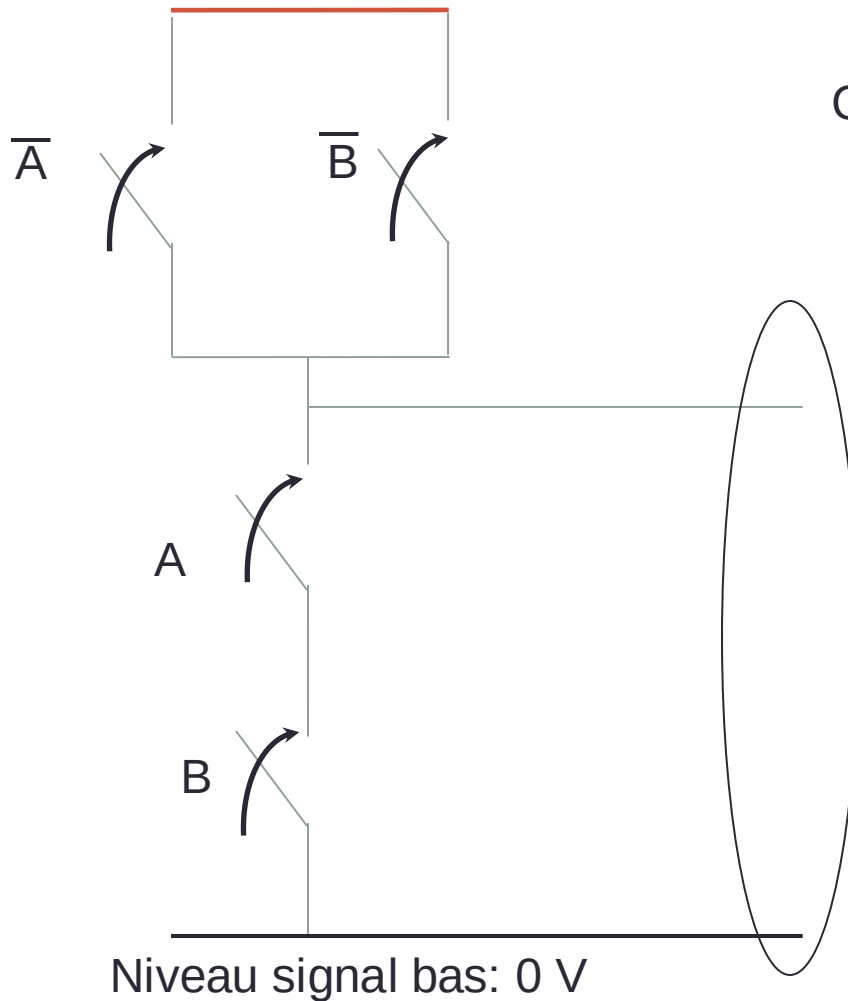


Les Valeurs entre 2.5 V et 5 V sont des “1”

Les Valeurs entre 0 V and 2.5 V sont des “0”

Comment on construit une fonction logique fondamentale: NAND

Niveau signal haut: 2.5 V



Quatre interrupteurs (switches)

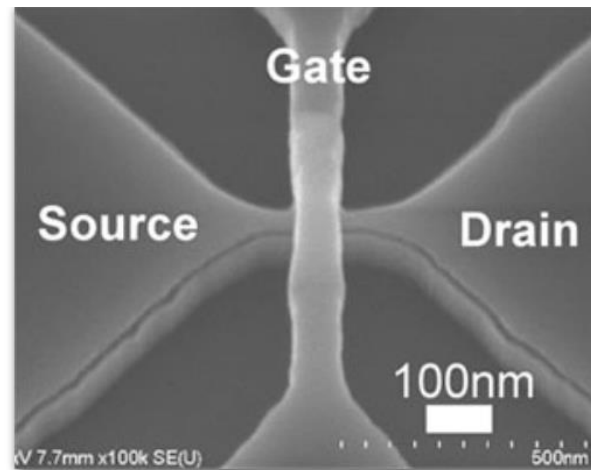
Sortie
= $\overline{AB}$



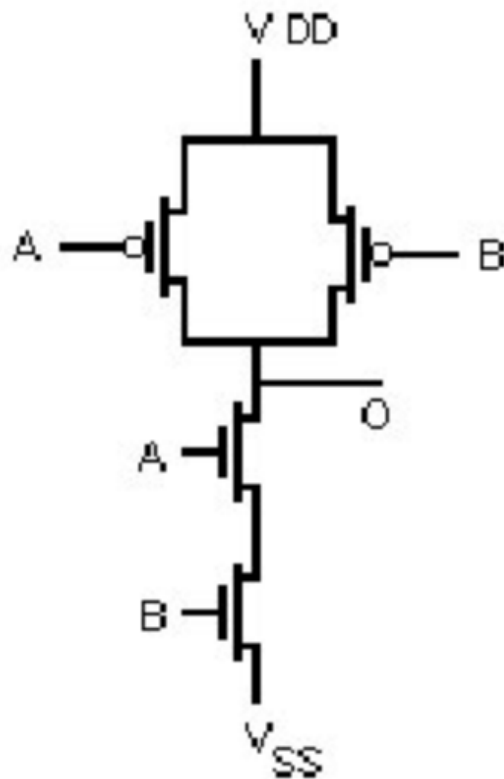
A	B	Out
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0

L'élément fondamental de circuits intégrés: le transistor

Une connexion électrique est établie entre SOURCE et DRAIN seulement si la tension entre la Grille (GATE) et supérieure à une certaine seuil. Le transistor est un interrupteur.



Comment on construit un switch très petit et très performant? Avec un transistor



Exemple:

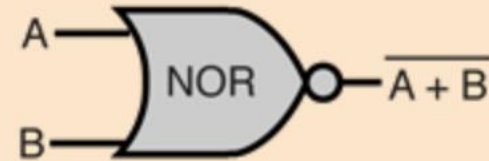
- quatre transistors MOSFET (Metal-oxide-semiconductor Field-effect transistor)
- deux par type
- Comme les deux types des transistor ont un fonctionnement – logiquement- complémentaire, on appelle cette technologies: CMOS, Complementary Metal-oxide-semiconductor.

Comment synthétiser les fonctions

N'importe quelle fonction mathématique peut être réalisée par des connexion en séries et en parallèle de la fonction logique NAND, **OU** de la fonction logique NOR, en logique binaire Booléenne.

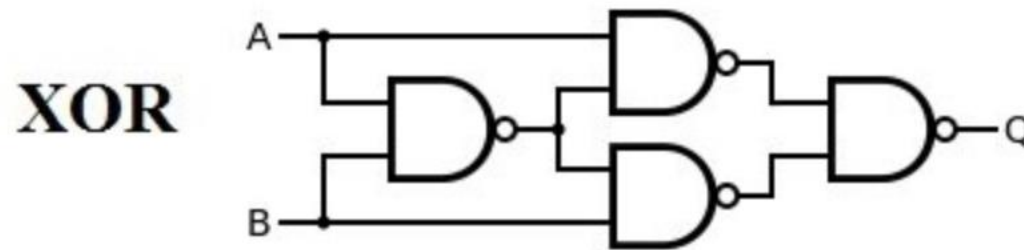


A	B	Out
0	0	1
0	1	1
1	0	1
1	1	0



A	B	Out
0	0	1
0	1	0
1	0	0
1	1	0

Example:

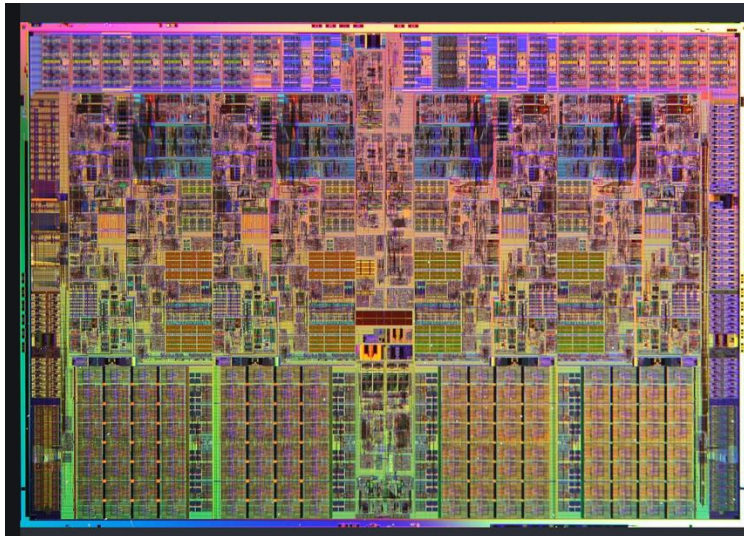


A	B	Output
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	0

Systèmes électroniques complexes

- Microprocesseur **i7**
- taille de la puce 120-125 mm²
- 2 milliards de **transistors**

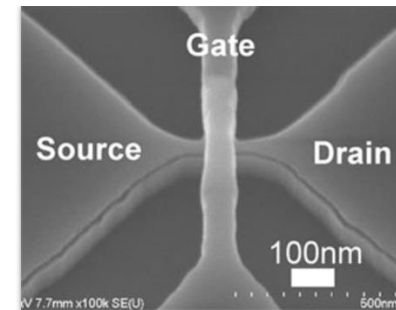
Microprocesseur **i7**



1 mm

Puissance dissipée:
dizaines de Watt

Transistor



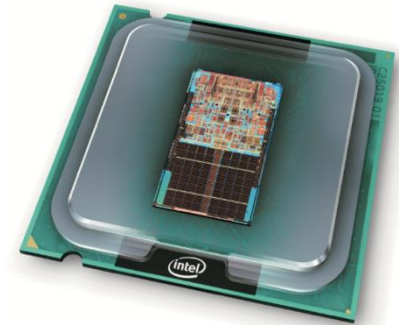
0.5 μm

Puissance dissipée: 1 milliWatt

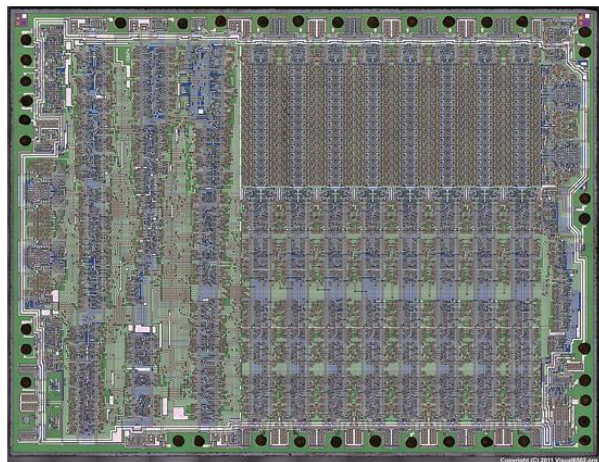
Systemes électroniques intégrés



En démontant le package
on révèle la puce (CHIP)



En regardant par dessus la puce
on note plusieurs couches:



Beaucoup d'éléments simples (transistors, capacités and résistances) sont arrangés et connectés sur la surface du même substrat de silicium (puce de silicium de un demi millimètre d'épaisseur). Les connections des éléments simples entre eux sont réalisées à l'aide de couches de métal supplémentaires sur le dessus de la puce.

Systèmes électroniques intégrés 1/2

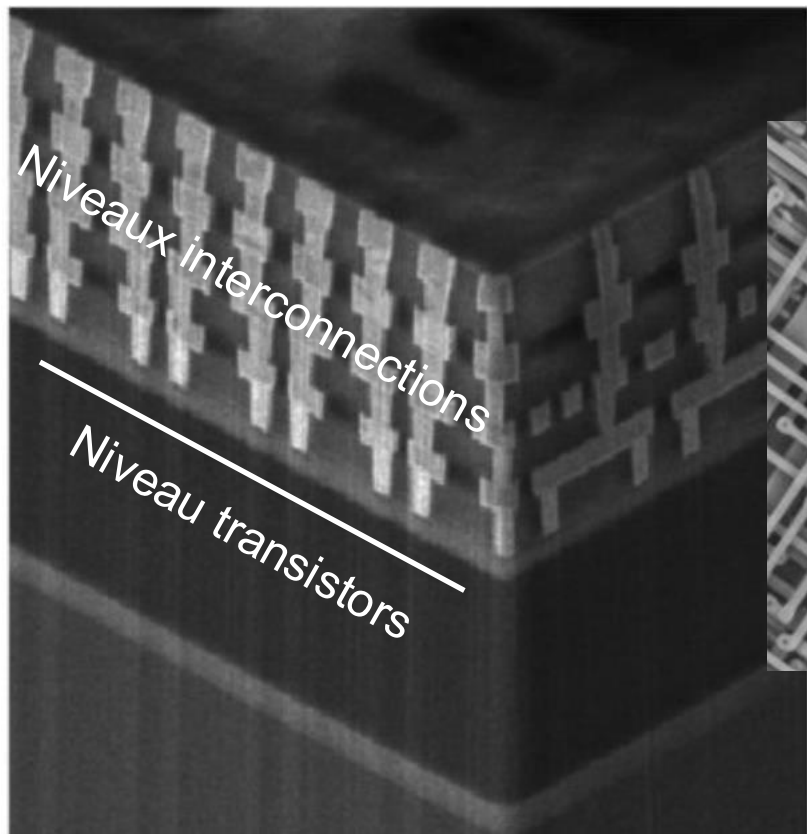
Un système électronique intégré est un composant électronique complexe qui reçoit des signaux électriques (tensions, courants) d'entrée et fournit d'autres signaux comme sorties. Il est désigné pour une ou plusieurs fonctions spécifiques : contrôle, stockage, communication, calculs et élaboration de données.



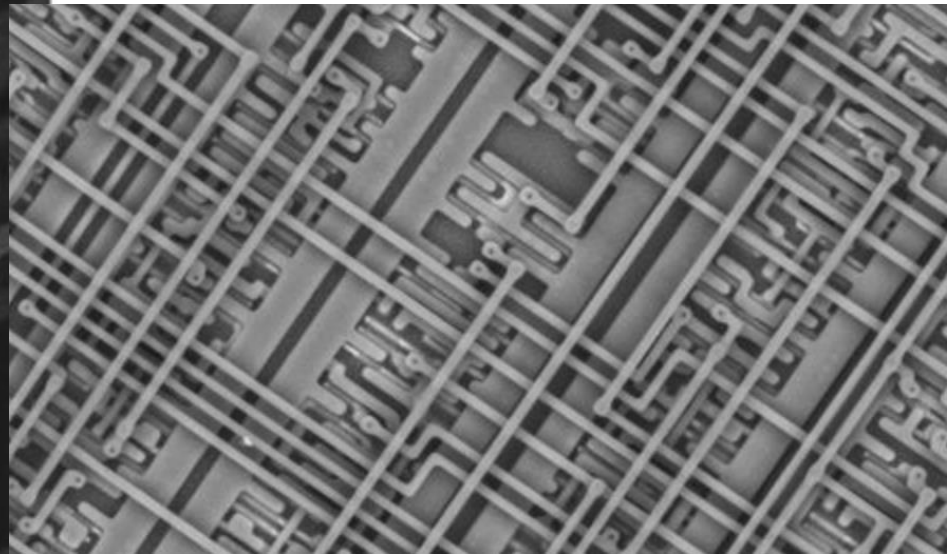
wikicommons

Microchip

Side view



Top view



quelques μm

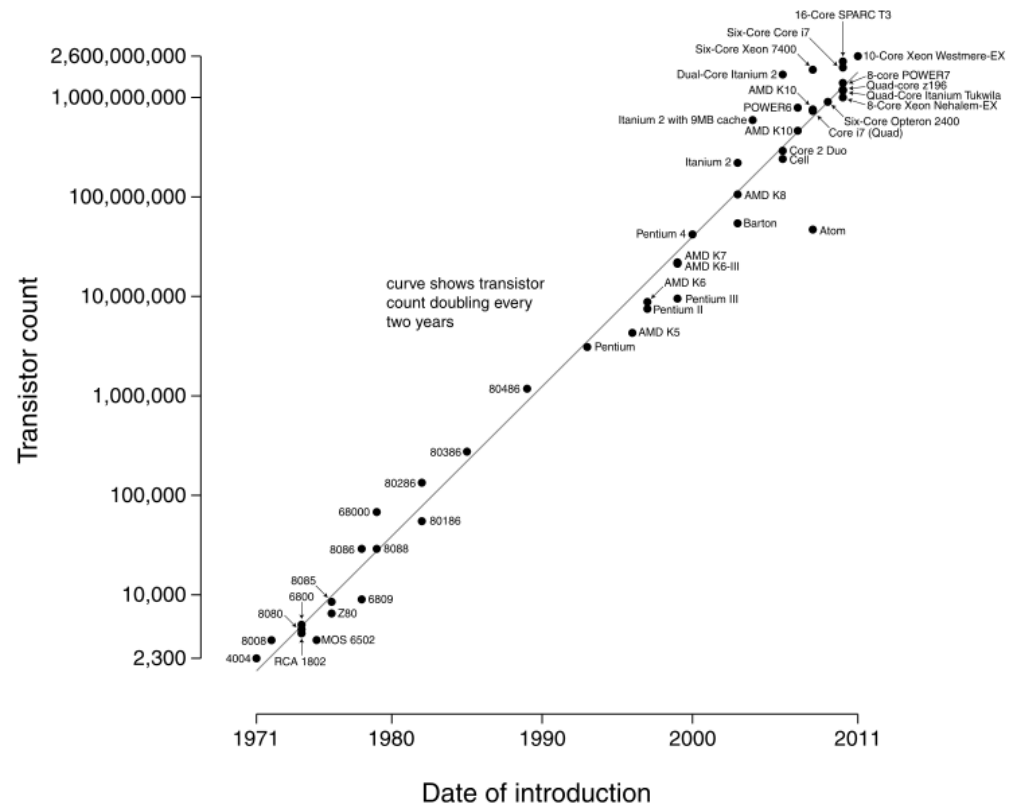
quelques μm

Combien de transistors peut contenir une puce?

Quelques milliards. Chaque transistor n'occupe que quelques dizaines de nanomètre de large.

La complexité (nombre de transistors par circuit intégré) augmente d'un facteur d'environ 2 tout les 18 mois.

(19 Avril 1965. Gordon E. Moore. "Cramming more components onto integrated circuits". Electronics, Volume 38, Number 8, April 19, 1965)



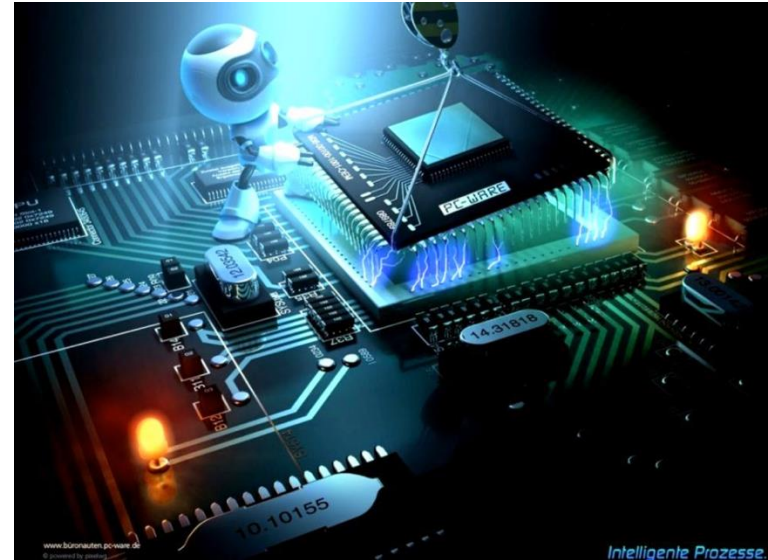
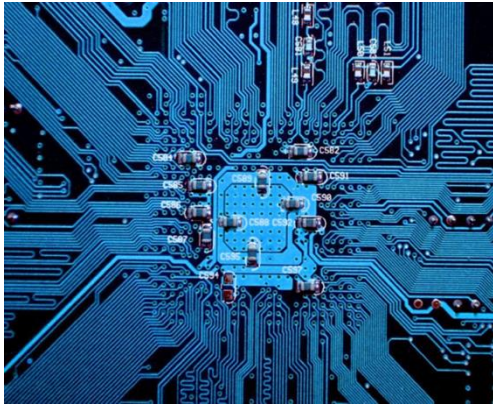
SPECIAL REPORT: 50 YEARS OF MOORE'S LAW

The glorious history and inevitable decline of one of technology's greatest winning streaks
1965-2015

Fifty years ago this month, Gordon Moore forecast a bright future for electronics. His ideas were later distilled into a single organizing principle—Moore's Law—that has driven technology forward at a staggering clip. We have all benefited from this miraculous development, which has forcefully shaped our modern world. In this special report, we find that the end won't be sudden and apocalyptic but rather gradual and complicated. Moore's Law truly is the gift that keeps on giving—and surprising, as well.

<https://spectrum.ieee.org/static/special-report-50-years-of-moores-law>

Circuits imprimés (PCB)

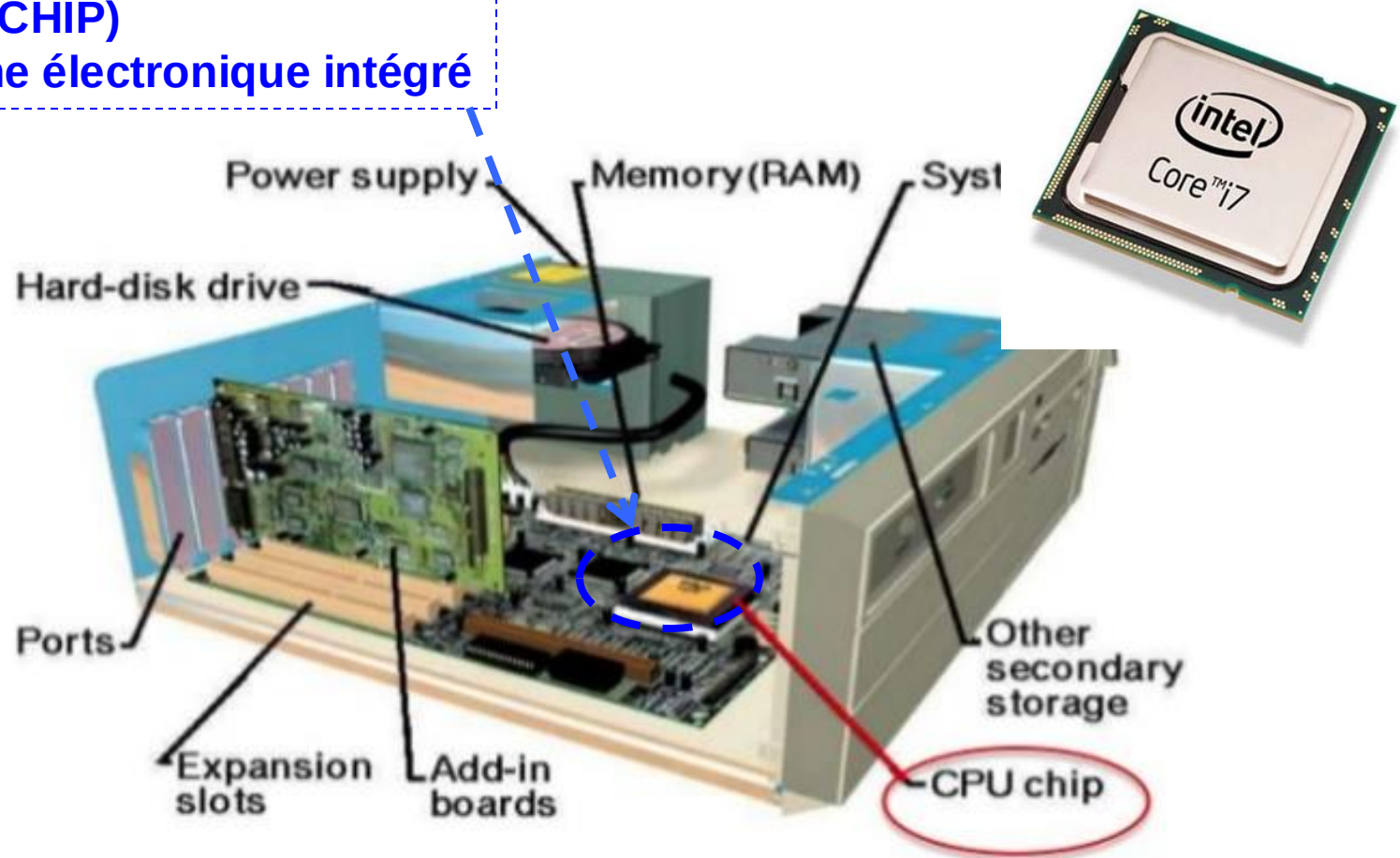


Richter Dahl Rocha & Associés architectes

Le circuit imprimé est le support sur lequel viennent se fixer les puces électroniques, résistances, capacités et inductances pour être connectées ensemble selon un schéma précis

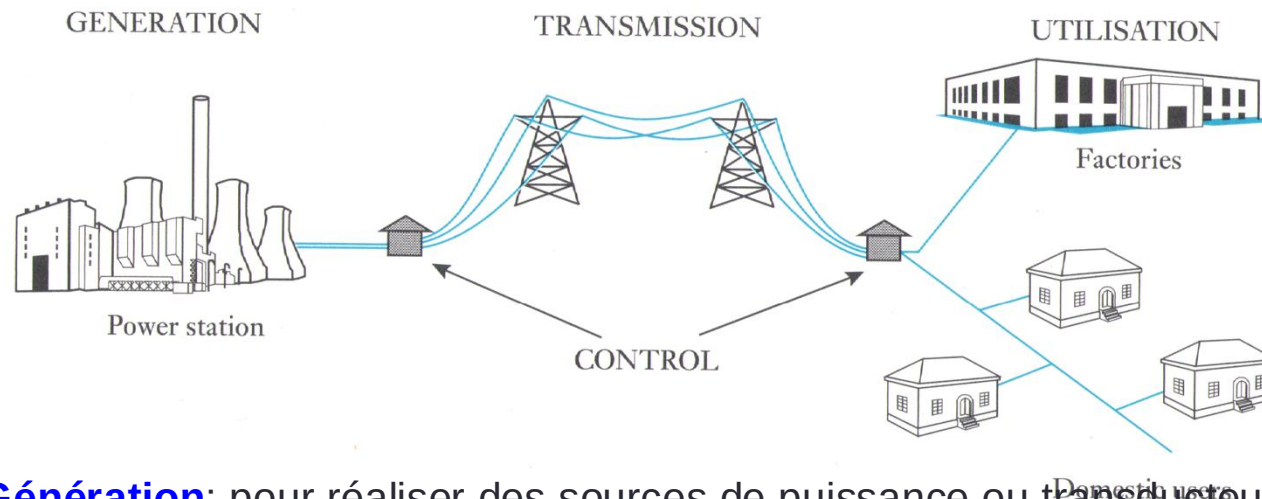
Système Calculateur

PUCE (CHIP)
Système électronique intégré



POUR CONCLURE

Les systèmes électriques et électroniques sont impliqués aux différents niveaux dans la gestion de l'énergie électrique et de l'information stockée, transmise, générée en forme électrique.



Génération: pour réaliser des sources de puissance ou transducteurs

Transmission: de l'énergie ou de l'information sous forme de signaux électriques

Contrôle et élaboration: interrupteurs, variation de la puissance, élaboration complexe de l'information

Utilisation: transformation de l'énergie électrique en formes de nature différente et transformation de l'info en forme électronique dans une forme utilisable (visuelle ou sonore)

Stockage: stocker l'énergie sous forme électrique ou autre. Mémoriser l'information sous forme électronique ou autre (bande magnétique)