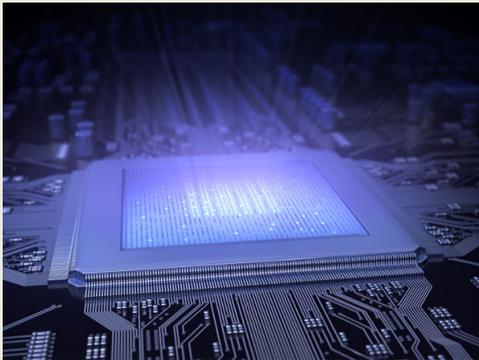


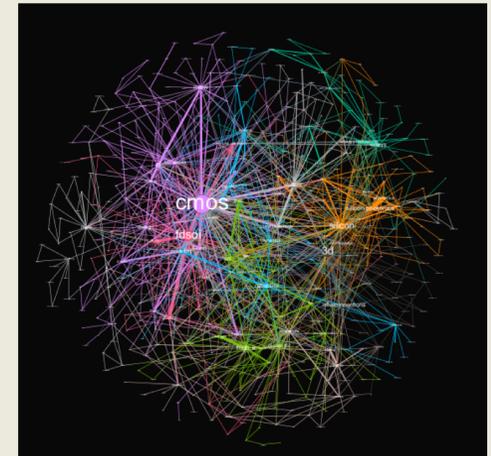
Conférence-débat

Le développement de la nanoélectronique : genèse technique et collectif proto-épistémique



Benjamin CABANES,
Enseignant-chercheur, *MINES ParisTech*

le 20 novembre 2018
18h00-20h30
MINES ParisTech, (V115)



Organisateurs:

Chaire Théorie et Méthodes de la Conception Innovante (MINES ParisTech, CGS),
Laboratoire de recherches sur les sciences de la matière (CEA)

Entrée libre dans la limite des places disponibles-

Inscription : stephanie.brunet@mines-paristech.fr (avant le 16 novembre 2018).

Introduction à l'histoire de la nanoélectronique



Invention du transistor le 23 décembre 1947
par trois chercheurs des Bell Labs



John Bardeen, William Shockley & Walter Brattain, prix Nobel de physique en 1956

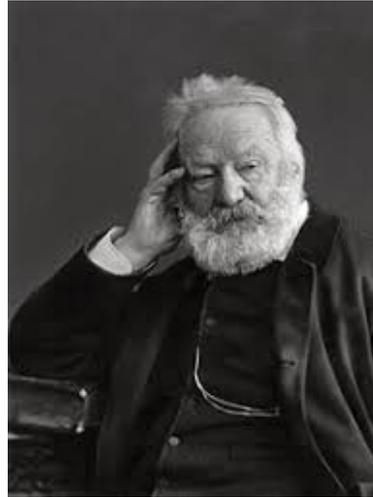
Introduction à l'histoire de la nanoélectronique



Alessandro Volta
(1745-1827)



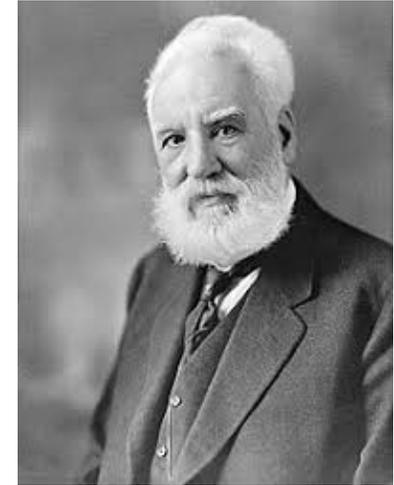
Napoléon Ier
(1769-1821)



Victor Hugo
(1802-1885)



Alexandre Dumas, Fils
(1824-1895)



Alexander Graham Bell
(1847-1922)

- Invention de la pile électrique en 1800 par Volta
- Création du Prix Volta par Napoléon Ier en 1801 en l'honneur de Volta
- Alexander Graham récipiendaire du Prix Volta en 1880 pour l'invention du téléphone (1876) - parmi les membres du jury: Hugo et Dumas
- Bell crée son laboratoire avec la dotation du prix Volta (50 000 francs) →

Volta Laboratory

Introduction à l'histoire de la nanoélectronique

Ordre de grandeur (mesure, taille)

Micromètre → 10^{-6} mètre
(cheveux: 50 à 100 μm)

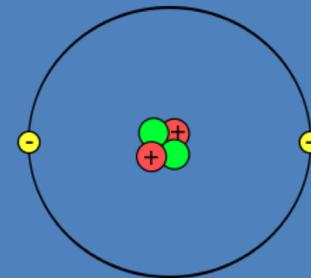
Nanomètre → 10^{-9} mètre
(virus: 20 à 300 nm)

1000 plus petit que le diamètre d'un cheveux

Discipline scientifique

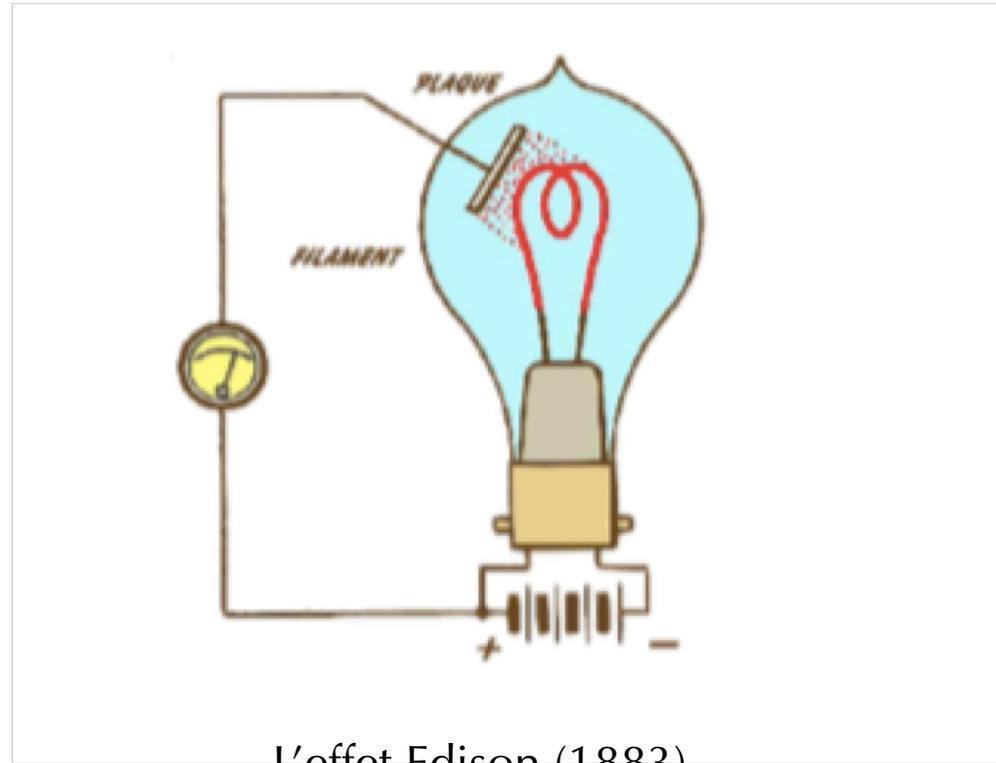
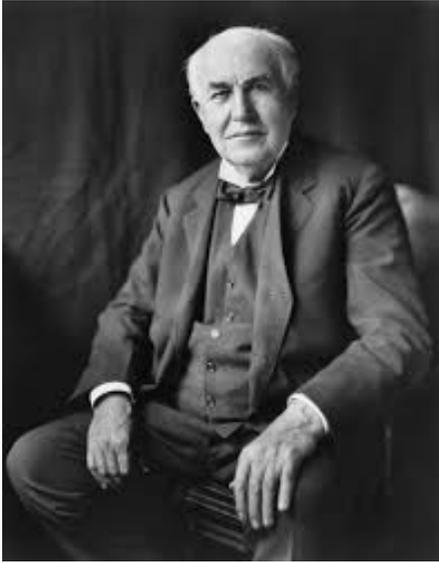
« *Science étudiant les électrons* » (TLFI)

« *Branche de la physique appliquée* »



De l'histoire de la nanoélectronique aux histoires de la nanoélectronique

Edison (1847-1931) et les émissions thermoïoniques



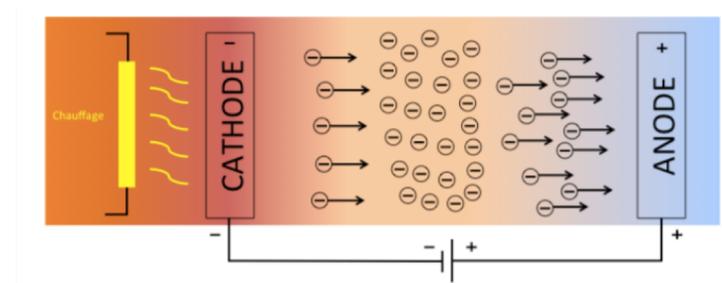
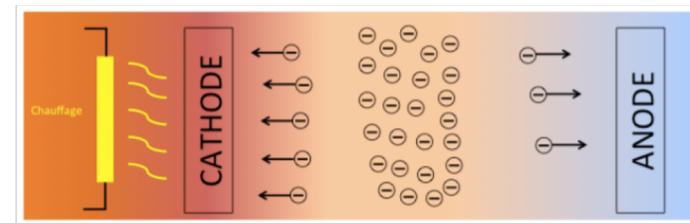
L'effet Edison (1883)

John Fleming (1847-1931) & l'invention de la diode (tube électronique)



En 1904, Fleming invente et brevète la première diode

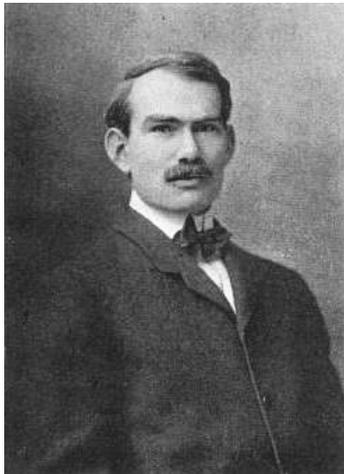
- Redresser un courant alternatif (alternatif → continu)
- Détecter les ondes radio



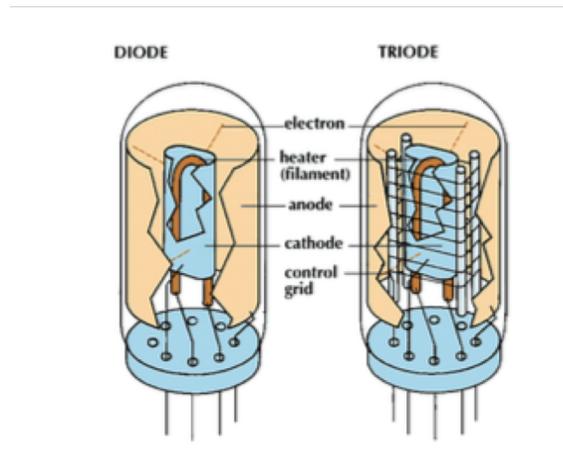
La découverte de l'électron par Joseph Thomson (1856-1940) & L'invention de la triode par Lee de Forest (1873-1961)



Découverte de l'électron, prix Nobel en 1906



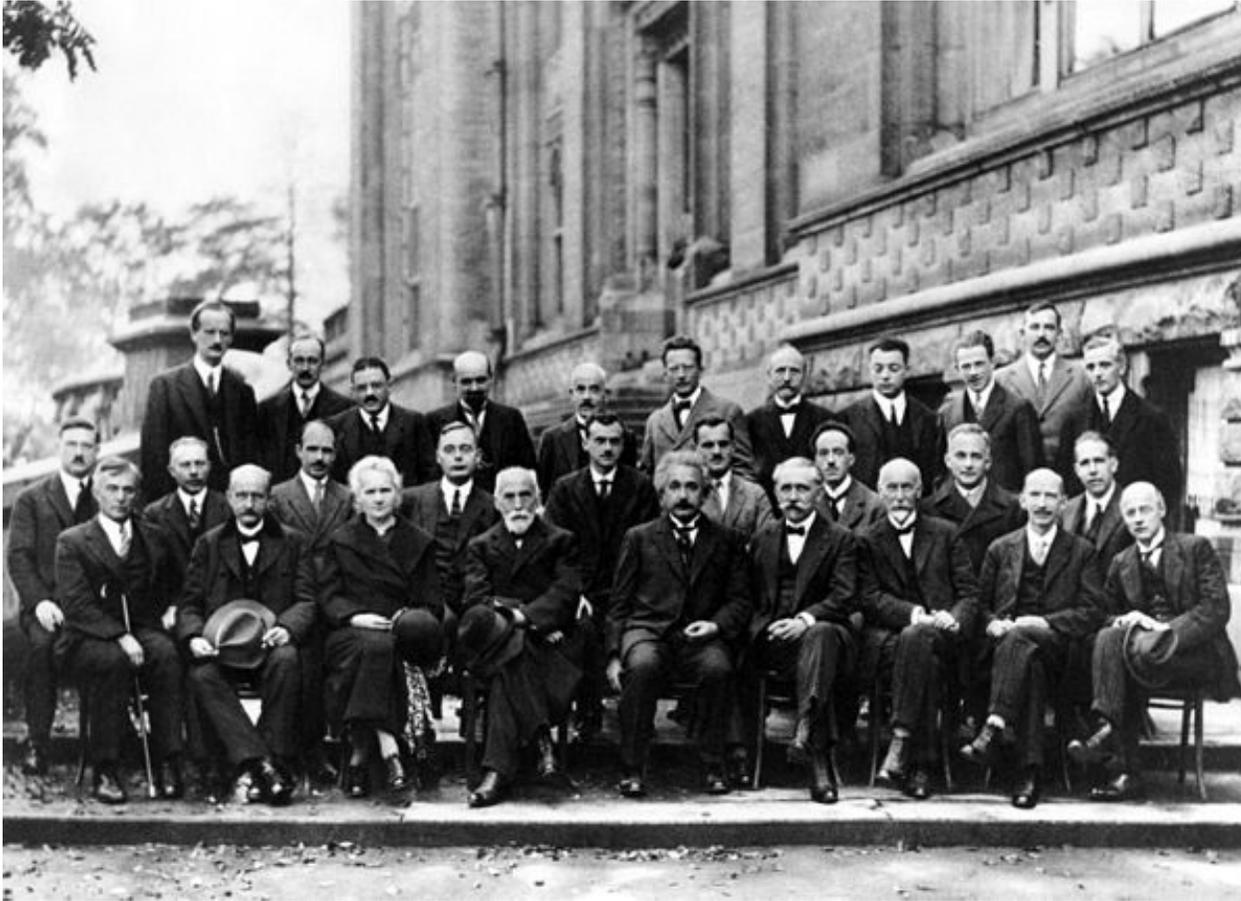
Invention de la triode en 1907



Une grille pour contrôler le courant par la tension de la grille

- Contrôler et doser les puissances d'émission de radio
- Récupérer les messages sonores (radio, télévision, radar, ordinateur)

5^e Congrès de Solvay tenu en 1927 sur le thème « Électrons et photons ».



17 prix Nobel de physique

1. **Niels Bohr** : modèle atomique où les couches électroniques sont quantifiées (modèle de Bohr)
2. **Louis de Broglie** : hypothèse, vérifiée, de la dualité onde-corpuscule de l'électron
3. **Arthur Compton** : diffusion inélastique d'un photon sur un électron d'un atome (diffusion Compton)
4. **Paul Dirac** : équation de Dirac, qui décrit le comportement de particules élémentaires de spins demi-entiers, comme les électrons
5. **Albert Einstein** : explication de l'effet photoélectrique, une émission d'électrons sous l'influence de la lumière
6. **Charles-Eugène Guye** : expériences qui démontrent la dépendance de la masse de l'électron à sa vitesse
7. **Wolfgang Pauli** : principe d'exclusion de Pauli (les électrons ne peuvent pas se trouver au même endroit dans le même état quantique)
8. **Erwin Schrödinger** : équation de Schrödinger, qui décrit l'évolution dans le temps d'une particule massive non relativiste, tel l'électron
9. **Charles Thomson Rees Wilson** : chambre à brouillard, qui permet d'étudier différentes propriétés des particules, tels les électrons

Sciences des matériaux & semi-conducteurs

- Faraday (1791-1867) → mise en évidence des matériaux semi-conducteurs (ni isolant, ni métaux)
- Becquerel (1852-1908) → tension produite par un éclairage de la surface d'une électrode dans un électrolyte
- Braun (1850-1918) → contact entre certains matériaux pouvaient redresser la tension
- Hertz (1857-1894) → existence d'ondes radioélectriques dans les semi-conducteurs
- Wilson (1906-1995) → modèle de mécanique quantique du solide semi-conducteur
- Schottky (1886-1976) → premiers modèles théoriques expliquant le redressement de tension dans un matériau semi-conducteur

Retour aux Bell Labs



Mervin Kelly (1895-1971)

- 1918-1925: Researcher, Western Electric Company
- 1926-1936: Researcher, Bell Labs
- 1936–1944 : Director of Research at Bell Labs
- **1936: recrute Shockley (Vacuum Tube Department)**
- **1939: Shockley devient responsable des projets de recherche sur les semi-conducteurs**
- **1945: création du Solid State Physics Department (dirigé par Shockley)**
- **1945: recrutement de Brattain & Bardeen**
- 1944–1951 : Executive Vice-President, Bell Labs
- 1951–1959 : President, Bell Labs

- 1939-1945 : plus de 2000 projets de recherche aux Bell Labs
- 1949-1959: 600 millions de dollars (Gouv USA), 50% du budget total des Bell Labs

Dispositif de commutation à l'aide de matériaux semi-conducteurs

Remplacer les triodes par des dispositifs à l'état solide

Concept proto-épistémique

Emergence d'un champ d'expertise à partir de deux domaines distincts

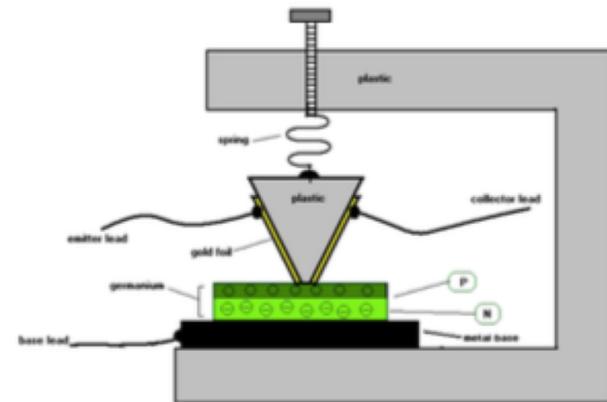
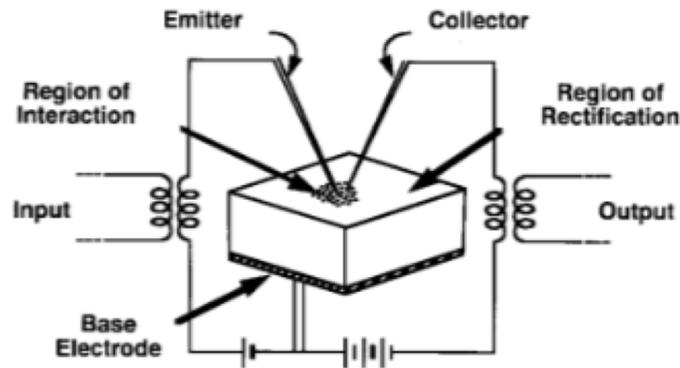
Retour aux Bell Labs



John Bardeen, William Shockley & Walter Brattain

1945: premier prototype amplificateur à semi-conducteur par Shockley
« a small cylinder coated thinly with silicon, mounted close to a small, metal plate »

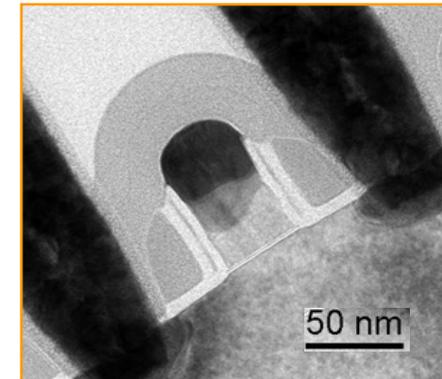
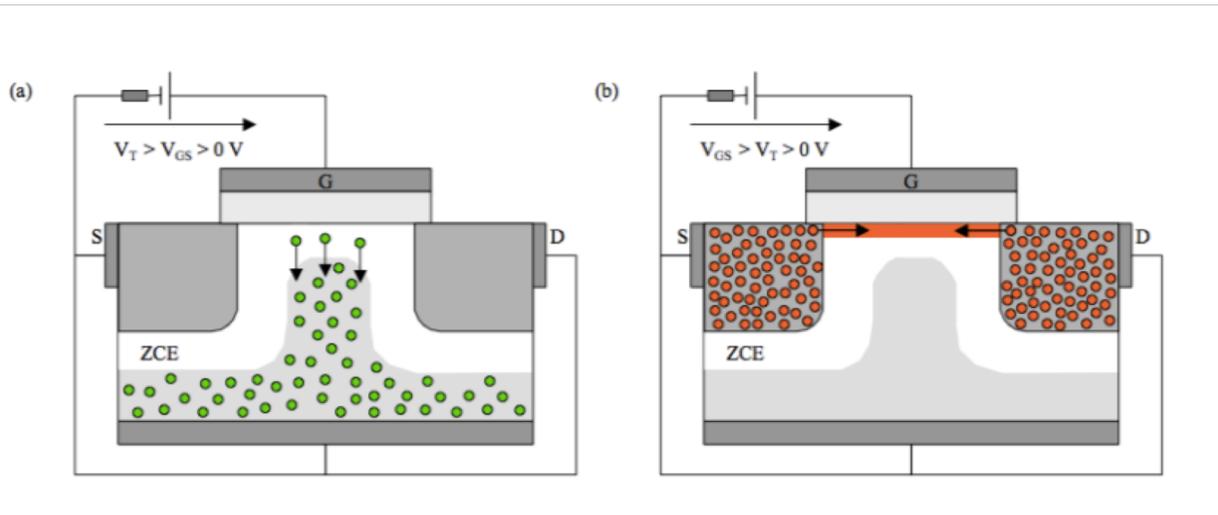
23 décembre 1947:
petit courant positif appliqué à l'un des deux contacts avait une influence sur la valeur du courant qui se propageait dans l'autre contact et dans le substrat de germanium.



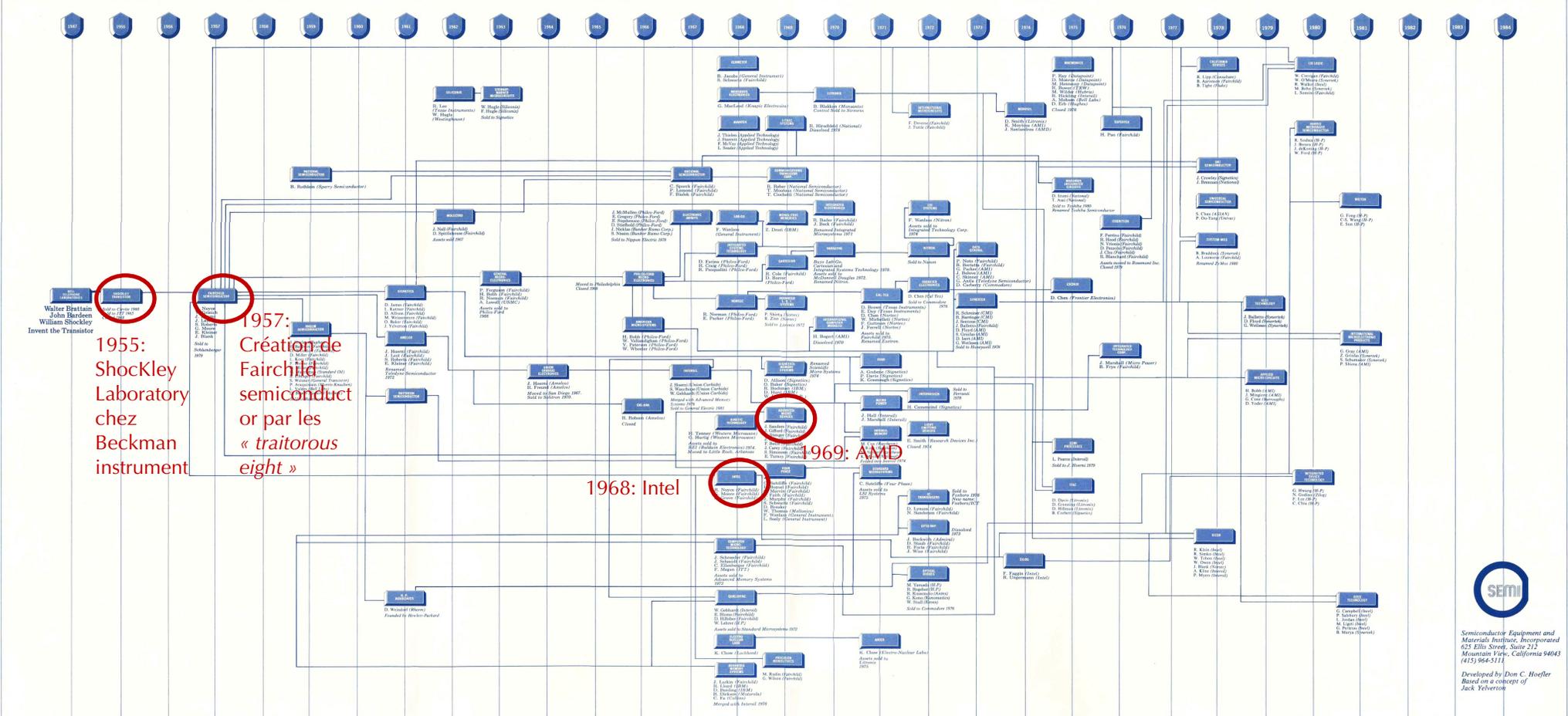
Possible d'amplifier un courant par l'intermédiaire d'un composant solide

Différents types de transistors

- 1949: Théorie des jonctions P-N par Shockley
- 1951: Transistor à jonction (transistor bipolaire) par Shocley
- 1952: Transistor à effet de champ par Shockley
- 1959: Premier circuit intégré par Jack Kilby chez Texas Instruments (prix Nobel de physique en 2000)
- **1960: Transistor MOS par Atalla & Khang aux Bell Labs**

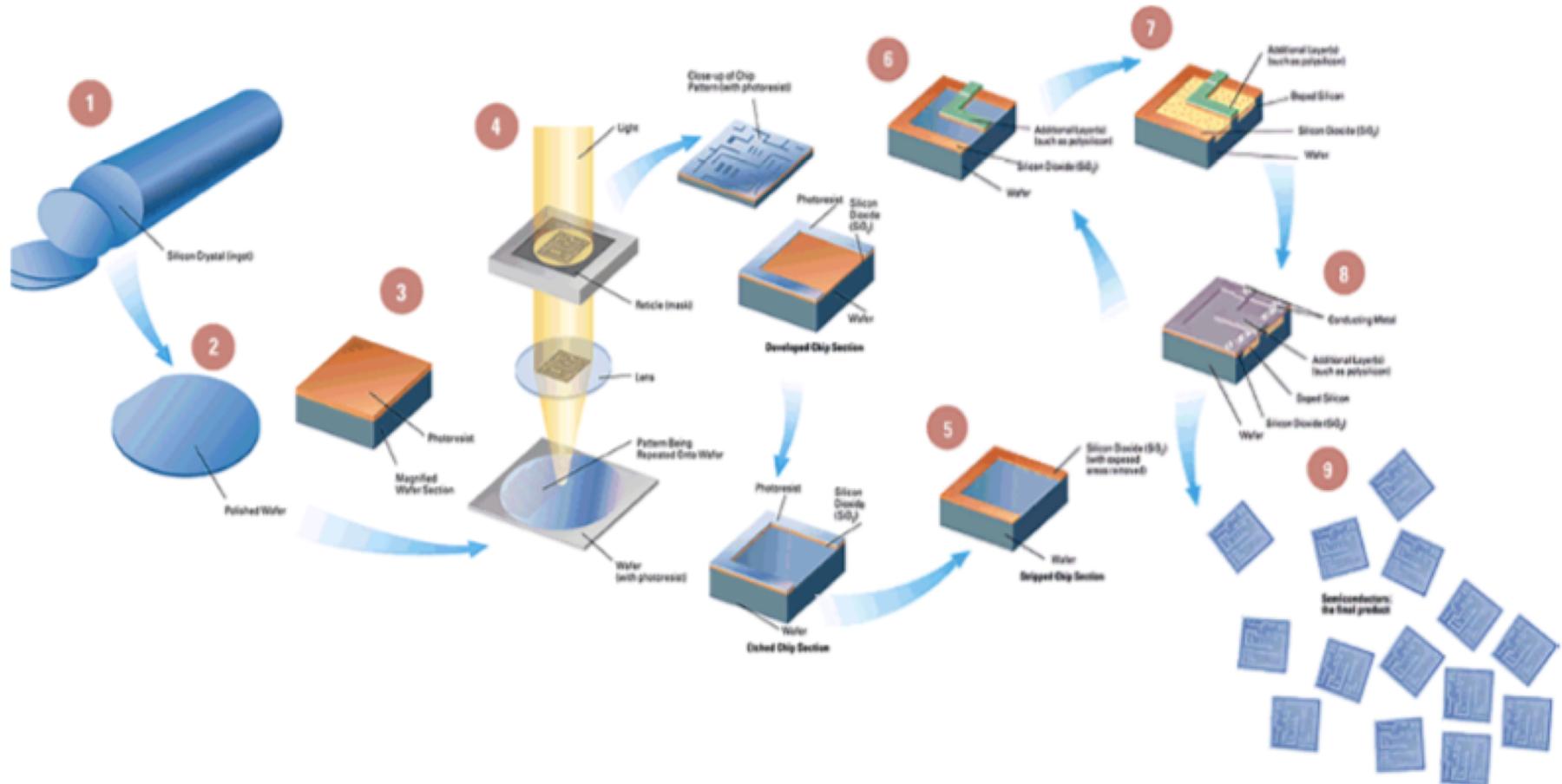


L'industrie des semi-conducteurs

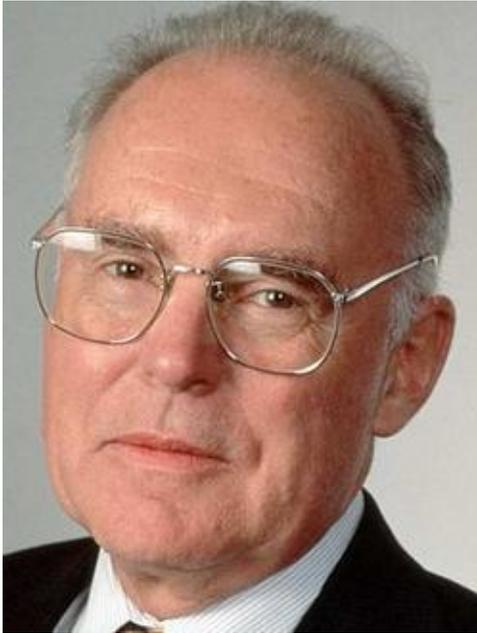


SEMI
Semiconductor Equipment and Materials Institute, Incorporated
625 Ellis Street, Suite 212
Mountain View, California 94043
(415) 964-5111
Developed by Don C. Hoefler
Based on a concept of Jack Yelverton

Processus de fabrication

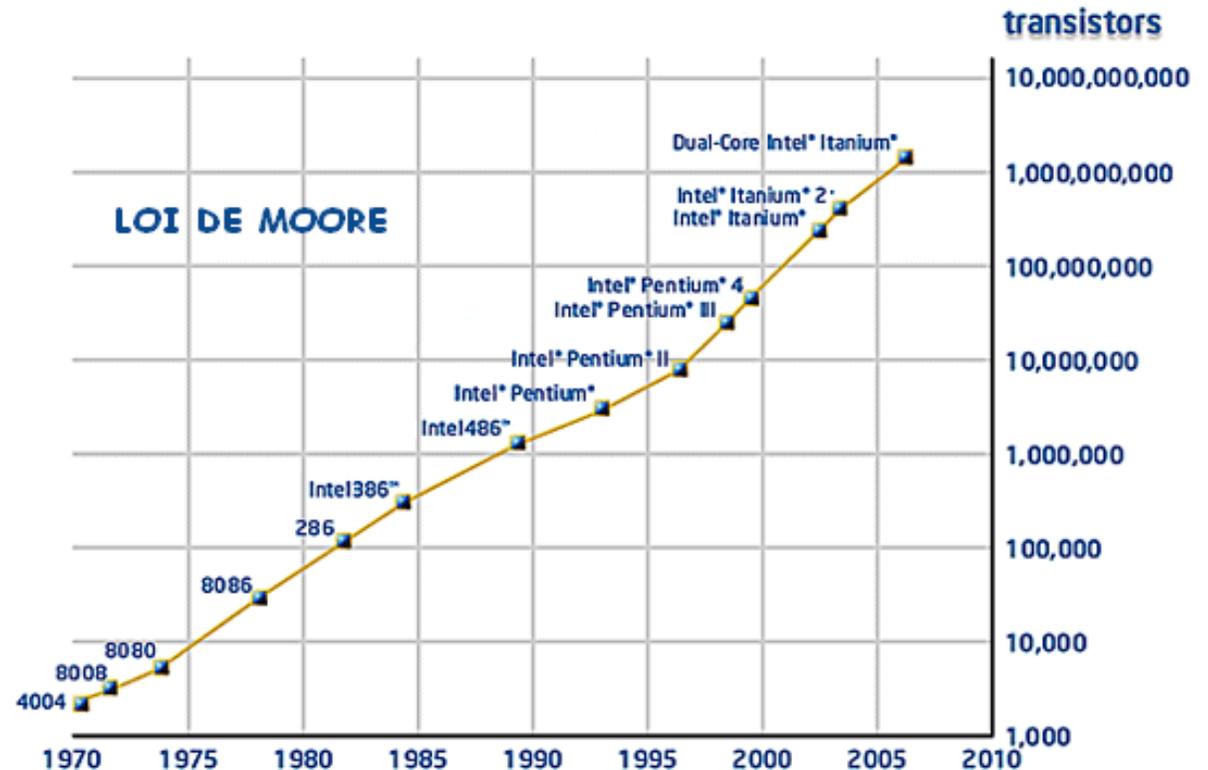


La loi de Moore

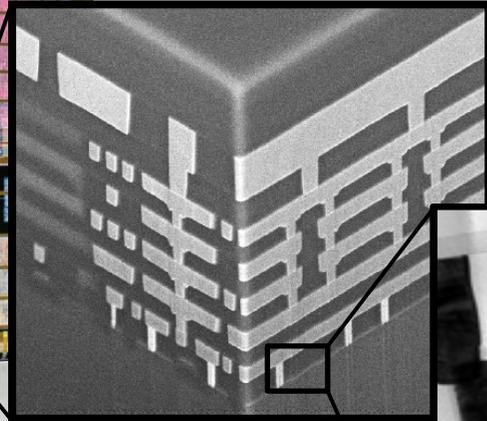
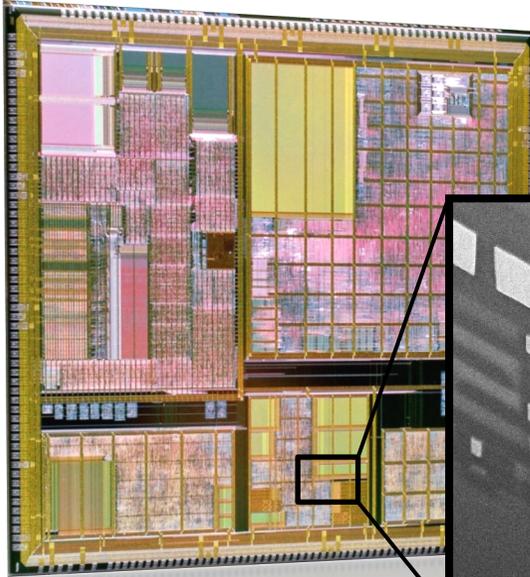


Gordon Moore,
co-fondateur d'Intel en
1968

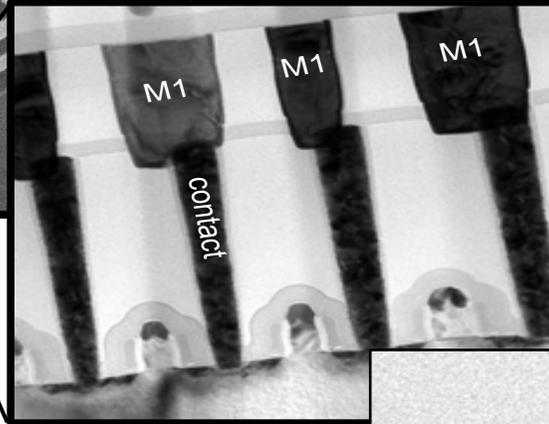
- Doublement du nombre de transistors sur un circuit intégré tous les deux ans
- Réduction des dimensions des dispositifs:
amélioration des performances et réduction du coût unitaire



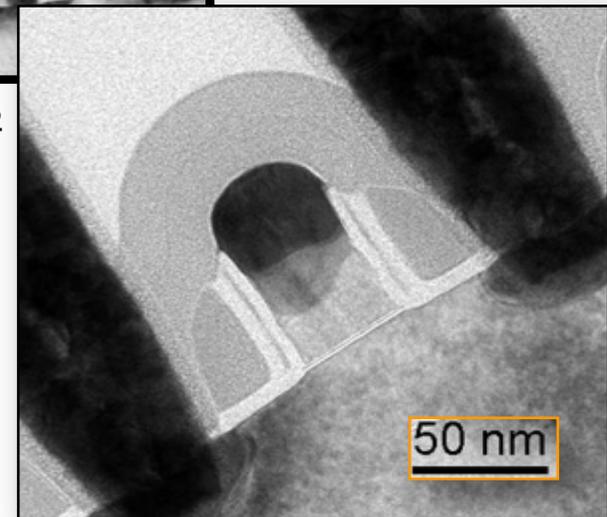
« *happy scaling* »



4x4 μm^2



500x500 nm^2



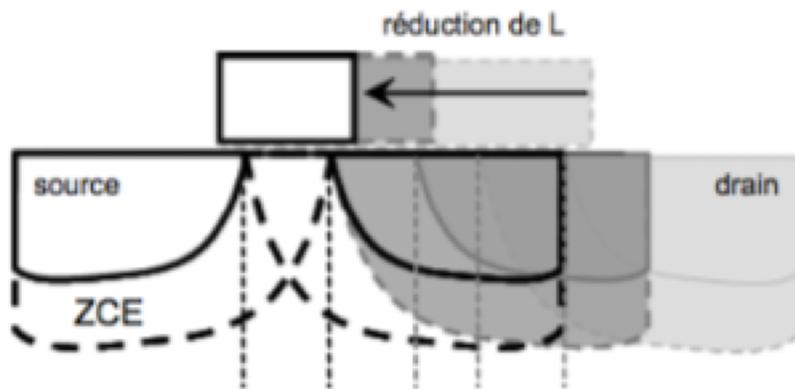
50 nm

Les limites du « *happy scaling* »

Fin année 90 → transistor inférieur à 100 nm

Limites physiques liées à la réduction des dimensions des transistors

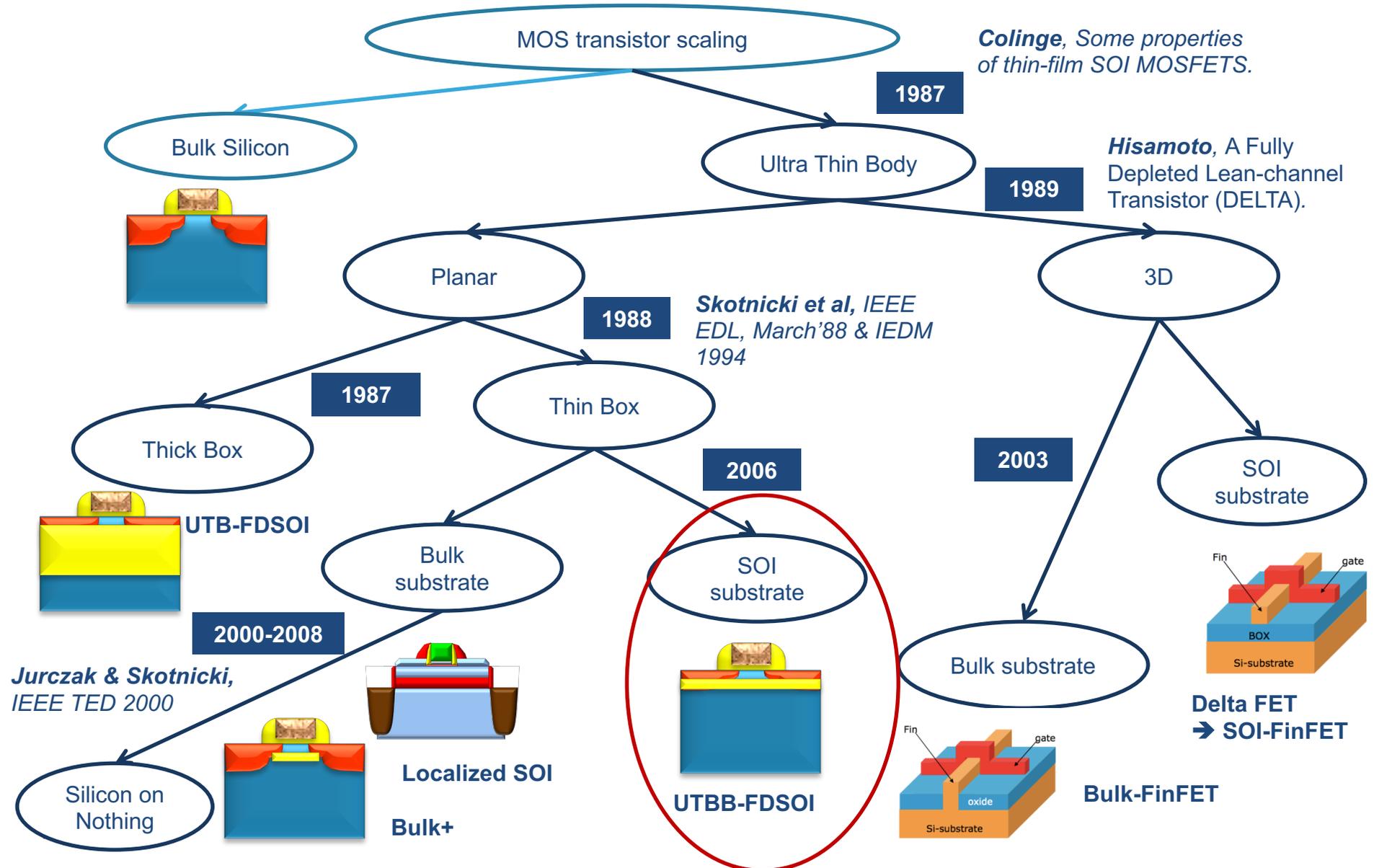
Il faut concevoir une alternative aux transistors existants



- Effet canaux courts
- Résistances en série
- Courants de fuite de grille
- Déplétion de grille

→ Il faut repenser l'architecture du transistor

Stratégie de conception chez STMicroelectronics



Stratégie de conception chez STMicroelectronics

- Concept proto-épistémique → ni produit, ni marché, ni discipline scientifique
- Exploration d'une variété de concepts différents
- Mise en évidence des relations d'interdépendances entre plusieurs domaines d'expertise
- Stratégie pilotée par les experts scientifiques et techniques de l'entreprise en collaboration avec des centres de recherche (CEA, IMEP)
- Le top management n'est pas prescripteur de la stratégie de recherche

Quel modèle de gouvernance?

Différents régimes d'émergence d'expertise

Recherche industrielle

[Little, 1913; Mees, 1920]

Modèle de coordination: Laboratoires industriels

[Little, 1913; Mees, 1920]

GRH: Double échelle *[Shepard, 1956, 1958]*

Amélioration/ accroissement des connaissances dans des domaines d'expertise existants & identifiés

Gestion de projet / NPD

[Midler, 1996; Garel, 2003; Cooper et al., 1995]

Modèle de coordination: Gestion de projet

[Midler, 1996; Garel, 2003]

GRH: Triple échelle *[Hall, 1985]*

Renouvellement des domaines d'expertise existants à partir d'une stratégie de développement de nouveau produit

Open Innovation / Absorptivité

[Chesbrough, 2003; Cohen & Levinthal, 1990]

Modèle de coordination: Plateformes technologiques *[Baldwin & Clark, 1997, 2000]*

GRH: Open Dual Ladder *[Bigliardi et al., 2011]*

Absorption d'expertises externes à l'entreprise

Rôle et reconnaissance de l'expert chez ST

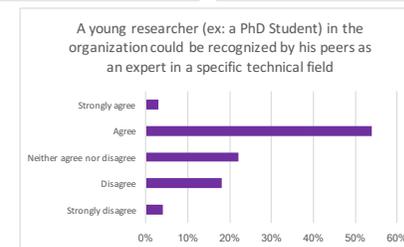
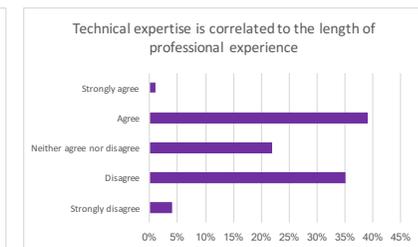
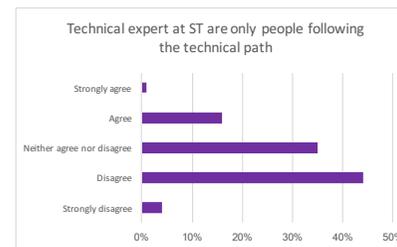
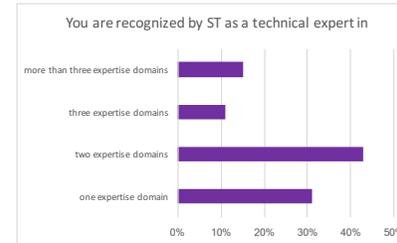
- Questionnaires
- Entretiens semi-directifs

1. Corrélation statut d'expert & durée d'expérience

2. Reconnaissance de l'expert selon un domaine d'expertise

3. L'action collective des experts → au sein des métiers

4. Pas de collaborations entre les experts de différents domaines d'expertise



Rôle et reconnaissance de l'expert chez ST

- Questionnaires
- Entretiens semi-directifs

1. Corrélation statut d'expert & durée d'expérience

2. Reconnaissance de l'expert selon un domaine d'expertise

3. L'action collective des experts → au sein des métiers

4. Pas de collaborations entre les experts de différents domaines d'expertise

1. **Pas de corrélation** statut d'expert & durée d'expérience

2. Reconnaissance de l'expert selon **plusieurs domaines d'expertise**

3. L'action collective des experts **n'est pas circonscrite** aux collectifs de métier

4. **Collaborations** entre les experts de différents domaines d'expertise

Experts & domaines d'expertise chez ST



Experts & domaines d'expertise chez ST



Experts & domaines d'expertise chez ST



L'émergence de la **photonique sur silicium** chez STMicroelectronics

+16 thèses CIFRE depuis 2009



Emergence d'un nouveau domaine d'expertise à partir de domaines d'expertise existants

Champ d'innovation orienté structure d'expertise

Pas de stratégie produit / pas d'absorption d'expertise externe

Restructuration des domaines d'expertise existants → pervasivité de l'expertise

~~Recherche industrielle~~

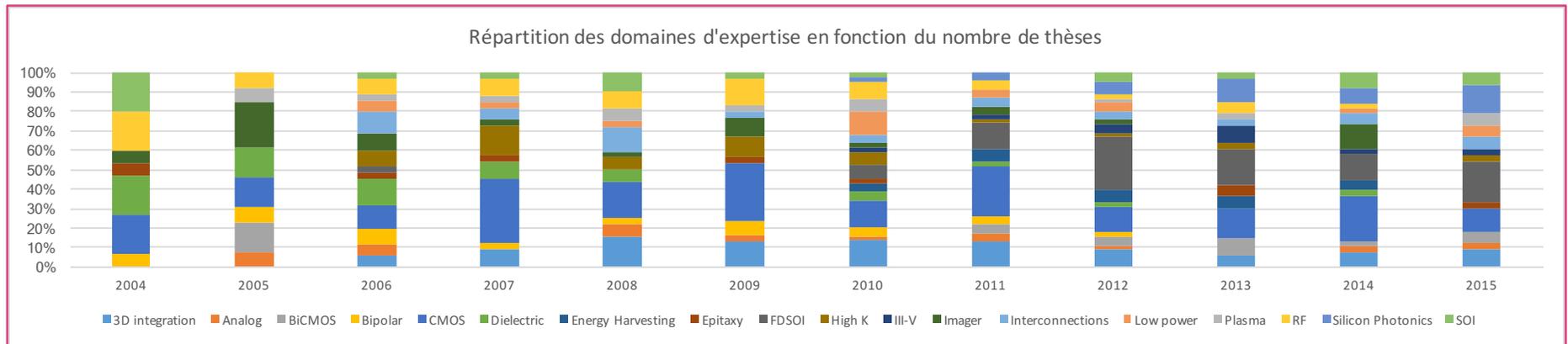
~~Gestion de projet / NPD~~

~~Open innovation / absorptivité~~

Le Rythme de l'émergence de l'expertise

Phénomène **rare & singulier** ou **régulier & systématique**?

+ de 640 thèses CIFRE sur une période de 12 ans



Emergence de nouveaux domaines d'expertise: **Régulière & Systématique**

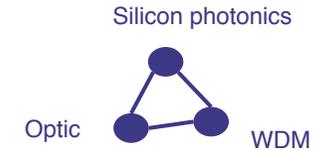
Comment se structure les expertises?

Quelle est la dynamique de l'évolution des structures d'expertise?

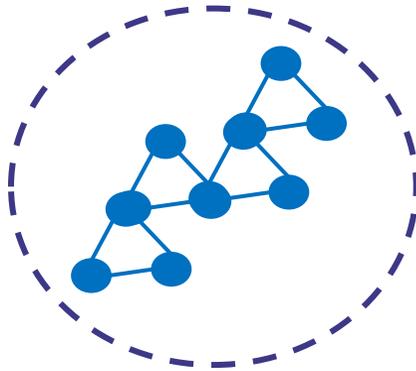
Dynamique de l'évolution des structures d'expertise

Sujet de thèse	Caractéristique expertise 1	Caractéristique expertise 2	Caractéristique expertise 3
Silicon photonics to WDM optical link	Silicon photonics	Optic	WDM

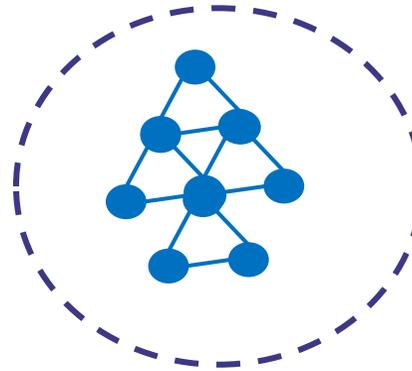
Codage d'une Thèse



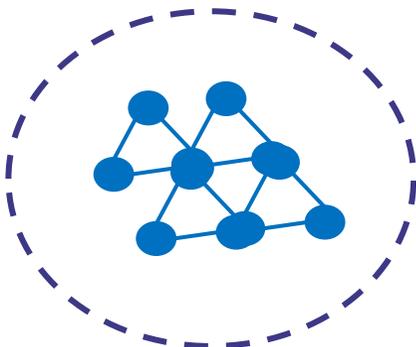
Domaine d'expertise 1



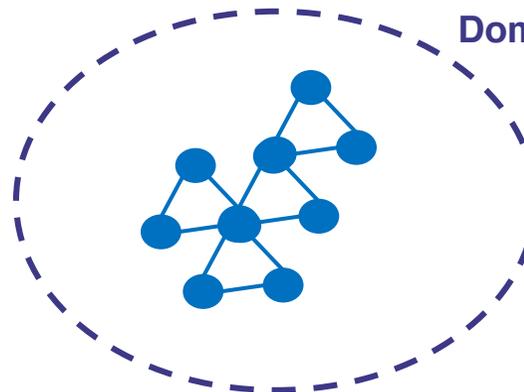
Domaine d'expertise 2



Domaine d'expertise 3



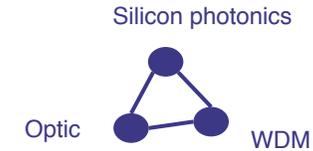
Domaine d'expertise 4



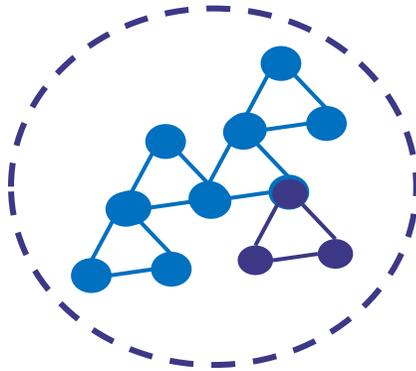
Dynamique de l'évolution des structures d'expertise

Sujet de thèse	Caractéristique expertise 1	Caractéristique expertise 2	Caractéristique expertise 3
Silicon photonics to WDM optical link	Silicon photonics	Optic	WDM

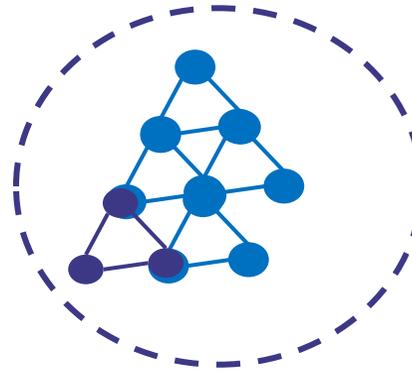
Codage d'une Thèse



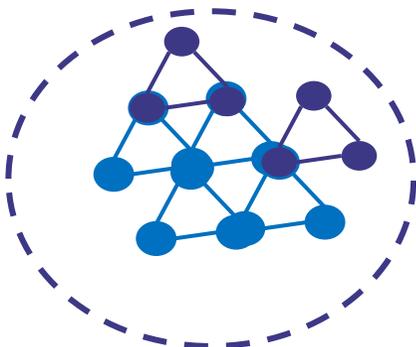
Domaine d'expertise 1



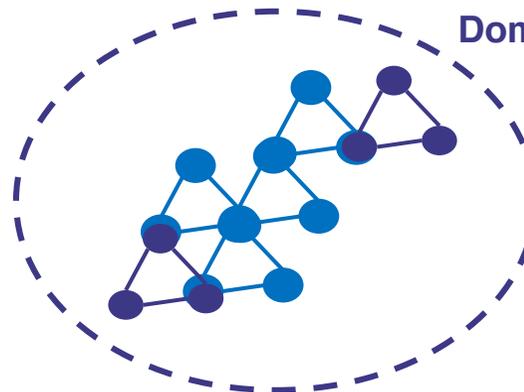
Domaine d'expertise 2



Domaine d'expertise 3

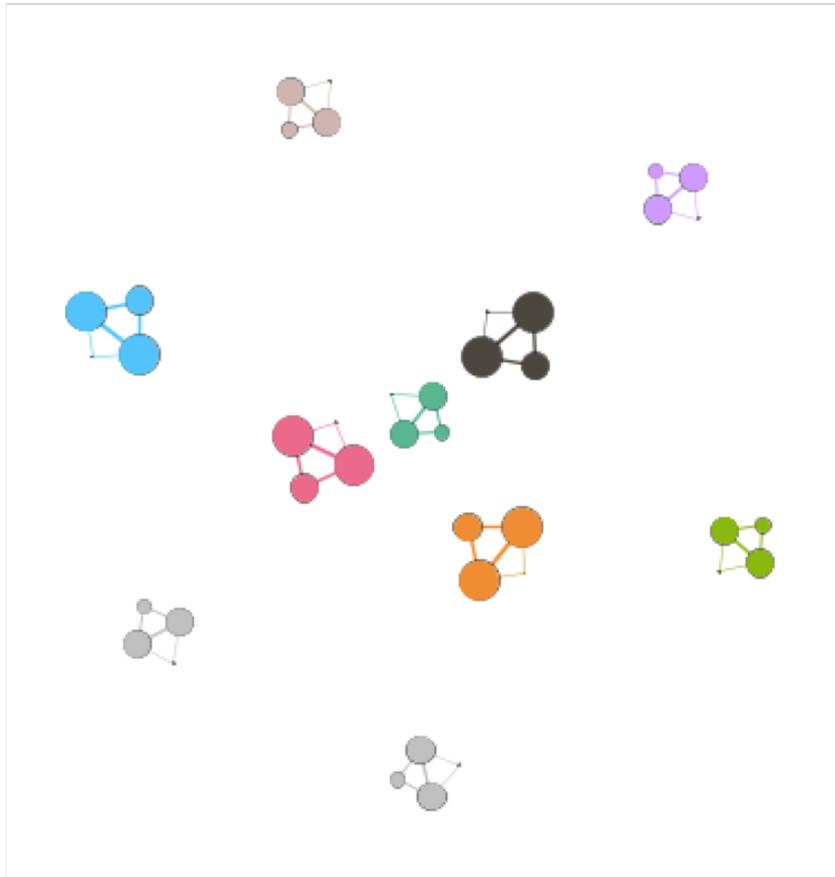


Domaine d'expertise 4



Dynamique de l'évolution des structures d'expertise

Théories standards de l'émergence d'expertise
(simulation)



$D_0=2004$
Thèse₀= 34

Dynamique de l'évolution des structures d'expertise

Théories standards de l'émergence d'expertise
(simulation)



$D_4 = D_3 + 2008$
 $Thèse_4 = Thèse_3 + 52$

Dynamique de l'évolution des structures d'expertise

Théories standards de l'émergence d'expertise
(simulation)



$D_8 = D_7 + 2012$
 $\text{Thèse}_8 = \text{Thèse}_7 + 63$

Dynamique de l'évolution des structures d'expertise

Théories standards de l'émergence d'expertise
(simulation)



$D_{11}=D_{10}+2015$
 $\text{Thèse}_{11}=\text{Thèse}_{10}+49$

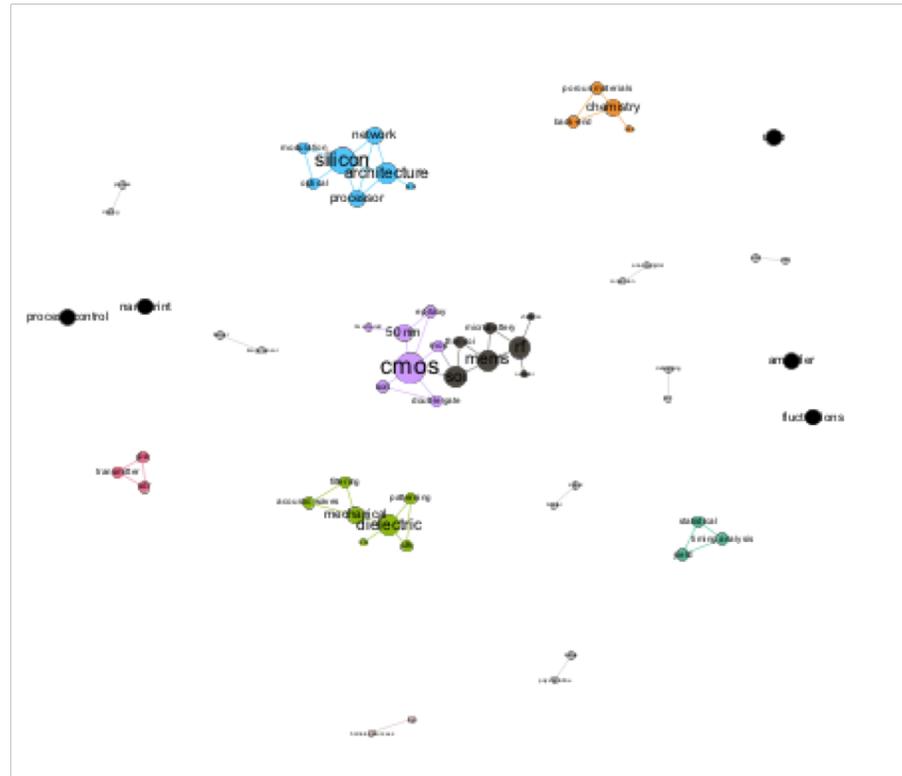
Dynamique de l'évolution des structures d'expertise

Théories standards de l'émergence d'expertise
(simulation)



$D_{11}=D_{10}+2015$
Thèse₁₁= Thèse₁₀+49

Analyse empirique chez STMicroelectronics



$D_0=2004$
Thèse₀= 34

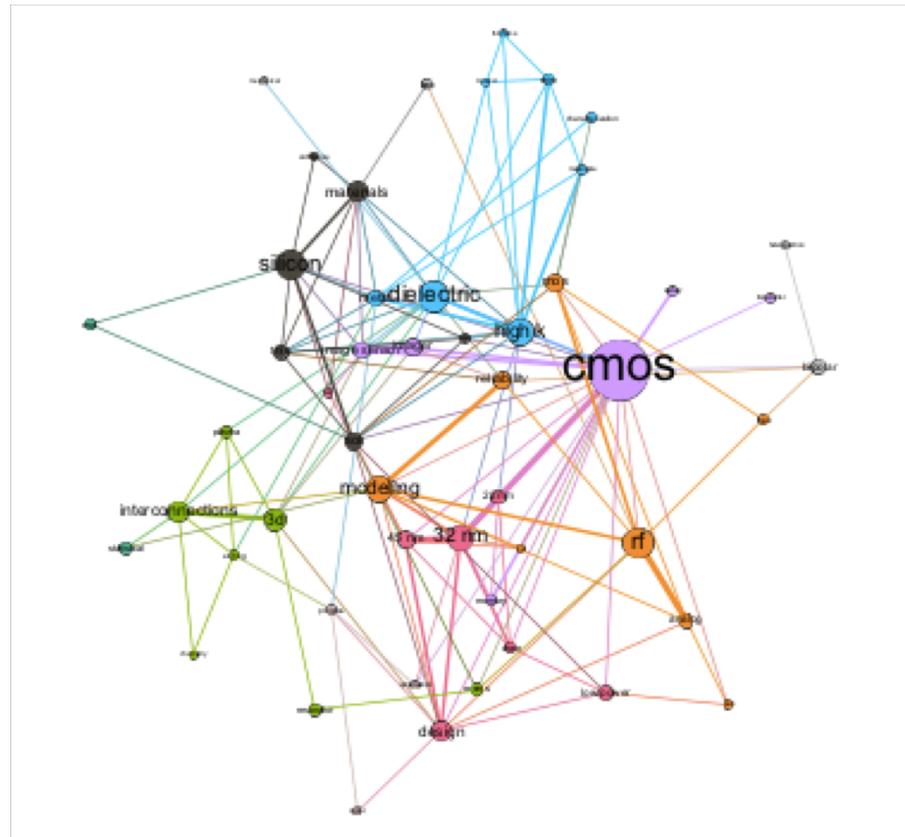
Dynamique de l'évolution des structures d'expertise

Théories standards de l'émergence d'expertise
(simulation)



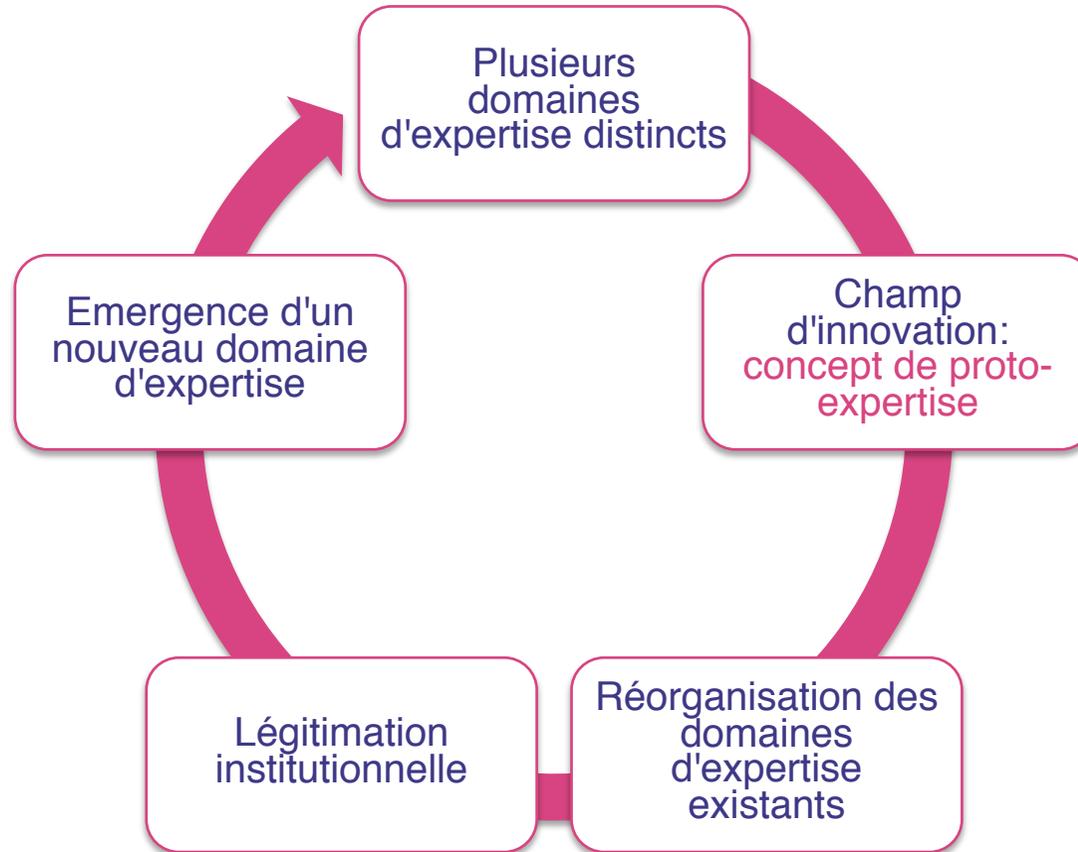
$D_{11}=D_{10}+2015$
Thèse₁₁= Thèse₁₀+49

Analyse empirique chez STMicroelectronics



$D_4=D_3+2008$
Thèse₄= Thèse₃+52

Nouveaux enjeux managériaux



Dynamique endogène de l'émergence de l'expertise

Phénomène régulier & systématique → **Quel modèle de gouvernance?**

Organiser l'émergence d'expertise par les communautés de savoir

Modèle organisationnel pour la création d'expertise



Communautés de savoir

Coordination différent du marché & de la hiérarchie

[Adler, 2001; Cohendet, 2003]

- **Communautés de pratique** → « des groupes d'individus qui partagent un enjeu ou une passion pour quelque chose qu'ils font et apprennent à mieux faire en interagissant régulièrement » [Lave et Wenger, 1991]
- **Communauté épistémique** → « un groupe d'individus partageant un objectif cognitif commun de création de connaissance et une structure commune permettant une compréhension partagée » [Cohendet et al., 2003]

Des communautés au sociétés proto-épistémiques

Communauté épistémique d'experts

- Création & accumulation de connaissances dans un champ d'expertise considéré
- Commun indentifiable & stable
- L'unité des membres existe *a priori*
- Règles sociales propres à la communauté (codebook)
- Normes communément acceptées (autorité procédurale)

Société proto- épistémique d'experts

- Emergence de proto-expertises & Réorganisation des structures d'expertises
- Commun inconnu & à concevoir
- Pas d'unité existante *a priori*
- Coopération entre différentes communautés
- Contrat antérieur débattu (entre les experts et les différentes parties prenantes)

Le Technical Staff College chez ST

Technical Staff College
STMicroelectronics



Mise en place d'une *société proto-épistémique* chez STMicroelectronics

Organisation

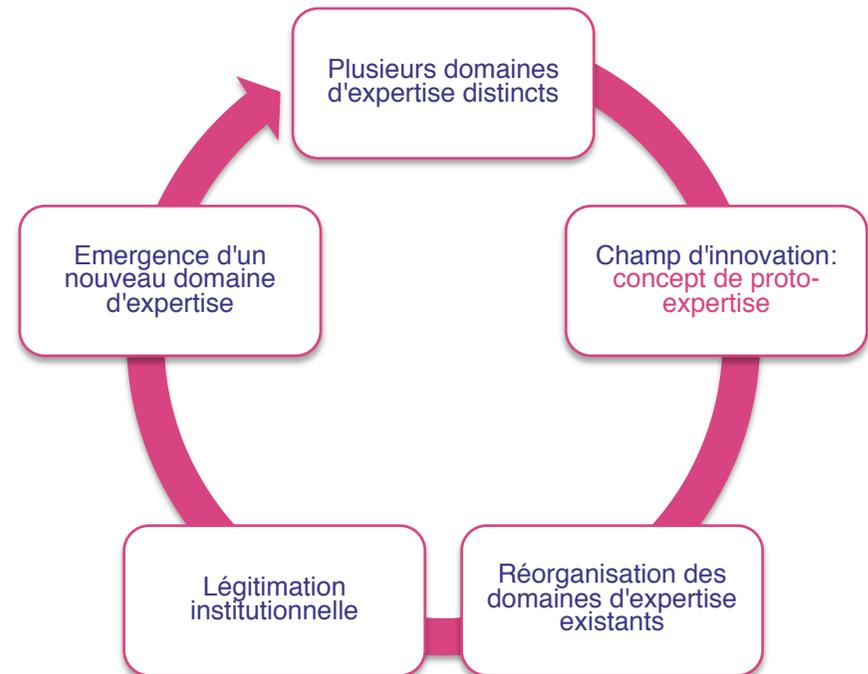
Missions

Composé de trois entités:

- **Board of Fellows:** direction collégiale par les experts seniors
- **Réseau des experts:** l'ensemble des experts
- **Advisory board:** parties prenantes (RH, innovation, manager, formation, etc.)

Aujourd'hui à ST → 6 projets de création de proto-expertise

Création d'un *F@ST.lab* → espace dédié à l'exploration de champs d'expertise



Le Technical Staff College chez ST

Incremental innovation development

→ Technical Benchmarks & Competition Analysis

- Conducting technological benchmarks and evaluating the performance of competing technologies
- Mapping the strategic expertise needs
- Securing intellectual property by filing patents

→ Knowledge Management & Best Practices

- Developing methods and procedures to improve knowledge management in the organization

Radical innovation development

→ Technical Vision & Prospective

- Providing prospective and strategic analysis about disruptive technologies
- Exploring new applications and possible uses from mastered technologies
- Anticipating and identifying technological challenges of the future

→ Disruptive Innovation Exploration

- Creating new expertise and competencies in order to generate new concepts & rules systems
- Supporting disruptive initiatives that could initiate new expertise and new pertinent concepts

Support

→ University & Laboratory Collaboration

- Developing expertise and network by participating in conferences and by developing projects and partnerships with laboratories, universities (ex: courses, ANR project, PhD, European project, etc.)

→ Technical Workshop & Training

- Transferring and disseminating knowledge through workshops and trainings (ex: Techday)

→ Technical Staff valorization & HR relation

- Coordinating the relationship between the different communities of technical experts
- Promoting the technical ladder in the organization

Processus d'institutionnalisation du TSC

Charte des experts

- Experts
- Manager (N+1 & N+2)
- DRH

« Members of Technical Staff provide sustainable expertise and competencies for STMicroelectronics business needs »

« Members of Technical Staff contribute to generate new expertise and competencies for disruptive innovation »

« Members of Technical Staff are committed to the management of the Technical Staff College »

Matrice d'évaluation des experts (double échelle)

Fellow (expert sénior)

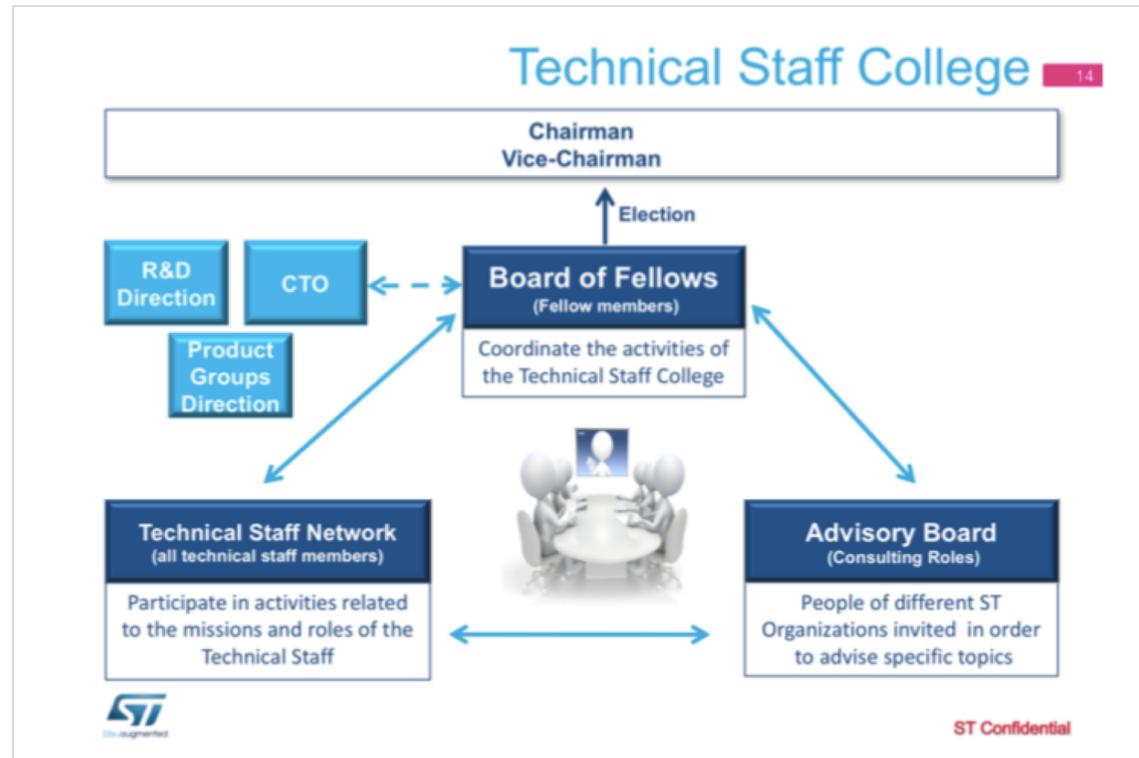
« Manage the missions and the activities of the Technical Staff College. Lead the development of the Technical Staff College and the Technical Staff Offices (as chairman, vice-chairman for example) »

Member of Technical Staff (expert)

« Contribute to the activities proposed by the Technical Staff College and the Technical Staff Offices »

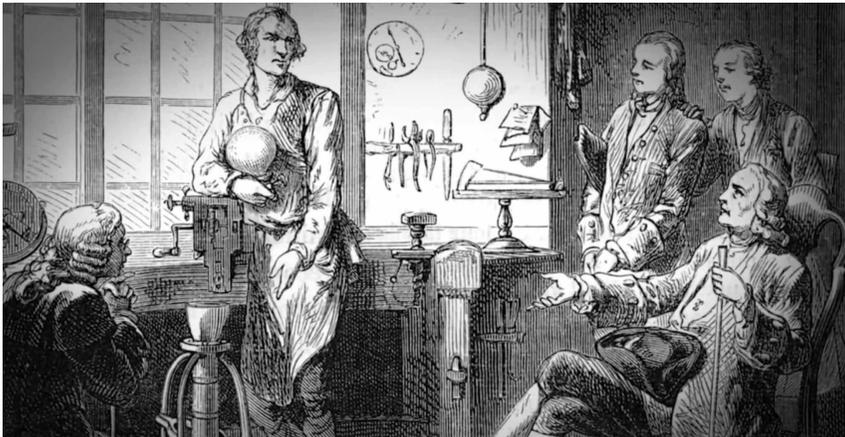
Une société proto-épistémique dans l'organisation

- Gouvernance de l'expertise vs. Gouvernance de l'entreprise
- Stratégie technologique vs. Stratégie de l'entreprise
- Société proto-épistémique dans l'organisation et ouverte à l'extérieure
- Performance d'une société proto-épistémique?



Les collectifs proto-épistémiques dans l'histoire

La Lunar Society (1765- 1813, UK)



Mathew Boulton, James Watt, Josiah Wedgwood, etc.

Macy Conference (1943-1952, USA)

The Macy Conferences on Cybernetics
Gruppenfoto der TeilnehmerInnen 1953



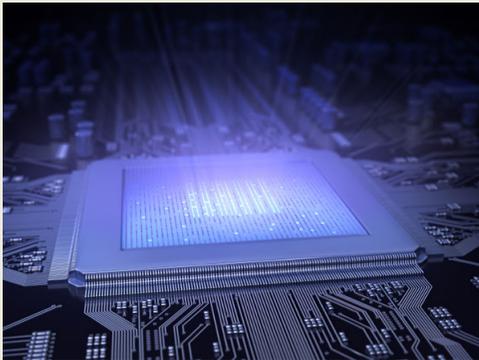
Dritte Reihe: Peggy Kubie, Henry W. Brosin, Gregory Bateson, Frank Fremont-Smith, John R. Bowman, George E. Hutchinson, Hans-Lukas Teuber, Julian H. Bigelow, Claude E. Shannon, Walker Pitts, Heinz von Foerster
Zweite Reihe: Leonard J. Savage, Janet Freed Lynch, Gerhardt von Bonin, Lawrence S. Kubie, Lawrence K. Frank, Henry Quastler, Donald G. Marquis, Heinrich Klüver, Filmer S. C. Northrop
Erste Reihe: Theodore C. Schneirla, Yehoshua Bar-Hillel, Margaret Mead, Warren S. McCulloch, Jan Droogleevoer Fortuyn, Yuen Ren Chao, W. Grey Walter, Vahe E. Amassian

Emergence de la cybernétique, des sciences cognitives et des sciences de l'information.

Mathématicien (Savage, von Neumann, Pitts, Wiener), Anthropologie et sociologie (Bateson, Frank, Lazarsfeld), Psychologie (Harrower), psychiatrie (Ashby, Kubie), biologie (von Foerster)

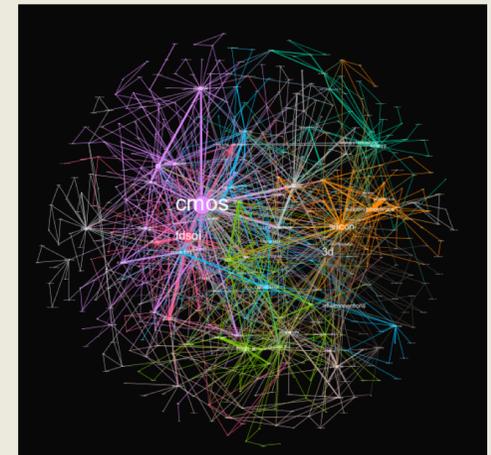
Conférence-débat

Le développement de la nanoélectronique : genèse technique et collectif proto-épistémique



Benjamin CABANES,
Enseignant-chercheur, *MINES ParisTech*

le 20 novembre 2018
18h00-20h30
MINES ParisTech, (V115)



Organisateurs:

Chaire Théorie et Méthodes de la Conception Innovante (MINES ParisTech, CGS),
Laboratoire de recherches sur les sciences de la matière (CEA)

Entrée libre dans la limite des places disponibles-

Inscription : stephanie.brunet@mines-paristech.fr (avant le 16 novembre 2018).