



GREYC

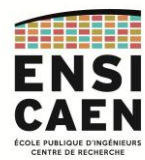


RÉCIT D'UN DOCTORANT EN 2^{ÈME} ANNÉE

Journée 4A ENS de Rennes

Dimitri Boudier

05/05/2017



- 2008 - 2010 : IUT Cherbourg-Manche
- 2010 - 2013 : INSA Rennes & Univ. of Strathclyde (UK)
- 2013 - 2014 : ENS de Rennes (Agrégation SII & IE)
- 2014 - 2015 : Université de Rennes 1 (M2 CTS)
- 2015 - 2018 : Université de Caen Normandie et GREYC
 - Thèse et missions d'enseignements

- Le GREYC et la micro-électronique
- Les MOSFETs
- Le bruit électrique basse fréquence
- Déroulement de la thèse
- Enseignement
- Conclusion



LE GREYC ET LA MICRO-ÉLECTRONIQUE



GROUPE DE RECHERCHE EN INFORMATIQUE, IMAGE, AUTOMATIQUE ET INSTRUMENTATION DE CAEN



ENSICAEN

Unité mixte de recherche
CNRS, ENSICAEN, UNICAEN



Université de Caen

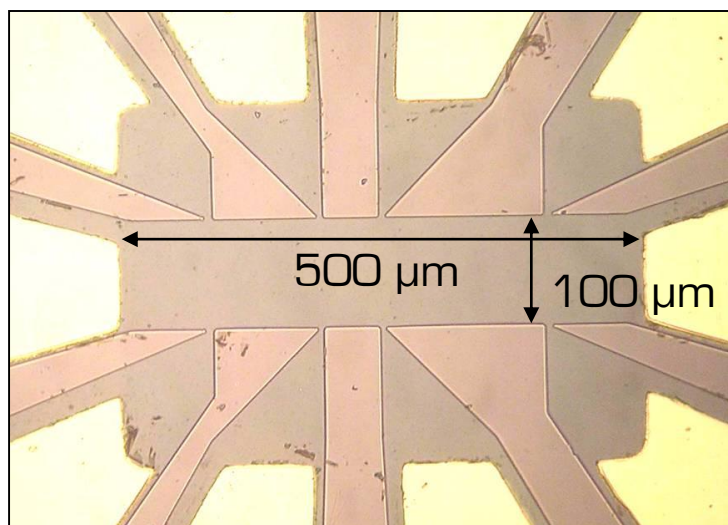
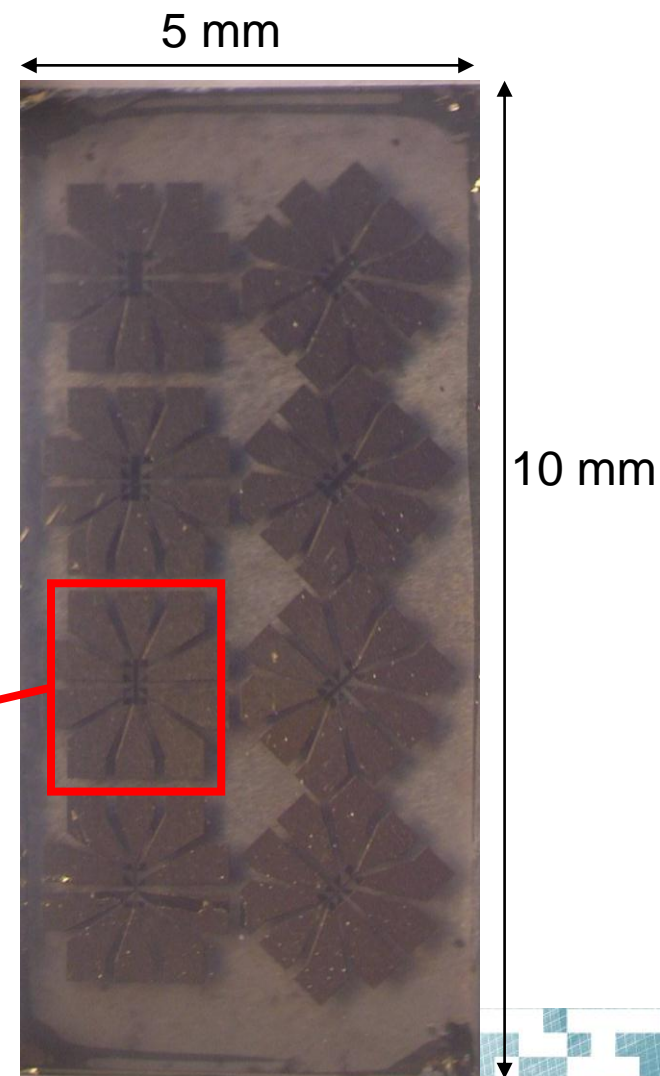
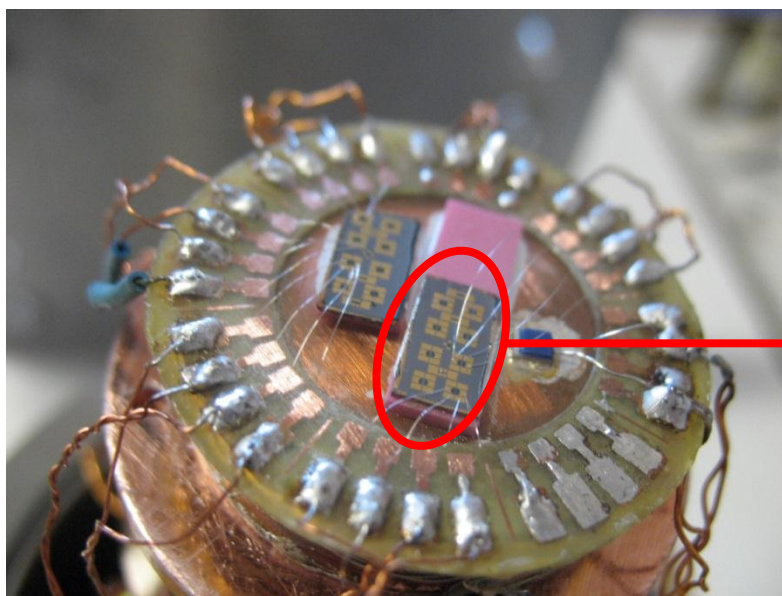
- Laboratoire de plus de 190 membres et composé de 7 équipes
 - Algorithmique, Modèles de calcul, Aléa, Cryptographie, Complexité (AMACC)
 - COncstraints, Data mining and Graphs (CODaG)
 - Modèles, Agents, Décision (MAD)
 - HUman Language TECHnology (HULTECH)
 - Image
 - Monétique & Biométrie
 - Électronique

ÉQUIPE ÉLECTRONIQUE

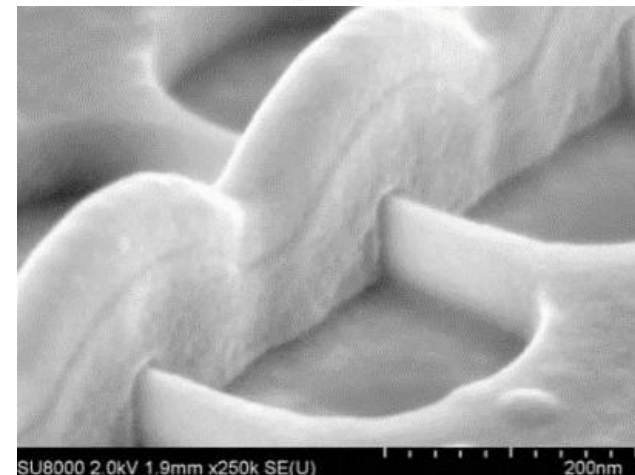
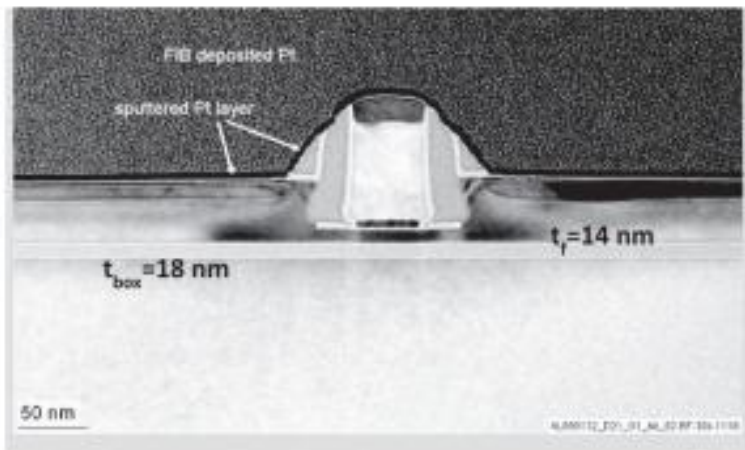
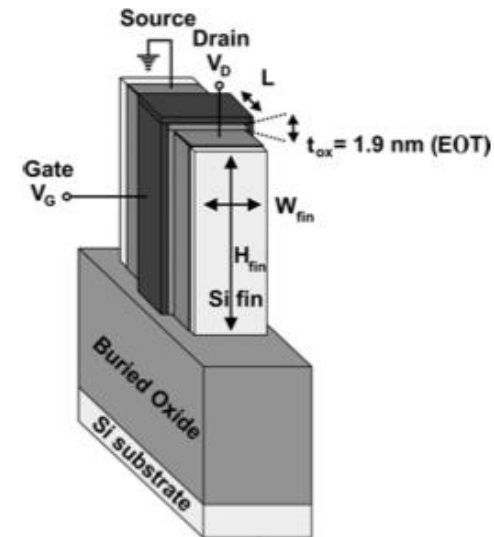
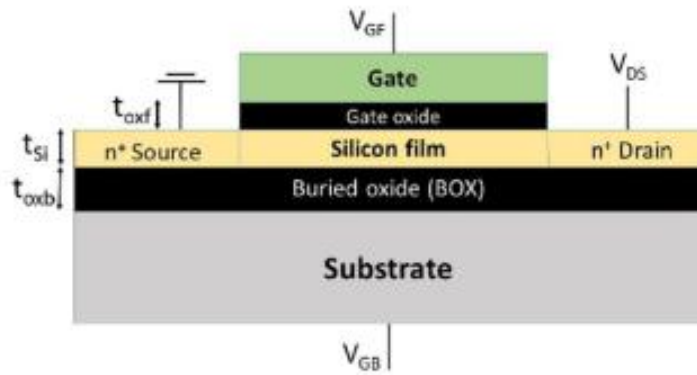
- Environ 20 chercheurs sur différentes thématiques
 - Analyse physique par le bruit à basse fréquence
 - Couches minces d'oxydes fonctionnels
 - Détection de rayonnement
 - Capteurs de champ magnétique et/ou électrique
 - Instruments de détection et d'imagerie haute sensibilité



EXEMPLE DE CAPTEUR RÉALISÉ ET ÉTUDIÉ



ÉTUDE DU BRUIT DANS DES TECHNOLOGIES AVANCÉES DE TRANSISTORS



En collaboration avec IMEC (Belgique), CIMAP (ENSICAEN), IEMN (Lille), III-V Lab Thalès (Palaiseau)

Impacts de la miniaturisation

Identification des défauts de fabrication

Étude des phénomènes de transport de porteurs et du bruit basse fréquence en fonction de la température dans les transistors FinFET et GAA NWFET sub-10 nm

Transistors nouvelles générations

LES MOSFETs

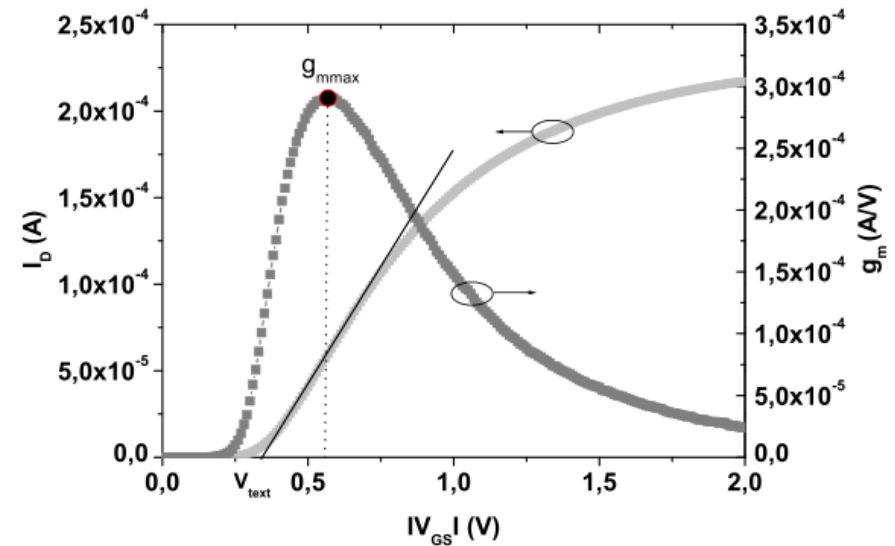
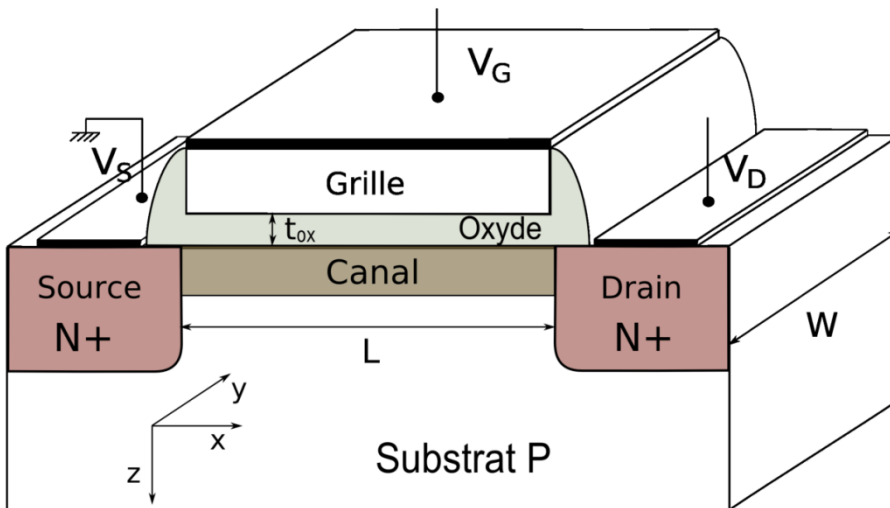
Principe de fonctionnement
Bref historique
Impacts de la miniaturisation
Évolutions technologiques



PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT

Contrôle de la population de porteurs dans le canal avec V_G

- Le canal est une résistance variable
- Le courant circule dans le canal entre la source et le drain

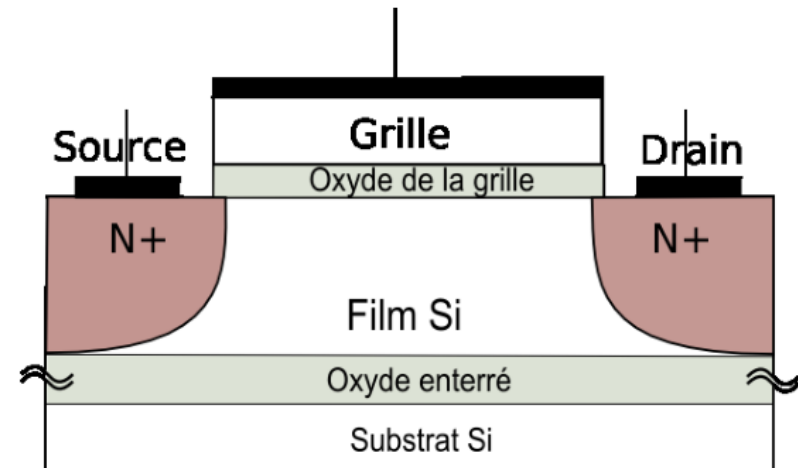
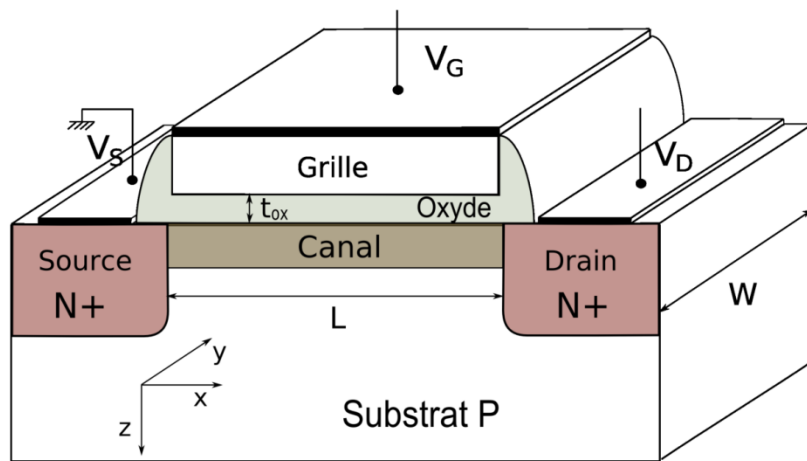


BREF HISTORIQUE

- Diode découverte en 1874
 - Brevet en 1906
- Premier brevet de MOSFET en 1928 (J.E. Lilienfield)
- Premier MOSFET fabriqué en 1960 (Bell Labs)
- Premier circuit intégré en 1963
 - Prix Nobel en 2000
- Industrialisation suivant la loi de Moore
 - Miniaturisation jusqu'à 5 nm

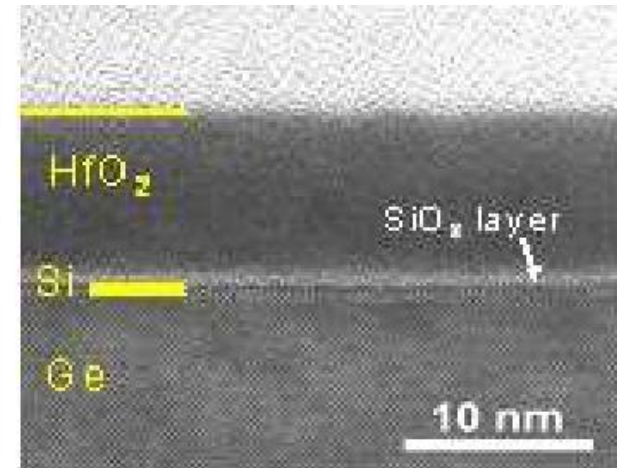
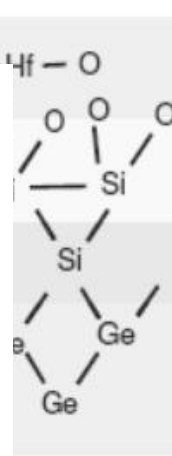
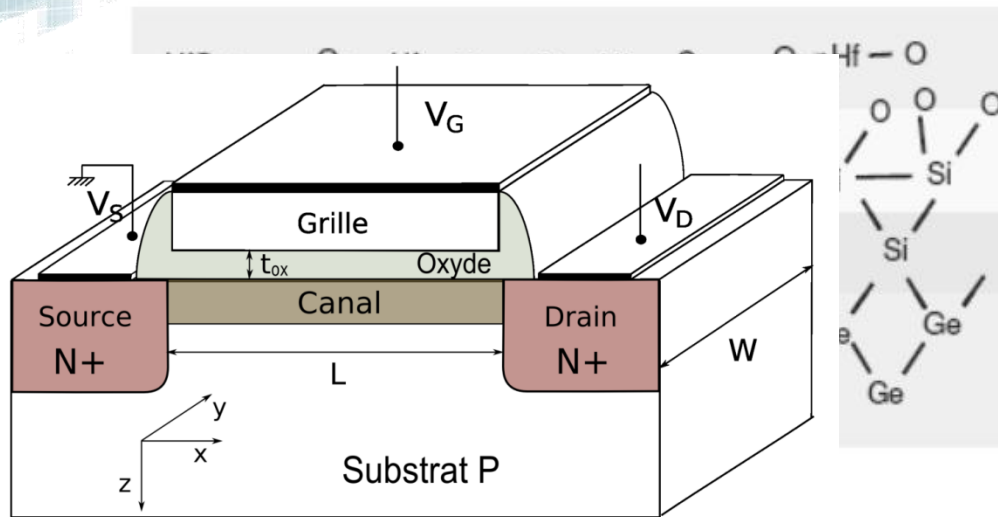
IMPACTS DE LA MINIATURISATION

- Courant de fuite dans le substrat : substrat SOI



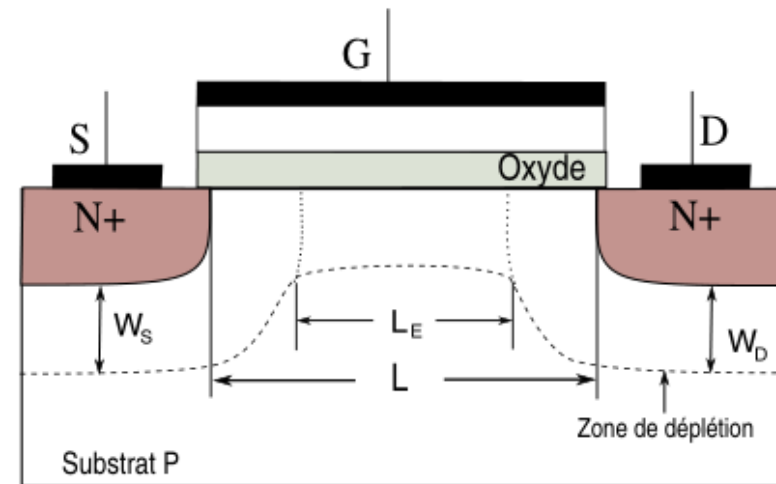
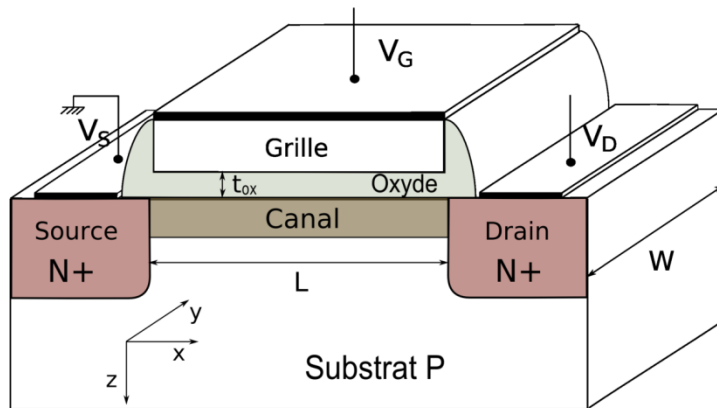
IMPACTS DE LA MINIATURISATION

- Courant de fuite dans le substrat : substrat SOI
- Courant de fuite dans la grille : isolant high- κ



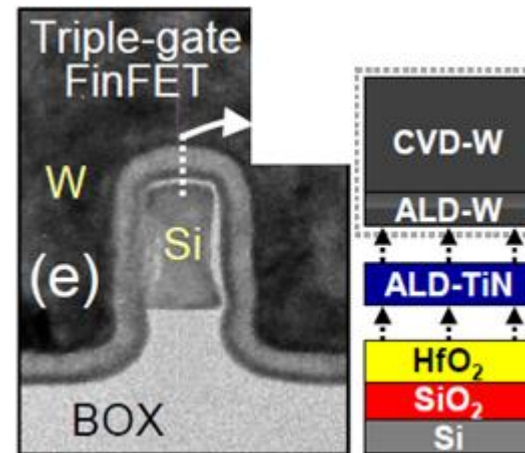
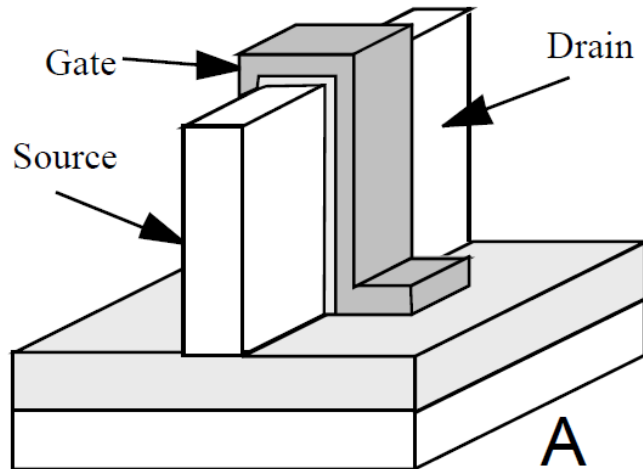
IMPACTS DE LA MINIATURISATION

- Courant de fuite dans le substrat : substrat SOI
- Courant de fuite dans la grille : isolant high- κ
- Dimensions du masque \neq dimensions réelles
 - Ajout d'étapes technologiques
 - Modification du modèle

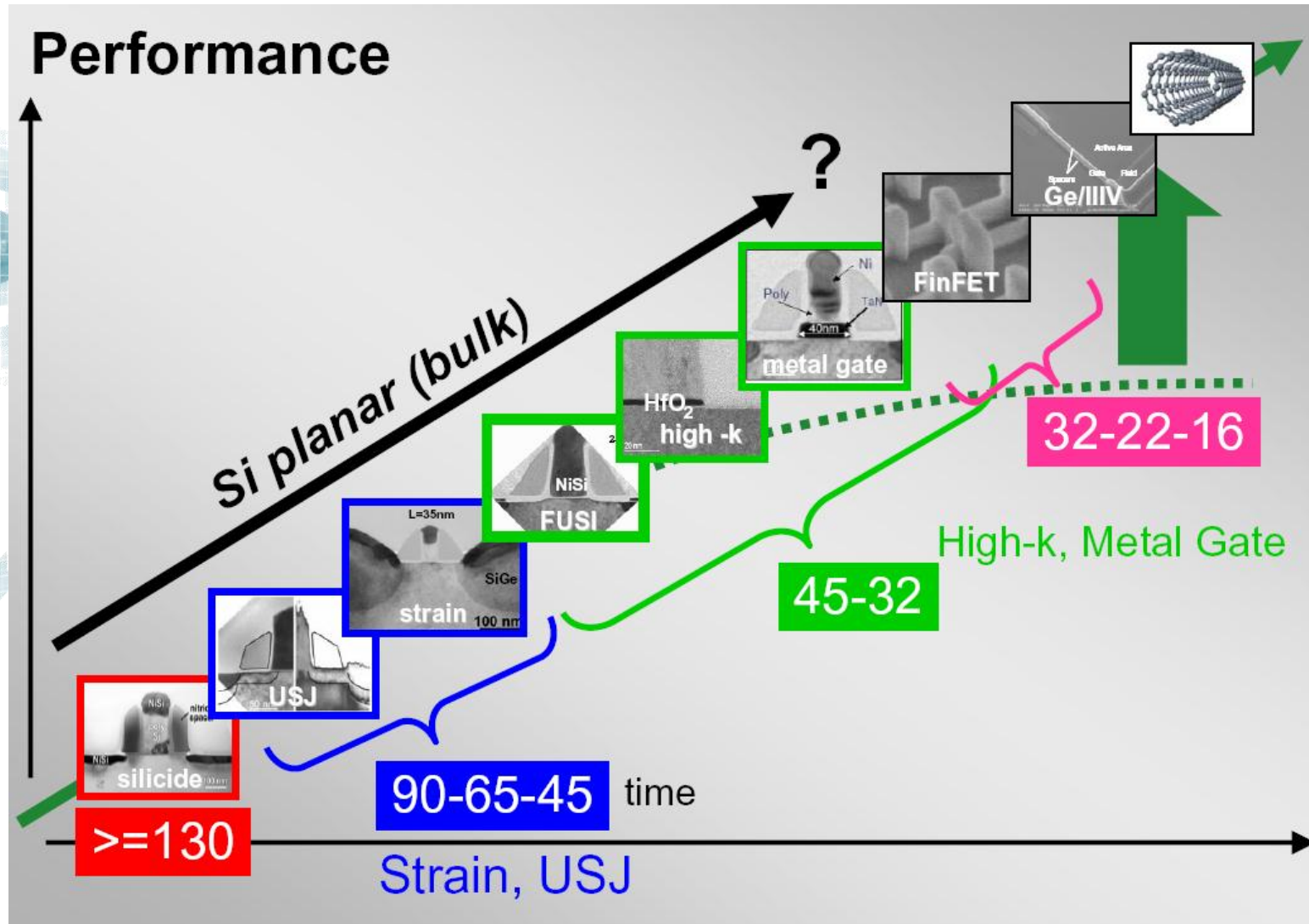


IMPACTS DE LA MINIATURISATION

- Courant de fuite dans le substrat : SOI
- Courant de fuite dans la grille : isolant high- κ
- Dimensions du masque \neq dimensions réelles
- Contrôle électrostatique plus faible
 - MOSFETs multi-grilles (3D)
 - Grille en métal



ÉVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES



ÉVOLUTIONS TECHNOLOGIQUES

MOSFET downscaling limitations as seen in 1984

G. Baccarani, *Generalized scaling theory and its application to a 1/4 micrometer MOSFET design*, IEEE TED, 1984

Further scaling down to $0.1\mu\text{m}$ channel length at the constant supply of 1 V would be certainly beneficial from the performance point of view, because it would allow to exploit the carrier saturated velocity at the circuit logic threshold, and even take advantage of velocity overshoot effects [37], but will probably require major technology breakthroughs: among these, we mention that of developing an improved insulator material having a dielectric constant at least twice as large as silicon dioxide's, so that its thickness need not be scaled down to limits incompatible with reproducibility and reliability, and the tunneling of electrons across the insulator can be kept to an insignificant level. Also, an improved gate material with a high conductivity and a more suitable work-function [29] for the required threshold voltage would be desirable. Alternatively, new device structures with more contained short-channel effect should be devised, so that scaling the channel length would be compatible with the vertical profiles typical of larger devices. In any case, it is anticipated that power density and related heat removal problems, along with increased current density within the interconnect wires, will be the major problems to be carefully considered, and will ultimately establish whether the goal of a $0.1\text{-}\mu\text{m}$ FET is worth the effort.

Short channel transport

High-k dielectric

Metal gate

Thin film transport, multi-gate devices

Power management

Today, 14 nm
in production!



LE BRUIT ÉLECTRIQUE BASSE FRÉQUENCE

En tant qu'outil de diagnostic
Les pièges
Densité Spectrale de Puissance

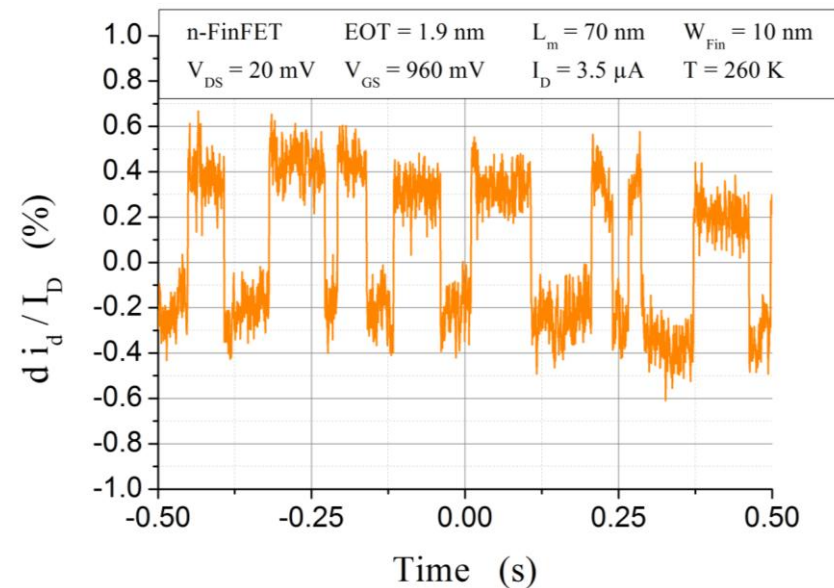
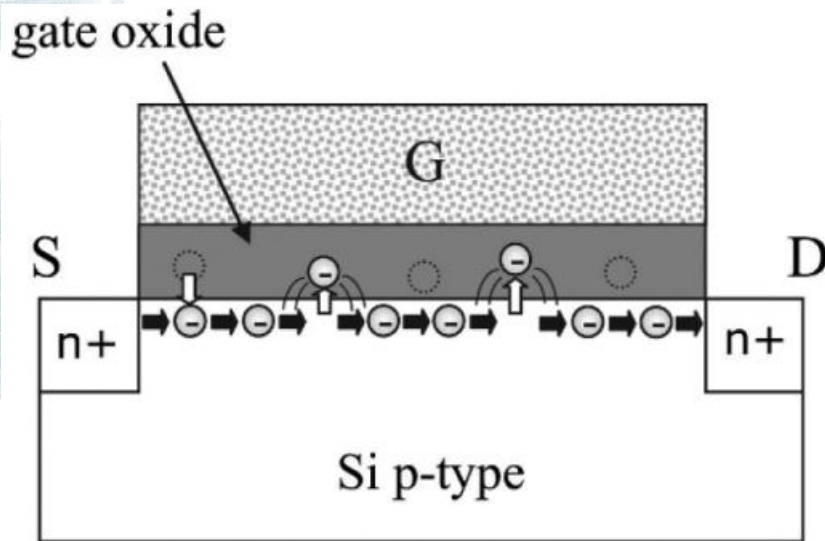


EN TANT QU'OUTIL DE DIAGNOSTIC

- Le bruit doit être réduit pour plusieurs raisons
 - Pour les capteurs qui reçoivent des signaux à faible puissance
 - Pour les transistors à hautes performances (GPP)
- Un outil de diagnostic non-destructif
 - Comparaison de différents composants
 - Identification des sources de bruit
 - Identification des pièges

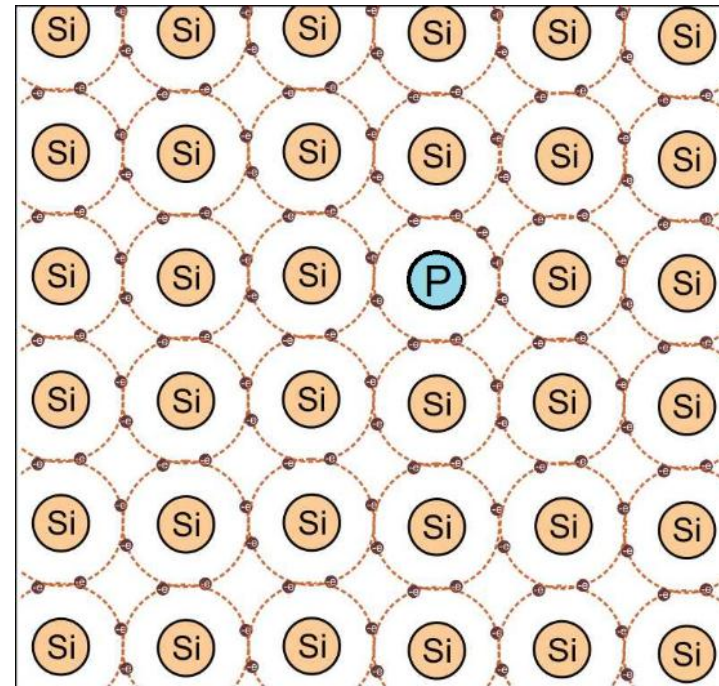
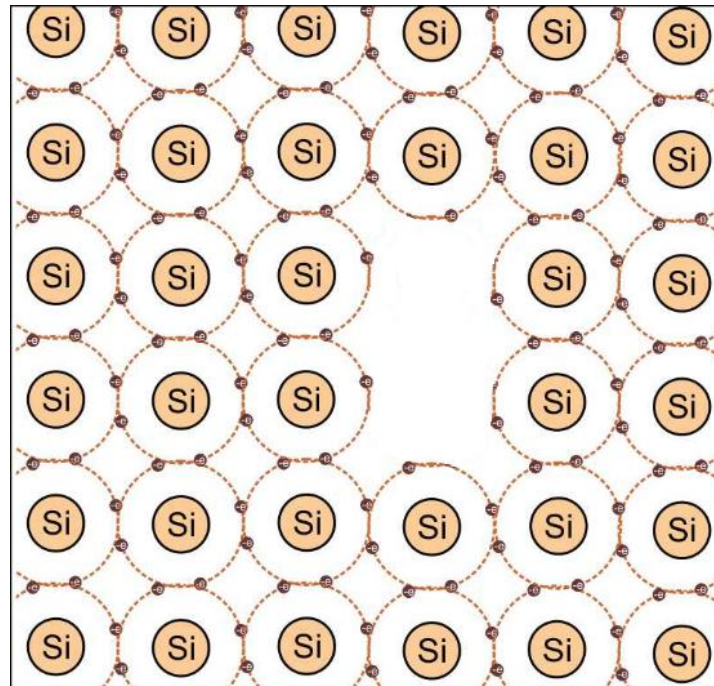
EN TANT QU'OUTIL DE DIAGNOSTIC

- Fluctuations aléatoires
 - Dans le domaine temporel et fréquentiel
 - Dû à des pièges qui
 - capturent et relâchent aléatoirement des porteurs de charge
 - provoquent des fluctuations de courant

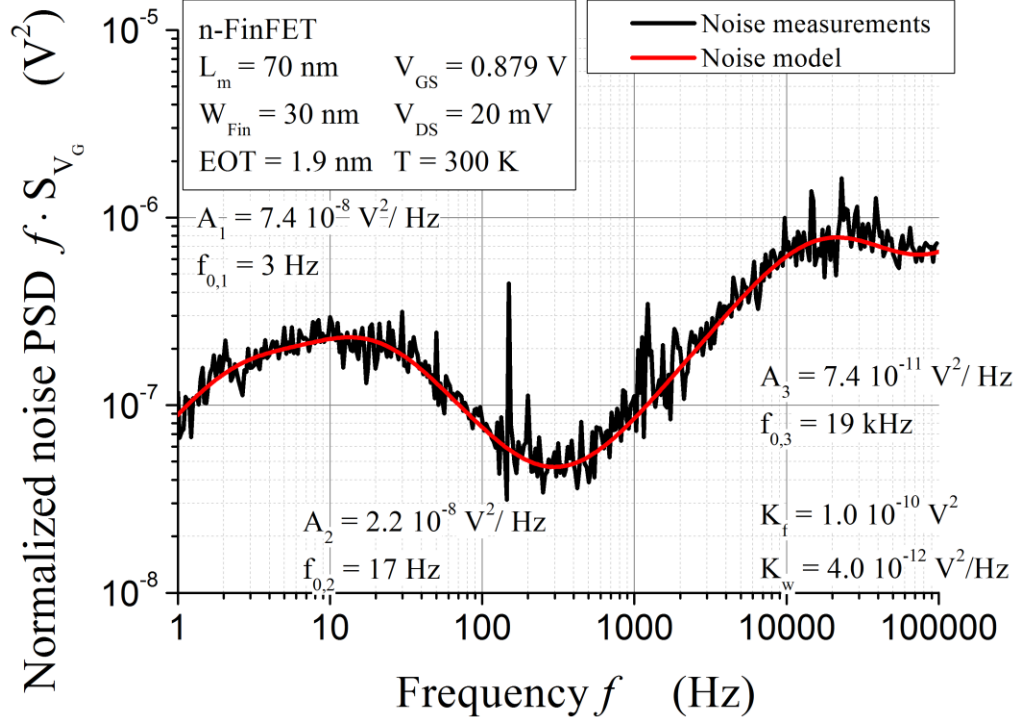


LES PIÈGES

- Les pièges sont des atomes qui
 - sont utilisés lors de la fabrication
 - se « coincent » dans le silicium pendant la fabrication
 - ne sont pas utiles/désirés lors du fonctionnement normal



DENSITÉ SPECTRALE DE PUISSANCE (DSP)



- Bruit blanc
 - K_w
- Bruit en $1/f$
 - K_f/f^γ
 - $\gamma \rightarrow$ uniformité de la répartition des pièges
- Lorentziennes
 - Plateau A_i
 - Fréquence caract. $f_{0,i}$

$$S_{v_g} = K_w + \frac{K_f}{f^\gamma} + \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{1 + (f/f_{0,i})^2}$$



DÉROULEMENT DE LA THÈSE

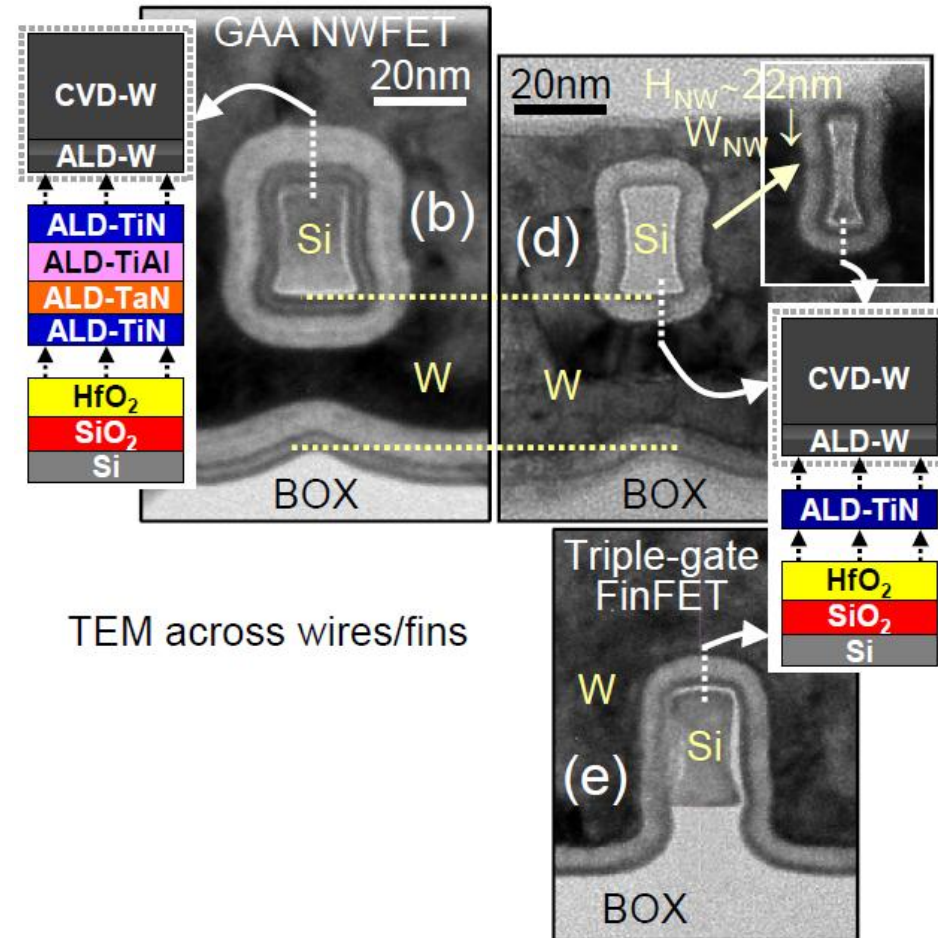
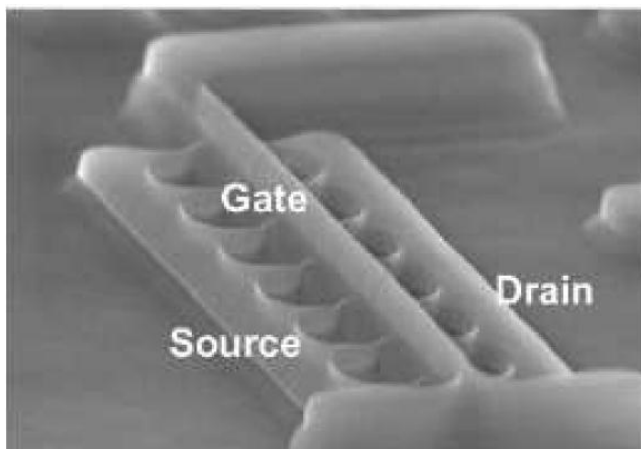


ÉTUDE DES DERNIÈRES TECHNOLOGIES

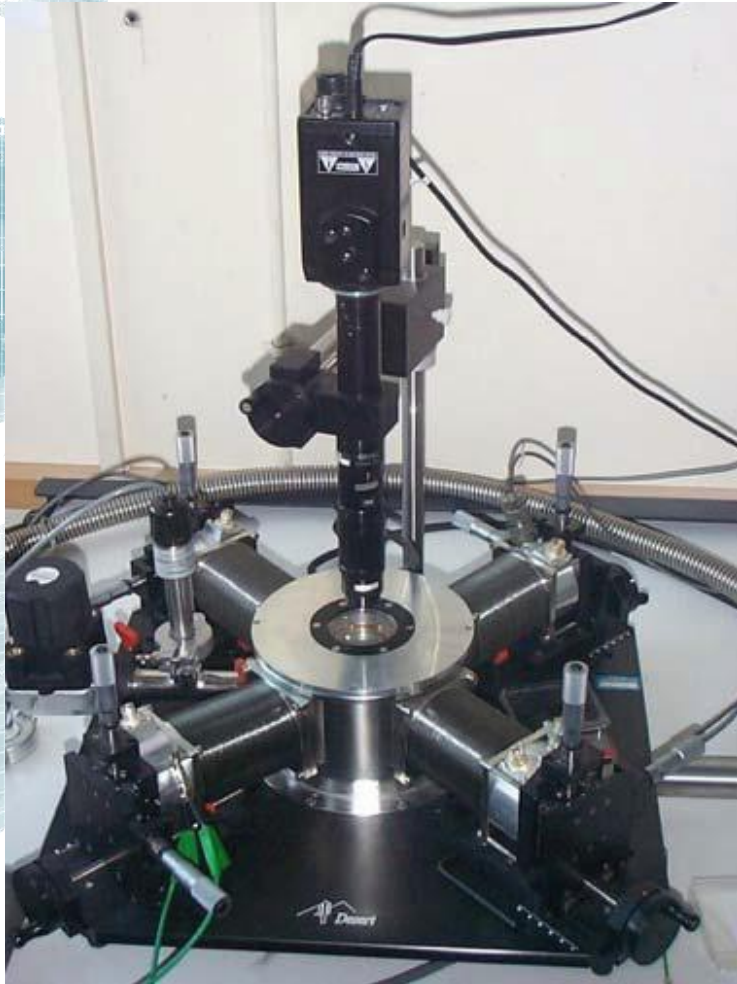
- Études statiques
 - Extraction des paramètres statiques
- Études LFN
 - Identification des phénomènes à l'origine du bruit
 - Identification de défauts créés pendant la fabrication
- Étude en température
 - Mise en avant d'effets quantiques
 - Étude autour des gammes de fonctionnement habituelles

COMPOSANTS IMEC POUR LE NŒUD TECHNO 10 NM

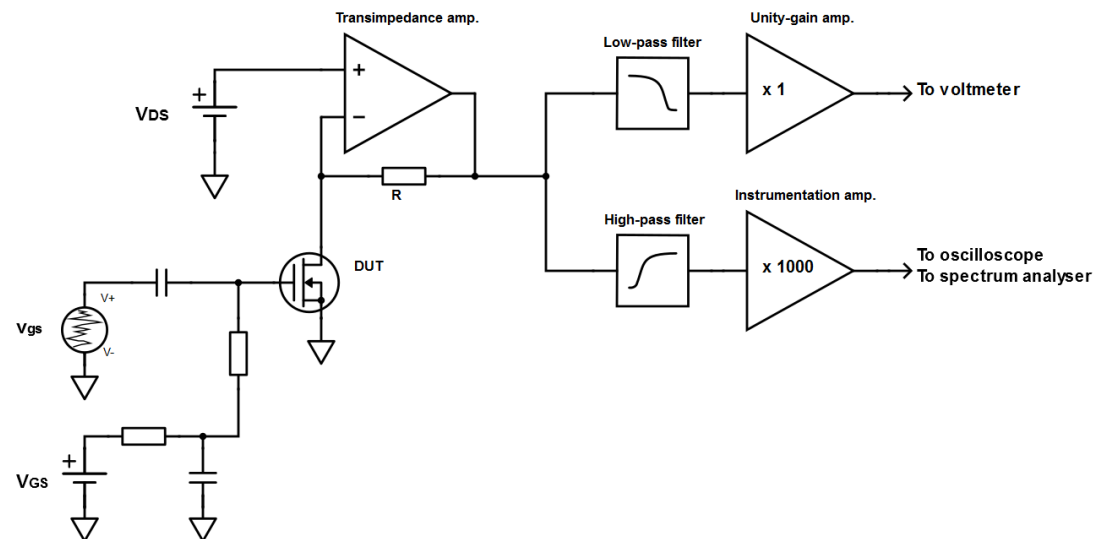
- FinFETs triple-grille
- Gate-All-Around FETs
- 5 fingers/nanofils
 - $W_{fin} = 5 \text{ nm to } 40 \text{ nm}$
 - $W_m = 250 \text{ nm to } 425 \text{ nm}$
 - $L_m = 20 \text{ nm to } 10 \mu\text{m}$



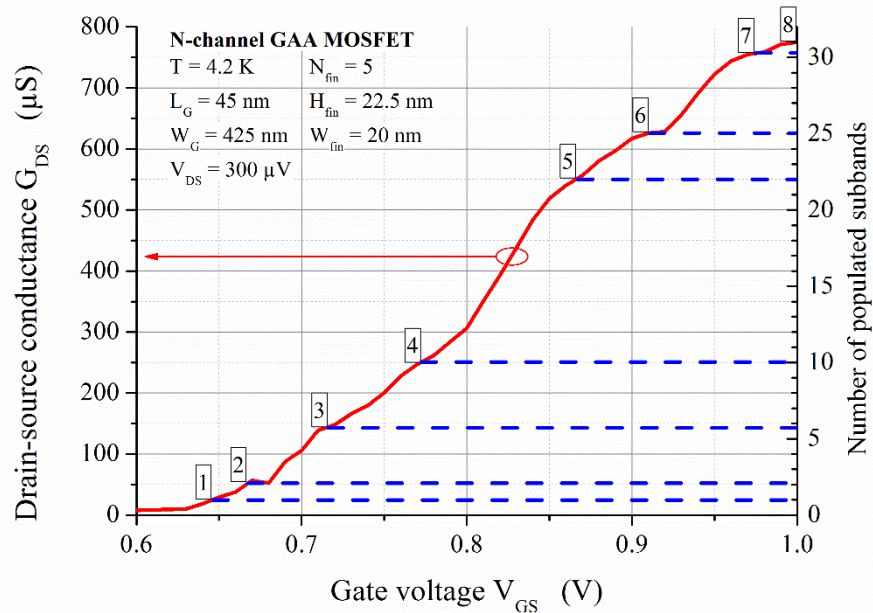
BANC DE MESURES



- Étude sur wafer 2 pouces
- 4 K - 375 K
- Traceur de caractéristiques
- Analyseur de spectre
- Électronique maison

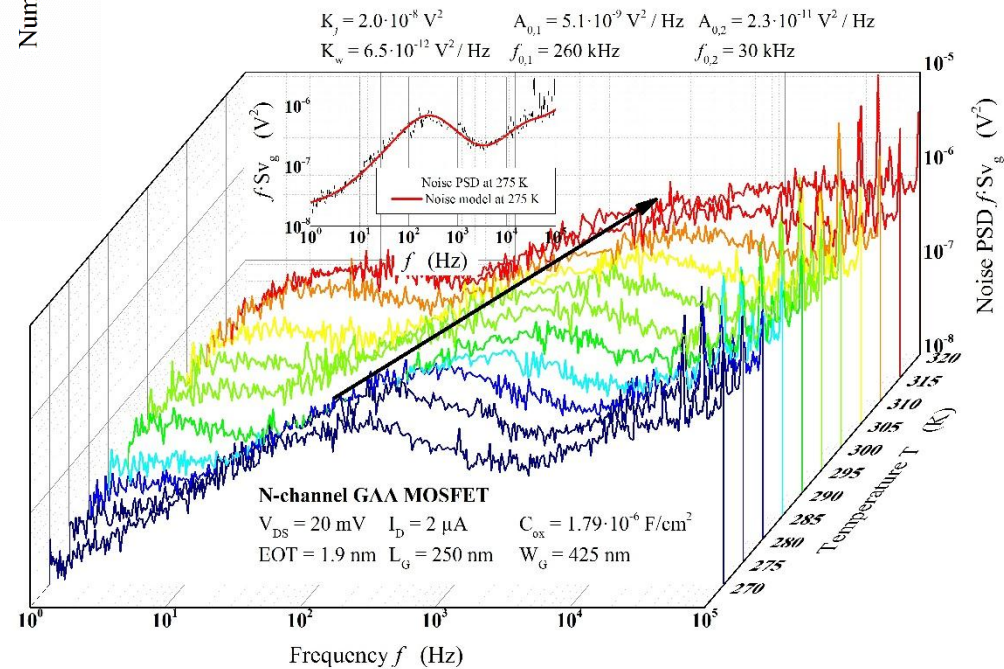


EXEMPLES DE RÉSULTATS



- Effets quantiques
 - $T = 4,2 \text{ K}$; $V_D = 300 \mu\text{V}$
 - Courant en escalier

- Spectroscopies de bruit
 - Variation de T
 - I_D et V_D constants
 - Identification des pièges



AVANCEMENT AU BOUT DE 20 MOIS (+6 MOIS DE STAGE)

- Résultats intéressants
 - Observations de phénomènes particuliers
 - Identification de pièges inattendus
- D'autres composants attendent d'être testés
 - Différents matériaux de grille
- 4 conférences
 - Vienne, Toulouse, Athènes, Vilnius
- 3 articles publiés
 - SSE, SSE, SST
 - D'autres à venir ?

LA THÈSE ET L'INTERNATIONAL

- Collaboration avec imec (*agreement*)
 - Centre de micro-nano-électronique à Leuven (Belgique)
 - Imec a fabriqué les composants
 - Travail collaboratif pour étudier ces composants
 - 6 semaines dans leurs locaux, encore 6 à venir
- Collaboration avec l'université de São Paulo
- Conférences internationales
 - EuroSOI-ULIS 2016 : Vienne
 - EuroSOI-ULIS 2017 : Athènes
 - ICNF 2017 : Vilnius

ENSEIGNEMENT



UNIVERSITÉ DE CAEN NORMANDIE – UFR SCIENCES

- Université de Caen Normandie
 - Fondée en 1432, reconstruite en 1957
 - 29 000 étudiants
 - Carnaval étudiant (30 000 personnes en 2017)
- L1 tous parcours – option Initiation à la Mécatronique
 - Caractérisation de capteurs et d'actionneurs, prog LabVIEW
 - Lego Mindstorm + CAPTIL
- L2 Sciences Pour l'Ingénieur – Électronique Analogique
 - Quadripôles
 - Amplificateurs Opérationnels
 - Filtres analogiques

ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE D'INGÉNIEURS DE CAEN

- École d'ingénieurs généralistes fondée en 1976
- Formations
 - Électronique et Physique Appliquée (classique)
 - Génie Nucléaire
 - Instrumentation Avancée
 - Signal, Automatique pour les Télécoms et l'Embarqué
 - Informatique (classique et apprentissage)
 - Matériaux – Chimie (classique)
 - Matériaux et Mécanique (apprentissage)
 - Génie Industriel
- 200 diplômés / an

- 1A Informatique et 2A Informatique par apprentissage
 - Architecture et technologies des ordinateurs
 - Du code source en C au langage machine
 - Observation du travail de la carte mère (CPU et mémoire)
- 3A Électronique
 - Projet intensif
 - Pédagogie quasiment inédite en France
 - Pendant deux semaines complètes, les élèves doivent constituer une entreprise et répondre à un cahier des charges
 - Jeu de rôle poussé au maximum
 - L'an dernier : PoKaenMon Go ++

CONCLUSION



- La thèse au GREYC
 - Étude de l'impact des procédés technologiques sur les transistors dédiés aux futures générations de processeurs
 - Études en température, en statique et en bruit électrique
- Enseignement à l'UFR et à l'ENSICAEN
 - Électronique analogique en L2
 - Architecture des processeurs en 1A, 2A Informatique
 - Projet intensif en 3A Électronique

- Philippe Lefèvre
 - PRAG Ensicaen
- Matthieu Desnoual
 - MCF au GREYC / Ensicaen
- Hugo Descoubes
 - PRAG Ensicaen, responsable tronc commun Électronique
- Isabelle Lartigaut
 - Thèse au GREYC sur le bruit dans les transistors
 - PRAG Ensicaen

GREYC - ÉLECTRONIQUE

- Conception et réalisation de capteurs de champ électrique au continu en suivant le principe de dualité
- Développement de capteurs magnétiques à base de dispositifs « Magnonic »
- Étude des phénomènes de transport de porteurs et du bruit basse fréquence dans les transistors de type nanofils 7 nm
- Ingénierie des contraintes locales dans $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ (LSMO) – applications à la réalisation de MEMS

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

Contact : dimitri.boudier@ens-rennes.fr



ANNEXES

Contact : dimitri.boudier@ens-rennes.fr



- Photolithographie UV par contact (limite = 1 μm)
 - sur des substrats de petite taille (limite = 5 \times 5 mm^2):

– → stratégies spécifiques d'étalement de résine, aligneur

Gravure ionique non sélective:

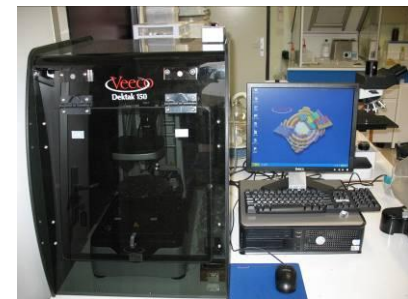
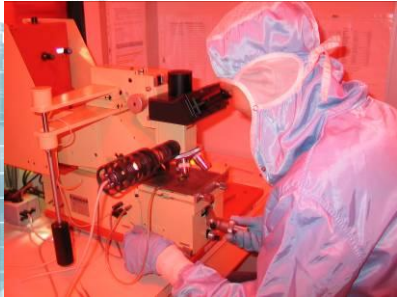
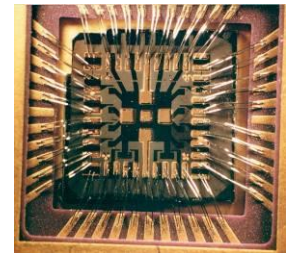
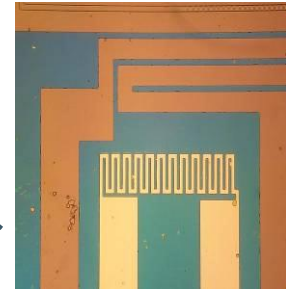
– → spectromètre de masse pour détection de fin d'attaque

Difficultés d'adhésion sans dégradation des contacts métalliques & par ultrasons

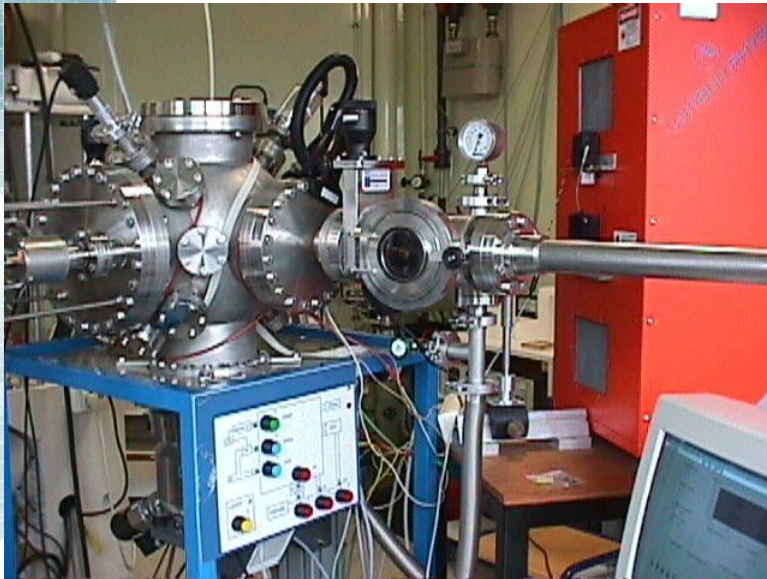
→ procédé multicouche spécifique

Gravure ionique réactive pour le micro-usinage du Si

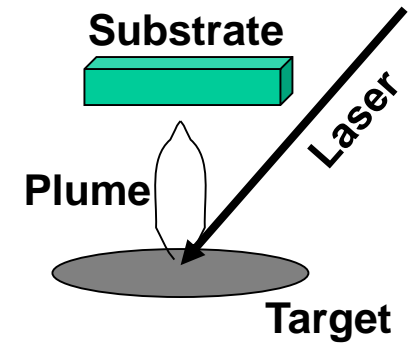
Profilomètre mécanique et AFM



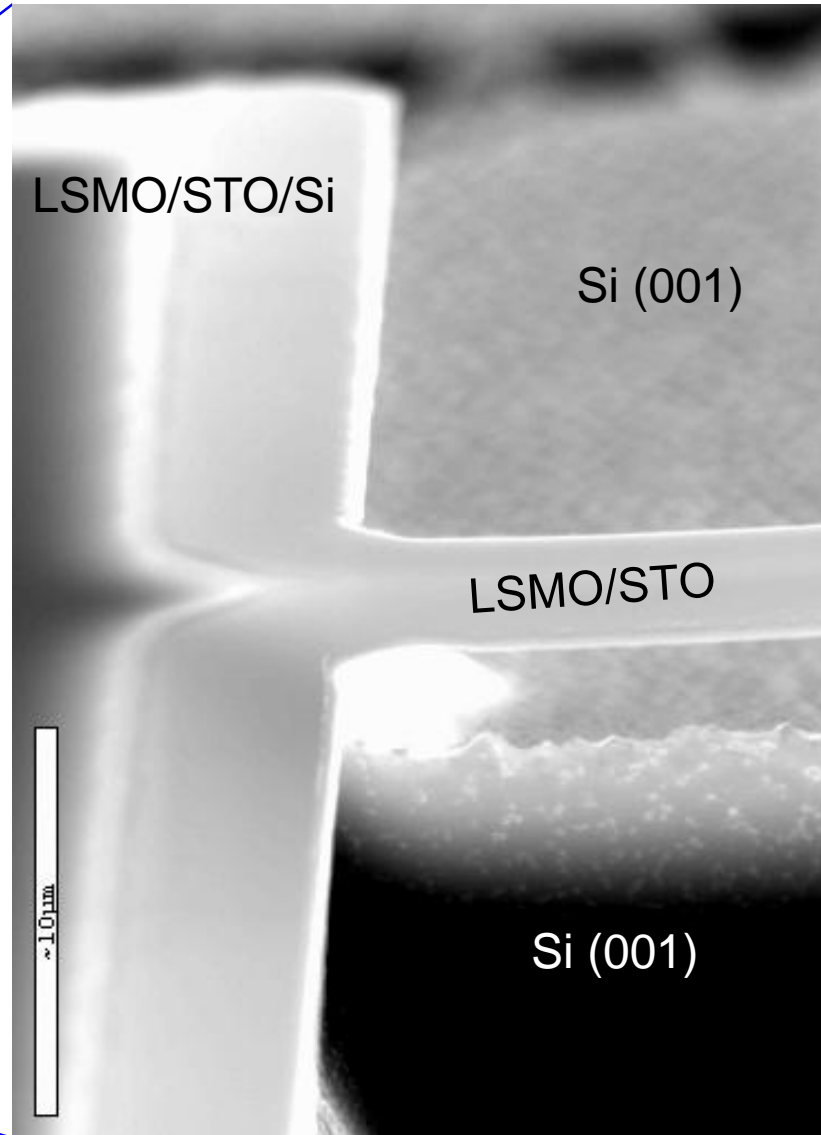
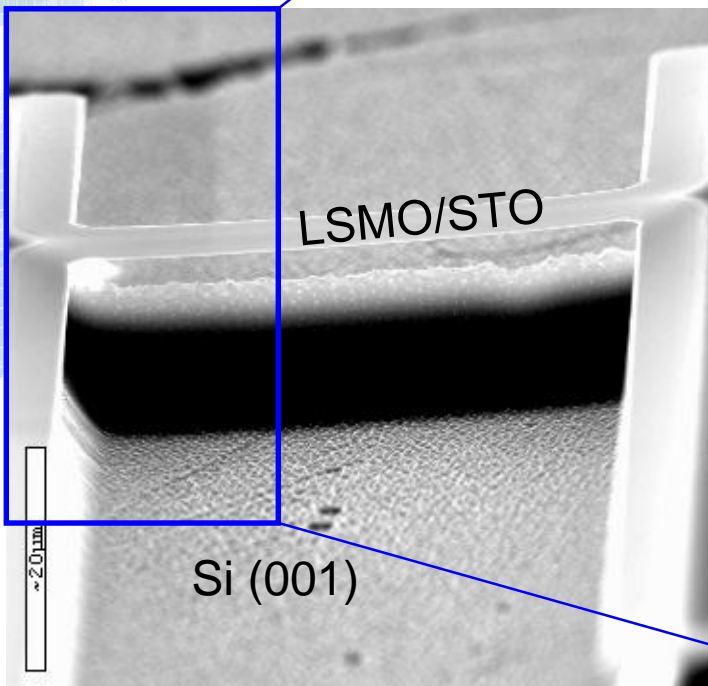
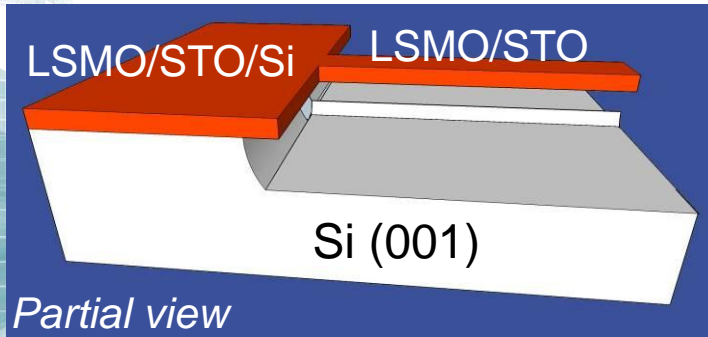
Croissance des couches minces par ablation laser pulsée au GREYC



Laser: Lambda Physics Compex102 (248 nm)



Température du substrat $\sim 700\text{-}750$ °C dans une pression d'O₂ (10^{-5} mbar – 1 bar)



- 107 000 habitants intra-muros
 - 262 000 en agglomération
- Patrimoine historique important
- 4 campus universitaires
 - Un campus scientifique



7 LABORATOIRES DE RECHERCHE À L'ENSICAEN

Le centre de recherche de l'ENSICAEN regroupe 7 laboratoires soutenus par les grands organismes tels que le CNRS, le CEA et l'Université de Caen dont un laboratoire mixte avec l'industrie ainsi qu'un centre de recherche technologique.



CiMap



RISMA



GREYC



lcm.t



LCS



LPC
caen



LaMIPS
Laboratoire de Microélectronique
et de Physique des Semiconducteurs