NanoSaclay
Laboratoire d'Excellence en Nanosciences et Nanotechnologies

UNIVERSITÉ PARIS SUD
Comprendre le monde, construire l'avenir®

SYSTÈMES FIABLES À BASE DE NANOCOMPOSANTS NON-FIABLES : *DES CONCEPTS AUX DÉMONSTRATEURS*

"Chaire fiabilité des nanotechnologies",
Laboratoire d'Excellence NanoSaclay

Nicolas Locatelli, D. Vodenicarevic, D. Querlioz, J-O. Klein
Institut d'Electronique Fondamentale, Univ. Paris-Sud, CNRS, Orsay

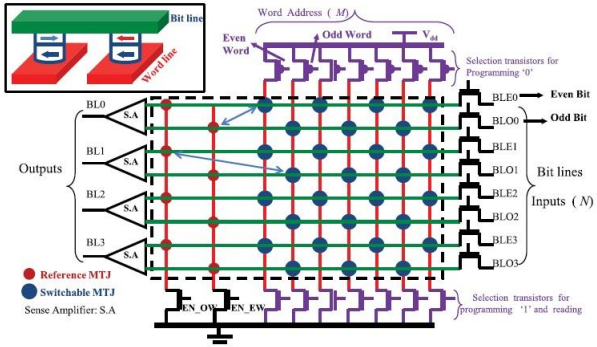
MOTIVATION

- Analyser la datamasse (« Big data ») :
  - « Recognition, Mining & Synthesis »
  - Internet des objets

- Gestion de l'avalanche de données ?
  - ✗ Multiplication des architectures de calcul usuelles
  - ⇨ Besoin d'architectures de calcul à forte densité & faible puissance.
  - ⇨ Des architectures innovantes de calcul neuro-inspirées apparaissent particulièrement efficaces face au flux massif de données.
- Les nanotechnologies seront au centre de la prochaine révolution du traitement des données.

LE CONTEXTE LOCAL NANOSACLAY

- ✓ Expertise au niveau nanodispositifs
  - Spintronique (IEF and CNRS/Thales)
  - Memristors (CEA)
- ✓ Expertise en nanoarchitecture/nanodesign
  - Conception hybride CMOS/spintronics
  - Modèles de calcul bio-inspirés



W. Zhao *et al.*

A développer :

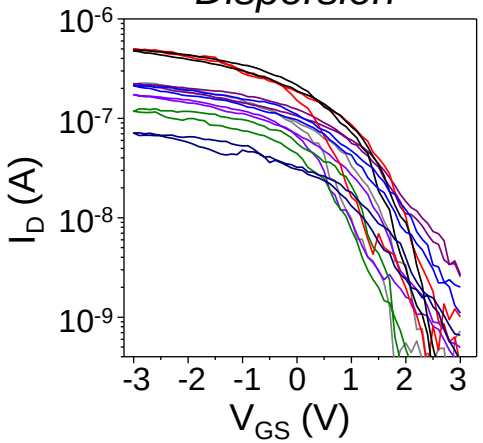
- ✗ Culture des problématiques de fiabilité des nanocomposants
- ✗ Fabrication de démonstrateurs démontrant le potentiels des nanodispositifs pour des applications innovantes

Objectif : développer des **interactions fortes** entre conception et nanodispositifs, autour du thème de la **fiabilité** des systèmes :
Des concepts fondamentaux aux démonstrateurs

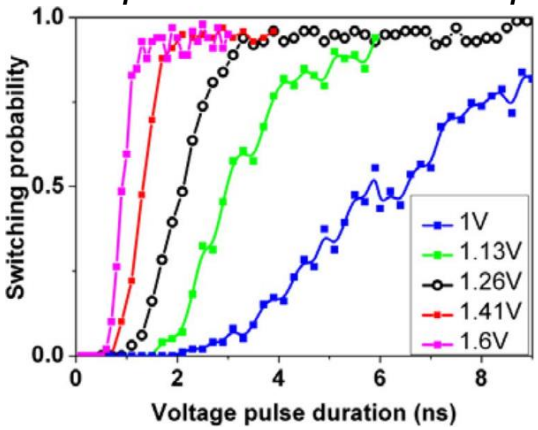
DES TECHNOLOGIES INNOVANTES, MAIS…

- Les composants électroniques issus des nanotechnologies sont **prometteurs**:
  - ✓ Très haute densité, nouvelles fonctionnalités, intrication des fonctions mémoires & calcul
- Mais les nano-composants sont **intrinsèquement non-fiables** :
  - ✗ Défaillances, dispersion des propriétés, comportement stochastique, bruit.

Memtransistors (CEA)
Dispersion



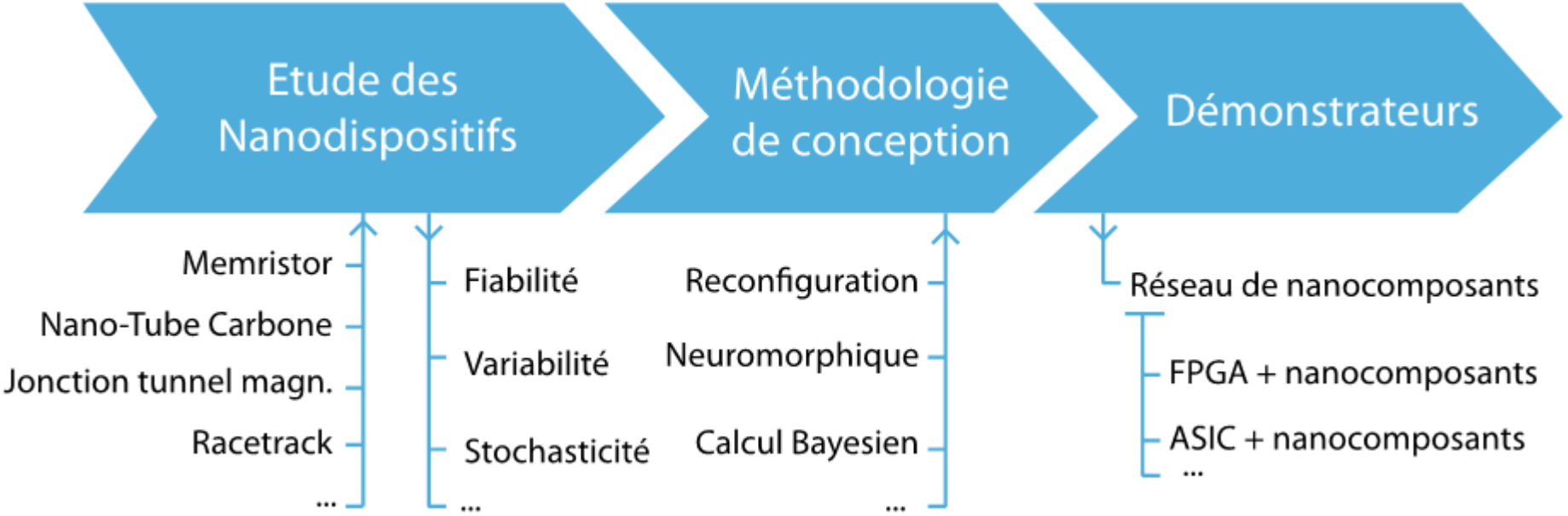
MRAM (IEF)
Comportement stochastique



Devolder *et al.*, PRL 100 (2008)

Notre vision : développer des stratégies de conception qui garantissent la fiabilité des systèmes malgré la non-fiabilité de leurs composants

MÉTHODOLOGIE : DU CONCEPT AU DÉMONSTRATEUR

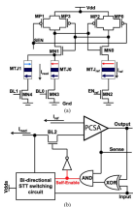


Dispositifs Intrinsèquement Non fiables

Développement des modèles de programmation

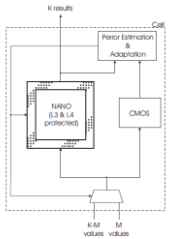
Intégration des nanocomposants pour la réalisation de démonstrateurs

QUATRE APPROCHES POSSIBLES



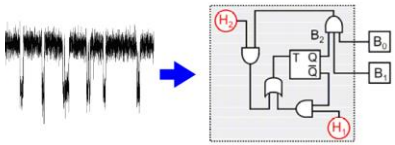
Lakys *et al.*

- **Système fiable par conception**
  - ⇨ Le circuit surveille son activité et « ré-essaie » en cas de défaillance.



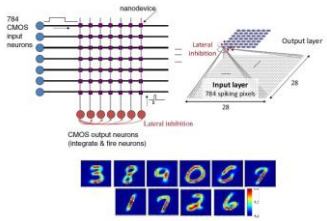
CONAN project

- **Systèmes à reconfiguration dynamique auto-réparateurs**
  - ⇨ Le système peut détecter et réparer ses défaillances.



DEFIBAYES project

- **Système exploitant les comportements stochastiques**
  - ⇨ Le non-déterminisme fait parti du modèle de programmation.



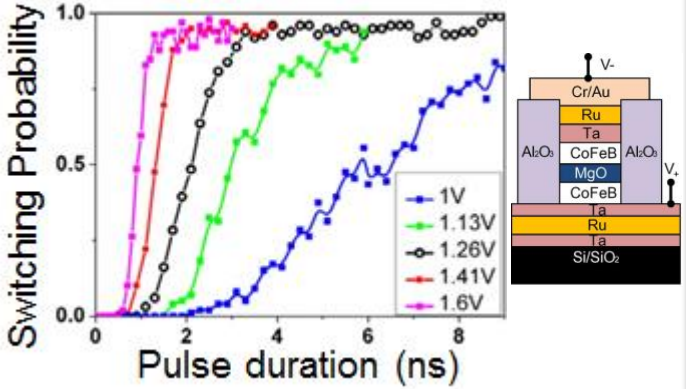
Querlioz *et al,*

- **Système neuro-inspiré à capacité d'apprentissage**
  - ⇨ Le système utilise des éléments synapses et neurones qui lui confèrent une fiabilité intrinsèque (comme le cerveau).

CIRCUIT FIABLE PAR CONCEPTION

➢ Projet : Circuit d'écriture très faible puissance pour la programmation de nano-mémoire magnétique (MRAM)

Ecriture d'un bit mémoire magnétique
→ ***Comportement stochatique***

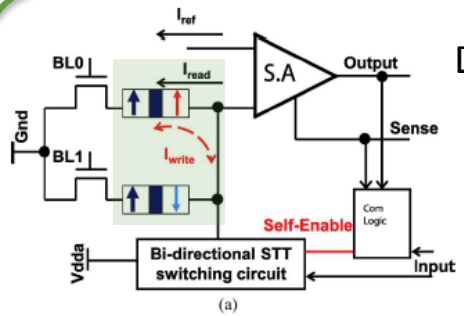


Devolder *et al.*, PRL 100 (2008)

+Variabilité des composants CMOS

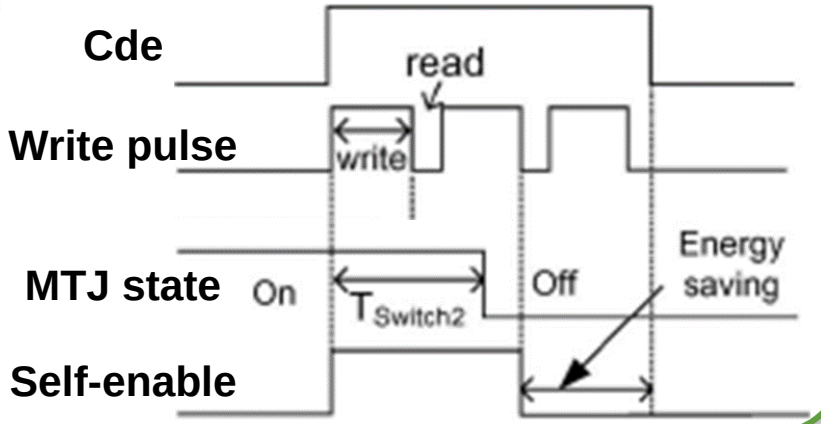
Outils commerciaux de simulations circuits + programmation de nouveaux modèles (VerilogAMS)

✓ **Notre solution : circuit de validation pour garantir l'absence d'erreur**
⇨ **Réduction du coût énergétique**



Démontré par simulation de circuit (modèle STT-MRAM & design-kit CMOS 65nm).

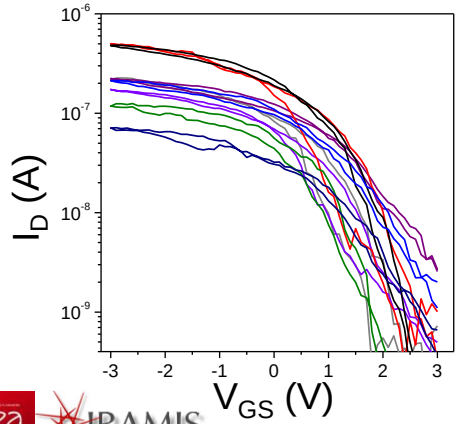
Lakys et al, IEEE TMAG (2012)



➢ Projet : Apprentissage supervisé de fonction logique dans un réseau de neurones à nanotubes

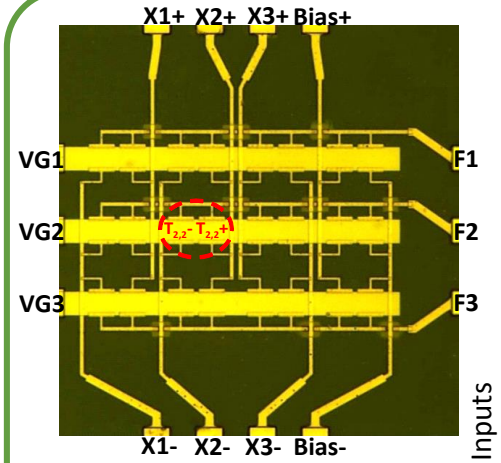
Résistances programmables à base de nanotubes (CNTFET) x8

→ ***Grande variabilité***



Système reconfigurable :

⇨ CNT ~ Emulation de synapses pour l'apprentissage

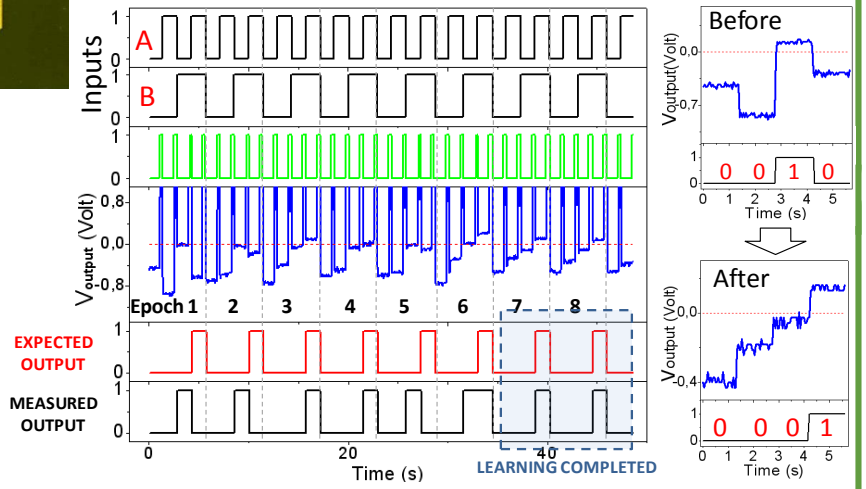


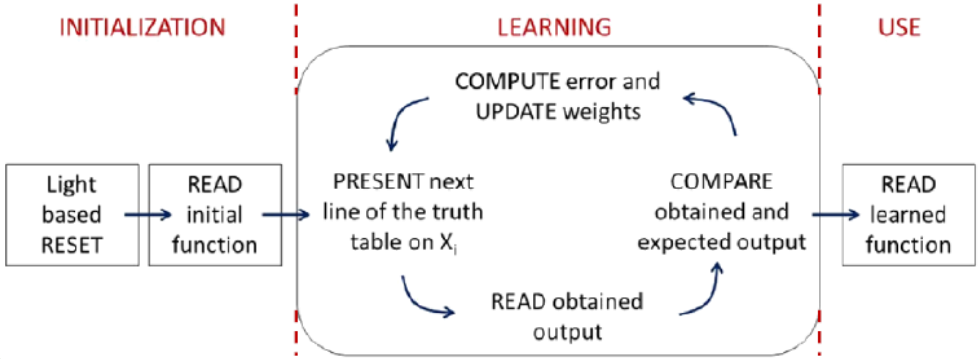
Démonstrateur :

Nanocircuit

+ FPGA (émulation CMOS)

Apprentissage d'une fonction logique, ici 'ET' :





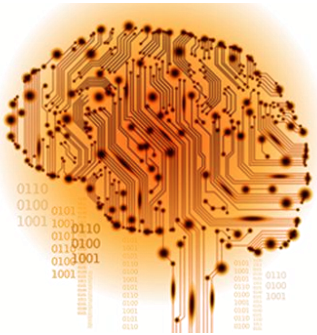
Gacem et al Nanotechnology, 2013

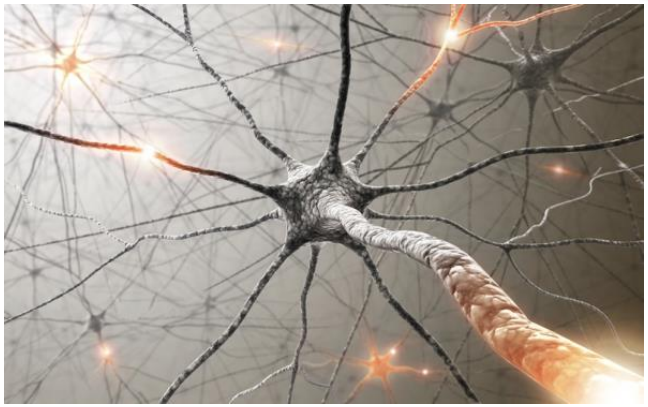
SYSTÈMES NEURO-INSPIRÉS À CAPACITÉ D'APPRENTISSAGE

Neuro-Inspiration :

⇨ Conception de circuits émulant le fonctionnement du cerveau.

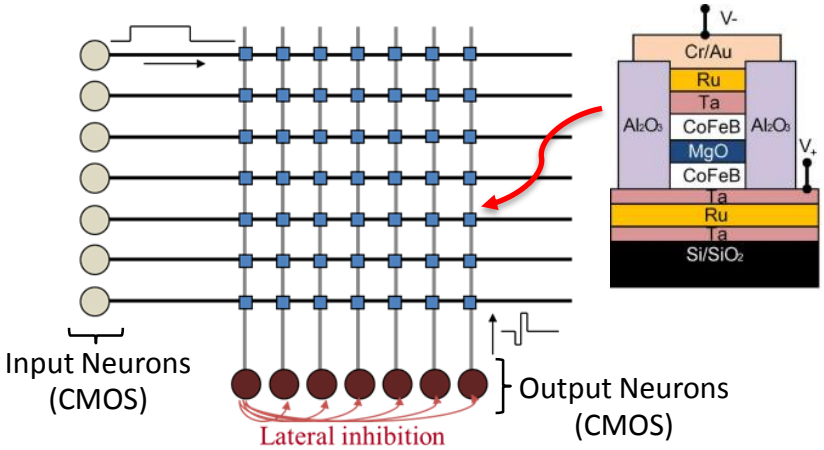
- ✓ Adaptés à la variabilité des composants
- ✓ Tolérants aux défauts
- ✓ Calcul massivement parallèle





MAIS : S'appuie sur la réduction de taille des composants car un très grand nombre de composants sont nécessaires (notre cerveau : 10^{10} neurones, 10^{16} synapses).

➢ Projet : Réseau de neurones à synapses stochastiques

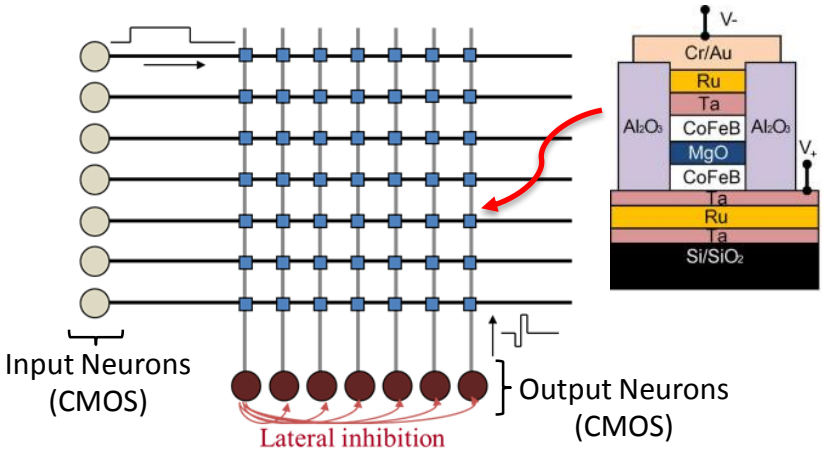


Querlioz et al, submitted (2012)

⇨ Des jonctions mémoires spintroniques émulent les connexions entre neurones (synapses)

⇨ Le comportement stochastique des composants permet un fonctionnement peu gourmand en énergie

➢ Projet : Réseau de neurones à synapses stochastiques



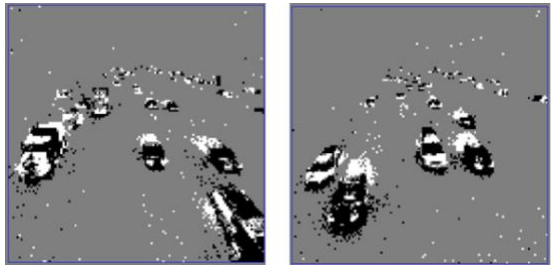
Querlioz et al, submitted (2012)

⇨ Des jonctions mémoires spintroniques émulent les connexions entre neurones (synapses)

⇨ Le comportement stochastique des composants permet un fonctionnement peu gourmand en énergie

⇨ Simulations : apprentissage non supervisé :

❖ *Définition d'une règle d'apprentissage*



→ *Après lui avoir présenté 10min de vidéo, le système devient capable de compter le trafic de chaque voie avec une précision de 98%.*

→ *Après lui avoir présenté une séquence de chiffres manuscrits, le système devient capable de les classifier.*

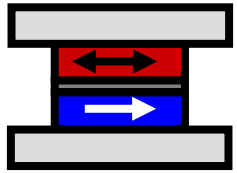
EXPLOITER LE COMPORTEMENT STOCHASTIQUE

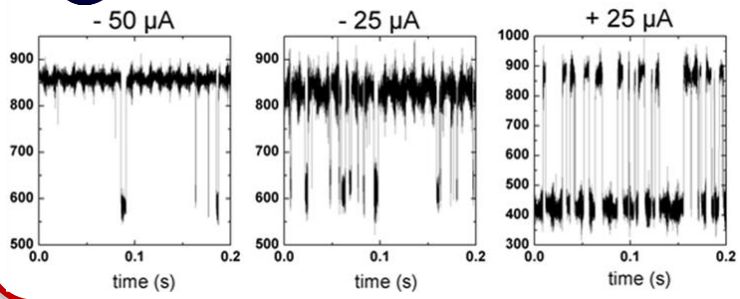
➢ Projet : Architectures de calculs probabilistes Bayésiennes

projets
DEFIBAYES, BAMBI

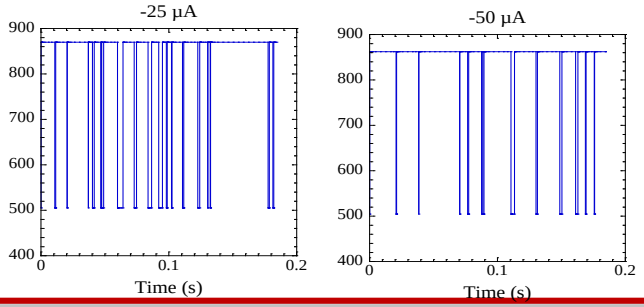
⇨ Génération et traitement de signaux binaires incertains :
le non-déterminisme fait parti du modèle de programmation.

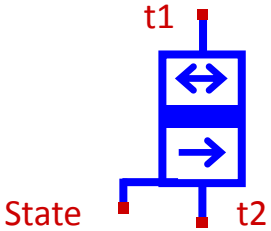
Jonction magnétique stochastique





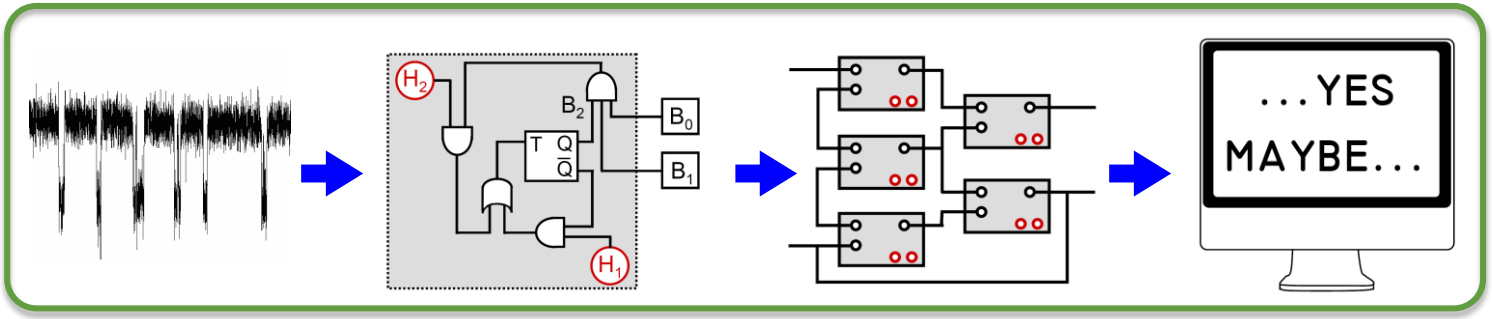
→ **Modèle SPICE associé, reproduisant le comportement du nano-composant :**





→ *Concept :* Codage pour des **probabilités**.

→ *Design* : Portes logiques pour le calcul Bayésien :



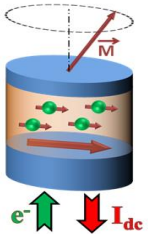
UN PROJET INNOVANT BIO-INSPIRÉ

➢ Mon projet : Réseau d'oscillateurs neuro-inspiré

→ *Inspiration* : imiter le cerveau qui se base sur la synchronisation de l'activité des neurones.

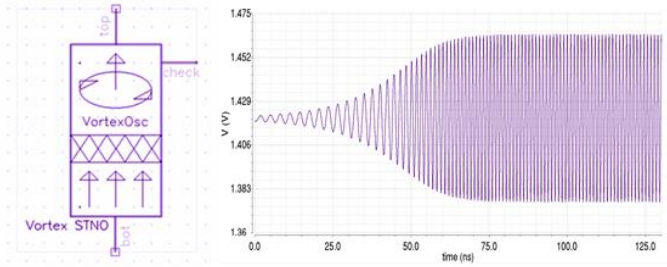
→ *Design* : concept de mémoire associative, basée sur un réseau d'oscillateurs couplés.

Composant retenu : Nano-oscillateur magnétique



Oscillations de l'aimantation

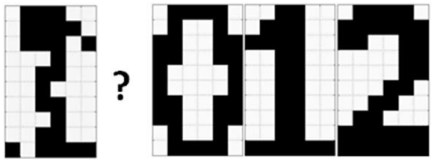
Modèle SPICE :



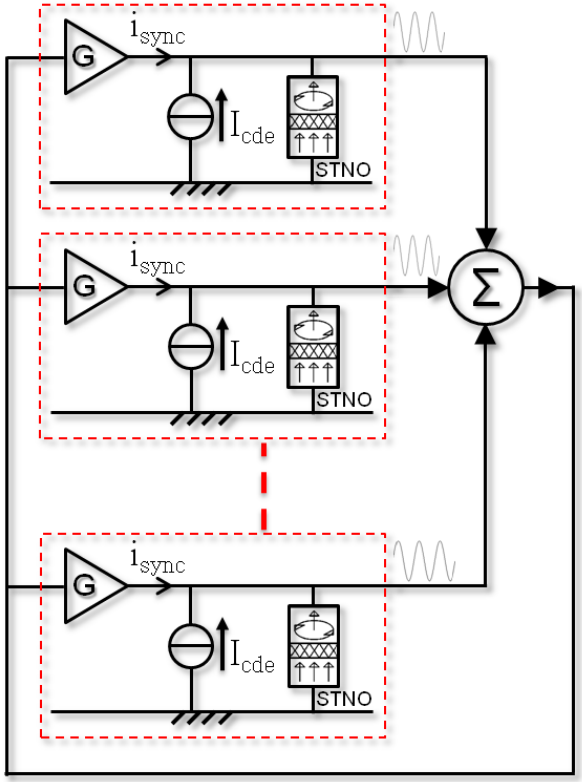
→Dimensions nano

→Accordable en fréquence

→ *Potentiel* : réalisation d'opérations cognitives



Mémoire associative – schéma de principe



SIMULATIONS POUR LA CONCEPTION DE CIRCUITS

La simulation au niveau système permet d'évaluer le potentiel des circuits innovants et de leur intégration pour des applications :

- Performances (fréquence, taux d'erreur, …).
- Première estimation de la puissance consommée.
- Robustesse à la dispersion des composants.
- Robustesse au bruit.
- Robustesse aux défaillances

+ elle permet de mettre en avant les *paramètres critiques* des nanotechnologies qui permettront de garantir la fiabilité des systèmes, malgré la non-fiabilité des nano-composants.

❖ Identification du domaine d'application du système essentielle : déterminera les performances critiques à atteindre.

Financement par le Labex :

400k€ / 4 ans

NanoSaclay
Laboratoire d'Excellence en Nanosciences et Nanotechnologies

- Recrutement d'un post-doctorant (avril 2014) portant une vision *de la conception à la démonstration expérimentale*
- Financement d'un doctorant associé au projet :
  Damir Vodenicarevic (début en octobre 2014)
- Moyens de nano-fabrication et de caractérisation

PERSPECTIVES

2014

Caractérisation, modélisation

→ Achat d'équipement

2014-2015

Conception, simulation de circuits

2015-2016

Fabrication

→ Moyens de nano-fabrication

2016-2017

Tests, Validation