



cea

leti

CAP sur les nouvelles mémoires

Stratégie, atouts et avancées
technologiques du CEA-Leti



Contact presse :

Marion Levy
T. 04 38 78 18 17
marion.levy@cea.fr

Contact technique :

Sandra Barbier
T. 04 38 78 36 63
sandra.barbier@cea.fr

CEA-Leti, technology research institute

17 avenue des Martyrs
38054 Grenoble Cedex 9, France
cea-leti.com



Sommaire

Un monde en quête de mémoires	3
Quatre technologies de mémoires	4
Des technologies mémoires prometteuses	4
Les technologies de mémoires non volatiles développées au CEA-Leti	5
Mémoires à changement de phase	6
Mémoires ferroélectriques	7
Mémoires résistives	8
Les nouvelles stratégies : calcul, énergie & neuromorphique	9
Calcul dans la mémoire	9
Énergie dans la mémoire	9
Vers des circuits neuromorphiques	10
R&D avancée sur les mémoires : pourquoi travailler avec le CEA-Leti	11
Expertise	11
Synergies	11
Équipements	11



Un monde en quête de mémoires

Aujourd'hui, les mémoires redeviennent une priorité pour deux raisons :

La production de données suit une croissance exponentielle. Avec l'utilisation massive d'objets connectés et de systèmes intelligents, ainsi que la multiplication des centres de données, le monde devrait générer 175 millions de terrabytes en 2025 : 10 fois le volume produit en 2015... Il est donc indispensable d'améliorer les performances et la densité des mémoires.

Le stockage et le transfert de données consomment jusqu'à 90 % de l'énergie des systèmes de calcul. Il faut recourir à des mémoires non volatiles, qui conservent l'information quand elles ne sont pas alimentées afin de limiter la consommation énergétique. Par ailleurs, il faut entièrement repenser ces systèmes autour de la mémoire pour limiter les transferts de données, et ainsi sortir du modèle Von Neumann.

Quatre technologies de mémoires

Le CEA-Leti développe trois technologies émergentes de mémoires non volatiles à fort potentiel : **les mémoires à changement de phase** (PCRAM ou PCM), **les mémoires ferroélectriques** (FeRAM ou FRAM), les **mémoires résistives** (ReRAM ou RRAM). De façon plus récente, il étudie les **mémoires magnétiques** (SOT-MRAM), connues pour leur rapidité d'écriture et leur endurance record à basse température.

En parallèle, le CEA-Leti travaille sur toute la chaîne de valeur des futurs systèmes de calcul : matériaux, composants, technologies intégrées, architecture, etc.

Ces recherches visent à proposer différentes approches innovantes :

- **le calcul proche ou dans la mémoire ;**
- **l'énergie dans la mémoire ;**
- **les circuits neuromorphiques.**

Les secteurs applicatifs : automobile, informatique, télécoms, équipements industriels, cybersécurité, biens de consommation, calcul haute performance, intelligence artificielle proche capteur (intelligence artificielle embarquée), etc.

Des technologies mémoires prometteuses

	NOR FLASH	MRAM	PCRAM	RRAM	FeRAM (HfO ₂)
Performance de stockage	~200 pJ / bit	~20 pJ / bit	~300 pJ / bit	~100 pJ / bit	~10 fJ / bit
Vitesse d'écriture	20 μs	20 ns	10-100 ns	10-100 ns	4 ns @ 4.8 V
Endurance	10 ⁵ -10 ⁶	10 ⁶ -10 ¹⁵	10 ⁸	10 ⁵ - 10 ⁶ pour 16 Mbit	10 ⁶ -10 ⁷ pour 16 kbit
Rétention	> 125° C	85° C - 165° C	165° C	> 150° C	> 125° C
Complexité de fabrication	Complexe	Medium	Medium	Simple	Simple
Cellule multi-niveaux	Oui	Non	Oui	Oui	Non
Passage à l'échelle	Mauvais	Moyen	Élevé	Élevé	Élevé

++ Endurance

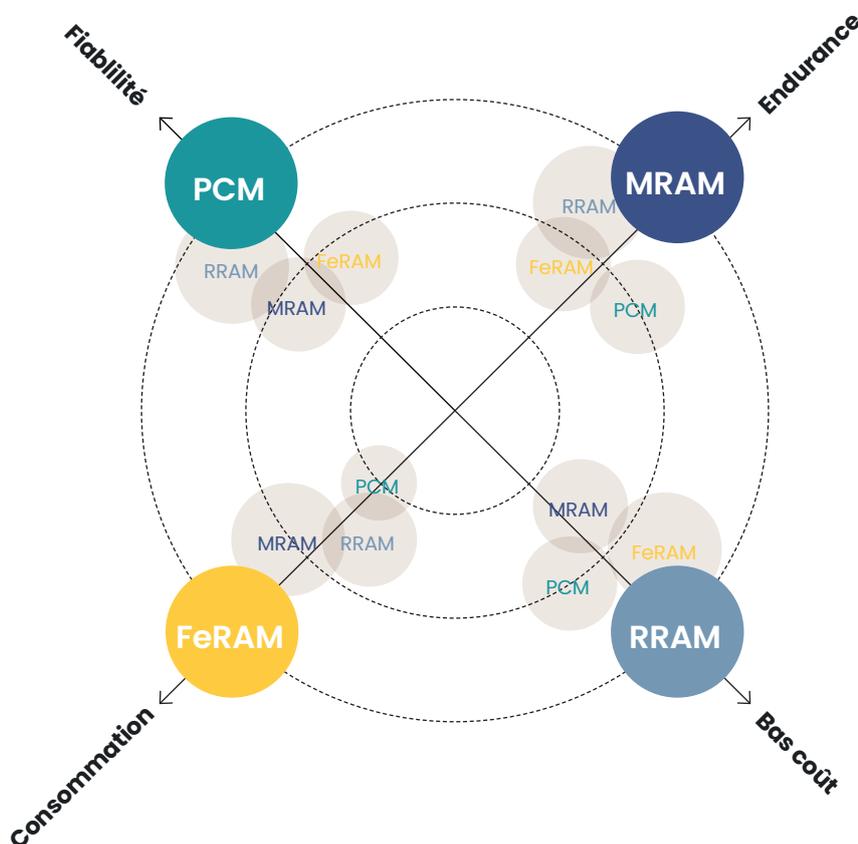
++ Fiabilité

++ Bas coûts

++ Consommation

Les technologies de mémoires non volatiles

développées au CEA-Leti



Mémoires à changement de phase (PCM)

Comment ça marche ?

L'information est stockée dans la phase amorphe (état « 0 ») ou cristalline (état « 1 ») d'un matériau chalcogénure qui garantit une transition de phase réversible sur un nombre très élevé de cycles.

Quels atouts ?

- **Miniaturisation** : le mécanisme de changement de phase est conservé jusqu'à l'échelle nanométrique
- **Cyclabilité** : 100 à 1000 fois supérieure à celle des mémoires flash
- **Vitesse de programmation** : quelques dizaines de nanosecondes
- **Stockage analogique de l'information** : l'utilisation d'états intermédiaires entre le 0 et le 1 permet de tripler voire quadrupler la densité de stockage
- **Facilité accrue vis-à-vis des particules**

Quelles applications ?

Stockage de données, microcontrôleurs pour l'automobile, intelligence artificielle embarquée, cybersécurité

Industrie

Une technologie de mémoire PCM a été transférée à un grand acteur mondial du semi-conducteur. Elle sera produite à des millions d'exemplaires pour des applications grand public, notamment l'automobile.

Nos axes de recherche

- **Matériaux** : Développement de nouveaux alliages pour atteindre les spécifications des applications visées sur des nœuds technologiques avancés. Le CEA-Leti s'appuie sur des techniques de mesure et d'analyse à l'état de l'art pour explorer et qualifier ces matériaux.
- **Design et intégration** : Conception de nouveaux dispositifs PCM pour miniaturiser, réduire la consommation, optimiser la densité de stockage et les performances.
- **Programmation et tests** : Pour chaque mémoire développée, étude des protocoles les plus adaptés pour améliorer les performances, la fiabilité et l'exploitation du comportement analogique.
- **Co-intégration** : Co-intégration de la PCM avec un sélecteur situé dans le back-end (interconnexions métalliques), pour l'implémenter dans des architectures 3D et atteindre la densité adéquate pour une mémoire ($4F^2$ de surface, F étant la période entre deux lignes de métal).

Mémoire à changement de phase « 3D » pour les applications embarquées

Pour la première fois, une mémoire à changement de phase développée spécifiquement pour les applications embarquées a été co-intégrée avec un sélecteur de type « BackEnd ». Cette avancée issue du CEA-Leti ouvre la voie à de nouvelles applications embarquées de ces mémoires pressenties pour remplacer les actuelles mémoires Flash.

► [Lire l'article](#)



Mémoires ferroélectriques (FeRAM ou FRAM)

Comment ça marche ?

La mémoire est constituée d'un matériau isolant ferroélectrique qui sépare deux électrodes métalliques. L'information (« 0 » ou « 1 ») est codée physiquement par le sens du vecteur polarisation électrique, vers le haut ou vers le bas.

Quels atouts ?

- **Très basse consommation** : à 10 fJ/bit, la FeRAM consomme moins que toutes les autres mémoires
- **Cyclabilité** : supérieure à celle de toutes les autres mémoires, jusqu'à 10^{15} cycles
- **Écriture et lecture très rapides** : seulement 4 ns à 4,8 V
- **Faible coût de fabrication**

Quelles applications ?

Informatique, télécoms, microcontrôleurs pour systèmes embarqués, intelligence artificielle embarquée

Industrie

Le CEA-Leti est impliqué dans trois programmes européens (3eFerro, StorAlge et BeFerroSynaptic) auxquels participent également STMicroelectronics, IBM, Thales et Ford.

Nos axes de recherche

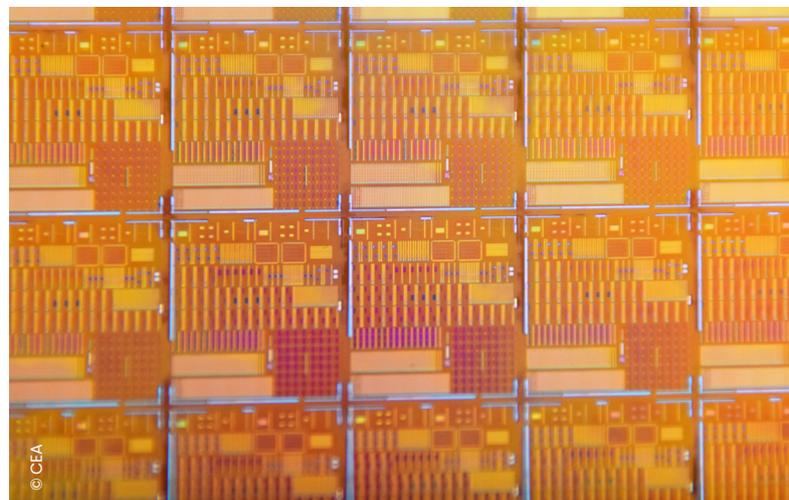
- **Matériaux** : Remplacement du matériau actif en PZT par un matériau sans plomb l'oxyde d'hafnium (HfO_2), compatible CMOS, facile à déposer en couches très minces et à miniaturiser.
- **Design et conception** : Amélioration des performances des FeRAM à base de HfO_2 , miniaturisation pour intégration dans des circuits intégrés.
- **Caractérisations avancées et démonstrateurs** : Simulation, conception et réalisation de démonstrateurs complexes intégrés en 200 et 300 mm, caractérisations morphologiques et électriques avancées.

Le CEA-Leti annonce une première mondiale vers la production massive de mémoires feram

SAN FRANCISCO — 15 décembre 2021

Le CEA-Leti annonce la première démonstration au monde de matrices de mémoire ferroélectrique à accès aléatoire (FeRAM) de 16 kbit au nœud 130 nm, soit un pas de plus vers la commercialisation de cette technologie mémoire économe en énergie.

► [Lire le communiqué de presse](#)



Mémoires résistives (ReRAM ou RRAM)

Comment ça marche ?

Un canal de conduction se forme et se rompt de manière réversible, sous l'effet d'un champ électrique, dans un isolant pris en sandwich entre deux électrodes métalliques.

Bon à savoir : Les RRAM se scindent en plusieurs catégories : CBRAM et OxRAM. Le CEA-Leti a conduit des recherches dans le domaine des CBRAM dans les années 2010 et investigate désormais plus particulièrement les OxRAM basées sur le matériaux HfO_2 qui offrent des meilleures performances en terme de vitesse et de fiabilité d'intégration.

Quels atouts ?

- **Rapidité** : temps de programmation de 100 ns, voire moins
- **Très faible coût**
- **Faible consommation** : environ 100 pJ/bit

Quelles applications ?

Internet des objets, intelligence artificielle embarquée, calcul neuromorphique, cybersécurité

Industrie

Le CEA-Leti transfère depuis 2020 ces technologies à ses partenaires industriels, partout dans le monde.

Nos axes de recherche

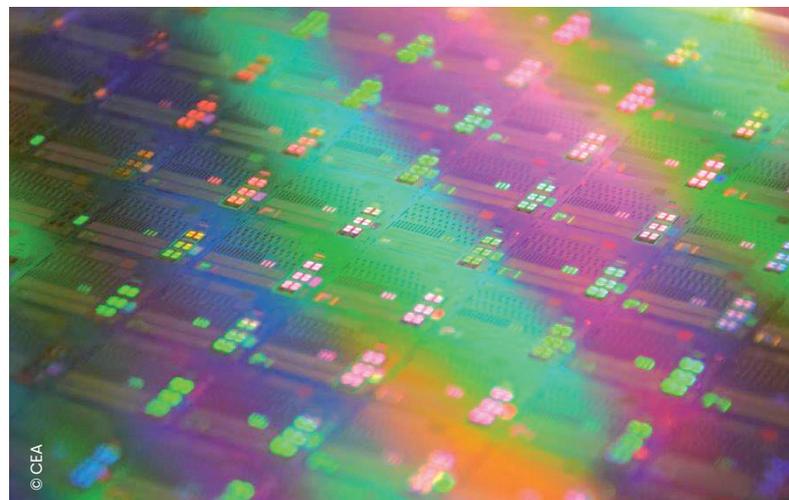
- **Industrialisation** : Montée en maturité de la technologie RRAM à des fins d'industrialisation : nouveaux matériaux, nouvelles couches et empilements, caractérisation électrique, protocoles de programmation et d'adressage, modélisation et simulation, intégration sur circuits logiques et tests.
- **Co-intégration** : Co-intégration de la RRAM avec un sélecteur situé dans le back-end, pour l'implémenter dans des architectures 3D et augmenter la densité.
- **Nouvelles applications** : Développement de RRAM pour de nouvelles applications en cybersécurité, circuits neuromorphiques, intelligence artificielle embarquée, etc.

Mémoires RRAM : de l'information et... de l'énergie

Les isolants de Mott, ces métaux capables de se muer en isolants, vont-ils remédier à la trop grande variabilité des mémoires résistives (ReRAM) ?

C'est ce que laisse espérer un projet CEA-Leti – LTM – CNRS.

► [Lire l'article](#)



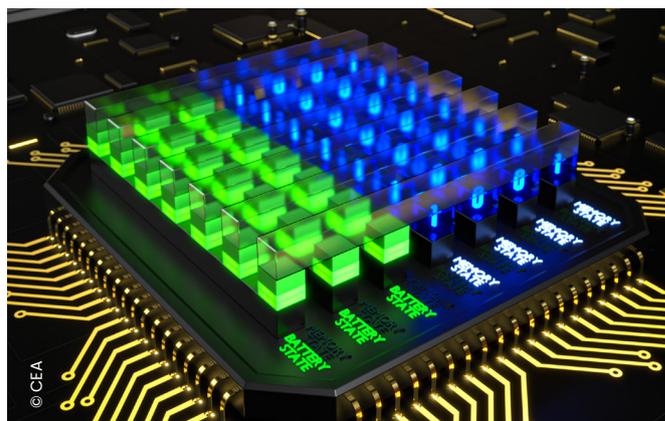
Les nouvelles stratégies : Calcul, énergie & neuromorphique



Calcul dans la mémoire

Co-intégrer des mémoires RRAM et des dispositifs logiques rend certaines tâches de calcul beaucoup plus efficaces en énergie et plus rapides, par exemple en calcul neuromorphique ou en intelligence artificielle embarquée. Le CEA-Leti développe une architecture de dispositifs qui permet le calcul dans la mémoire à grande échelle et l'intégration à très haute densité grâce à l'empilement vertical des cellules. Dans le cadre d'un projet ERC doté de 2,75 M€, il réalise un accélérateur circuit 20 fois moins gourmand en énergie qu'un circuit classique utilisant une architecture Von Neumann à l'état de l'art.

► [Lire l'article](#)



Énergie dans la mémoire

Le CEA-Leti étudie une solution de rupture consistant à détourner des mémoires RRAM de leur fonction première pour y stocker de l'énergie et de l'information. Leurs densités d'énergie et de puissance sont comparables à celles des supercondensateurs.

Ces mémoires extrêmement compactes pourraient être placées au plus près des processeurs à alimenter, ce qui simplifierait le réseau de distribution du circuit et améliorerait son efficacité. Les secteurs applicatifs envisagés sont l'internet des objets et les objets nomades.

► [Lire le communiqué de presse](#)

Vers des circuits neuromorphiques

Le coût en temps et en énergie lié au transfert de données entre la mémoire et le calcul est devenu le principal défi des systèmes informatiques, notamment pour les applications où la donnée est clé, comme la reconnaissance vocale en langage naturel. Les chercheurs s'inspirent du vivant et notamment du cerveau pour démultiplier l'efficacité de ces systèmes, aussi bien en termes de performance que d'énergie consommée.

Un circuit neuromorphique se différencie d'une architecture classique de par l'organisation de ses éléments, y compris la mémoire et le calcul : à l'instar des synapses et des neurones de notre cerveau, les réseaux de neurones et le centre de calcul sont positionnés à proximité dans un même circuit. Dès lors, penser composant mémoire isolé n'a plus de sens, les chercheurs favorisent une approche de calcul plus globale.

Pour développer des circuits neuromorphiques qui puissent répondre aux contraintes de l'intelligence artificielle embarquée, liées notamment à l'énergie et à la mémoire disponible, le CEA-Leti s'appuie sur des approches variées.

Réseau neuronal sur puce

Le CEA-Leti s'inspire du cerveau humain par le développement de réseaux de neurones à impulsion.

L'institut a dévoilé en 2019 le premier réseau neuronal sur puce entièrement intégré doté d'une mémoire RRAM qui permet un calcul massivement parallèle, basse consommation et à faible latence.

► [Lire l'article](#)

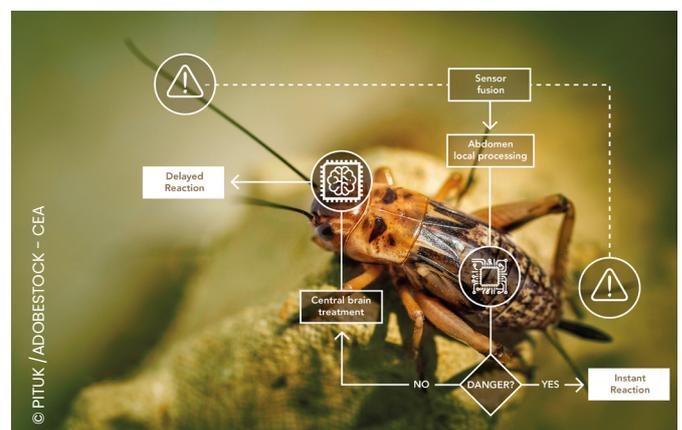
Reseau neuronal en local

Le CEA-Leti s'inspire du système nerveux des animaux, où les éléments dédiés au calcul et à la mémoire sont distribués et placés à proximité.

Dôté d'un ERC, le projet vise à développer des dispositifs de mémoire sur silicium à l'échelle nanométrique inspirés du système nerveux des insectes afin de créer la première puce intelligente associée à un module neuronal local capable de traiter les données sensorielles en temps réel.

► [Lire le communiqué de presse](#)

Biomimétisme



R&D avancée sur les mémoires :

Pourquoi travailler avec le CEA-Leti



Expertise

20 ans de R&D sur les mémoires, plus de 60 brevets, une expertise complète : choix et optimisation des matériaux, conception et design de dispositifs, procédés de fabrication, intégration technologique, protocoles de programmation, tests...

Synergies

La capacité à orchestrer et mettre en synergie ces compétences pour optimiser les performances, l'encombrement, le coût et la consommation de chaque mémoire, pour chaque application.

Équipements

Des salles blanches et des lignes-pilotes à l'état de l'art industriel 300 mm, pour valider les procédés en conditions réelles et les transférer facilement à un fondeur.

Cette capacité à concevoir des technologies mémoires optimisées, dédiées à une application et prêtes à passer en production fait du CEA-Leti un acteur de R&D de premier plan mondial. Nous collaborons déjà avec une dizaine de partenaires industriels français et étrangers.

Glossaire

PCM : Mémoires à changement de phase

FeRAM /FRAM : Mémoires ferroélectriques

RRAM/ReRAM : Mémoires résistives

Remerciements

Ces travaux sont en partie soutenus par le programme de recherche et d'innovation Horizon 2020 de l'Union européenne, le programme de l'Agence nationale pour la recherche et le réseau des Carnot.

La région Auvergne Rhône-Alpes co-finance les équipements au meilleur niveau mondial du CEA-Leti.



À propos du CEA-Leti

Le CEA-Leti, implanté sur le centre du CEA-Grenoble, est un institut de recherche technologique du CEA, pionnier dans les domaines des micro et nano-technologies.

Il développe des solutions applicatives innovantes et compétitives pour répondre aux défis mondiaux actuels, notamment les énergies propres et sûres, la santé, le transport durable et la transition numérique. S'appuyant sur des infrastructures préindustrielles, ses équipes multidisciplinaires proposent leur expertise au travers d'applications variées, des capteurs au calcul intensif, en passant par le traitement des données ou encore la puissance. Le CEA-Leti développe des relations de long terme avec ses partenaires industriels et essaime des startups technologiques avec plus de 70 créations. Le CEA-Leti rassemble 1 900 chercheurs, un portefeuille de 3 100 brevets et 11 000 m² de salles blanches et possède des bureaux dans la Silicon Valley, à Bruxelles et à Tokyo. Il est membre du réseau des Instituts Carnot et de l'IRT Naoelec.

Plus d'infos sur cea-leti.com

CEA-Leti, technology research institute

17 avenue des Martyrs, 38054 Grenoble Cedex 9, France
cea-leti.com

   @CEA-Leti