

C. Billard, C. Marcoux, A. Walther, B. Des Loges - CEA LETI Minattec  
 N. Dempsey, S. Diaz, D. Givord, A. Dobrynin - Institut Néel  
 M. Paillard, P. Monfraix - Thalès Alénia Space  
 J. Delamare, O. Cugat, Y. Lembeye, J.M. Crebier, D. O'Brien, C. Pigot, H. Chetouani - G2ELab Grenoble Génie Electrique Lab

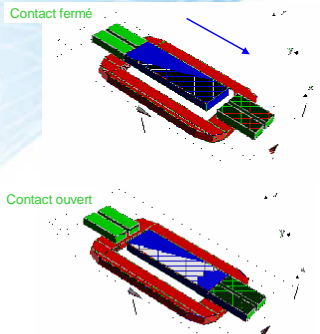
## Objectifs du projet

• Mettre au point le dépôt sur silicium de matériaux magnétiques durs nano-composites NdFeB

- étude de la composition des matériaux NdFeB (et SmCo),
- techniques de dépôt dans des caissons en oxyde, de patterning et de planarisation, de libération des aimants,
- techniques de recuit localisé permettant d'envisager une intégration Above-IC et ouvrant la voie à des designs plus innovants.
- Les matériaux développés dans Nanomag2 ont d'ores et déjà fixé un nouvel état de l'art dans le domaine des aimants intégrés

• Réaliser des prototypes de micro-commutateurs MEMS RF avec ces aimants intégrés NdFeB pour une application industrielle avec Thalès Alénia Space. L'actionnement magnétique intégré est très performant en terme de bistabilité, de densité de force (synonyme de bons contacts et de bonne tenue à la puissance), et de rapidité de commutation.

• Les applications sont nombreuses et visent aussi bien le marché des capteurs que celui des biotechnologies. Ces aimants performants trouveront également leur place dans la génération électrique pour les objets nomades à l'aide de  $\mu$ -convertisseurs electro-magnétiques.



### Principe de fonctionnement

Le commutateur est composé de 4 aimants fixes (en vert) et d'un aimant mobile (en bleu).

Au repos l'aimant mobile est dans une position stable et il est collé sur l'une des paires d'aimants fixes.

Une impulsion de courant dans la bobine d'actionnement (en rouge) est à l'origine d'une force de Laplace qui provoque le déplacement d'une position stable vers l'autre.

On ne consomme de l'énergie que pendant la commutation.

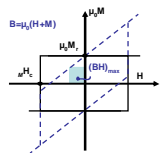
### Chiffres clefs

Durée : 36 mois 162 h.mois  
 Coûts : 1 350 000 euros 2 runs en 200 mm  
 Financement ANR : 800 000 euros

## Résultats et travaux en cours

### Dépôt sur silicium d'aimants NdFeB et SmCo

- Les dépôts et les caractérisations sont faits à l'institut Néel, département Nano, avec un prototype de machine de dépôt 100 mm (compatible 200 mm) → vitesse de dépôt de 18  $\mu\text{m/h}$ .
- La composition des aimants fixe l'aimantation à saturation ( $\mu_0 M_s$ ) et le champ d'anisotropie ( $\mu_0 H_A$ ).
- La **rémanence** ( $\mu_0 M_r$ ) est fixée par  $\mu_0 M_s$  et l'orientation cristalline → elle mesure la faculté à emmagasiner un champ magnétique et à le restituer.
- La **coercivité**  $H_c$  découle de  $\mu_0 H_A$  et des défauts dans le matériau → elle mesure la résistance au retournement de l'aimantation.
- Le **produit BH** donne la quantité d'énergie disponible pour l'actionneur magnétique.



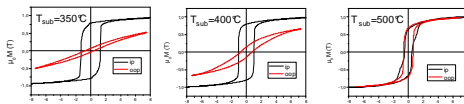
$\uparrow (BH)_{\text{max}} \rightarrow \downarrow \text{volume aimant}$

Material	$\mu_0 M_s$ (T)	$\mu_0 H_A$ (T)	$(BH)_{\text{max}}$ (kJ/m <sup>3</sup> )	$T_c$ (K)
RE-TM				
Nd <sub>2</sub> Fe <sub>17</sub> B	1.61	7.6	514	585
SmCo <sub>5</sub>	1.05	40	220	1000
Sm <sub>2</sub> Co <sub>17</sub>	1.30	6.4	333	1173
L1 <sub>0</sub>				
FePt	1.43	11.6	407	750
CoPt	1.00	4.9	200	840

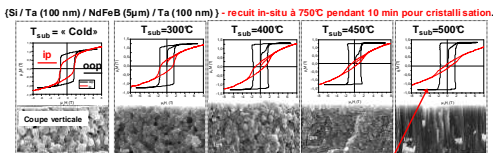
$M_r \leq M_s$   
 $H_c \leq H_A$   
 $M_r, H_c$  déterminés par la microstructure

### Performances des matériaux SmCo et NdFeB

• Le matériau SmCo a l'avantage de se cristalliser dès une  $T^{\circ}$  de dépôt de 350°C et d'avoir de très bonnes caractéristiques : rémanence  $\mu_0 M_r / \mu_0 H_c = 0.8T$  et coercivité  $\mu_0 H_c = 1.3T$ .



• Le matériau NdFeB doit être cristallisé après dépôt à au moins 650 °C. Son orientation devient hors du plan quand on augmente la  $T^{\circ}$  de dépôt. Ses performances magnétiques sont aussi de tout premier ordre.



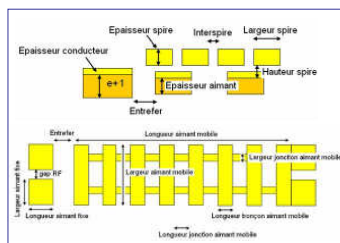
**$(BH)_{\text{max}} = 400 \text{ kJ/m}^3$  - plus haute valeur publiée pour films**

### Spécification et design de l'actionneur

- Tenue à la puissance RF minimale de 5 W.
- Commutation « chaude » (signal toujours présent en entrée pendant la commutation)
- Force de contact ~100  $\mu\text{N}$
- Temps de commutation < 1 ms
- Fiabilité > 10<sup>8</sup> cycles

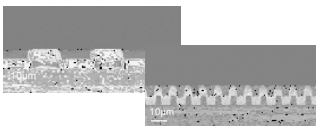
Actionneur correspondant pour  $F_{\text{contact}} \approx 100 \mu\text{N}$

- Dimensions: 400x945  $\mu\text{m}^2$  avec 32 segments et aimant de 5 $\mu\text{m}$  d'épaisseur
- Rémanence: 0.7 T
- Masse aimant mobile : 18.4x 10<sup>-9</sup> kg avec 3  $\mu\text{m}$  d'or
- Tps de commutation = 105  $\mu\text{s}$  (l=1.2xcom)

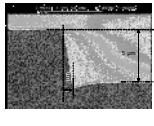


### Exemples de briques de base technologiques

Dépôt du matériau magnétique NdFeB en caisson oxyde



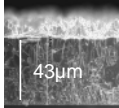
Réalisation de caissons d'oxyde



Gravure humide des aimants



Dépôt de couches épaisses

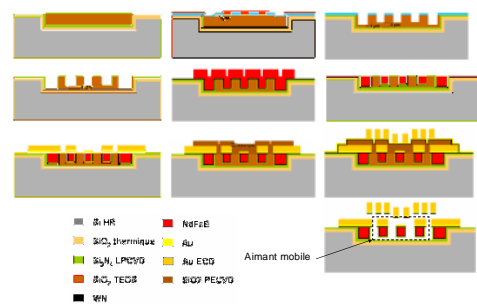


Planarisation des aimants

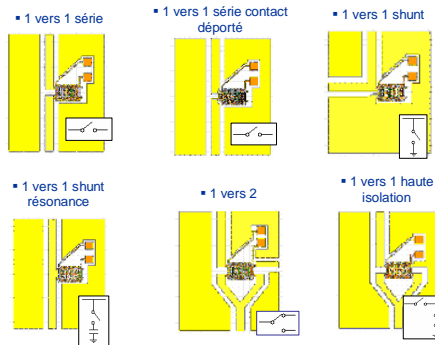


### Process flow simplifié

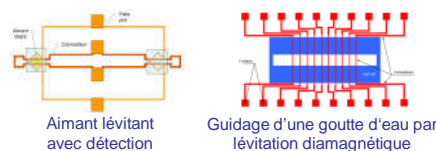
• 9 niveaux de masque et 58 étapes



### Les variantes de design RF



### Autres applications



Ce projet est valorisé par 2 brevets et 10 publications internationales

## Contact et partenaires du projet

Contact projet : Christophe BILLARD (LETI-MINATEC)  
 LETI/DCIS/SCME – 17 rue des Martyrs  
 38054 Grenoble cedex 9  
 Tél 04-38-78-45-13  
 christophe.billard@cea.fr



Réseau National en Nanosciences et en Nanotechnologies

