

# Actionneurs et Systèmes électromagnétiques

*Pr. Yves Perriard et Dr Christian Koechli  
Institut d'Electricité et de Microtechnique (IEM)  
Laboratoire d'Actionneurs Intégrés (LAI), Neuchâtel*

# Déroulement

- Cours sur 2 semestres
- Livre : Conversion Electromécanique
- Exercices + résumés + quiz  
pdf cours: Moodle
- TP semestre 6
- 7 crédits à la fin semestre II (!)



# Supports de cours

- Notes de cours des étudiants
- MOOC (Massive Online Open Course)
  - <https://courseware.epfl.ch/dashboard>

Titre du cours : Conversion Electromécanique I & II

- Moodle :

Cours MICRO-313 (notes manuscrites, exercices et corrigés)

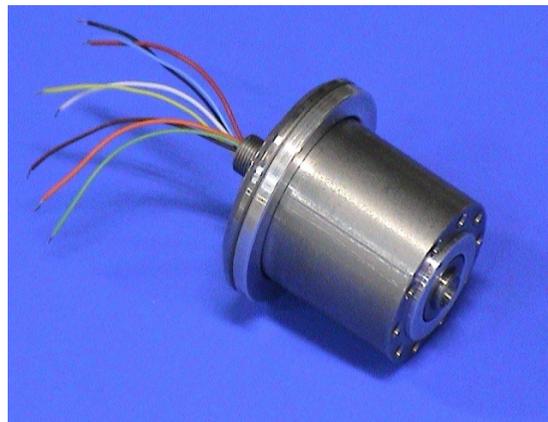
- Livre Conversion Electromécanique





# Quelques exemples : Seagate

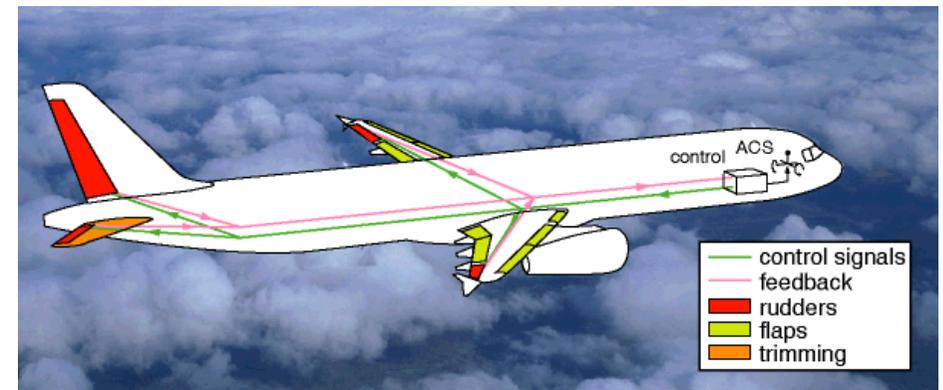
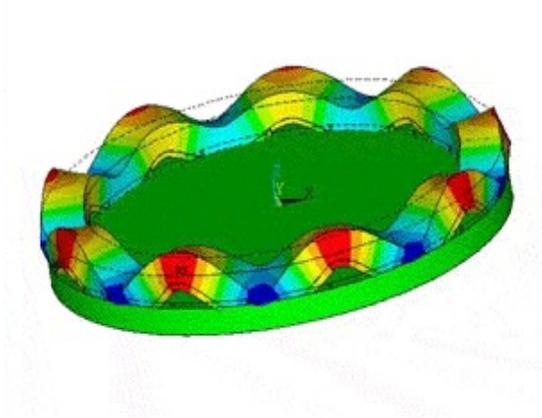
EPFL





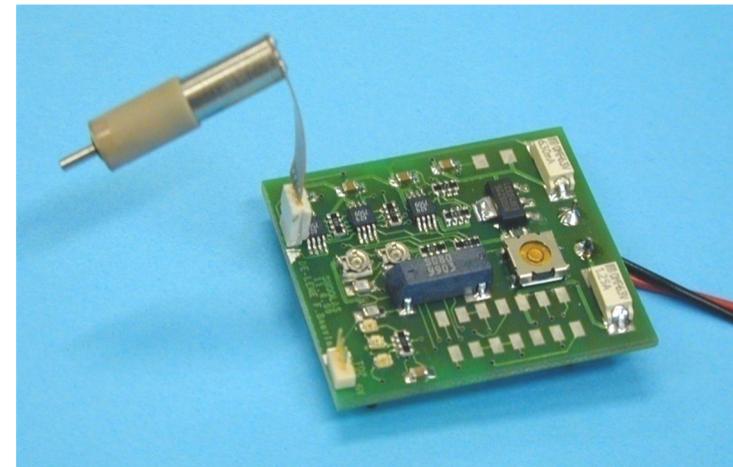
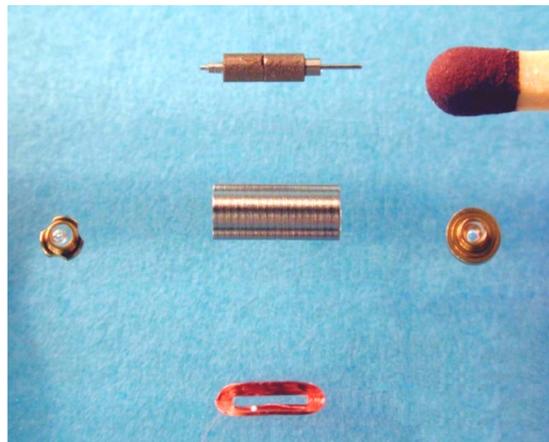
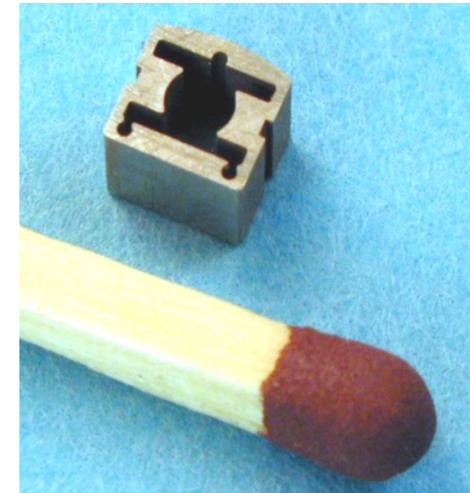
## Exemple d'application des moteurs piézo-électriques de grande puissance

- *Suppression des lignes hydrauliques dans l'avionique*
- *Réduction de la consommation*



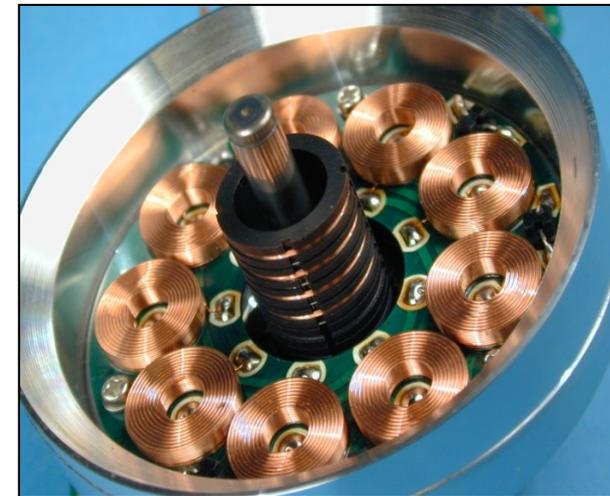
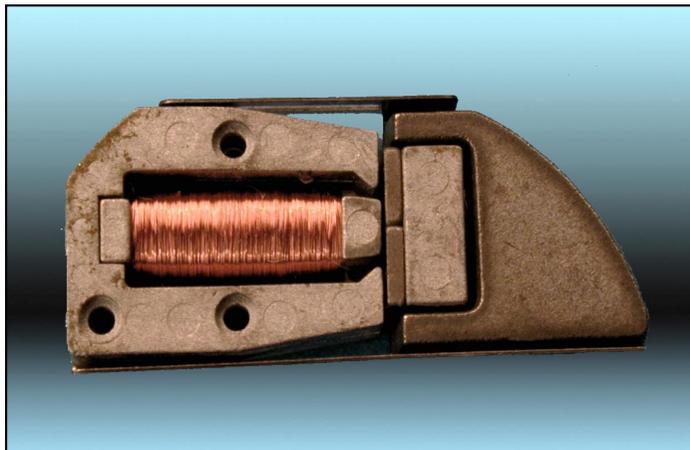
# Miniaturisation

- *Miniaturisation de l'entraînement*
- *Intégration de l'électronique*
- *Suppression des capteurs*



# Intégration et choix

- *Multiplication des fonctions par système*
- *Utilisation du concept "contactless"*
- *Analyse globale de l'entraînement*



# Moteur Lavet utiliser dans une montre

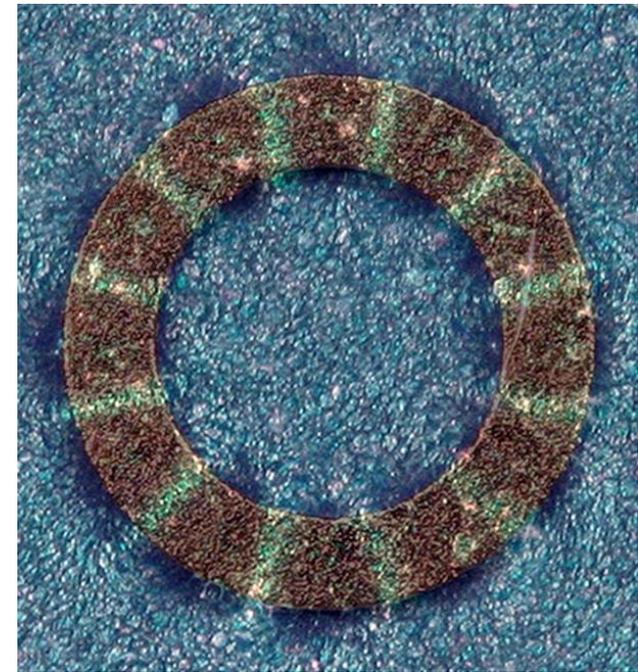
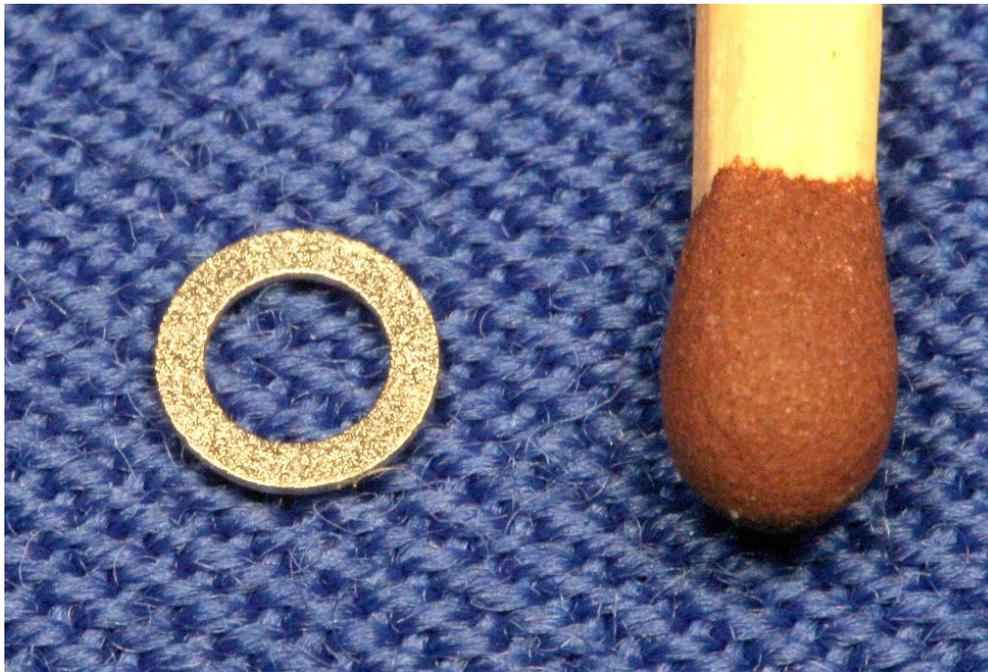


Source : Swatch Group

Rendement du moteur environ 15%



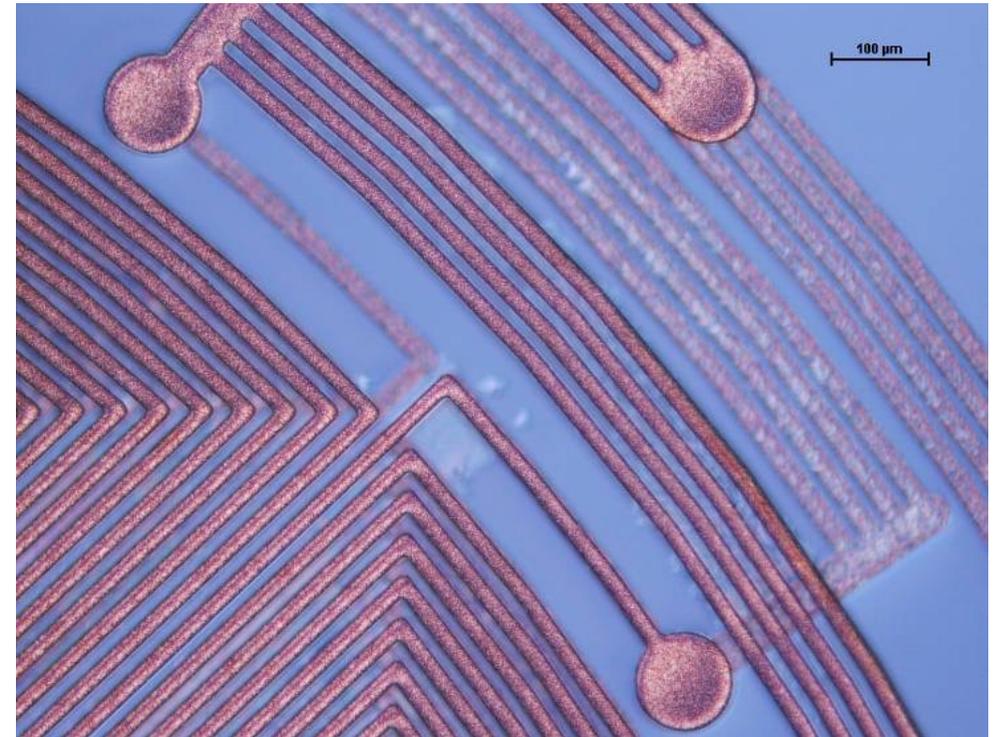
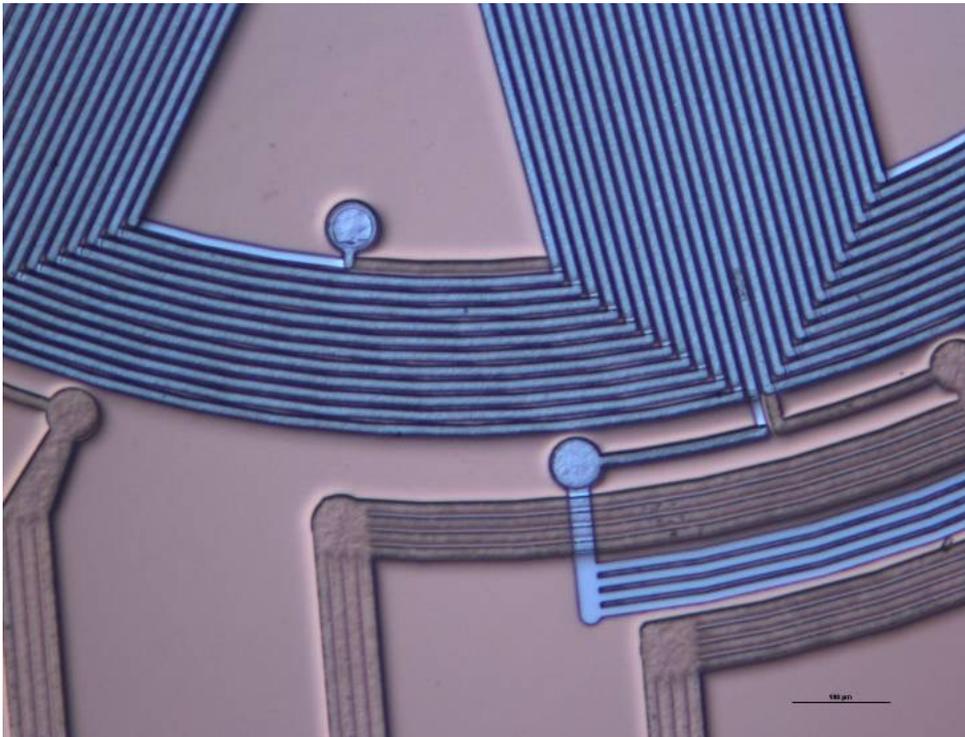
# Rotor



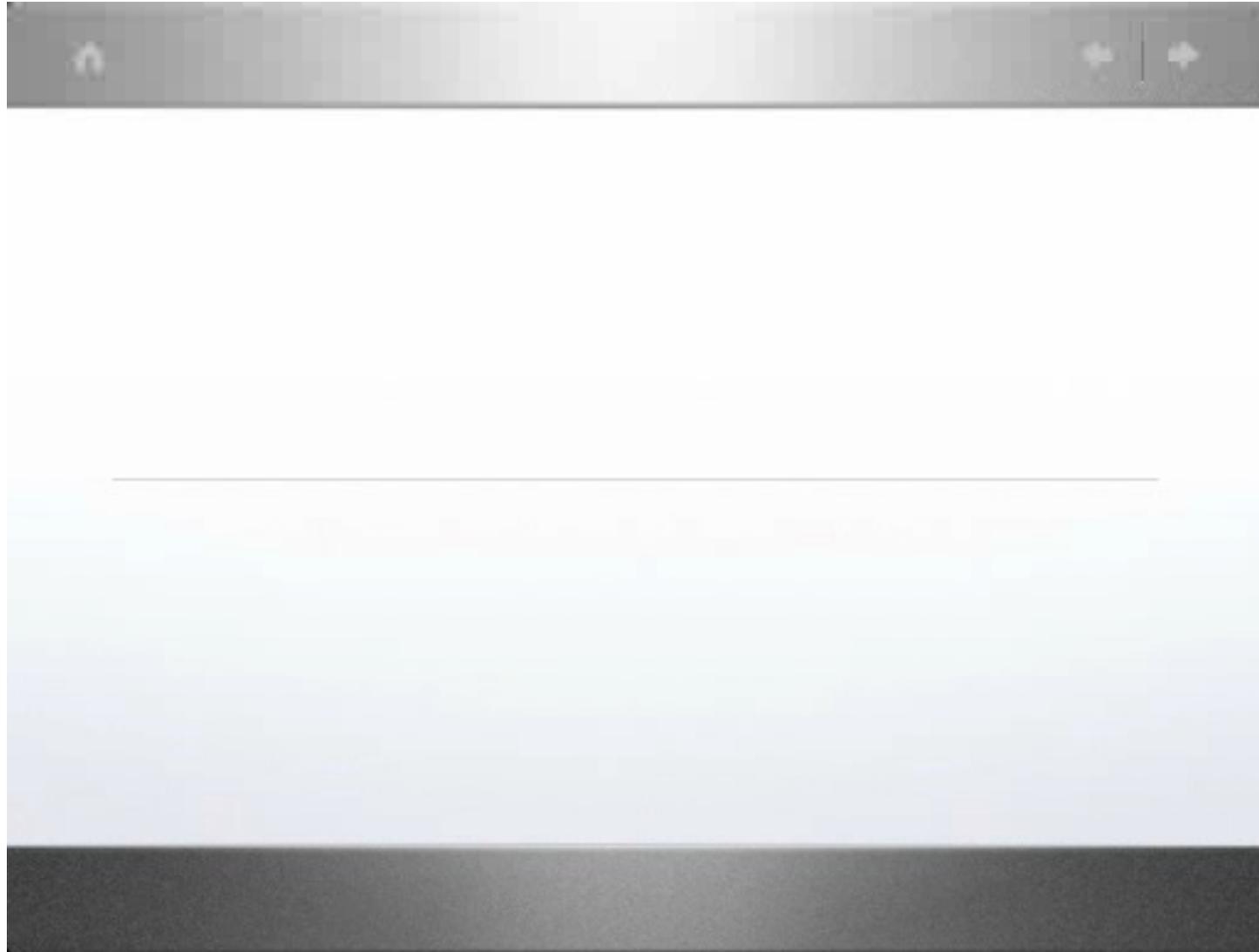
- Anneau multipolaire (12 poles)
- $B_r = 0.95 \text{ T}$ ,  $\varnothing_{\text{ext}} = 4.0 \text{ mm}$ ,  $\varnothing_{\text{int}} = 2.6 \text{ mm}$



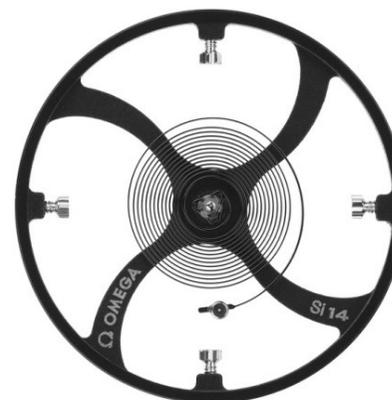
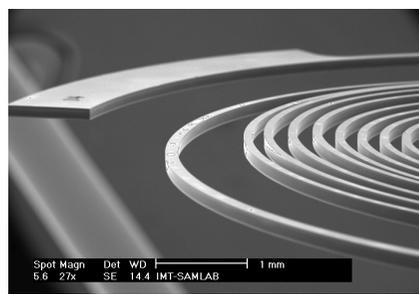
# Images du bobinage



# Rendement du moteur 42% EPFL



# Innovations dans la montre



1861: **Charles-Edouard Guillaume** à Fleurier

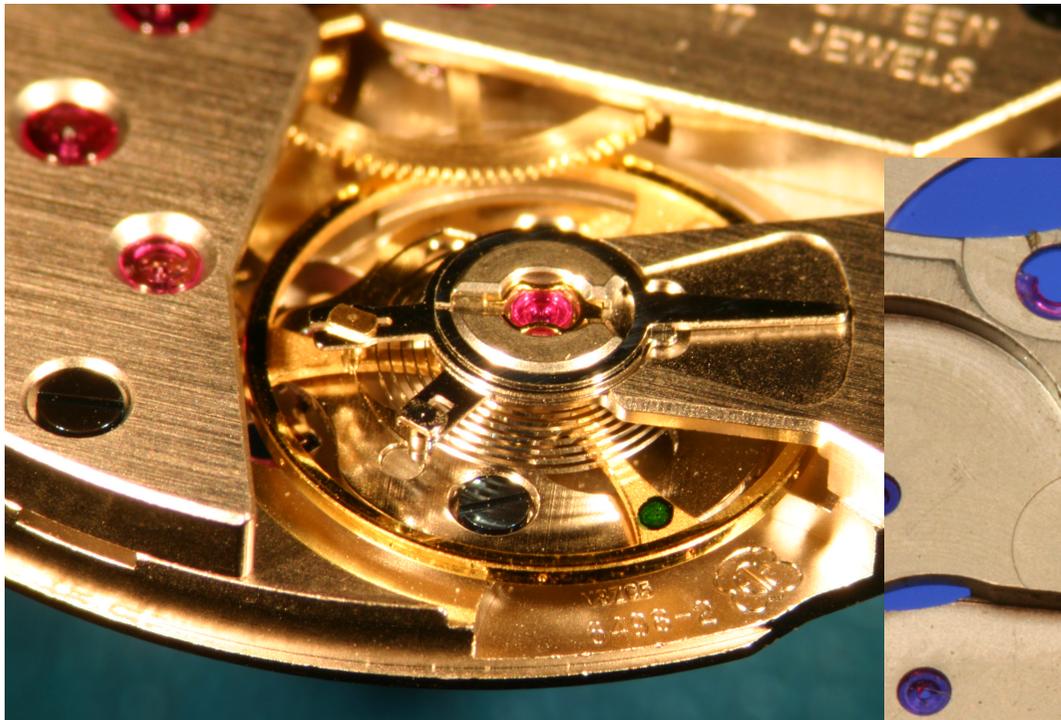
- Inventeur de l'Invar (alliage à faible coef. De dilatation)
- Prix Nobel de physique en 1920

2009: Technologie MEMS pour le ressort spiral (Prof. N. de Rooij)

2010: Oscillateur magnétique pour le ressort spiral (Prof Y. Perriard)

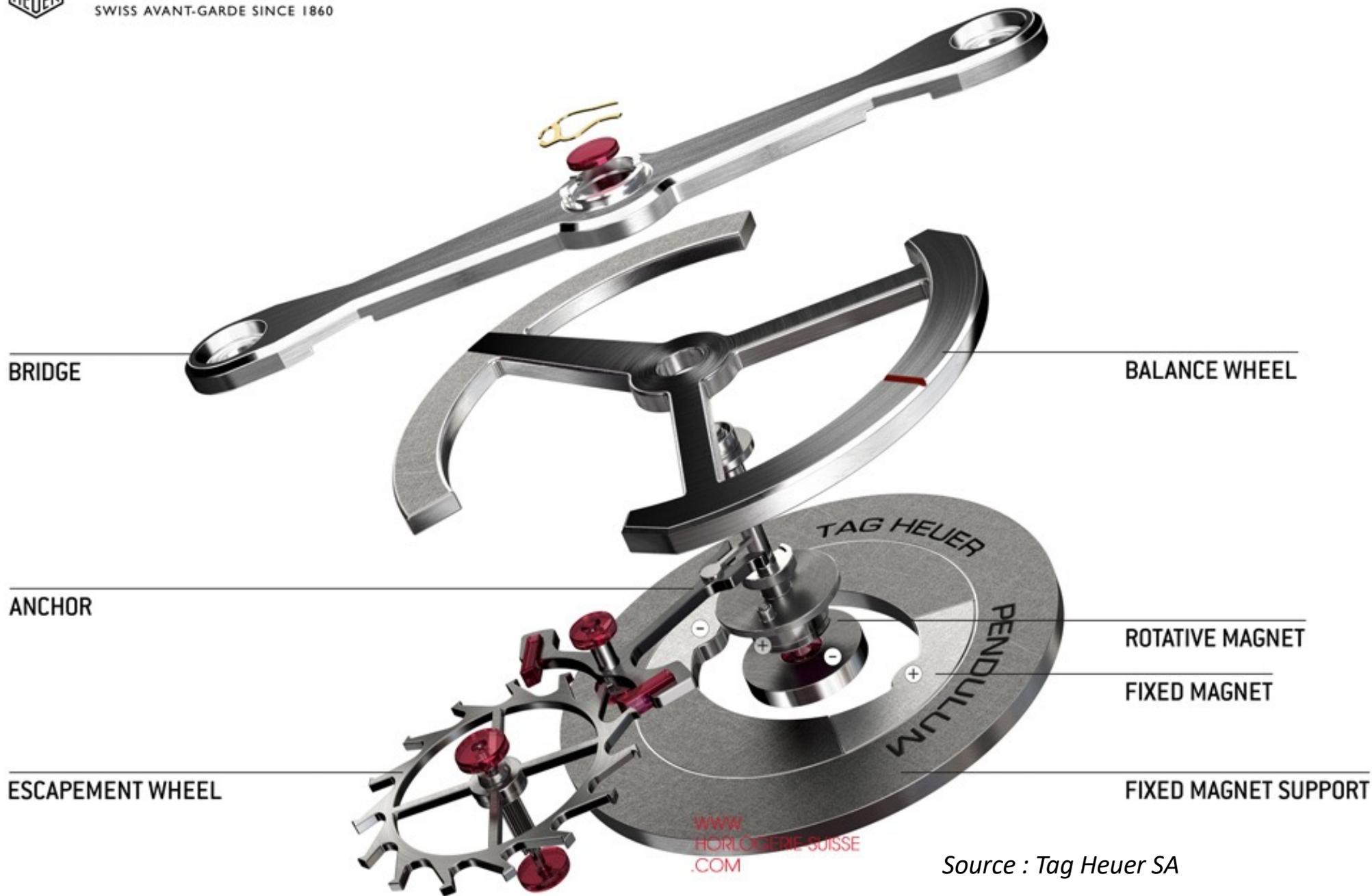


# Un nouvel oscillateur magnétique pour Tag Heuer

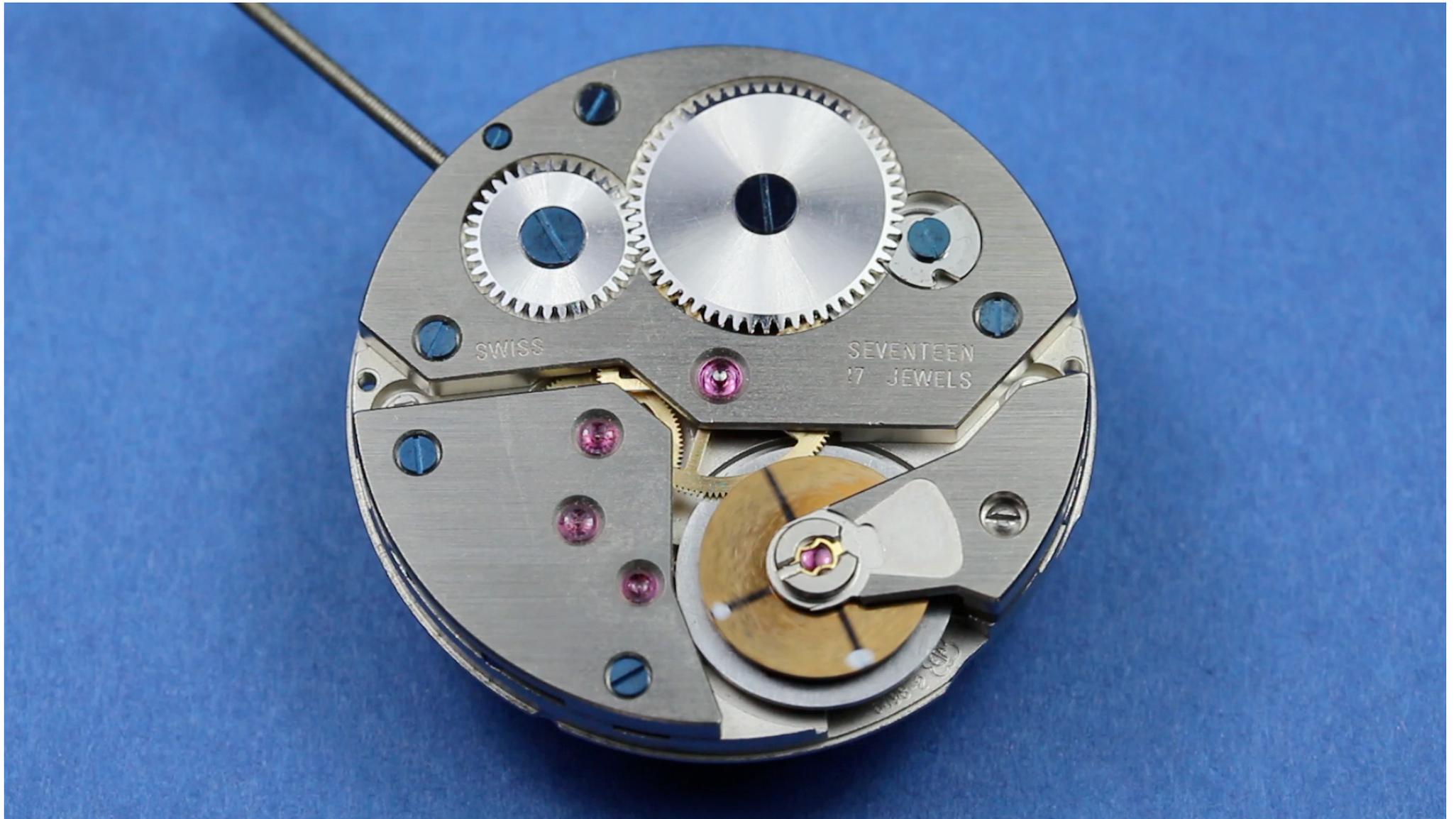




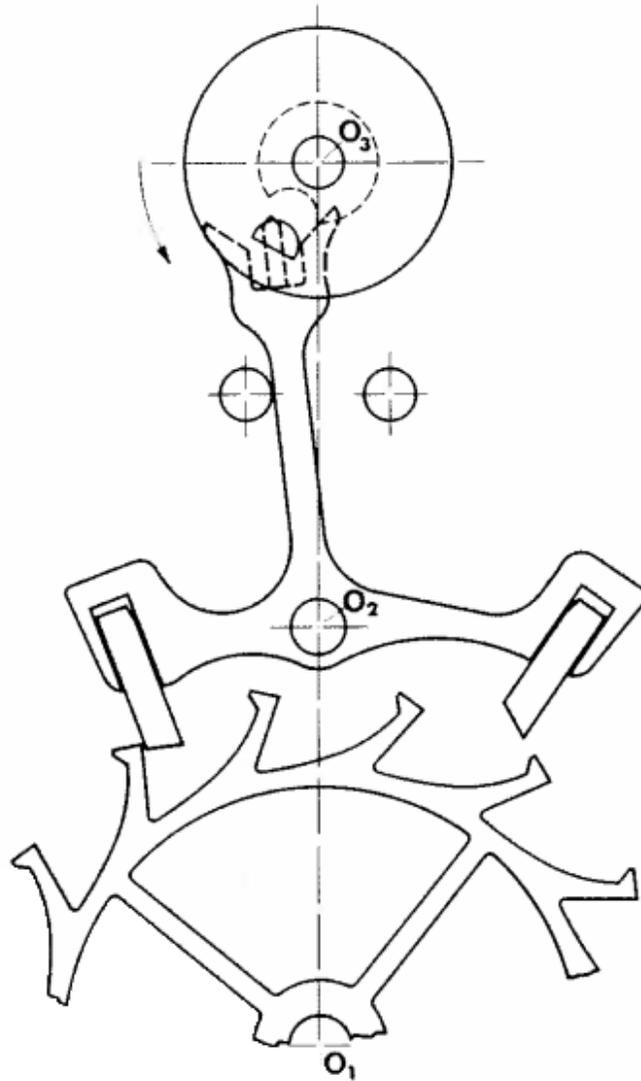
**TAG Heuer**  
SWISS AVANT-GARDE SINCE 1860







# Échappements horlogers EPFL



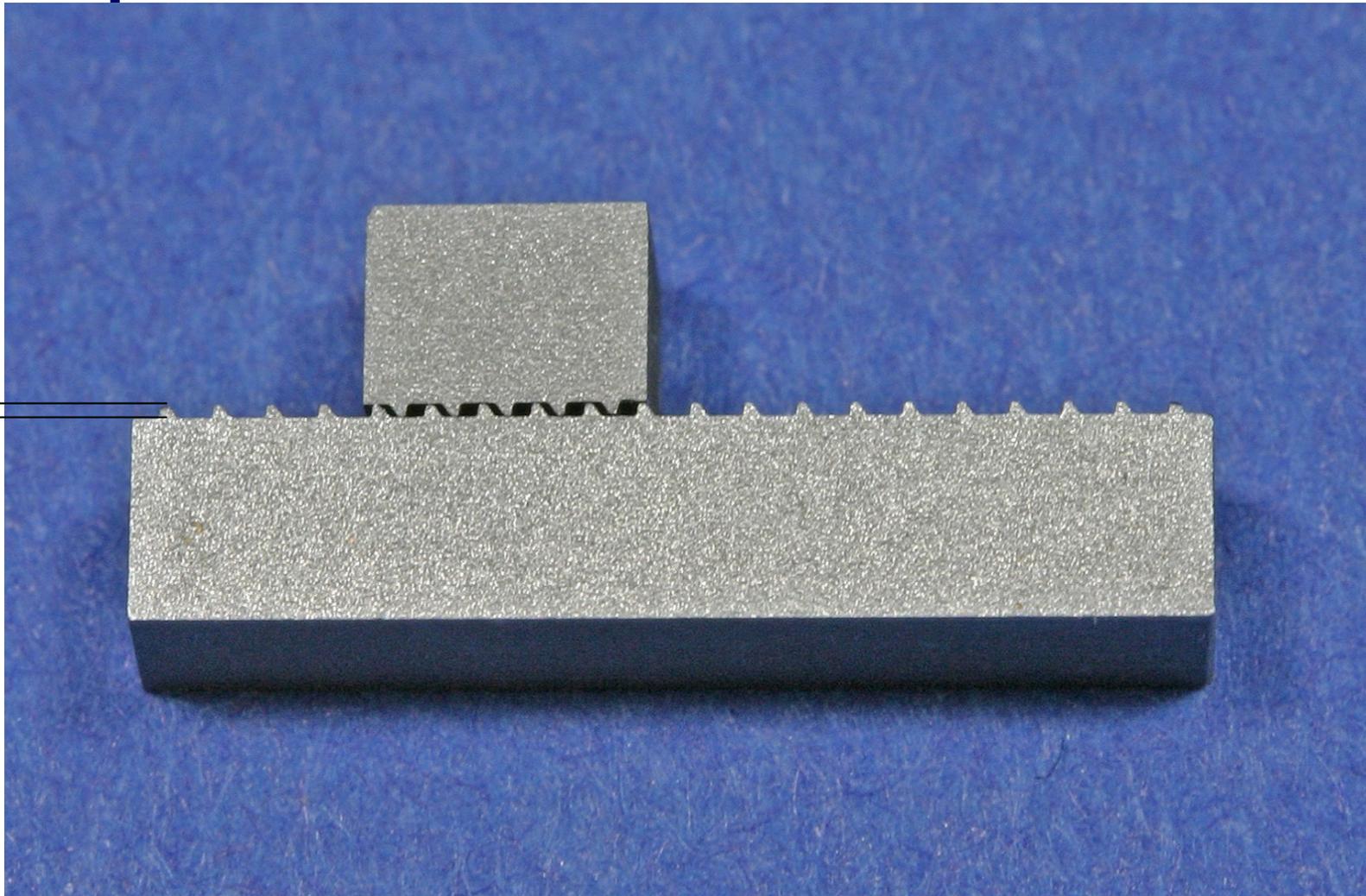
*Image: Ch. Huguenin. Echappements et moteurs pas à pas. FET-Neuchâtel, 1974.*



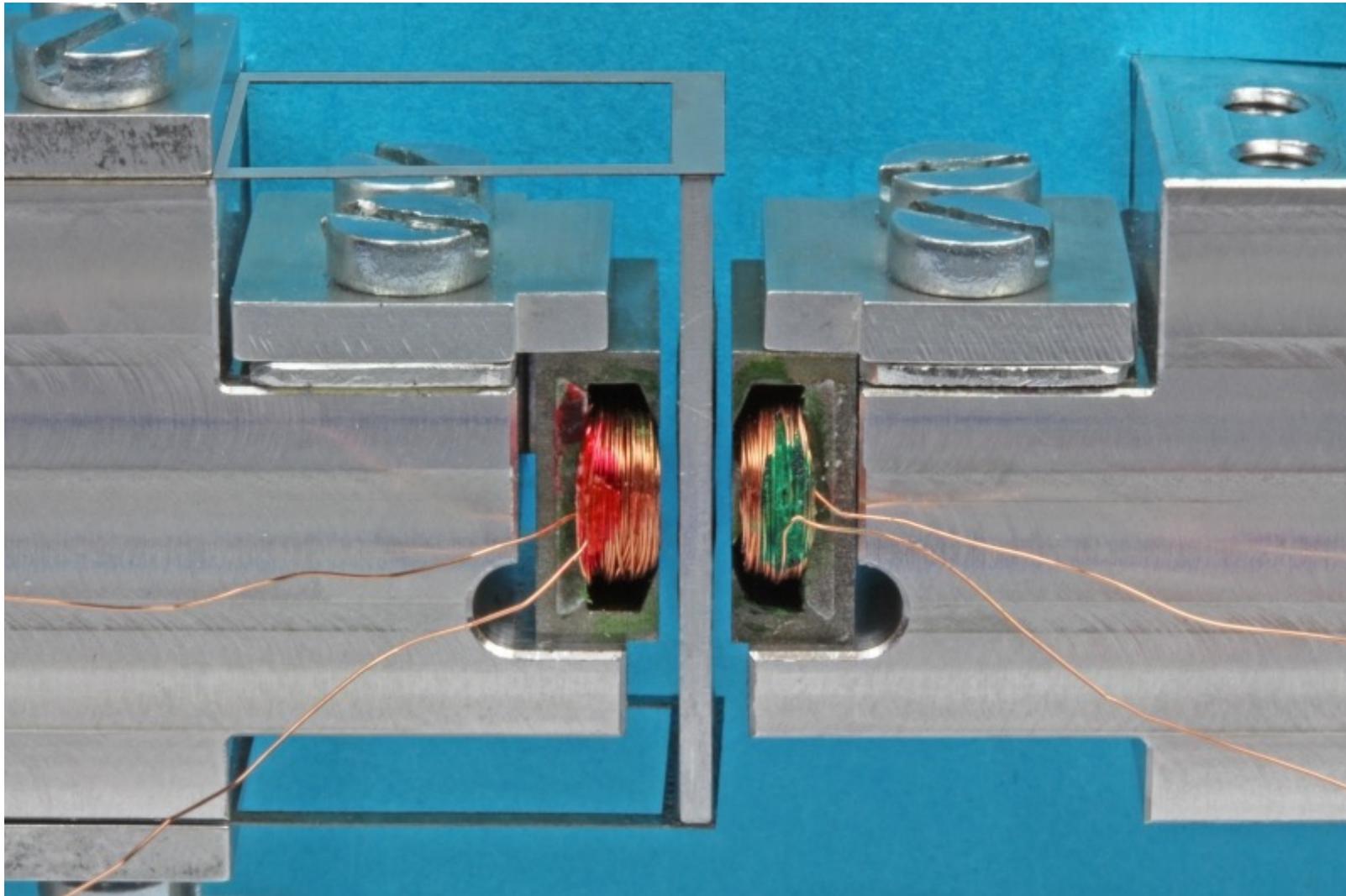


# Bloqueurs et rail

$0.2m$   
 $m$

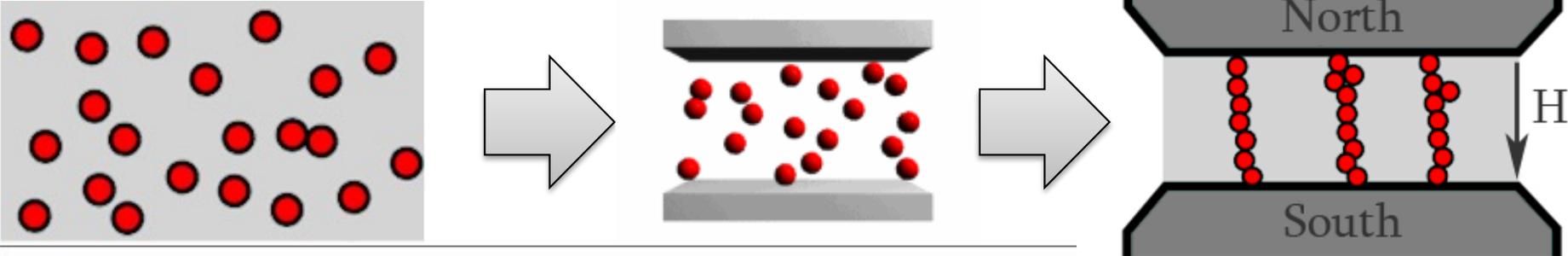


# Actionneur





# Matériaux magnétiques liquides !

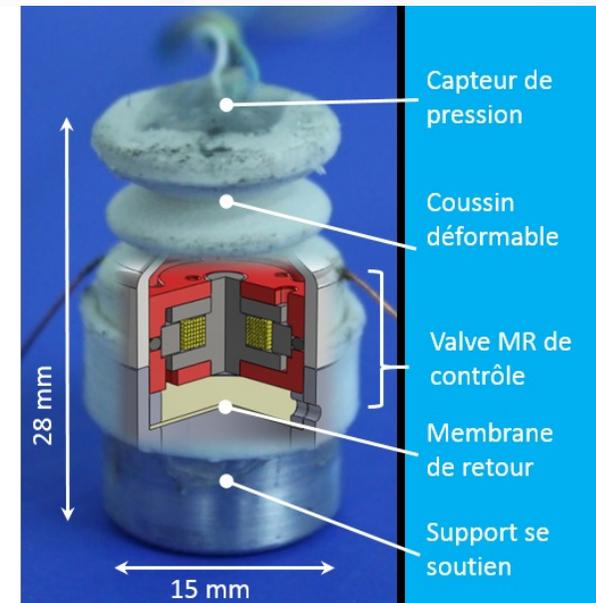
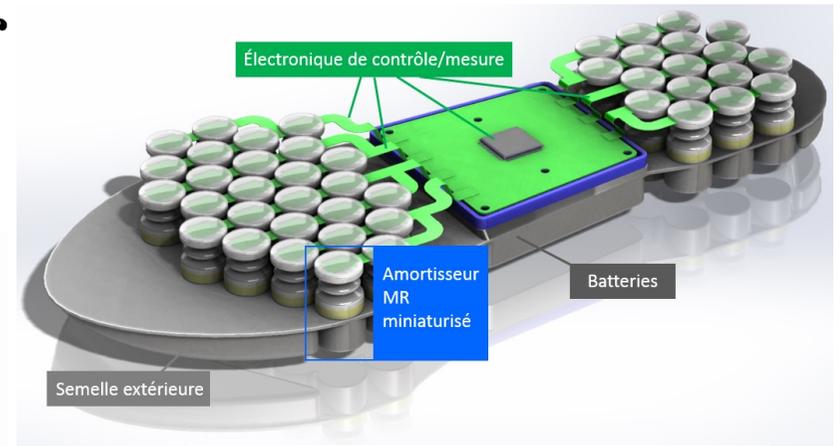
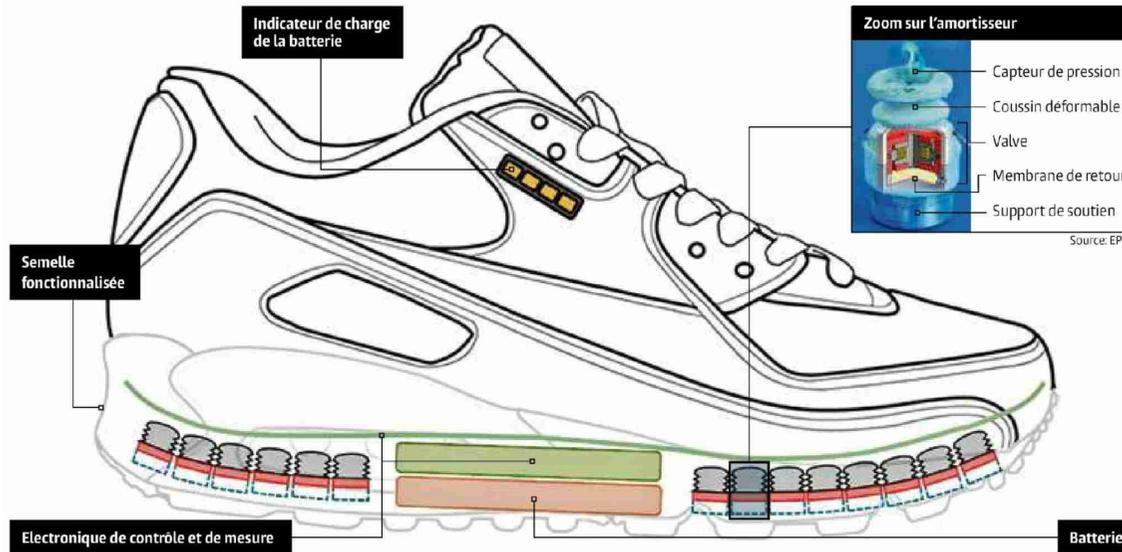


*\*Sachiko Kodama, Yasushi Miyajima, "Morpho Towers", ferrofluid*



## Des chaussures intelligentes pour lutter contre le « pied diabétique »

**SANTÉ** Les HUG et l'EPFL développent des semelles capables de prévenir les blessures aux pieds des diabétiques, sources d'amputations



SYLVIE LOGEAN

Toutes les trente secondes. C'est la fréquence à laquelle une amputation est réalisée sur un patient diabétique dans le monde. Malgré des efforts importants en termes

geste chirurgical lourd peut atteindre 30% dans les 30 jours qui suivent l'opération, et 50% après un an.

Un concept totalement nova-

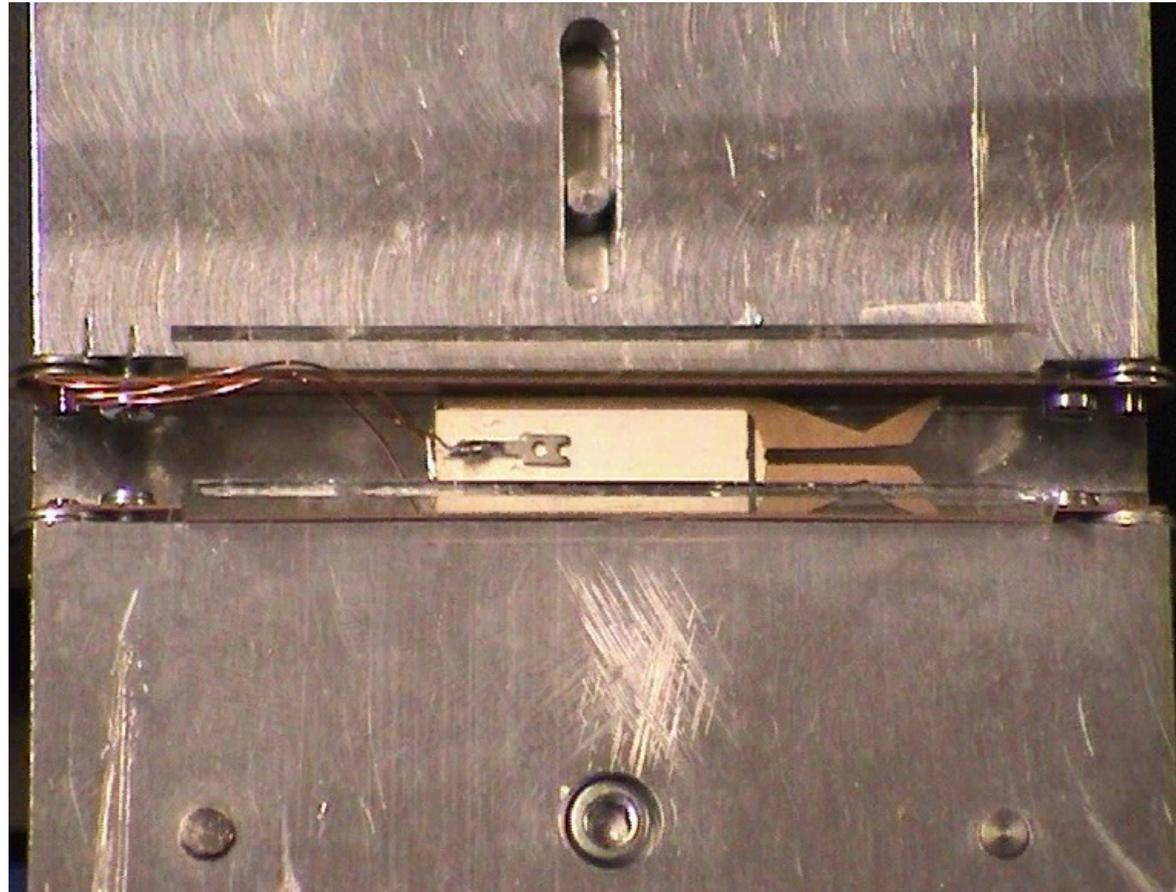
### Traitements compliqués

« Il faut savoir que 85% des amputations chez les diabétiques sont précédées d'un ulcère plantaire principalement dû à une



# Exemple

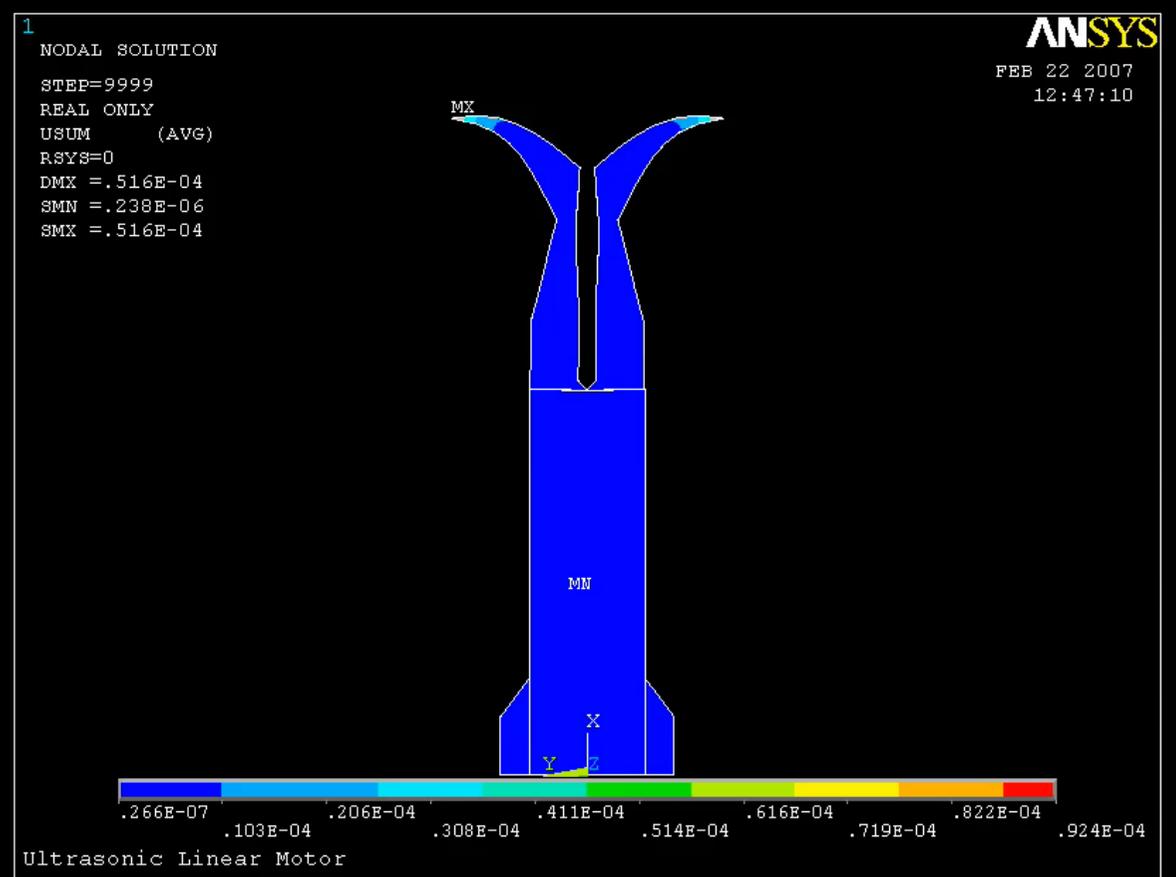
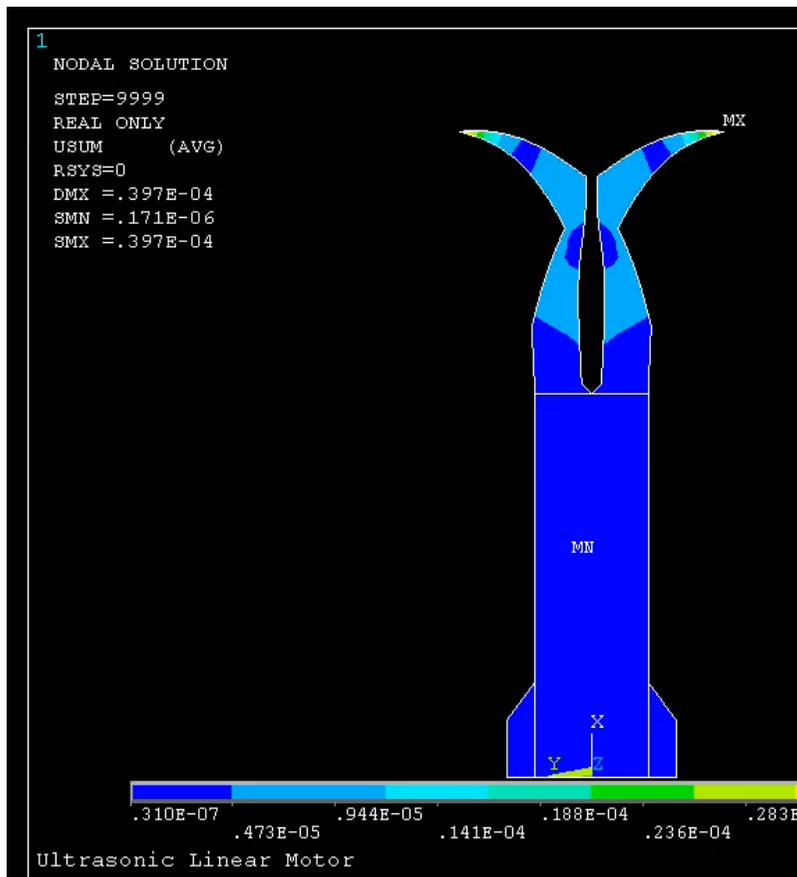




# Séquence de déformation du résonnateur EPFL

Reverse motion: 69 kHz

Forward motion: 84 kHz



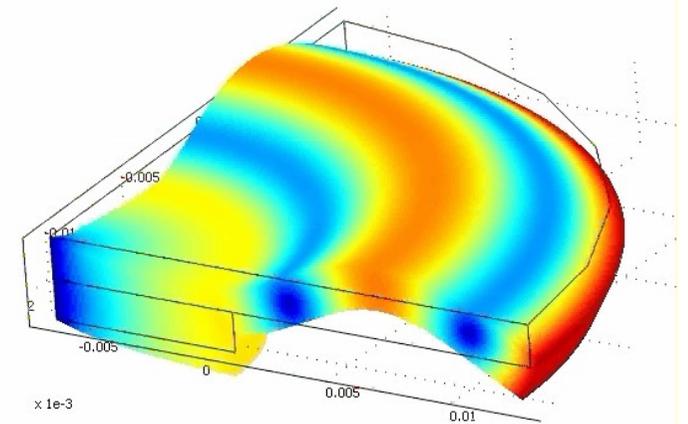
# Piezoelectric Haptic Touch Actuator



*Felt friction is controlled depending on the finger position around the touchpad*

## **Multiphysics design:**

- Piezoelectricity
- Structural mechanics
- Fluid dynamics





WSS

WERNER SIEMENS-STIFTUNG

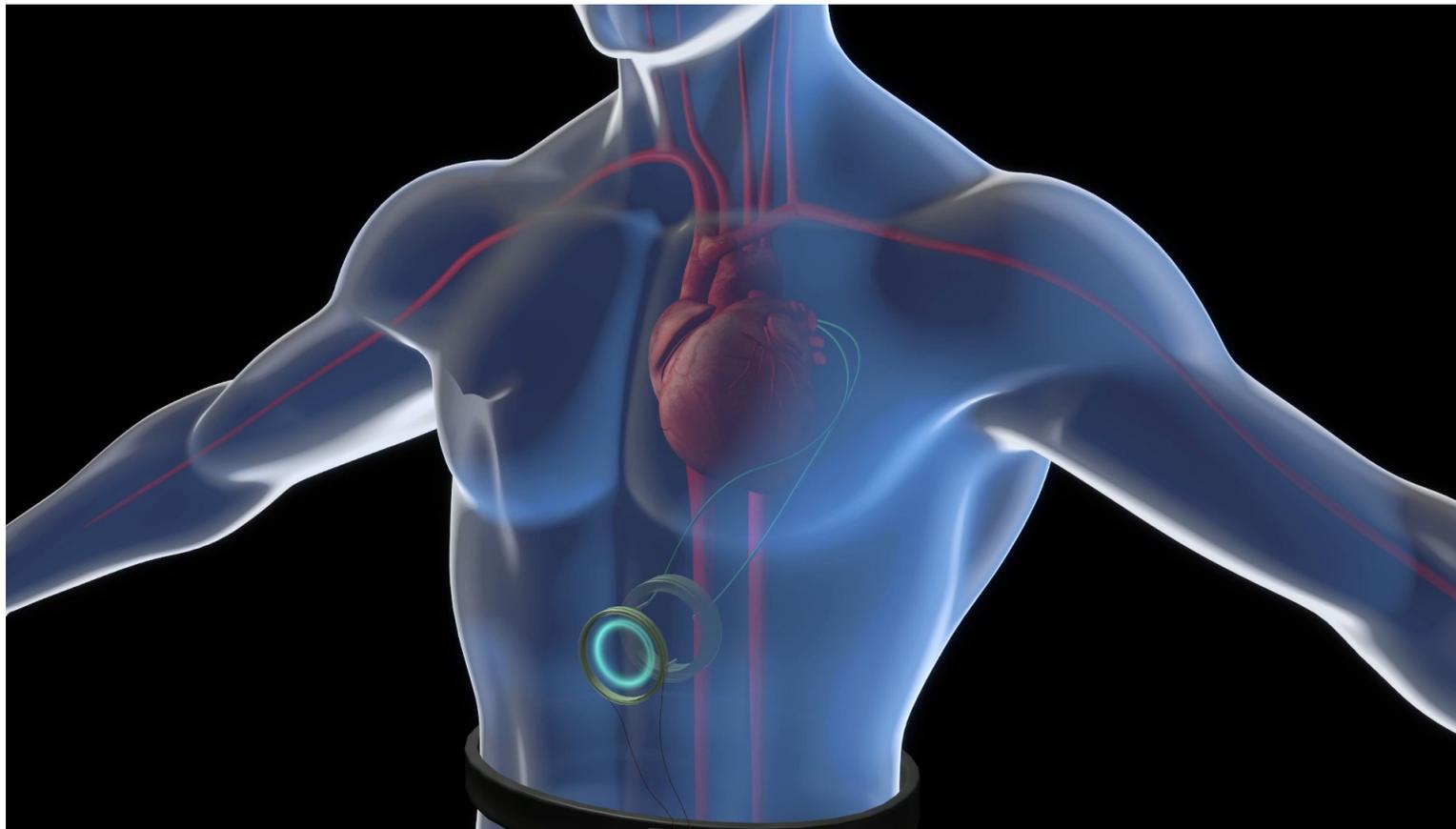


**EPFL** Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

*Center for Artificial Muscles (CAM)  
Zentrum für künstliche Muskeln in der Rekonstruktionsmedizin*

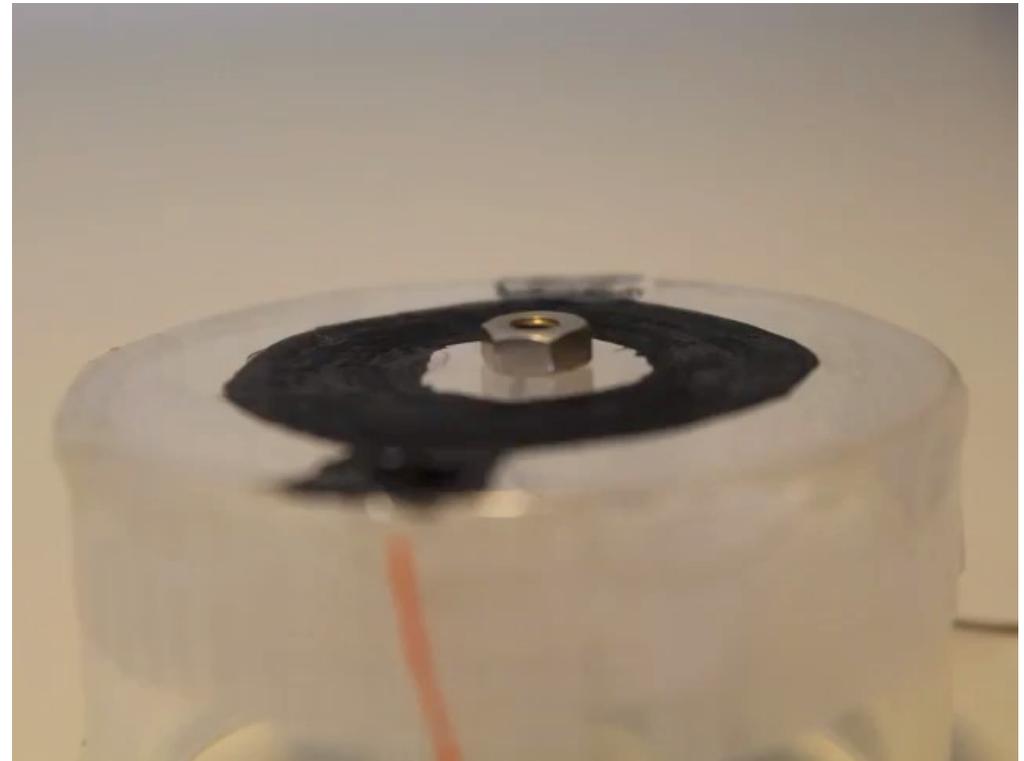
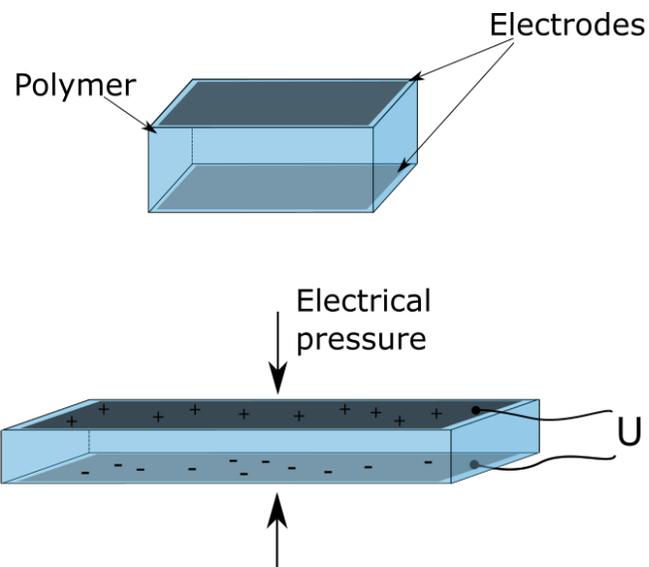
*EPFL Research Day - Neuchâtel  
2019.09.11  
Prof. Yves Pernard*

# EAP : ELECTRO ACTIVE POLYMER

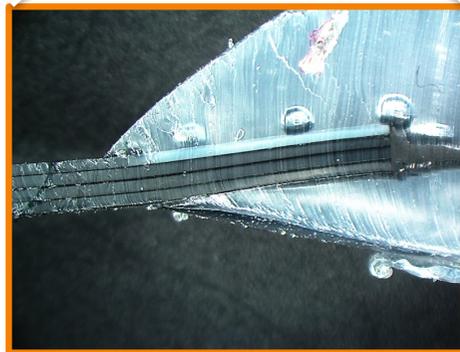
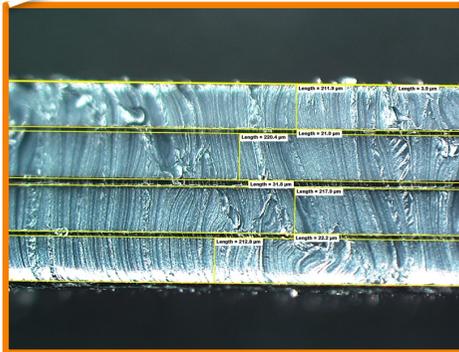
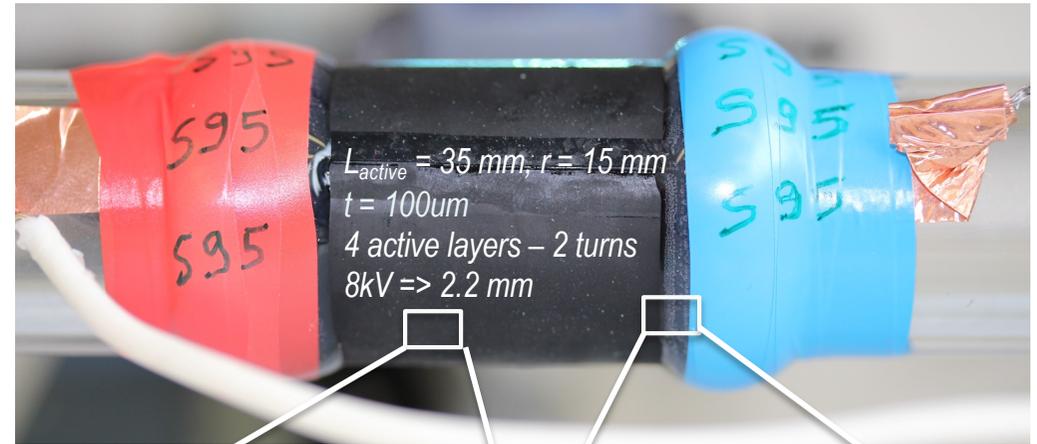
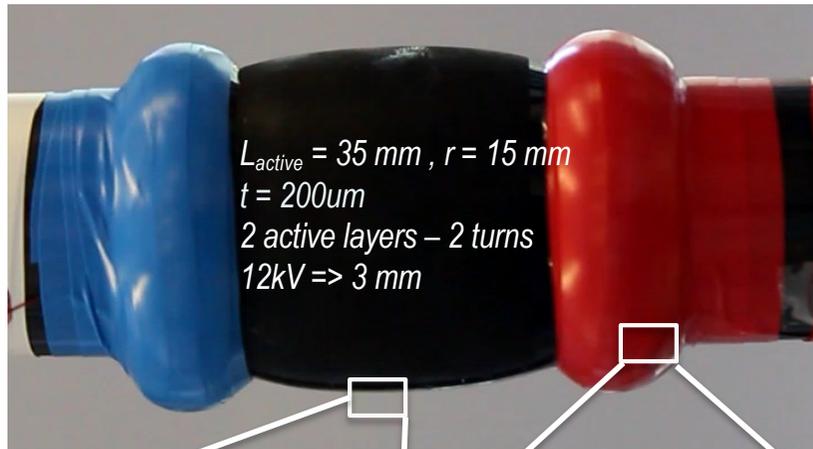


## What is a Dielectric Elastomer Actuator (DEA) ?

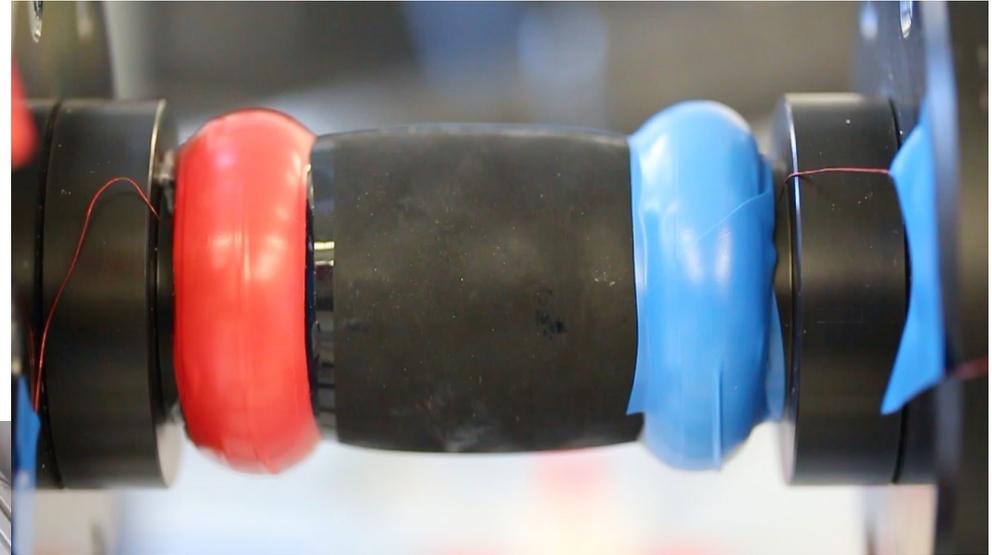
- Polymer: **Soft** membrane as support and insulator
- Compliant **electrodes**
- **High Voltage**



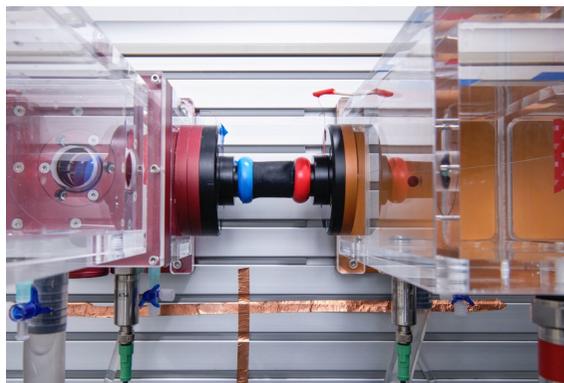
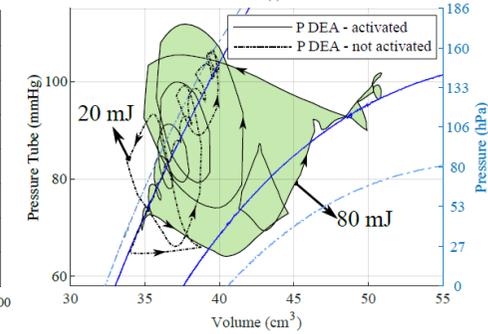
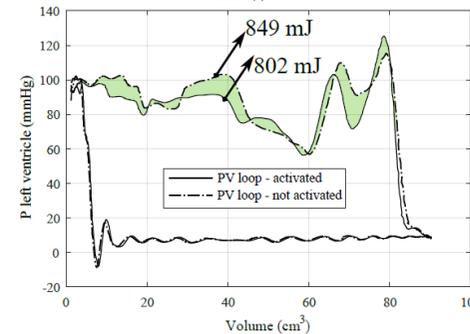
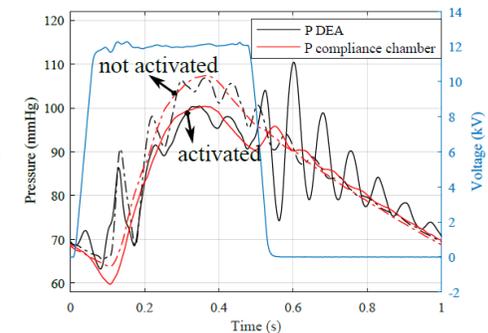
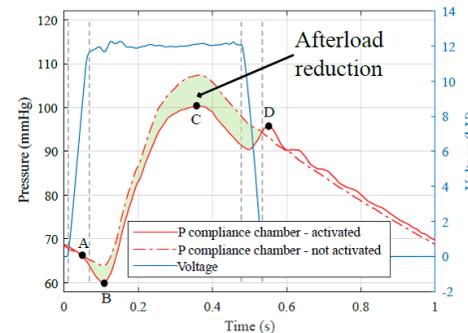
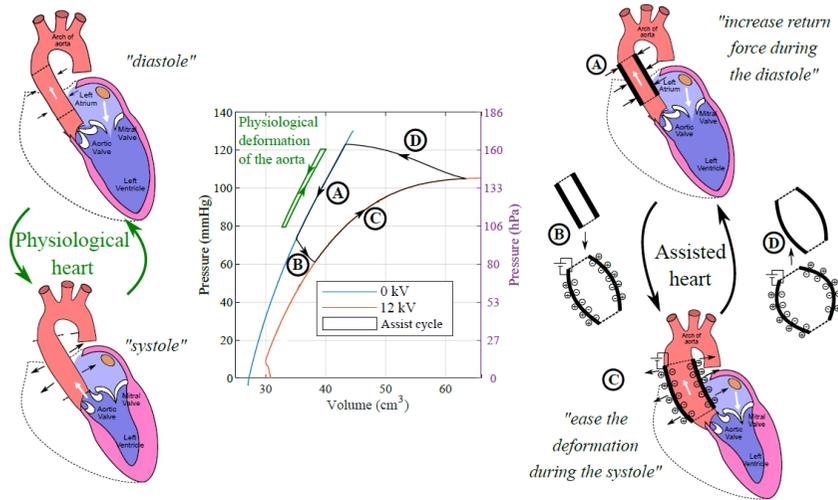
## Tubular DEA



# In-vitro test : Flowloop



# DEA based assisting device



## Feasibility of a Dielectric Elastomer Augmented Aorta

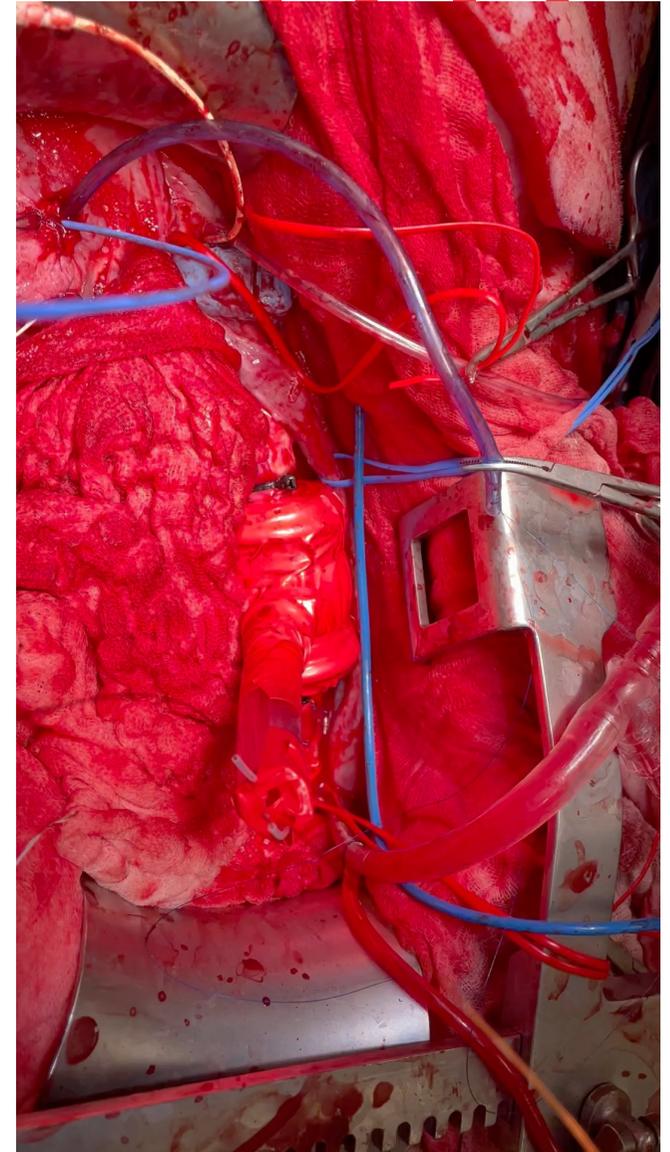
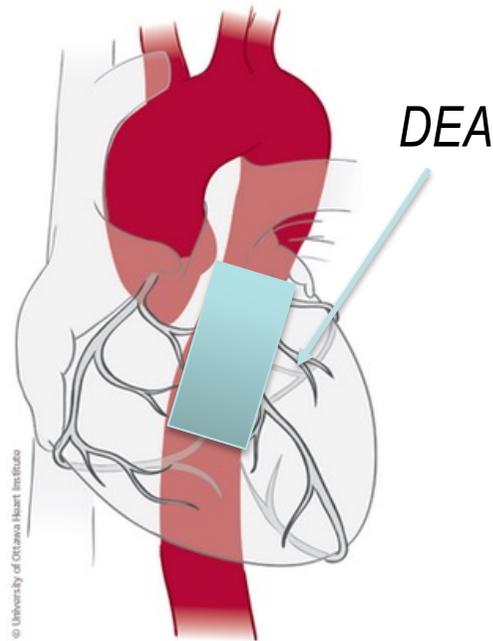
Morgan Almanza, \* Francesco Clavica, Jonathan Chavanne, David Moser, Dominik Obrist, Thierry Carrel, Yoan Civet, and Yves Perriard  
 Advanced Science. 2021-01-25. Vol. Volume 8, num. Issue 6. DOI :  
 10.1002/advs.202001974.



## In Vivo animal experiments, April 22<sup>th</sup>, InselSpital



# In Vivo animal experiments









# Un peu d'histoire ...

- Pendant l'antiquité, deux phénomènes à distance étaient observables et suscitaient beaucoup d'intérêt de questions :
  - celui de l'attraction d'un petit morceau de fer par la pierre d'aimant
  - celui de la paille attiré par un morceau d'ambre frottée



# Antiquité

- Ces phénomènes étaient-ils réellement des observations d'action à distance ou bien y avait-il un vecteur invisible ? Dans tous les cas, ils étaient souvent confondus ...



# Magnétite ou « pierre d'aimant »



Source : *histoire de l'électromagnétisme, Julien Geandrot*



# Ethymologie

- Le mot électricité provient du mot “elektron” qui signifie ambre en grec. On doit l'invention de ce mot à William Gilbert (16<sup>ème</sup> siècle) ;
- Le mot magnétisme a été créé à partir de la région de Magnésie (nord de la Grèce). C'est là qu'à l'antiquité on a découvert la pierre qui avait la propriété d'attirer le fer



# Ethymologie

- Le mot aimant est apparenté au mot diamant : cela viendrait de “adamas” en grec, qui signifierait inébranlable. On qualifiait les pierres extrêmement dures avec cet adjectif.



# Magnésie



Source : wikipedia



# Ambre



Source : *histoire de l'électromagnétisme, Julien Geandrot*

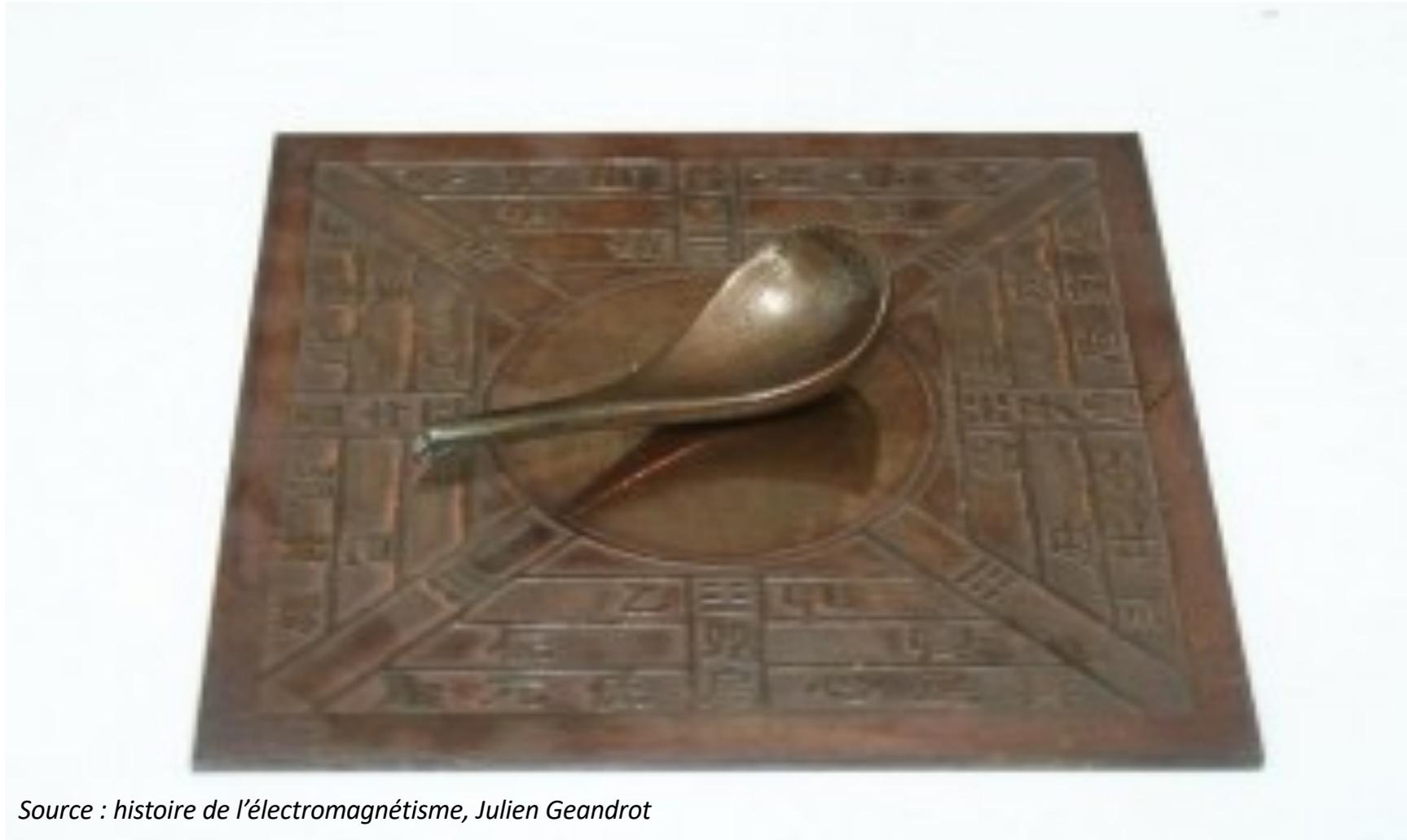


# Feng shui

Les chinois avait découvert cette magnétite il y a longtemps, cette pierre, trouvée dans la région de Magnésie, s'orientait dans une direction particulière. Alors, croyant en un message des dieux, ils pensaient que cette direction était sacrée.



# Feng shui, cuillère boussole



Source : *histoire de l'électromagnétisme, Julien Geandrot*



# Premier scientifique

- Pierre de Maricourt, surnommé Pierre le Pèlerin, (Petrus Peregrinus) est un savant du Moyen Âge.
- exposa au 13<sup>ème</sup> siècle l'existence et la propriété (attraction-répulsion) des pôles magnétiques.
- La dénomination des pôles provient de son observation de la direction Nord-sud prise par l'aimant



# Premier traité de physique

William Gilbert (1540-1603) qui publia après de nombreuses années d'expérimentation "De Magnete" ; probablement le premier vrai livre de physique.

Il reprit les expériences de Maricourt, mais exploita aussi de nouvelles expériences. Gilbert faisait très peu appel aux mathématiques.

Il n'accordait que peu de crédit aux formules ! Il n'a donc rien formulé mathématiquement ...



TRACTATVS

Siue  
PHYSIOLOGIA NOVA  
**DE MAGNETE,**  
MAGNETICISQVE CORPO-  
RIBVS ET MAGNO MAGNETE  
tellure Sex libris comprehensus

à  
Guilielmo Gilberto Colcestrensi,  
Medico Londinensi.

*In quibus ea, quæ ad hanc materiam spectant pluri-  
mis & argumentis ac experimentis exactissime  
absolutissimeq; tractantur et explicantur.*

Omnia nunc diligenter recognita & emen-  
datus quam antè in lucem edita, aucta & figu-  
ris illustrata operâ & studio

Wolfgangi Coehmans / I. U. D.  
& Mathematici:

*Ad calcem libri adjunctus est Index Capi-  
tum Rerum et Verborum locupletissimus*

EXCVSVS SEDINI  
Typis Gôtzianis Sumptibus  
Joh: Hallervordij.  
Anno M. DC. XXVIII.

Pet. Rollos fecit.

Soc. Reg. Lond.



# Invention du paratonnerre

- Benjamin Franklin (1706-1790) a laissé sa trace dans l'histoire avec l'invention du paratonnerre mais aussi avec l'invention des termes conducteur, charge électrique, électricité positive et négative.
- Il postule que l'électricité est un fluide qui imprègne tous les corps, le frottement ne fait passer ce fluide que d'un corps vers un autre.



# Principales découvertes

- Aimantation Thalès de Milet 600 av JC
- Découvertes pôles Peregrinus 1269 ap JC
- Champ mag. Terrestre William Gilbert 1544-1603
- Paratonnerre Benjamin Franklin 1706-1790
- Piles chimiques Alexandre Volta 1740-1827
- Loi d'Ampère André-Marie Ampère 1775-1836
- Résistance Georg Simon Ohm 1789-1854
- Expérience de Faraday Michael Faraday 1791-1836





# 160 après, que reste-t-il ? EPFL

*Il laisse :*

- 20 équations unifiées, regroupant toutes les lois électriques et magnétiques
- C'est la seconde réunification (1<sup>ère</sup> : méca-nique terrestre et céleste de Newton)

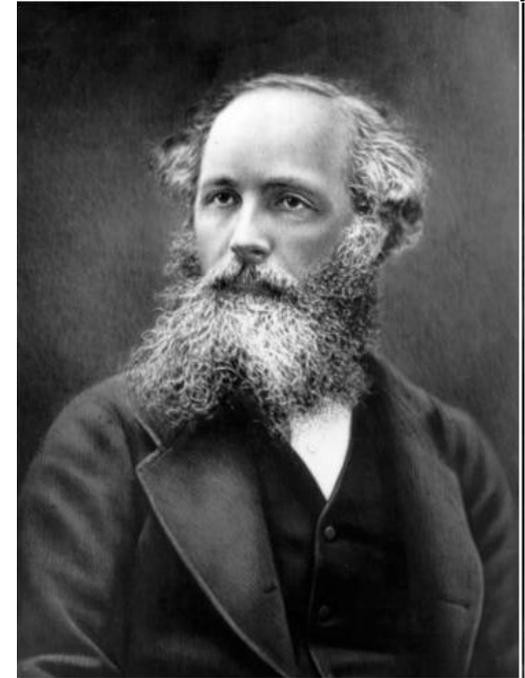
*Avec les opérateurs vectoriels :*

- *Il ne reste plus que 4 équations linéaires*
- *Théorie de Maxwell encore jamais mise en défaut*



# Les équations de Maxwell **EPFL**

$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{H} &= \vec{J} + \varepsilon \left( \partial / \partial t \right) \vec{E} \\ \nabla \times \vec{E} &= -\mu \left( \partial / \partial t \right) \vec{H}\end{aligned}$$



*Les courants électriques* variant dans *l'espace* et dans *le temps*  
et agissant au sein d'un *milieu spécifique* créent  
des *champs électromagnétiques*

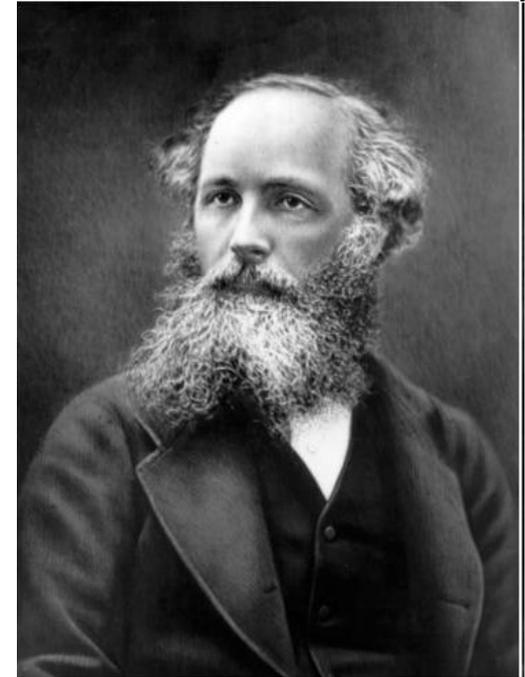
# Les équations de Maxwell **EPFL**

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{J}$$

$$\text{rot } \mathbf{E} = - \partial \mathbf{B} / \partial t$$

$$\text{div } \mathbf{B} = 0$$

$$\text{div } \mathbf{D} = \rho$$



**Les courants électriques** variant dans **l'espace** et dans **le temps**

et agissant au sein d'un **milieu spécifique** créent

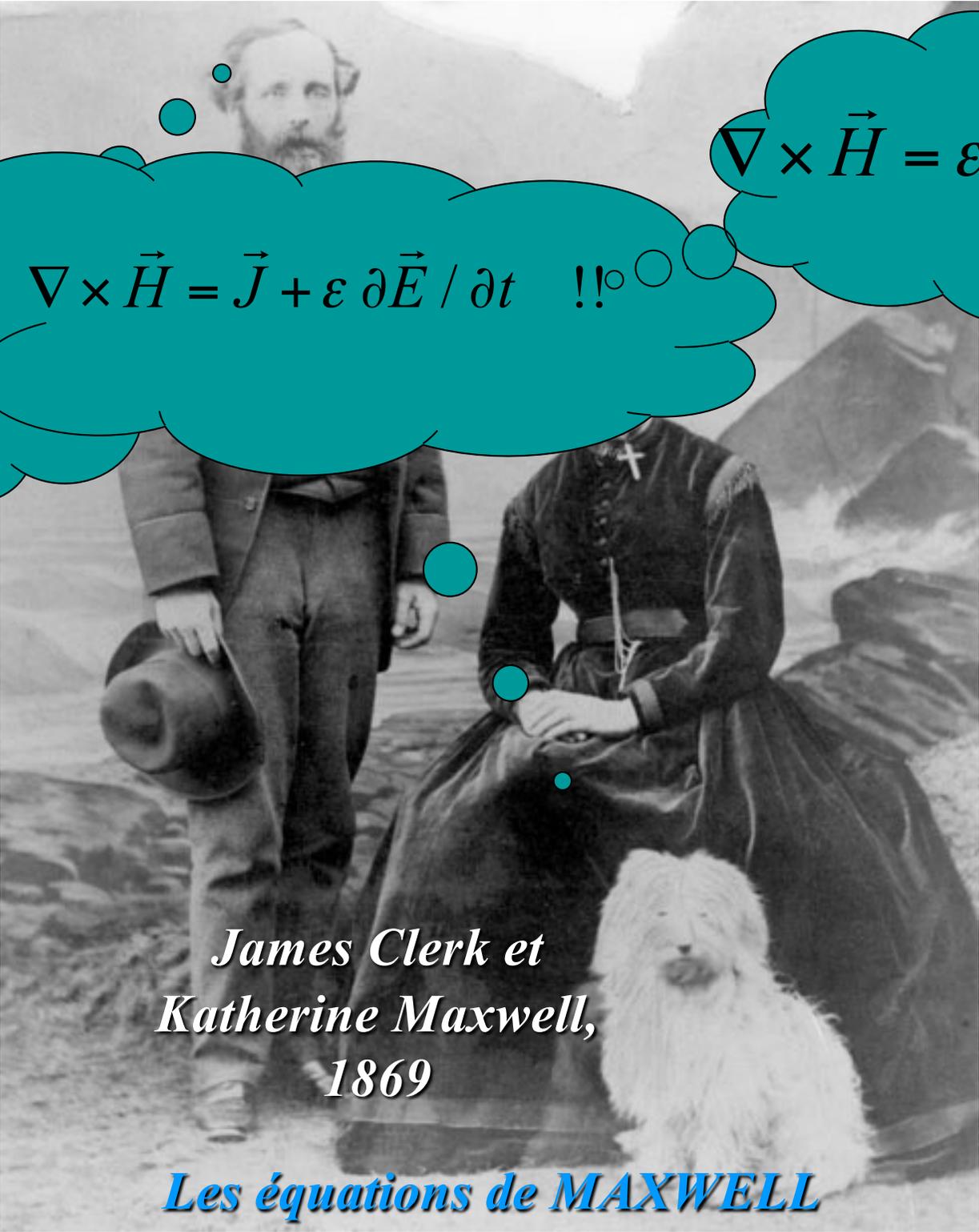
des **champs électromagnétiques**

# Grâce à Maxwell :

## James Clerk Maxwell (1831-1879)

- On peut formuler la conversion Electro-mécanique
- Cette conversion définit le passage de l'énergie électrique en énergie mécanique (ou inversement) en passant par l'énergie magnétique !





$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \epsilon \partial \vec{E} / \partial t$  !!

$\nabla \times \vec{H} = \epsilon \partial \vec{E} / \partial t$  ??

*James Clerk et  
Katherine Maxwell,  
1869*

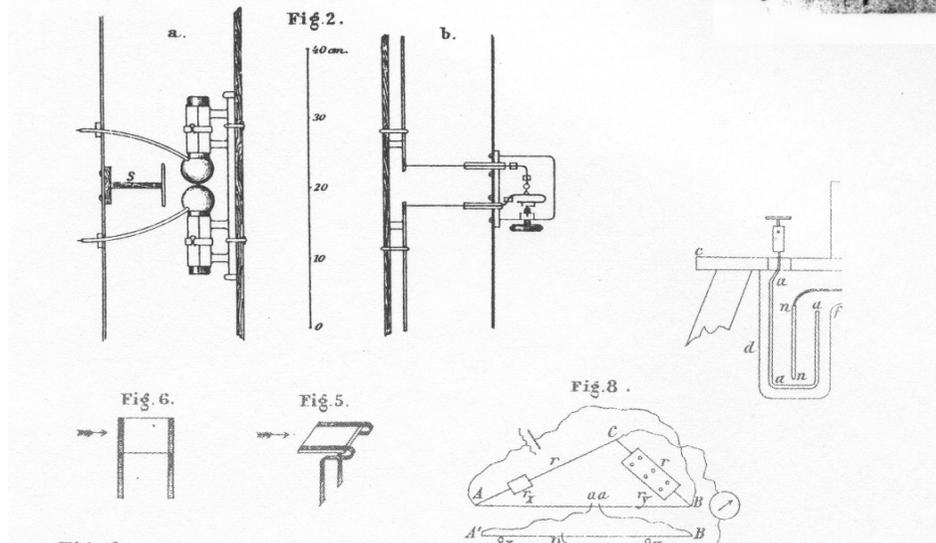
*Les équations de MAXWELL*

# De Maxwell (1865) à Hertz (1888), puis Einstein



*H. Hertz*

Heinrich Hertz (1857–1894).  
(Photograph courtesy of Deutsches Museum, Munich.)



## ANNALEN DER PHYSIK UND CHEMIE.

HERAUSGEGEBEN VON  
F. A. C. GREN, L. W. GILBERT, J. C. POGGENDORFF.  
NEUE FOLGE.  
HAND XXXVI.

UNTER MITWIRKUNG  
DER PHYSIKALISCHEN GESELLSCHAFT IN BERLIN  
UND INSBESONDERE DES HERREN  
H. VON HELMHOLTZ  
HERAUSGEGEBEN VON  
G. WIEDEMANN.



LEIPZIG, 1889.  
VERLAG VON JOHANN AMBROSIUS BARTH.

Maxwell n'a pas eu de chance



*vraiment*



*Maxwell qualité filtre...*