

EPFL

Cours Actionneurs et Systèmes Electromagnétiques

■ École
polytechnique
fédérale
de Lausanne

10 septembre 2025

Pr. Yves Perriard
Dr Christian Koechli

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

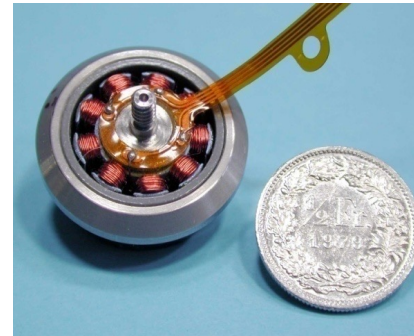
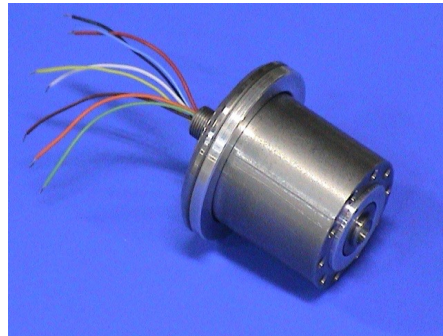
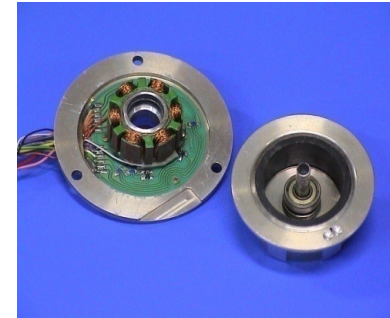
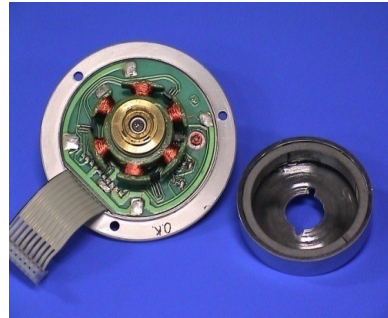
- Moodle :
Cours MICRO-313 (notes manuscrites,
exercices et corrigés)
- Livre Conversion Electromécanique



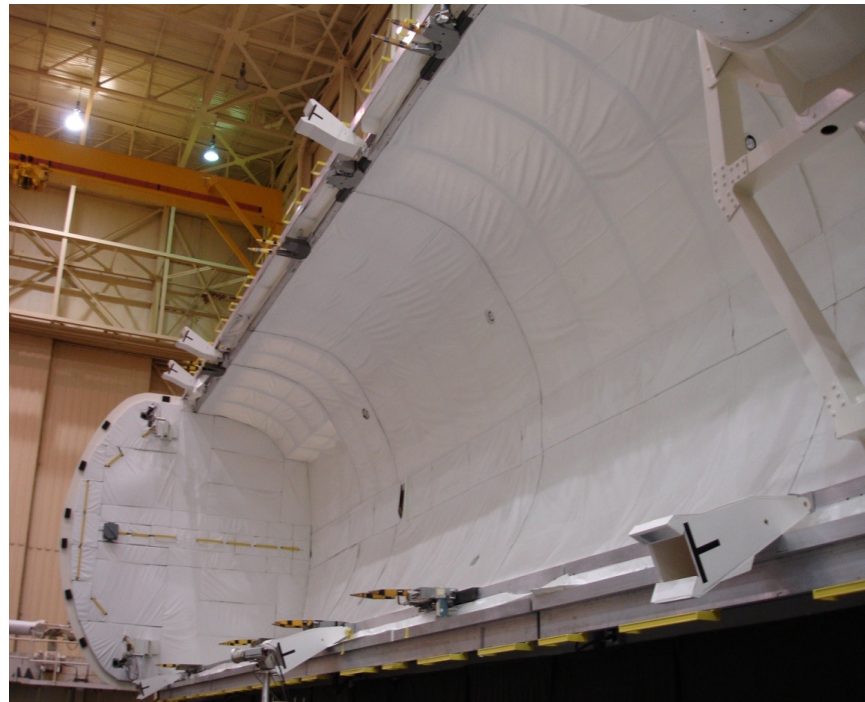
Examen

- Ecrit session été : plusieurs exercices à résoudre
- Droit à toute la documentation ? Encore ouvert
- Exercices durant le cours ne comptent pas (pas de bonus)
- Matière : ce qui est fait au cours durant les 2 semestres
- 7 crédits : 71% exa écrit, 29%TP (2/7)

Quelques exemples : Seagate

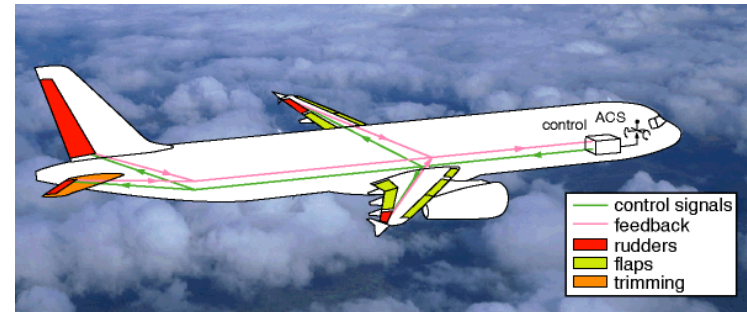
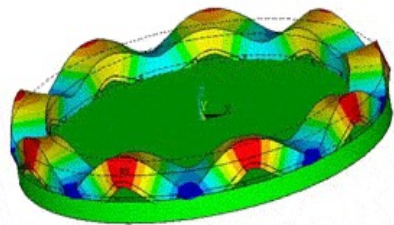


Robotique



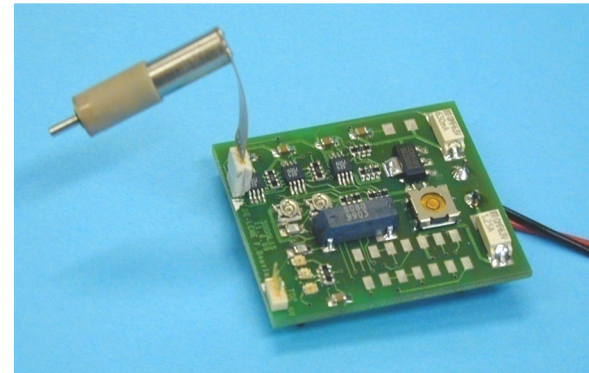
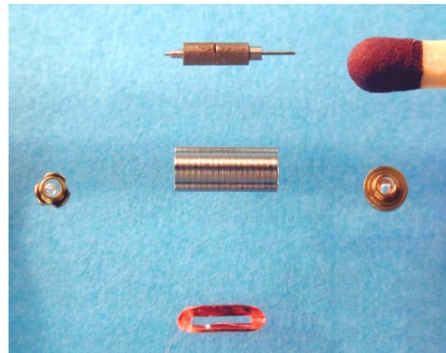
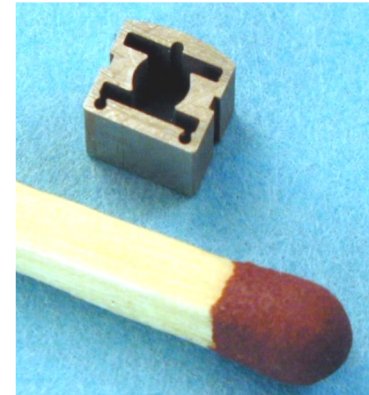
Exemple d'application des moteurs piézo-électriques de grande puissance

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



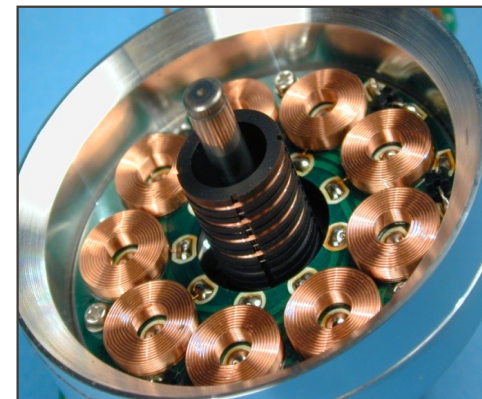
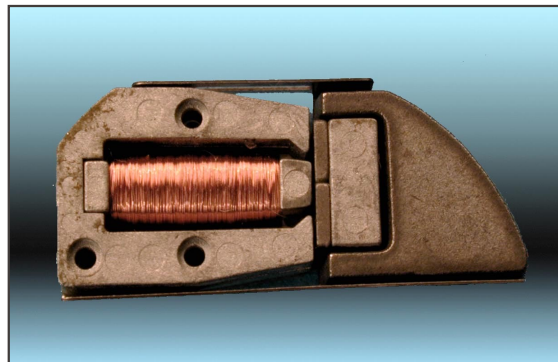
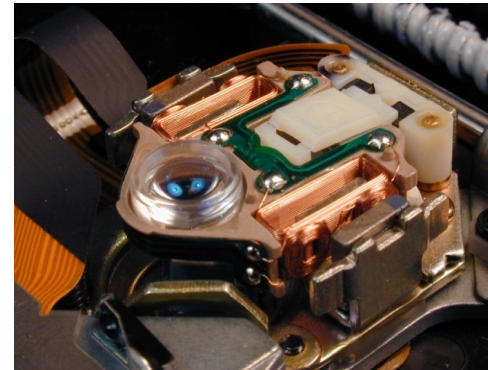
Miniaturisation

- 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



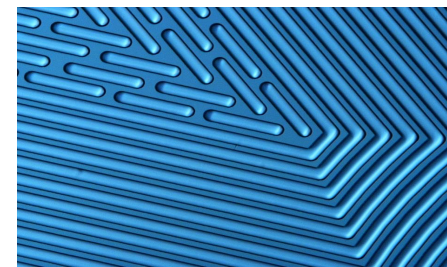
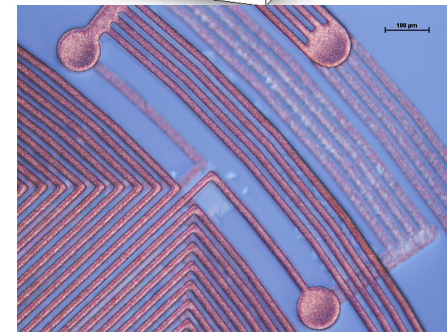
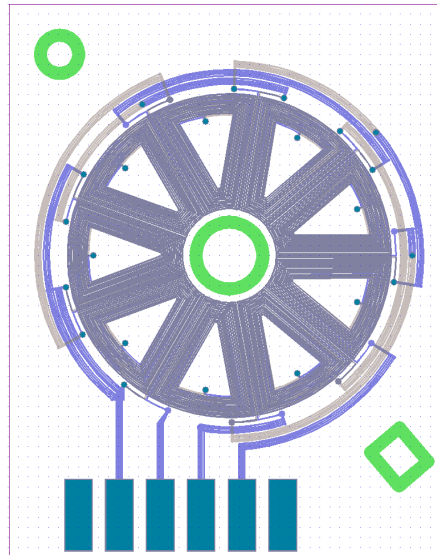
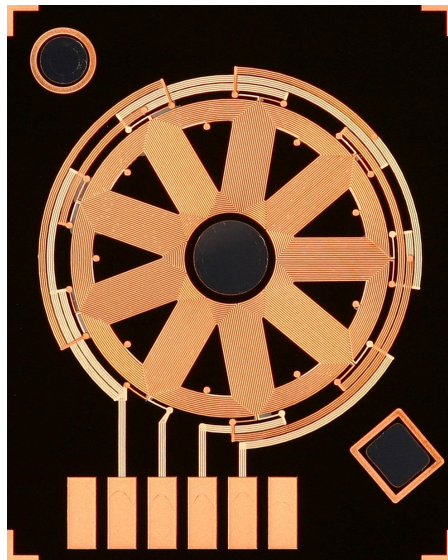
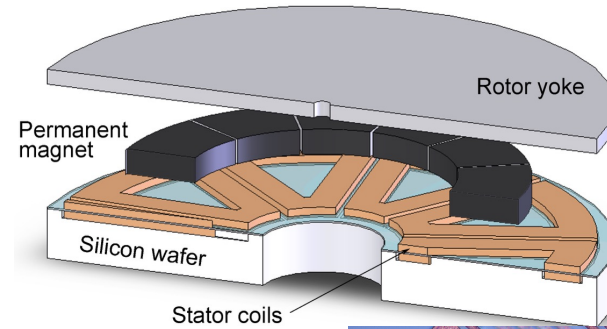
Source : Swatch Group

Rendement du moteur environ 15%

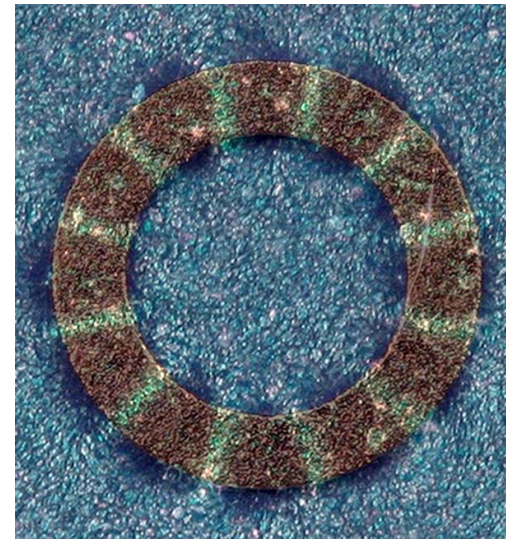
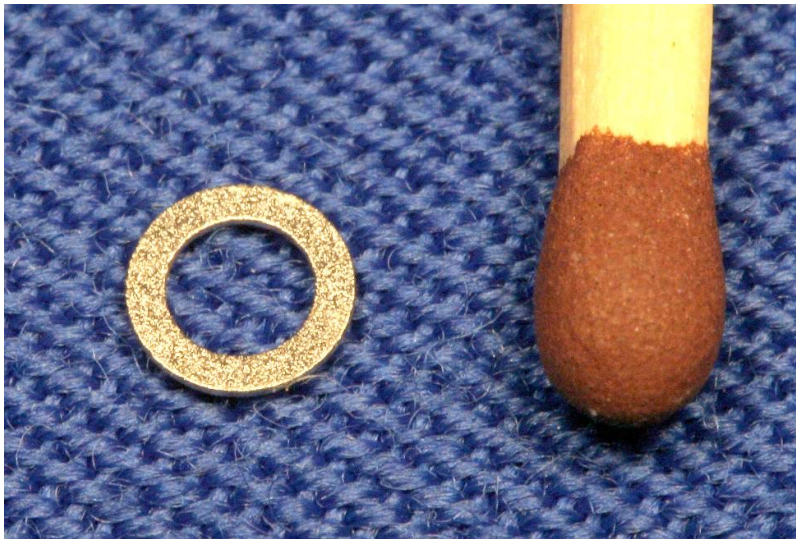


MEMs hybride

Moteur 3 phases
Processus batch



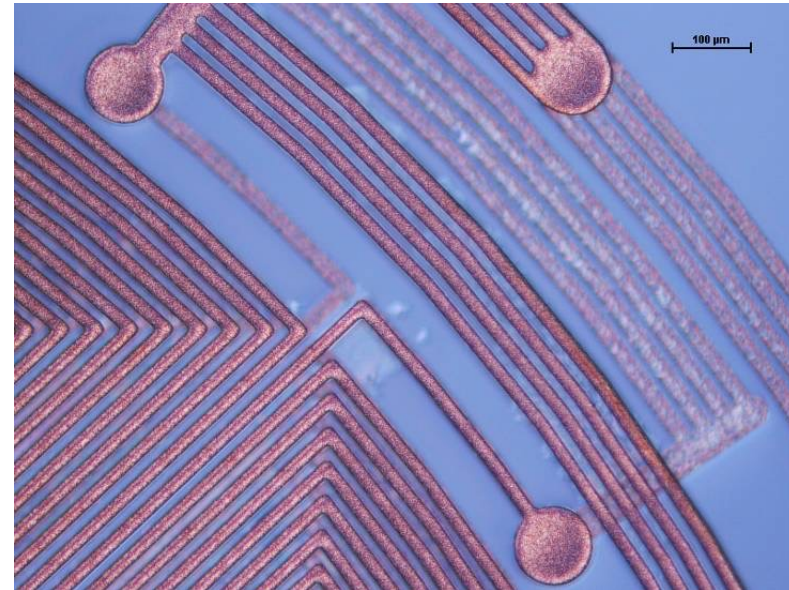
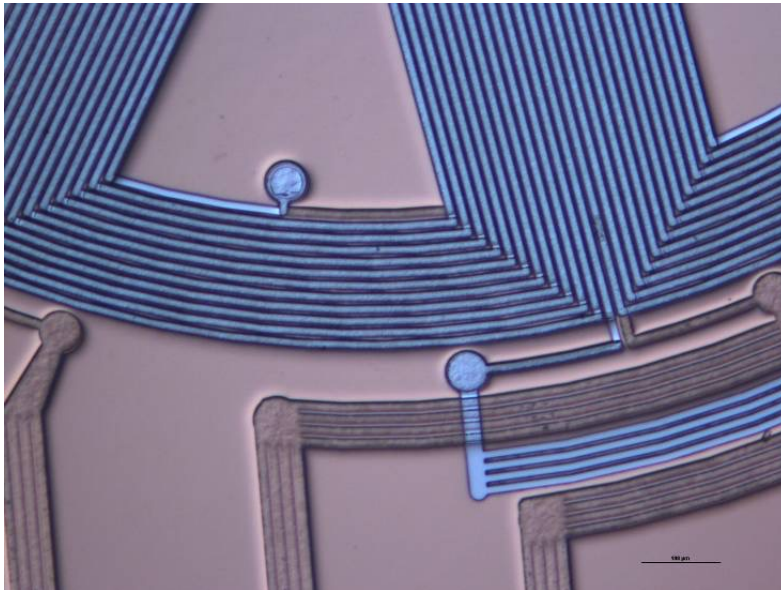
Rotor



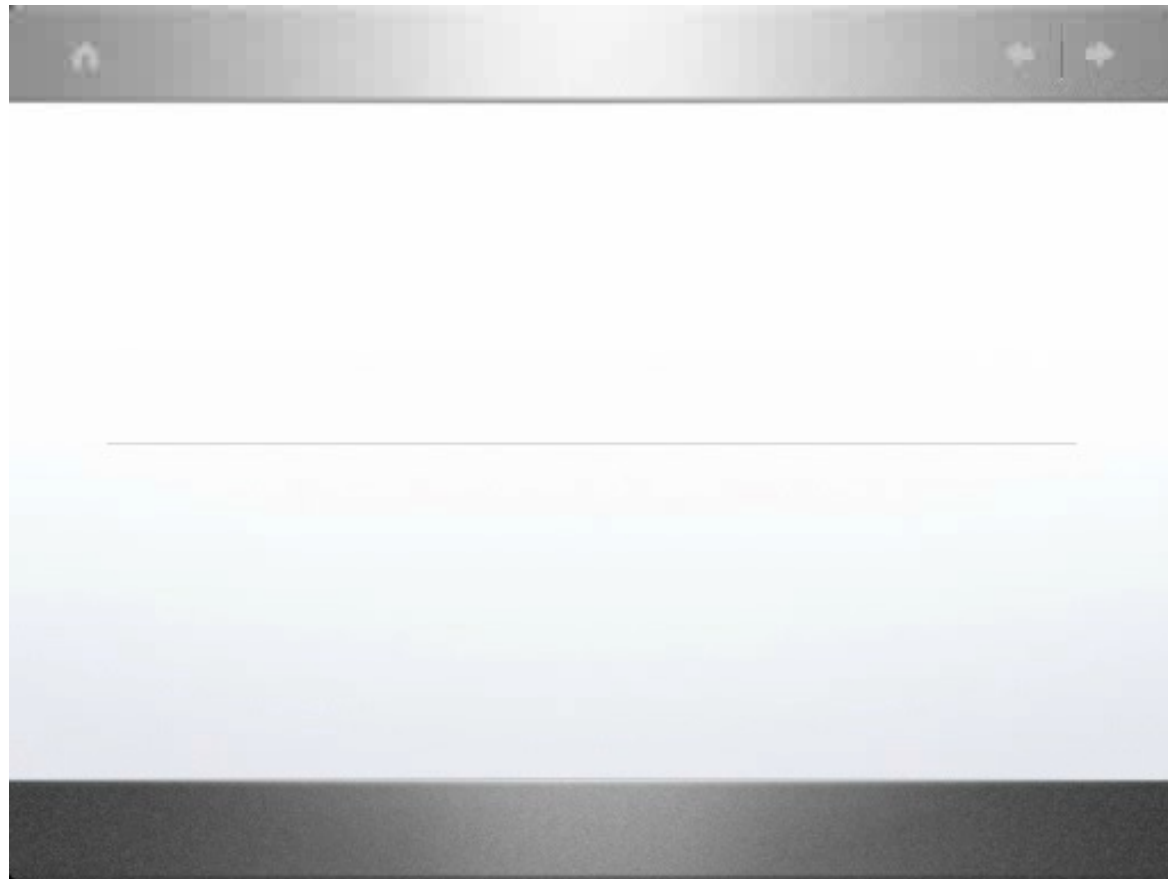
- Anneau multipolaire (12 poles)
- $B_r = 0.95 \text{ T}$, $\phi_{\text{ext}} = 4.0 \text{ mm}$, $\phi_{\text{int}} = 2.6 \text{ mm}$

▪

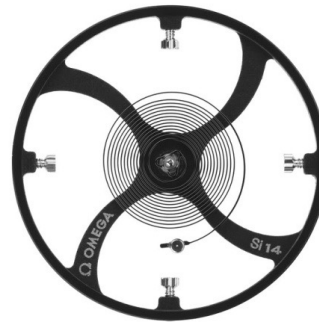
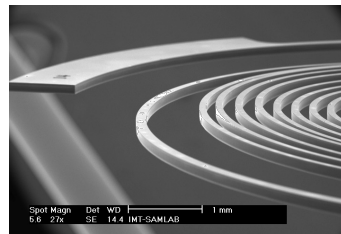
Images du bobinage



Rendement du moteur 42%



Innovations dans la montre



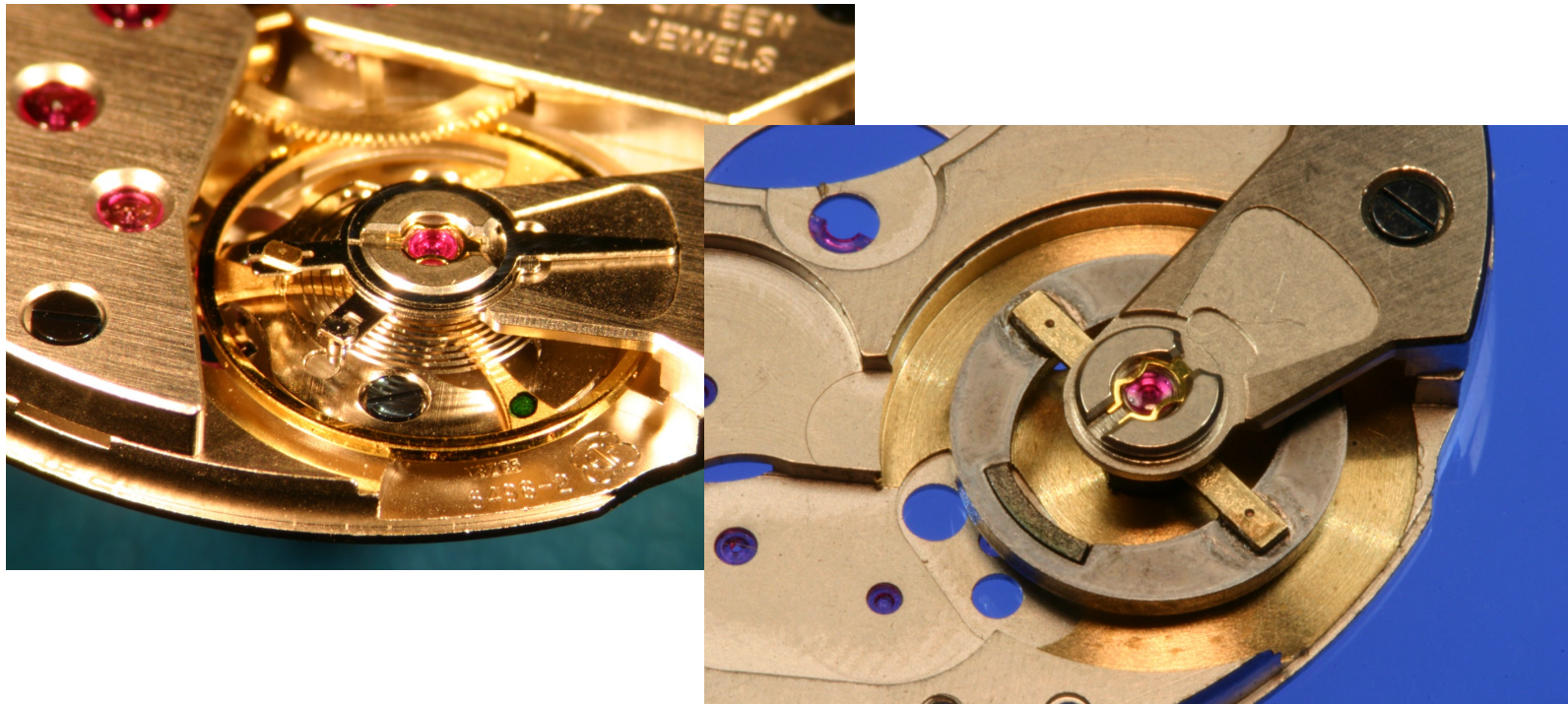
1861: **Charles-Edouard Guillaume** à Fleurier

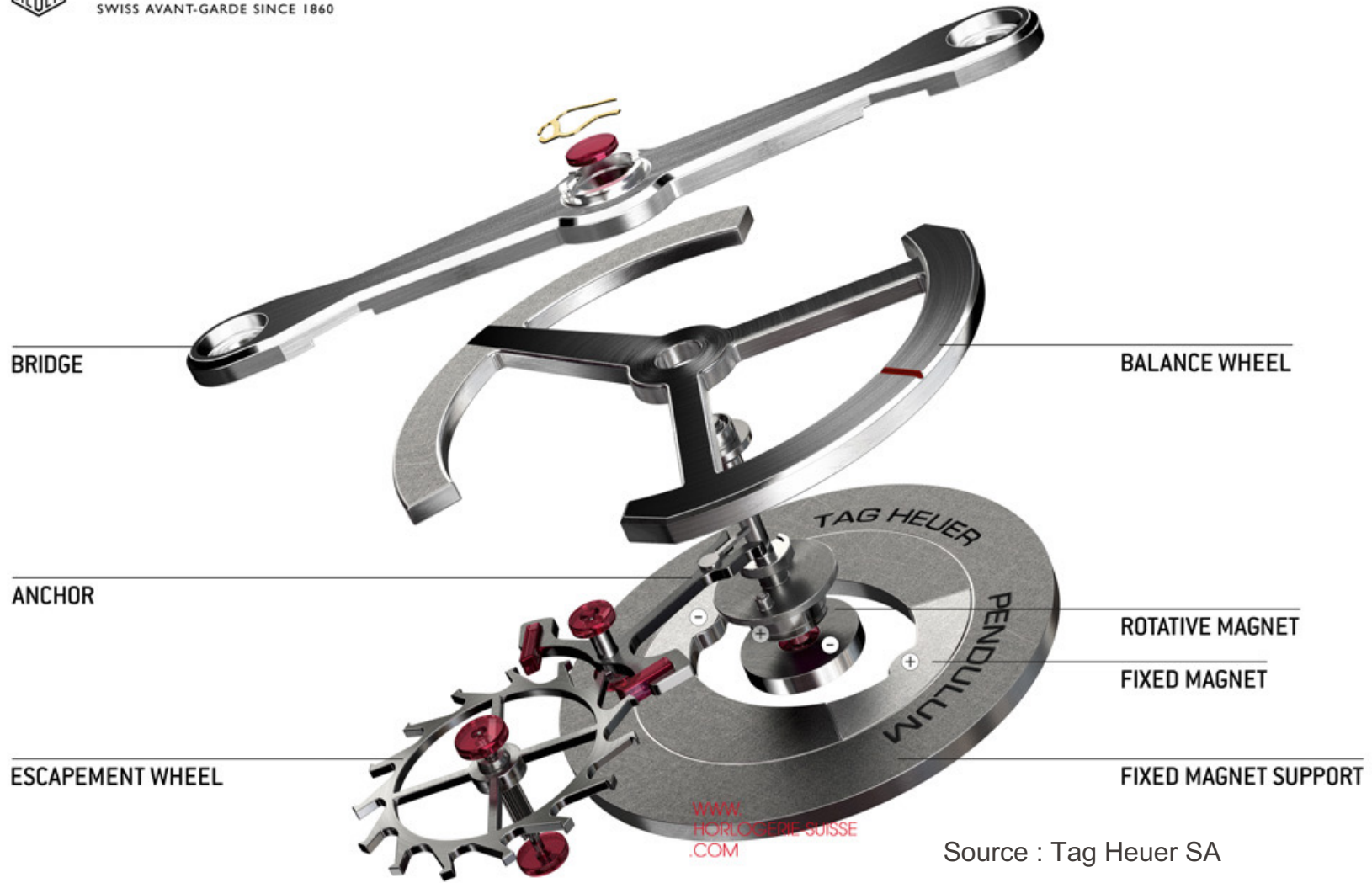
- Inventeur de l'Invar (alliage à faible coef. De dilatation)
- Prix Nobel de physique en 1920

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

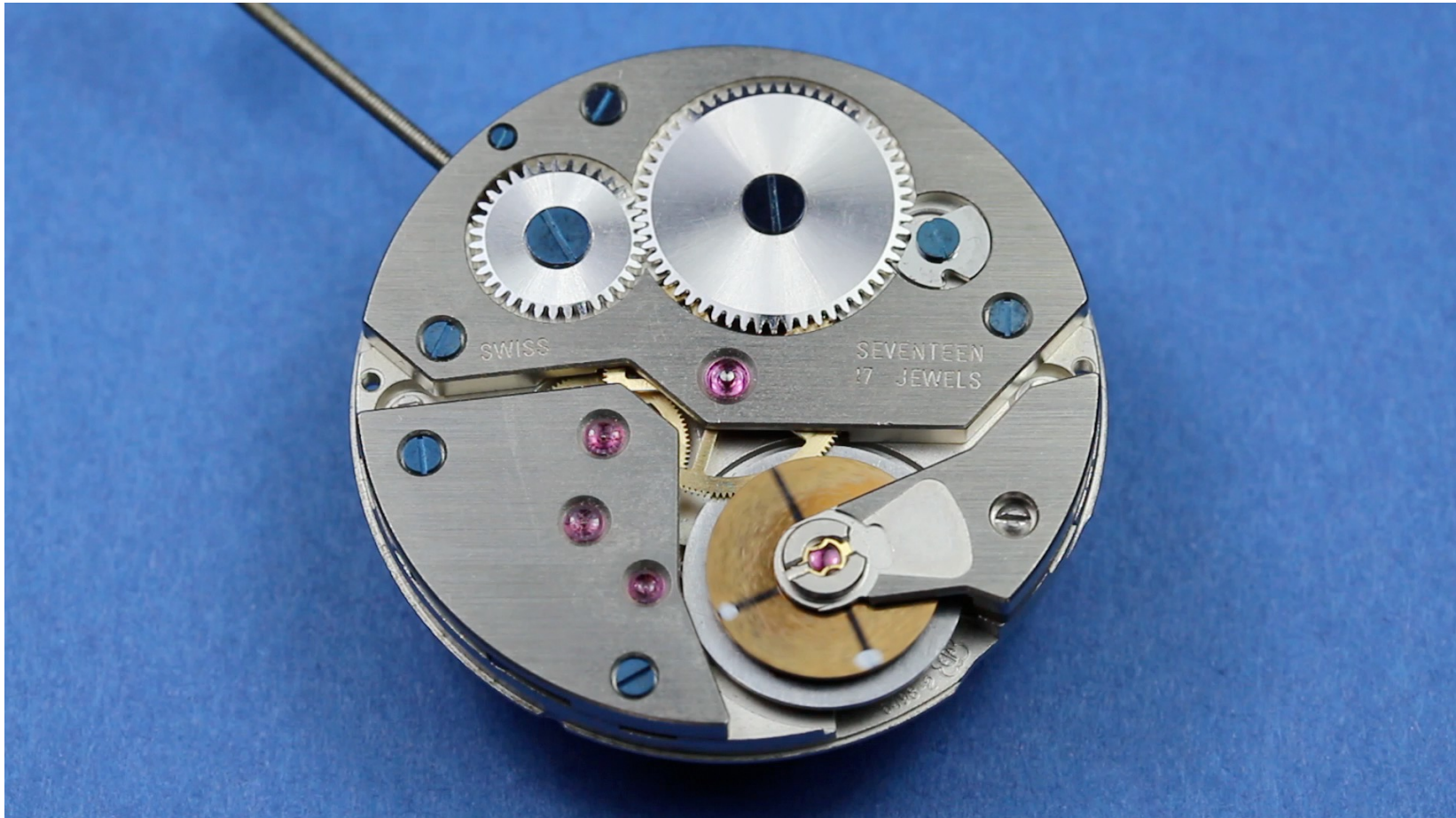
2010: Oscillateur magnétique pour le ressort spiral (Prof Y. Perriard)

Un nouvel oscillateur magnétique pour Tag Heuer









Échappements horlogers

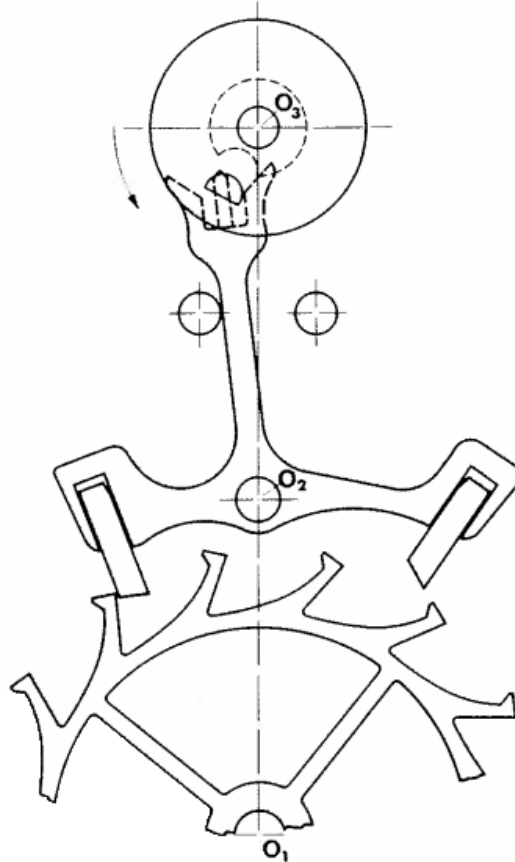
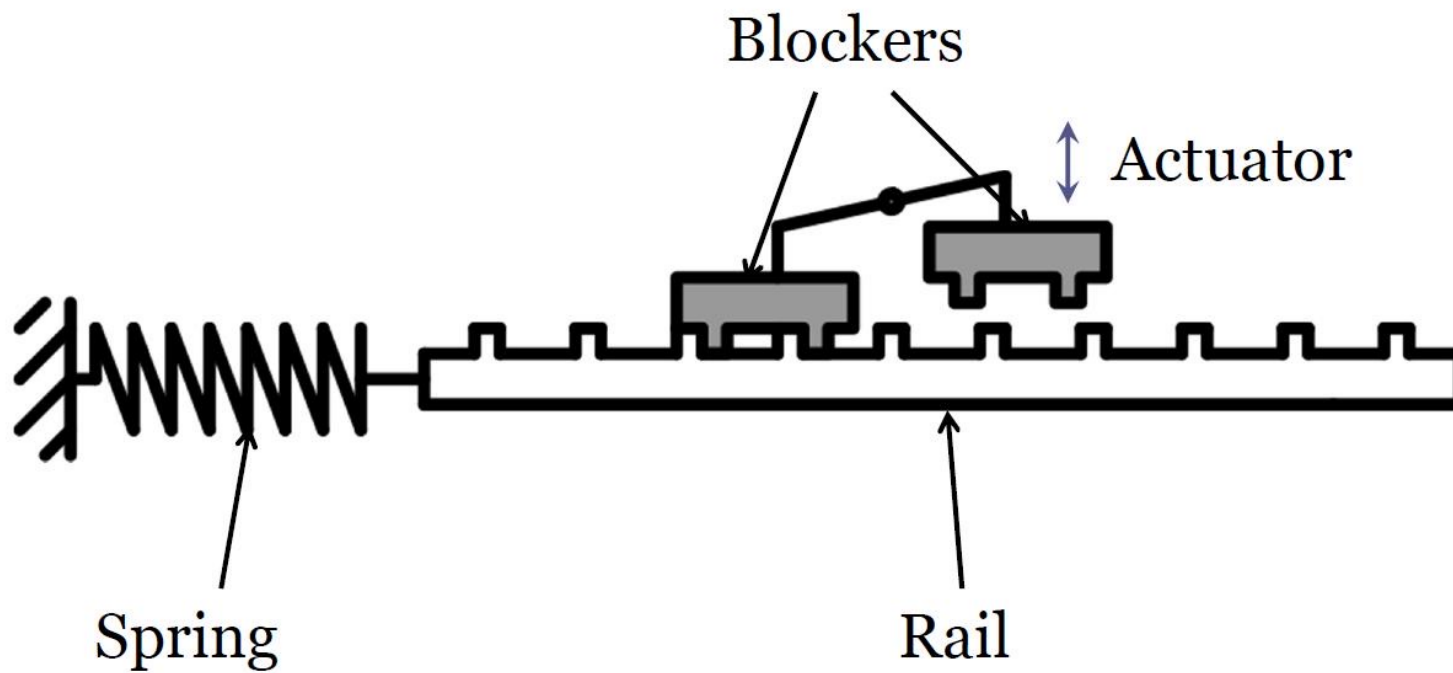
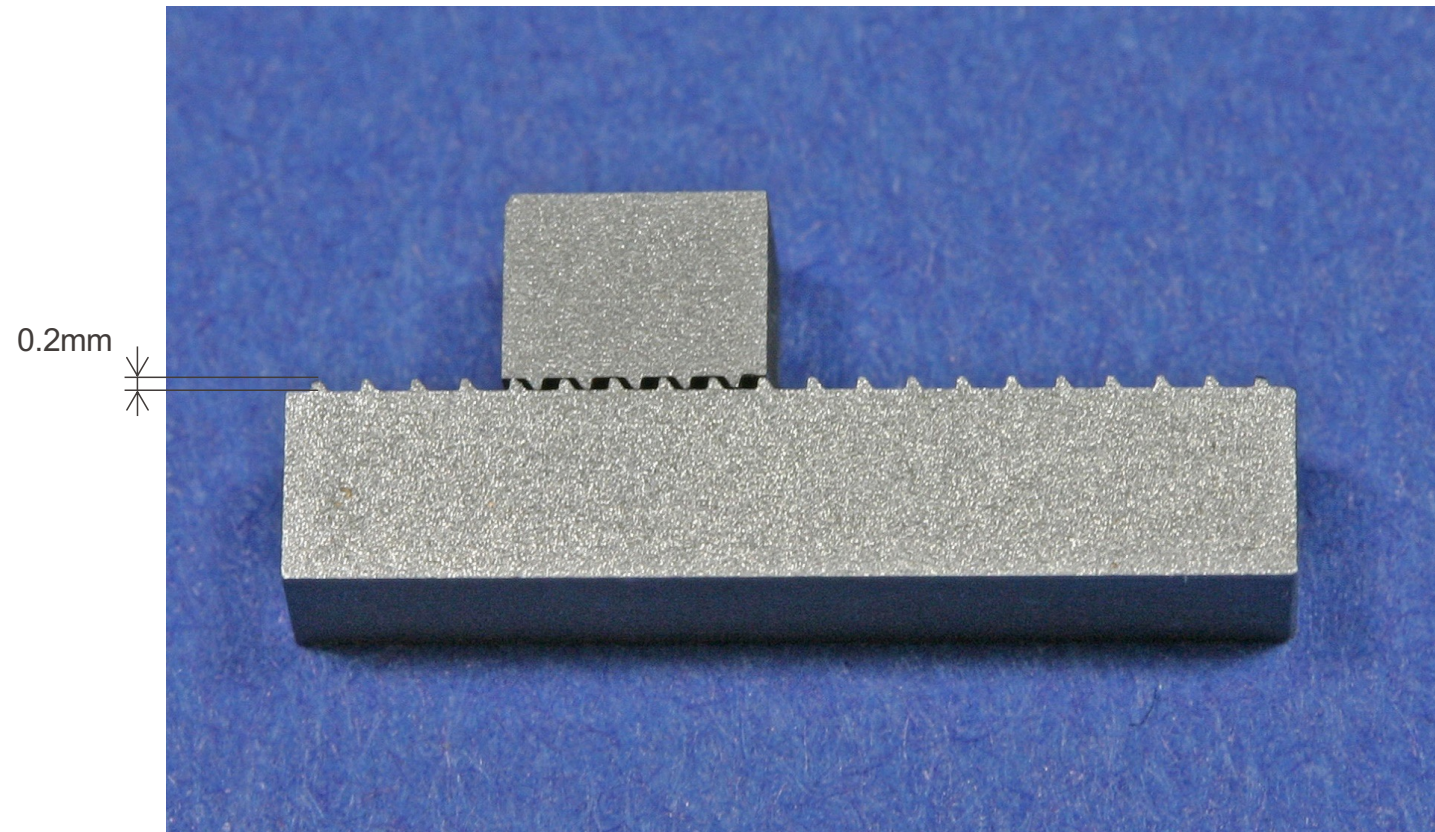


Image: Ch. Huguenin. *Echappements et moteurs pas à pas*. FET-Neuchâtel, 1974.

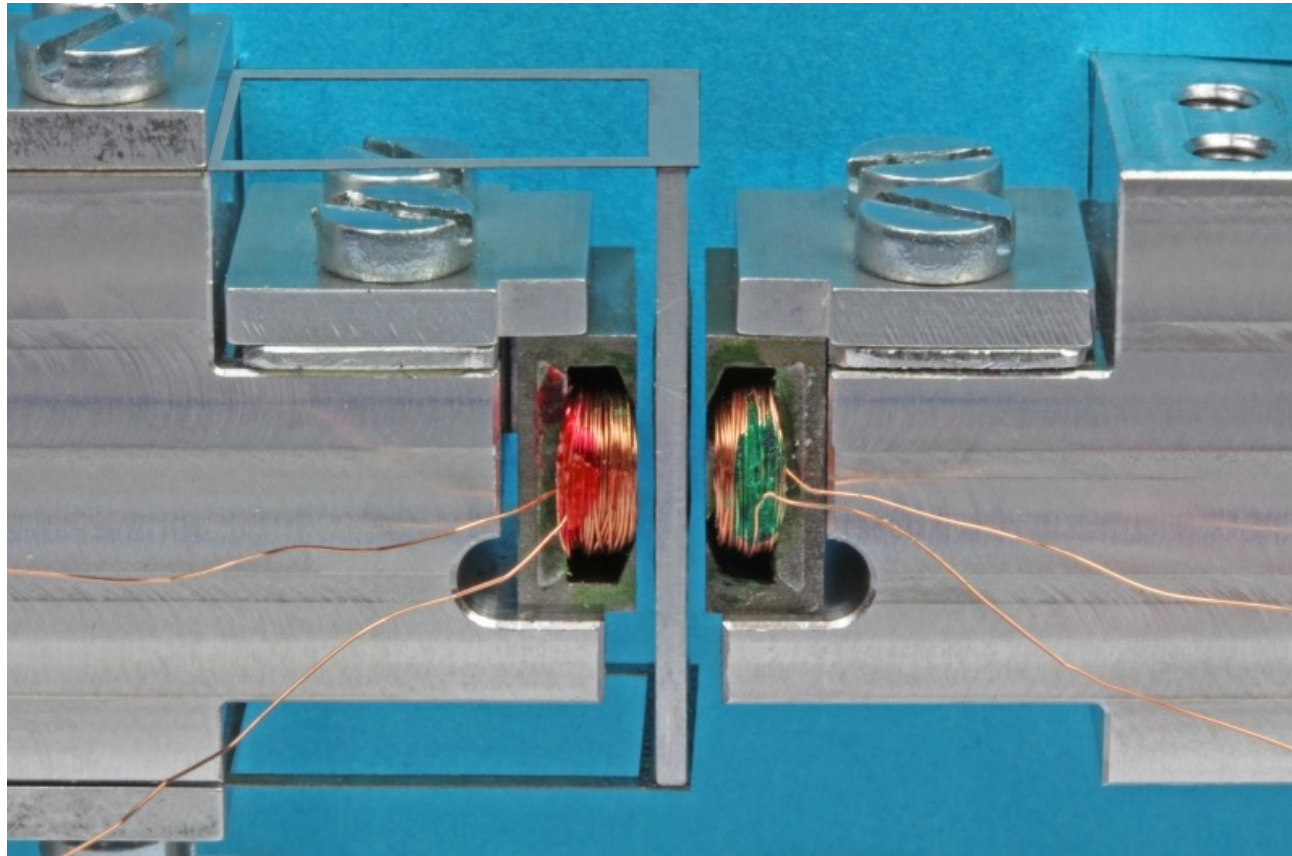
Notre système d'échappement



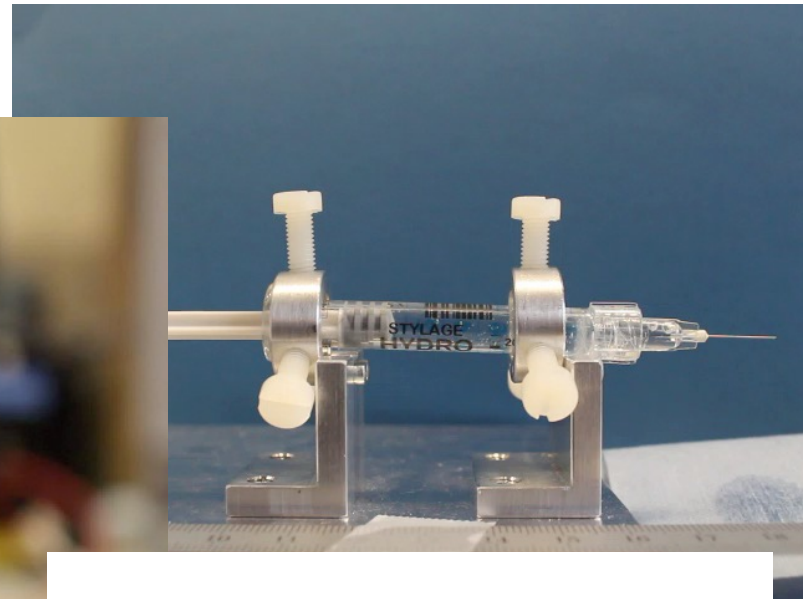
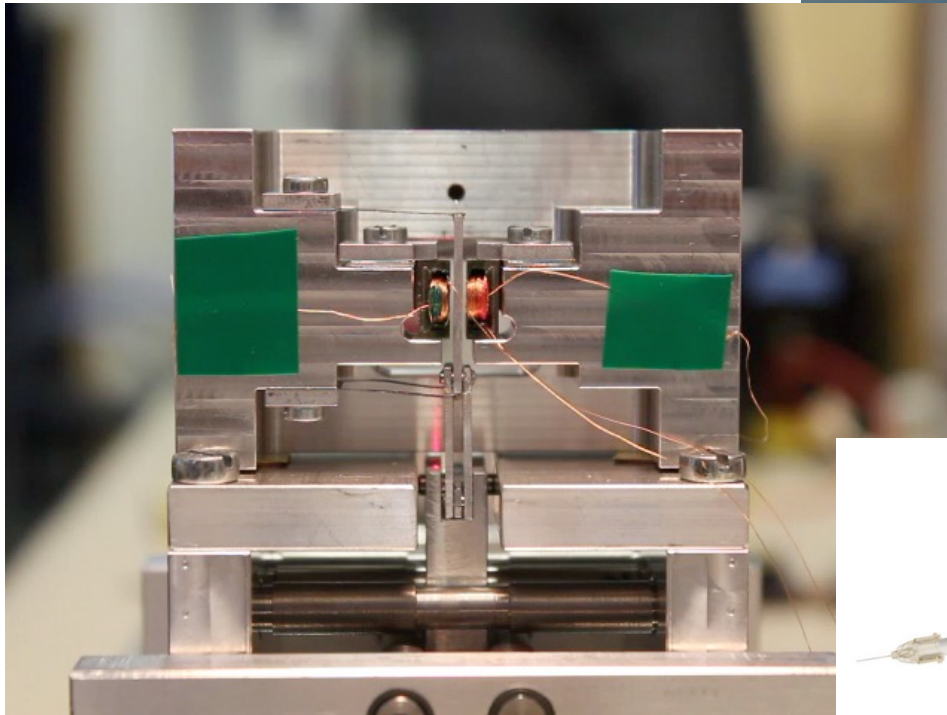
Bloqueurs et rail



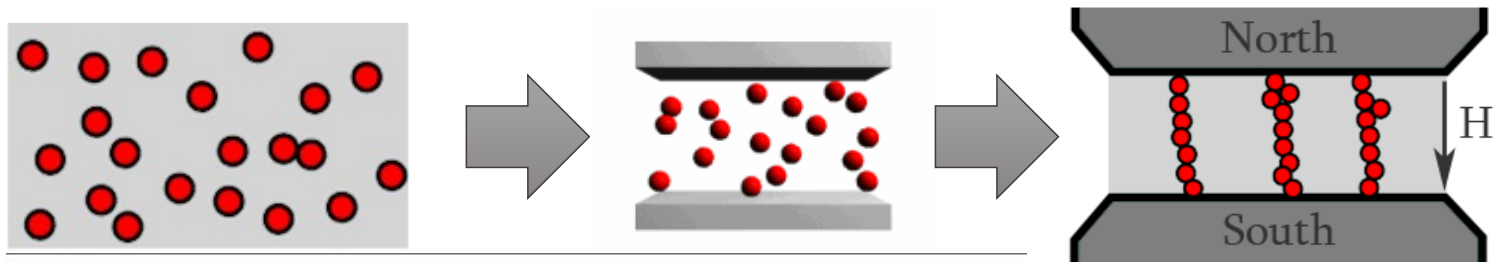
Actionneur



Prototype



Matériaux magnétiques liquides !



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

Date: 16.02.2016

LE TEMPS



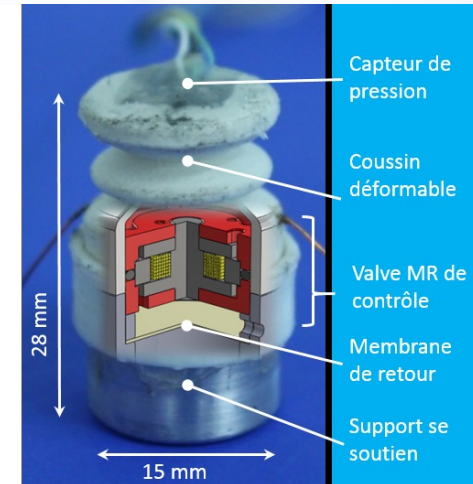
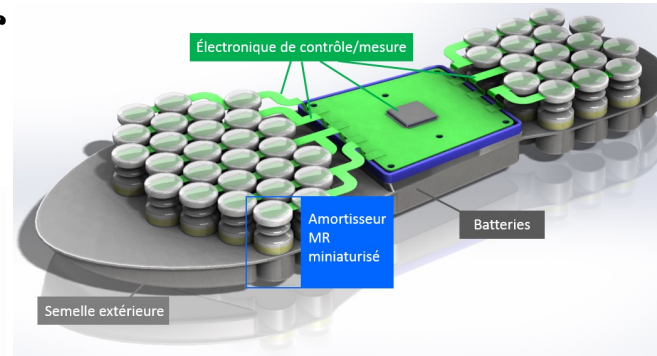
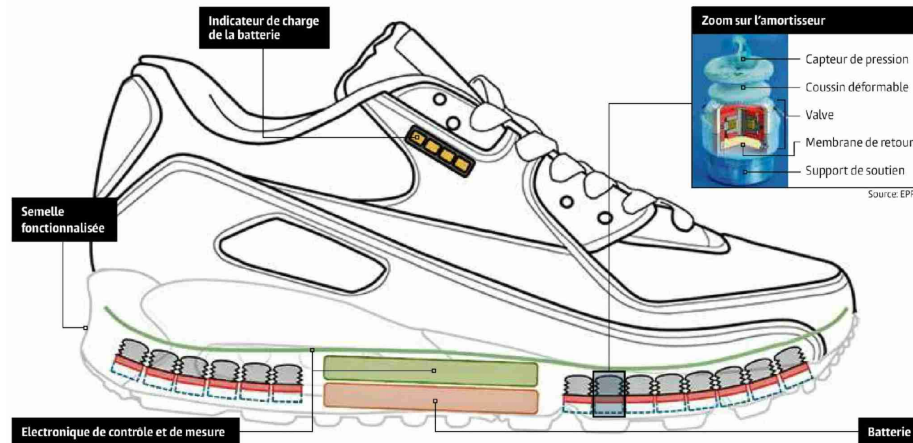
Le Temps
1211 Genève 2
022/ 888 58 58
www.letemps.ch

Genre de média: Médias imprimés
Type de média: Presse journ./hebd.
Tirage: 36'802
Parution: 6x/semaine

N° de thème: 999.056
N° d'abonnement: 1086739
Page: 12
Surface: 75'362 mm²

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

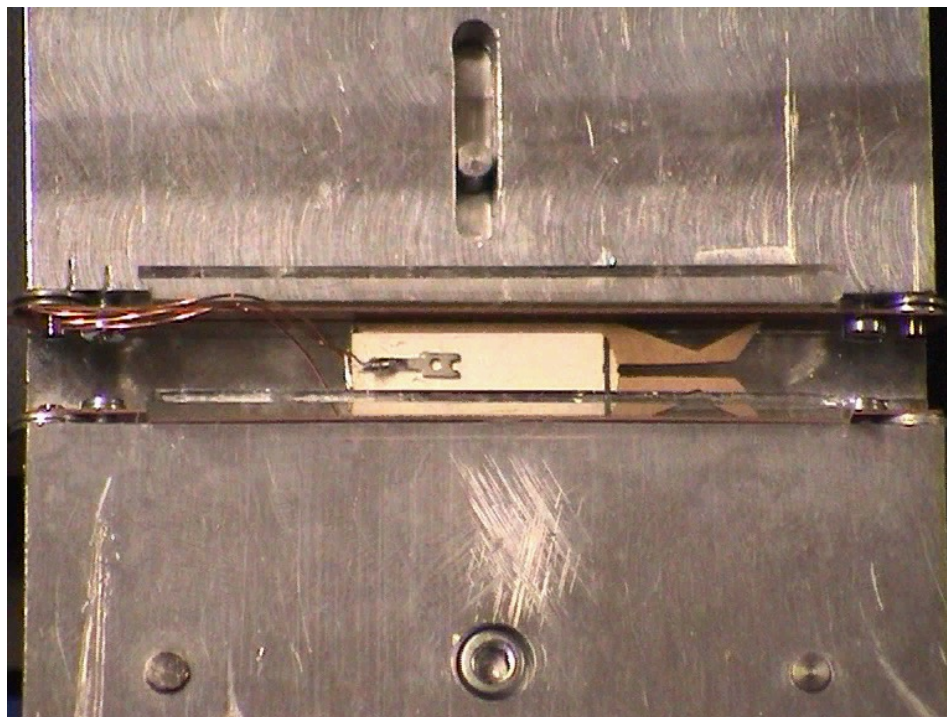
geste chirurgical lourd peut atteindre 30% dans les 30 jours qui suivent l'opération, et 50% après un an. Un concept totalement nova-

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

Exemple



■

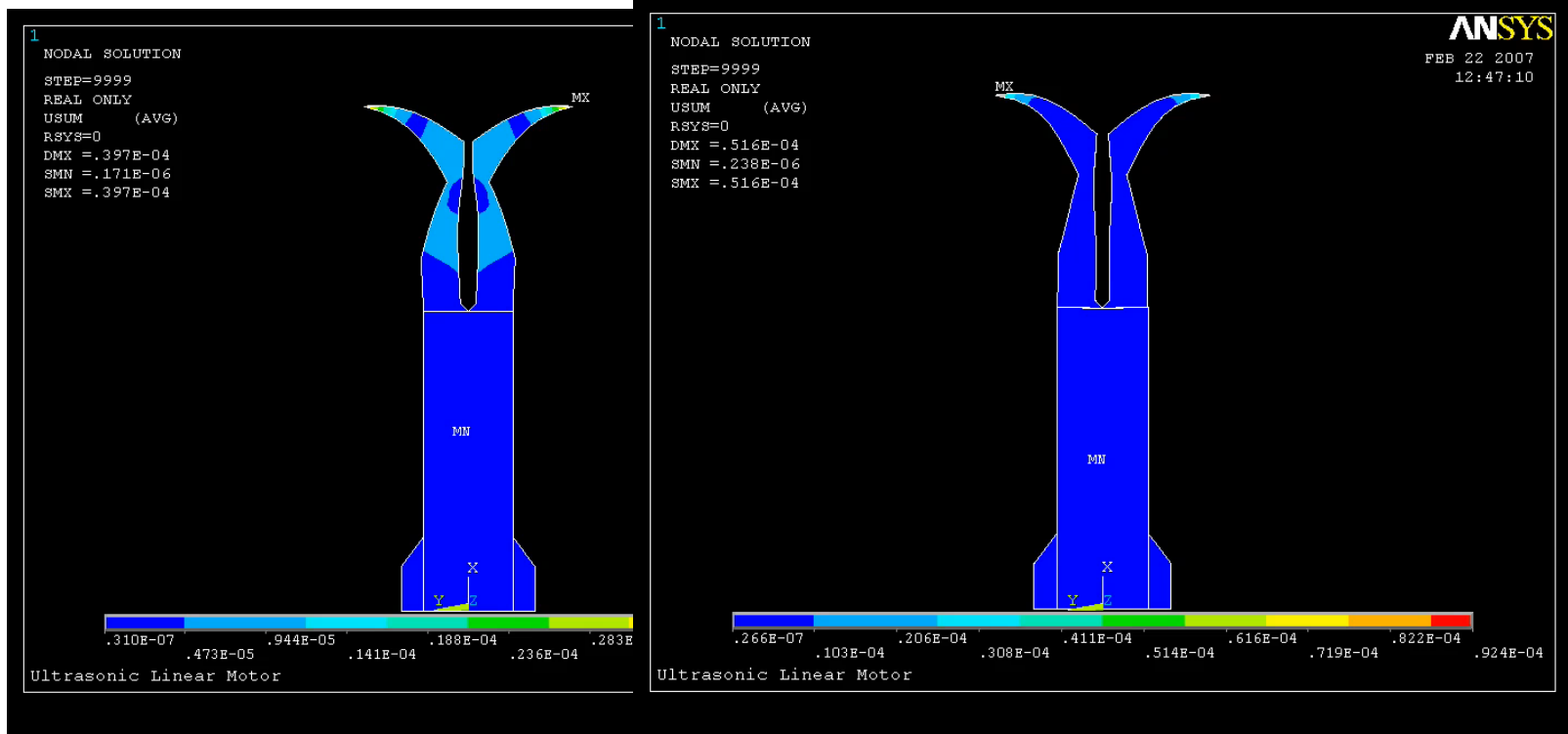


Séquence de déformation du résonnateur

Reverse motion: 69 kHz



Forward motion: 84 kHz



Piezoelectric Haptic Touch Actuator

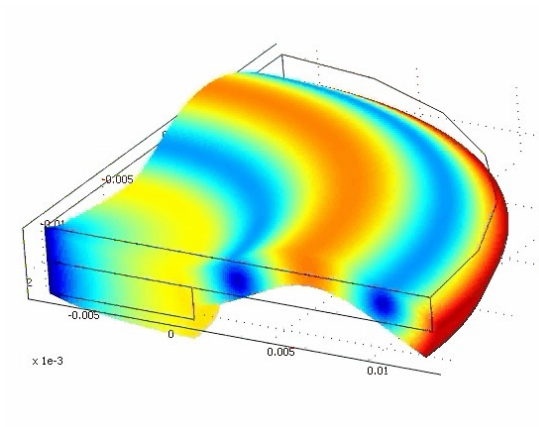


Felt friction is controlled depending on the finger position around the touchpad



Multiphysics design:

- Piezoelectricity
- Structural mechanics
- Fluid dynamics



Piezoelectric Haptic Touch Actuator

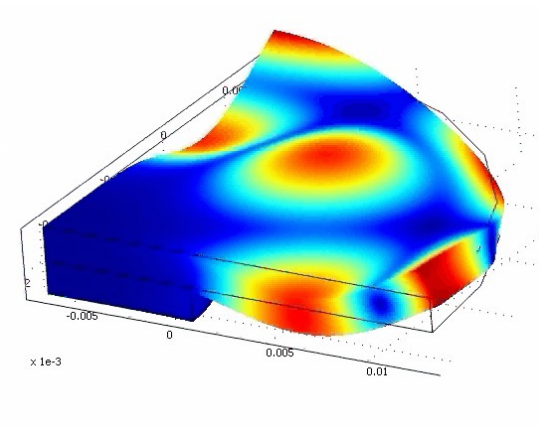


Felt friction is controlled depending on the finger position around the touchpad



Multiphysics design:

- Piezoelectricity
- Structural mechanics
- Fluid dynamics



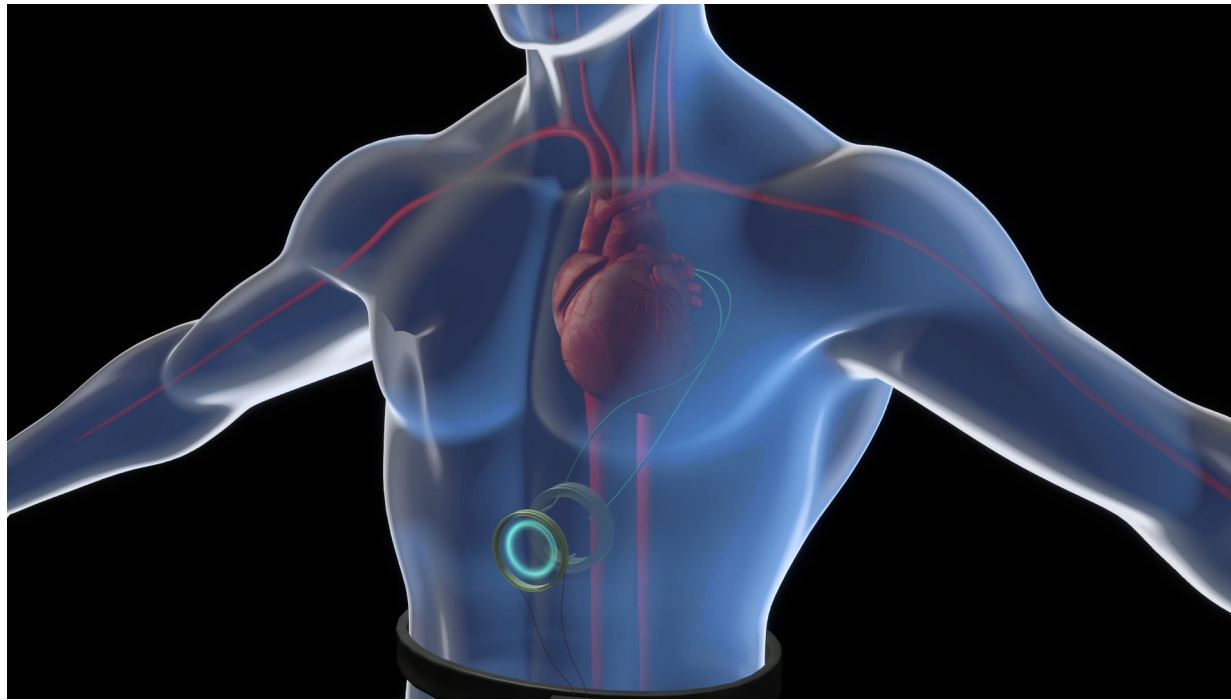


EPFL Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

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

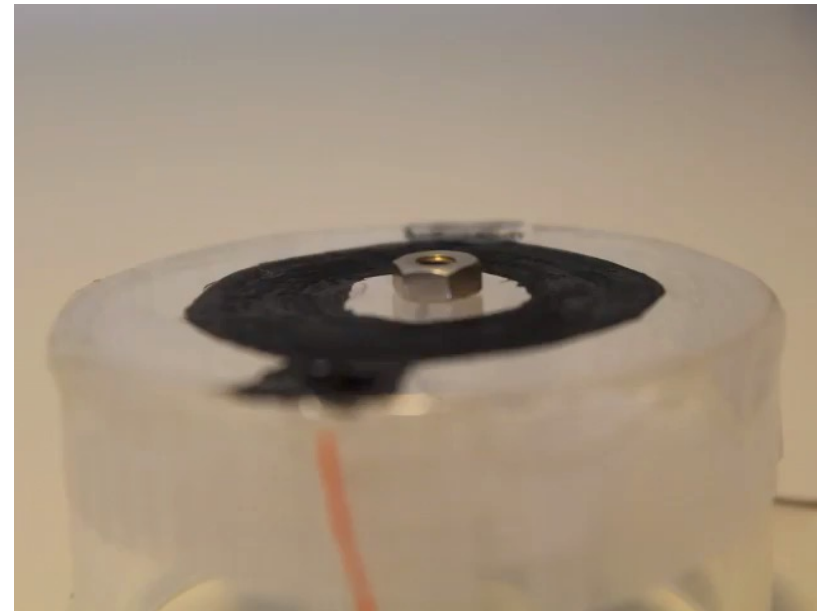
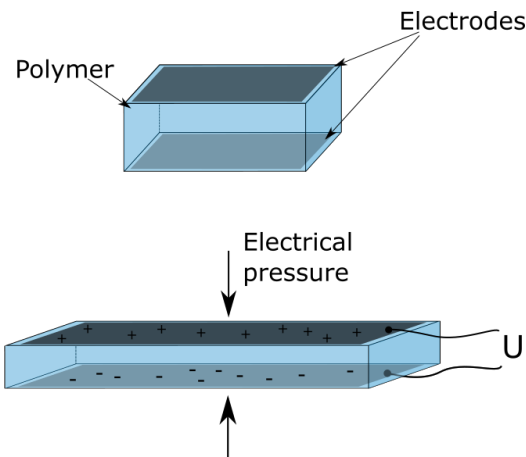
EPFL Research Day - Neuchâtel
2019.09.11
Prof. Yves Pernard

EAP : ELECTRO ACTIVE POLYMER

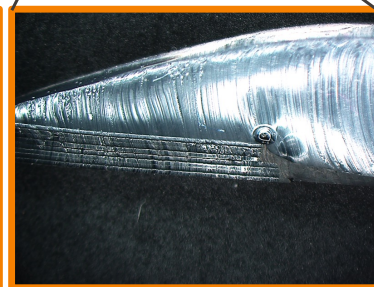
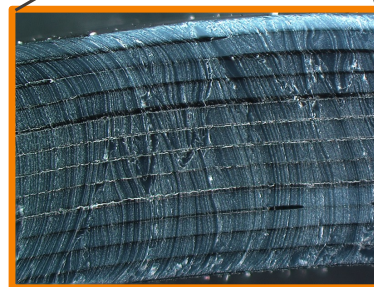
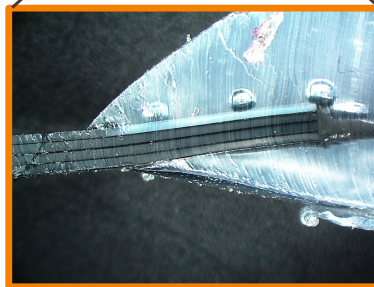
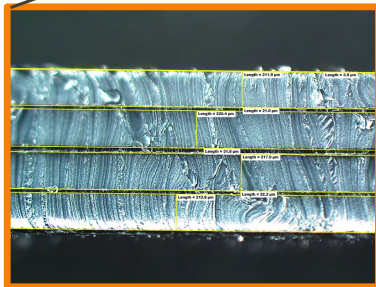
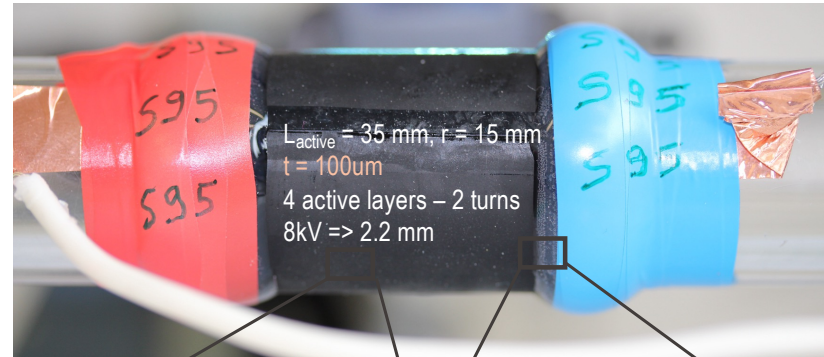
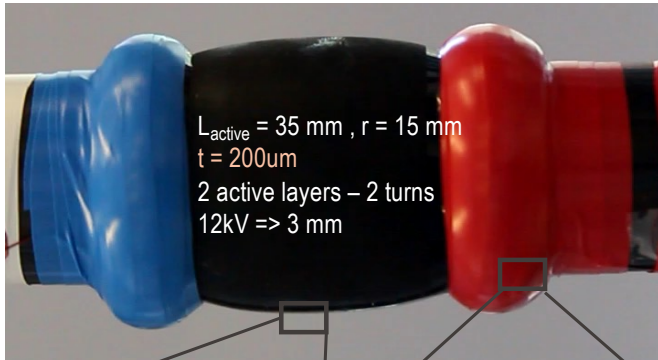


What is a Dielectric Elastomer Actuator (DEA) ?

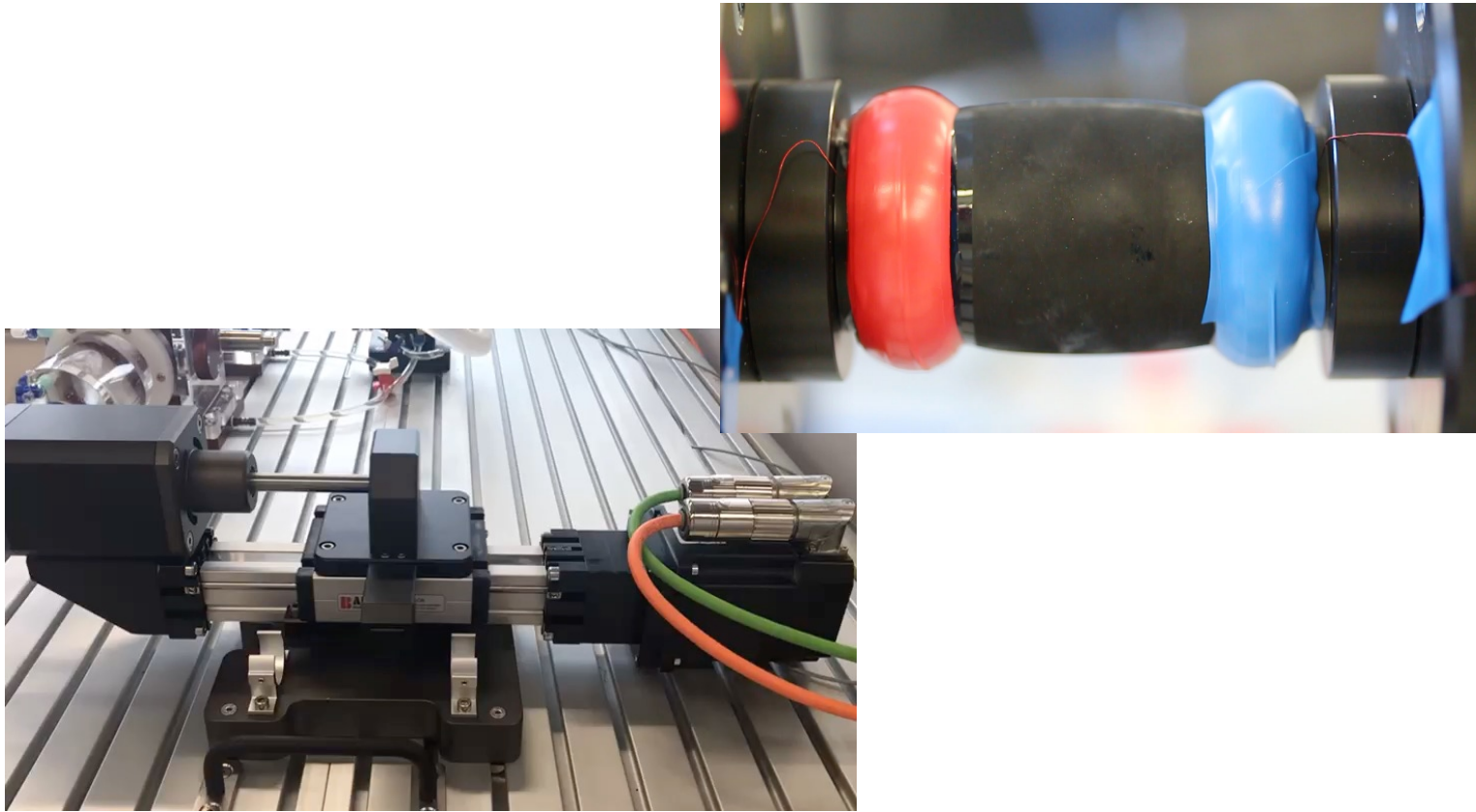
- Polymer: **Soft** membrane as support and insulator
- Compliant **electrodes**
- **High Voltage**



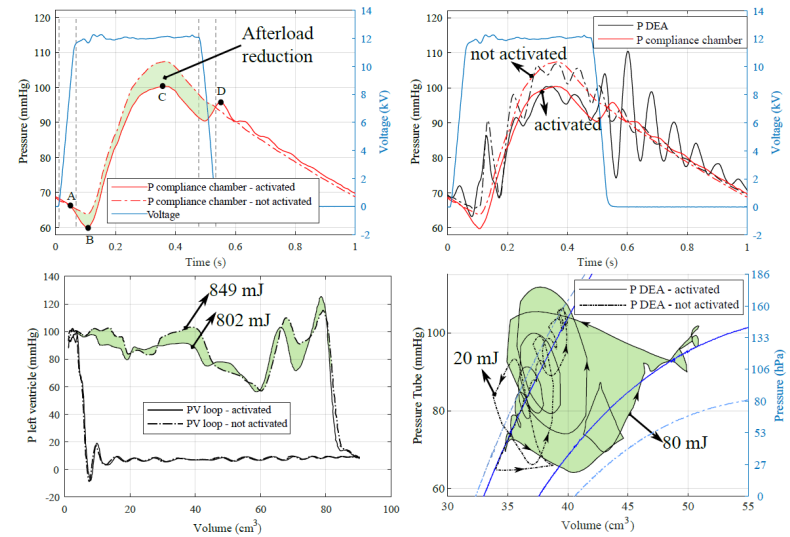
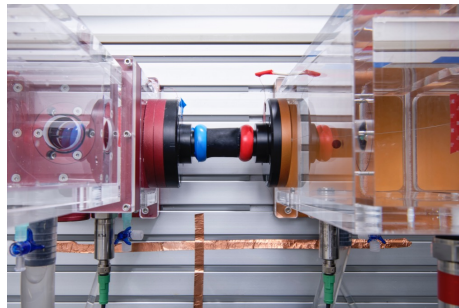
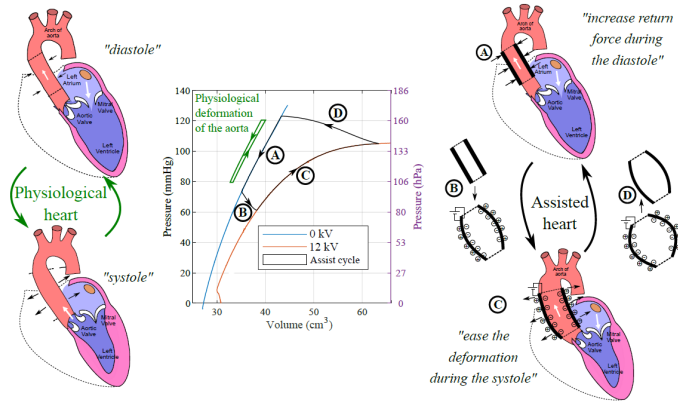
Tubular DEA



In-vitro test : Flowloop



DEA based assisting device



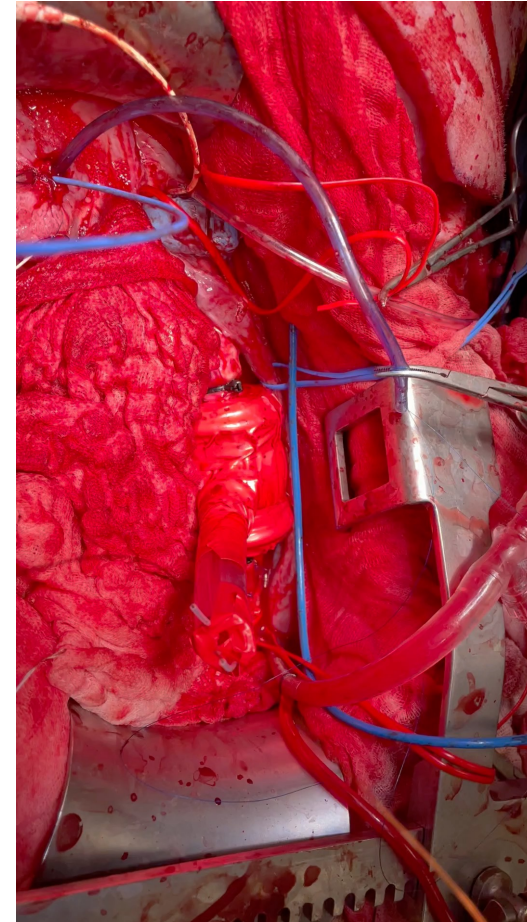
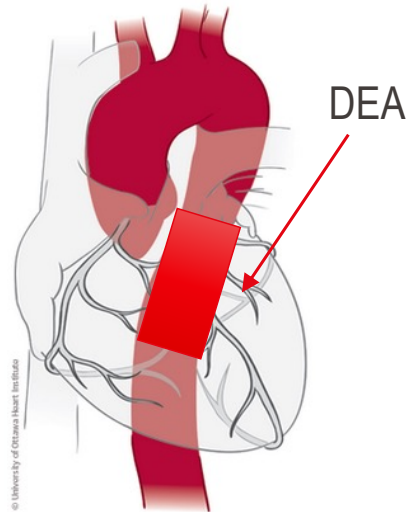
Feasibility of a Dielectric Elastomer Augmented Aorta

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 22th, InselSpital



In Vivo animal experiments



Programme 5^{ème} sem.

- Circuits magnétiques
- Conversion électromécanique
- Aimants permanents
- Comportement dynamique
- Début classification

Programme 6^{ème} sem.

- Fin classification
- Champ tournant
- Moteur à courant continu
- Moteur synchrone et courant continu sans collecteur
- Moteur asynchrone
- Système d'entraînement

Programme 6^{ème} sem. TP

- Banc de mesure
- Circuit magnétique (inductance)
- Moteur à courant continu
- Moteur à courant continu sans collecteur
- Moteur asynchrone

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

- 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 »



- Le mot électricité provient du mot “elektron” qui signifie ambre en grec. On doit l'invention de ce mot à William Gilbert (16^{ème} 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

- 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.





Source : histoire de l'électromagnétisme, Julien Geandrot

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

- Pierre de Maricourt, surnommé Pierre le Pèlerin, (Petrus Peregrinus) est un savant du Moyen Âge.
- exposa au 13^{ème} 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



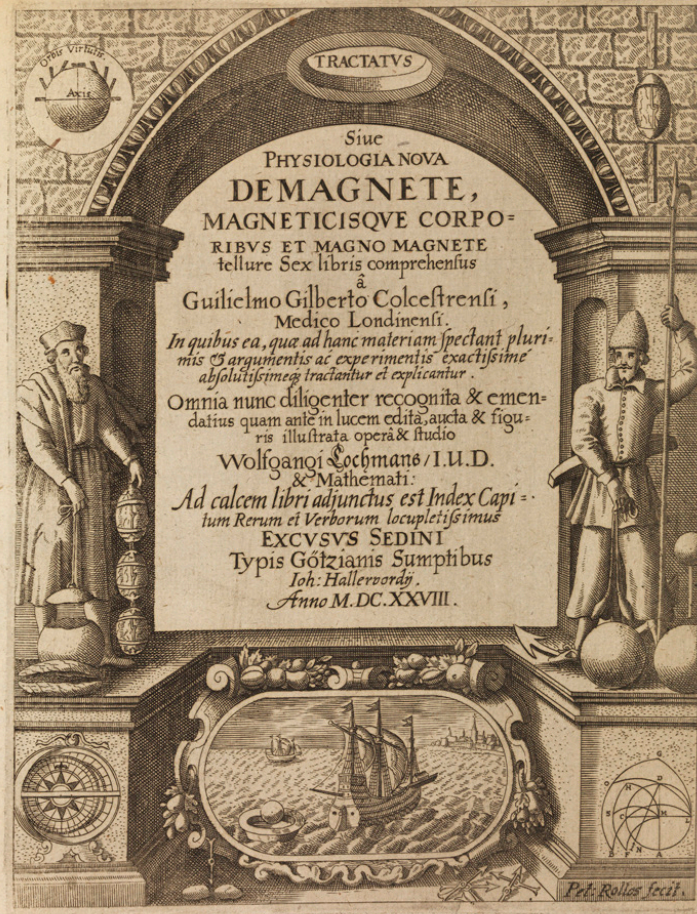
Premier traité de physique

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 formuler mathématiquement ...





Lib. 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

Enfin Maxwell vint !!! (1864)

James Clerk Maxwell (1831-1879)

Phénomènes électriques et magnétiques intimement liés

- Reformula la loi d'Ampère
- Prédit la propagation de perturbations électriques dans les milieux diélectriques
- Calcula la vitesse de perturbations électriques (lumière)
- Découvrit qu'électromagnétisme et lumière sont de même nature
- Prédit théoriquement l'existence des ondes électromagnétiques

160 après, que reste-t-il ?

Il laisse :

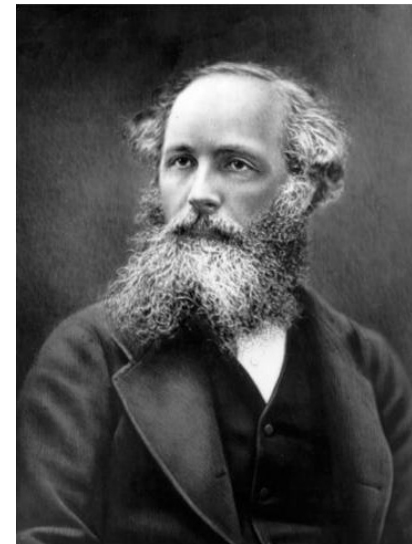
- 20 équations unifiées, regroupant toutes les lois électriques et magnétiques
- C'est la seconde réunification (1^{ère} : méca-nique terrestre et céleste de Newton)

Avec les opérateurs vectoriels :

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

Les équations de Maxwell

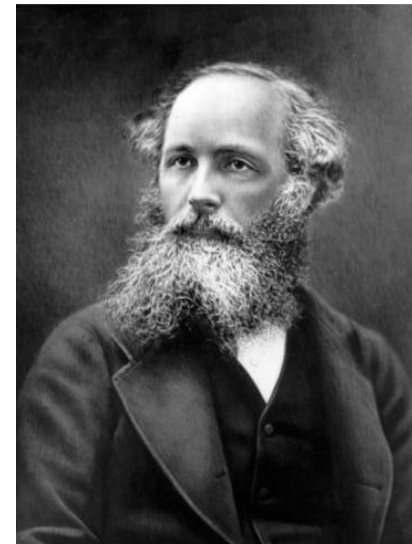
$$\begin{aligned}\nabla \times \vec{H} &= \vec{J} + \varepsilon (\partial / \partial t) \vec{E} \\ \nabla \times \vec{E} &= -\mu (\partial / \partial t) \vec{H}\end{aligned}$$



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

$$\begin{aligned}\text{rot } \mathbf{H} &= \mathbf{J} \\ \text{rot } \mathbf{E} &= - \partial \mathbf{B} / \partial t \\ \text{div } \mathbf{B} &= 0 \\ \text{div } \mathbf{D} &= \rho\end{aligned}$$



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

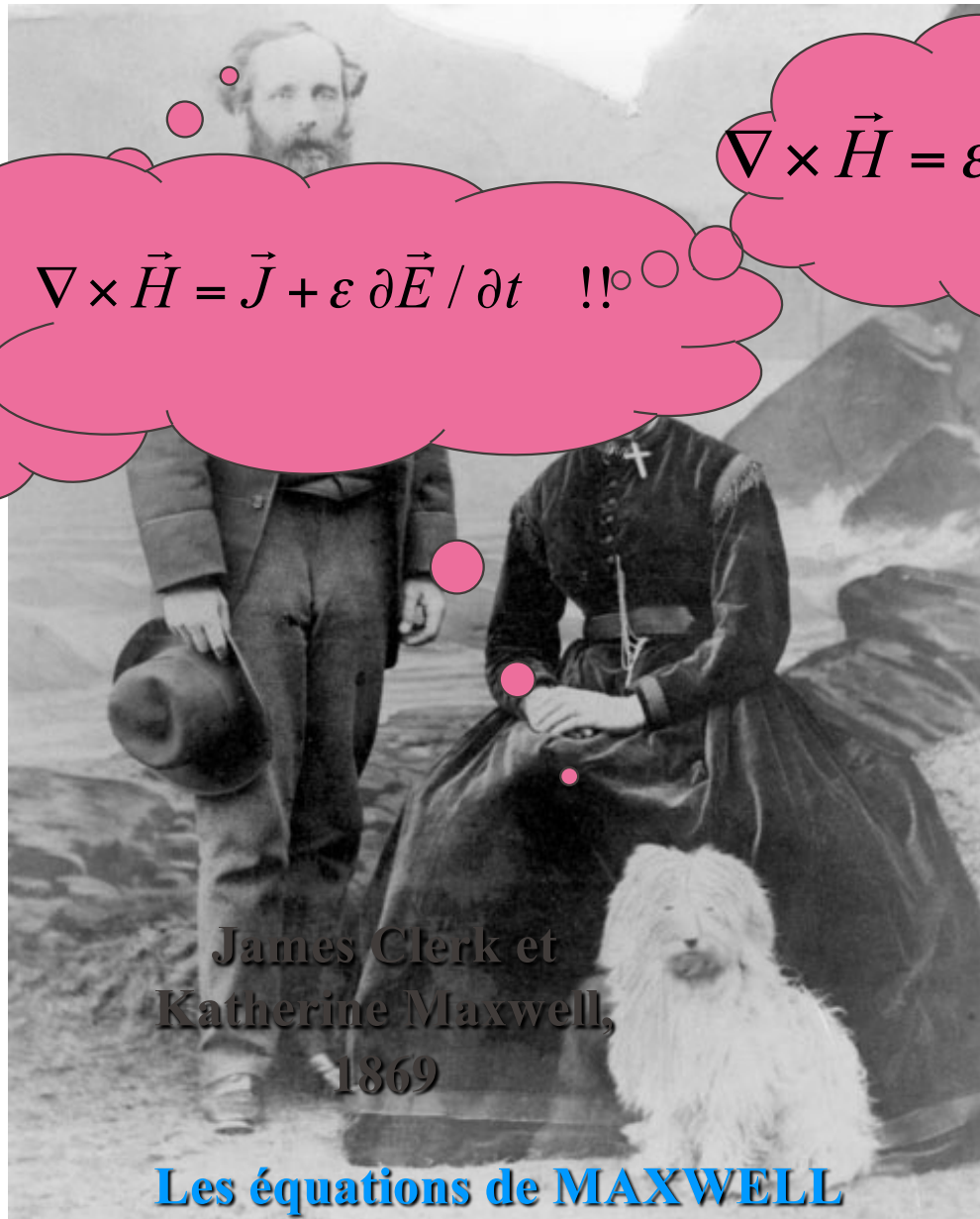
Grâce à Maxwell :

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

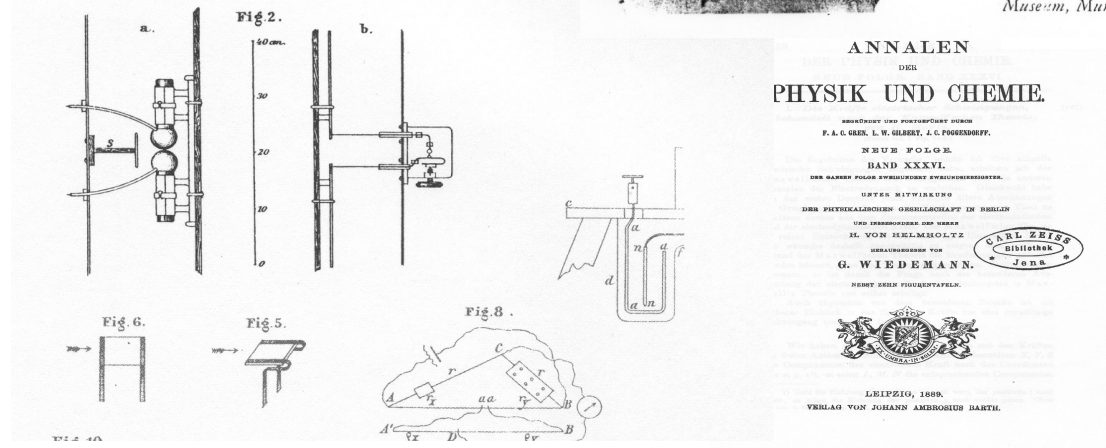
Les équations de MAXWELL

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



H. Hertz

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



EPFL

Maxwell n'a pas eu de chance



vraiment



Maxwell qualité filtre...

