

# Conception et commande de systèmes robotiques pour l'imagerie interventionnelle

**Laurent Barbé**

Ingénieur de recherche, [laurent.barbe@unistra.fr](mailto:laurent.barbe@unistra.fr)

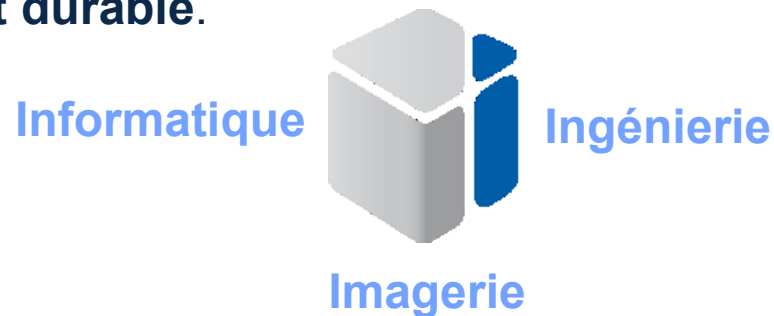
**Plate-forme IRIS– Laboratoire ICube**

La Mécanique et le monde du Vivant,  
Carqueiranne 19-22 octobre 2021

# Laboratoire ICube

ICube est depuis le 1<sup>er</sup> janvier 2013 :

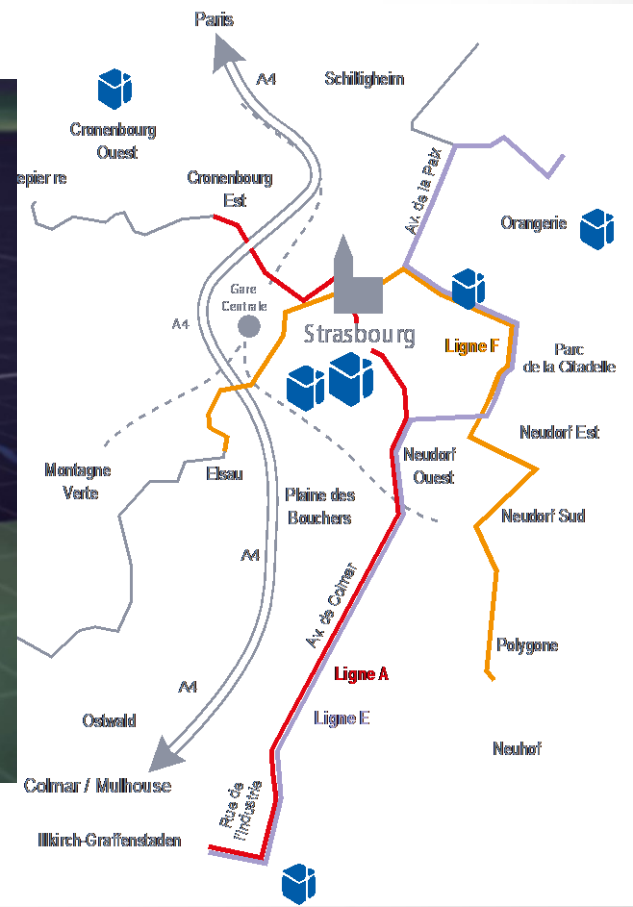
- un laboratoire de recherche en **ingénierie**, en **informatique** et en **imagerie** avec comme secteurs d'activité privilégiés la **santé**, **l'environnement** et le **développement durable**.



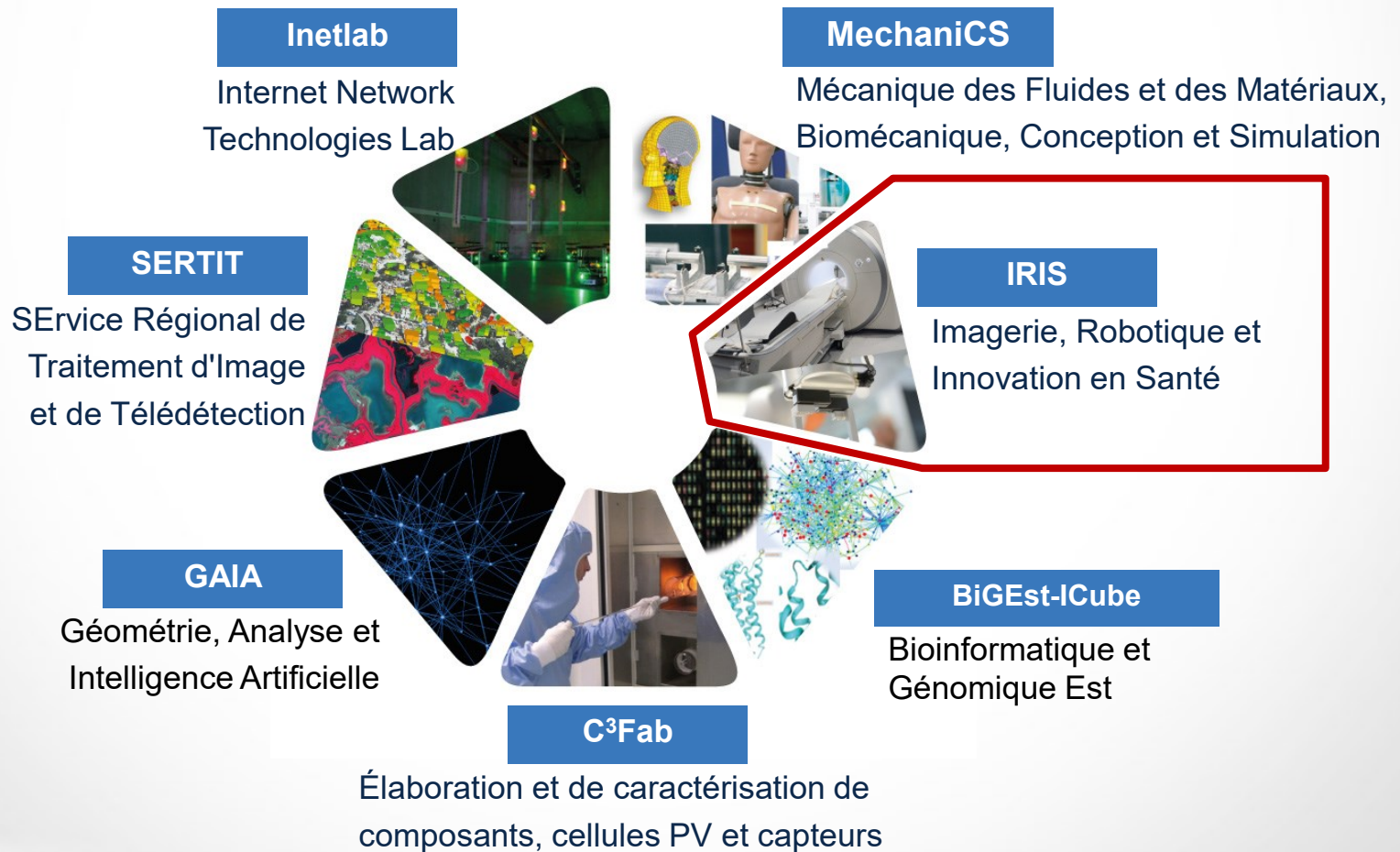
- une unité mixte de recherche (UMR7357) sous la cotutelle du **CNRS**, de **l'ENGEES**, de **l'INSA Strasbourg** et **l'université de Strasbourg**.



# ICube, un laboratoire multisite



# 7 plateformes technologiques et de services



# La plate-forme IRIS

## ❖ La plateforme IRIS

Plateforme de support à la recherche en Imagerie, Robotique  
Innovation pour la Santé

## ❖ 6 pôles de compétences

Neuro Imagerie homme

Biomécanique

Imagerie pré-clinique

Informatique et traitement d'images

Imagerie Interventionnelle

Robotique

## ❖ Pôle Robotique

### Domaines d'activités

Chirurgie laparoscopique et endoscopique

**Imagerie interventionnelle percutanée**

Télémanipulation avec retour d'efforts

Asservissement visuel

Conception de systèmes robotiques

### Expertises techniques

Systèmes Contrôle / Commande

Développement logiciel

Conception mécatronique

Fabrication additive

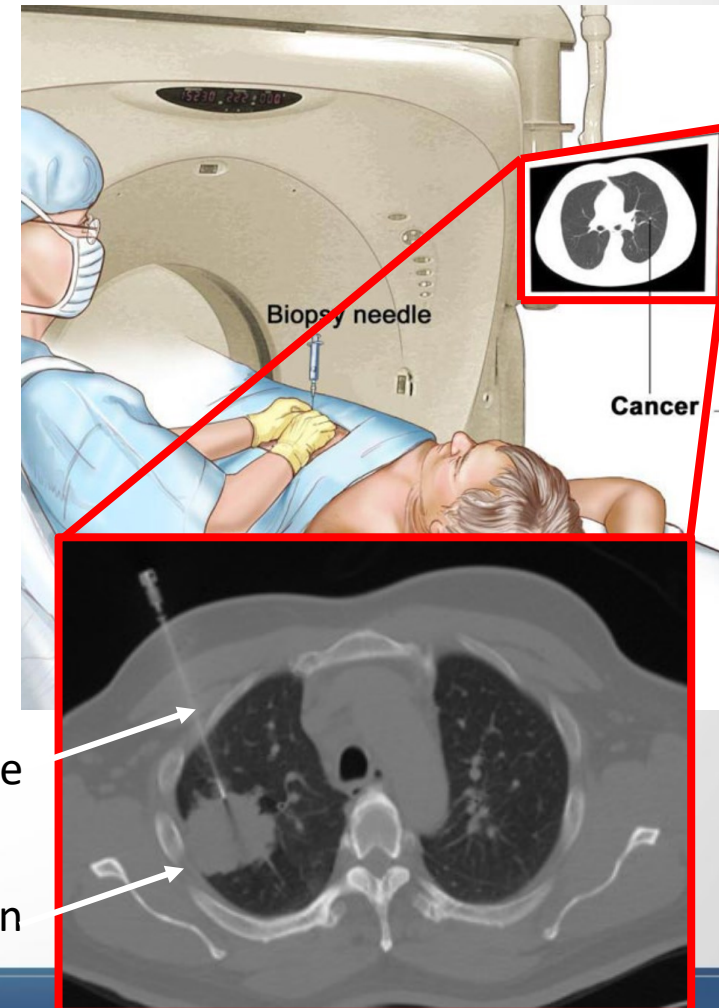
## IRIS en quelques chiffres

- 23 membres au 10/2021
  - 9 IR / 3 IE / 3 Ide / 5 Tech / 3 CDD
- 1500 m<sup>2</sup> située dans l'Hôpital Civil
- Adossée à 8 équipes de recherche
- EquipEX Robotex
- Participation aux réseaux IBIsA, Fli, FMTS

# Imagerie Interventionnelle

# Imagerie interventionnelle percutanée

- Geste chirurgical réalisé sous **guidage avec un imageur** au moyen d'une aiguille
- Actes :
  - Biopsie
  - Cryoablation
  - Thermoablation
  - Radiofréquences ...
- Imageurs :
  - Scanner à rayons X
  - IRM
  - Échographie





# Déroulement d'une procédure percutanée

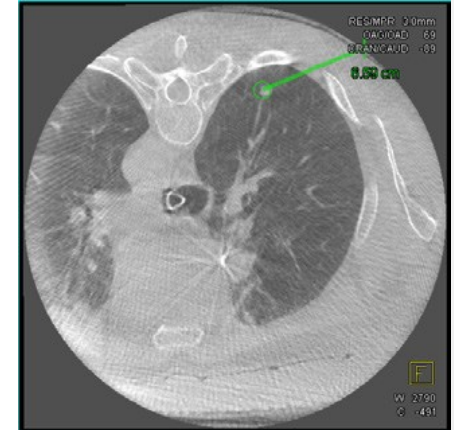
Images préopératoires

Repérage de la trajectoire

Insertion de l'aiguille

Traitement

Extraction



1. Repérage de la tumeur
2. Planification du geste



# Déroulement d'une procédure percutanée

Images préopératoires

Repérage de la  
trajectoire

Insertion de l'aiguille

Traitement

Extraction



Repérage et marquage du point  
d'insertion

# Déroulement d'une procédure percutanée

Imagerie pré-opératoire

Repérage de la trajectoire

Insertion de l'aiguille

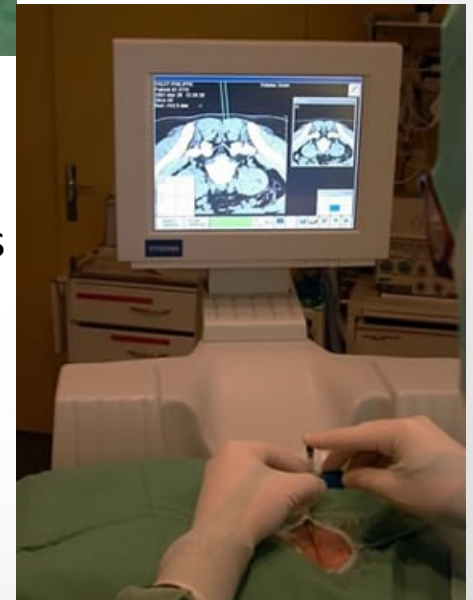
Traitement

Extraction



Préparation et incision  
au point d'entrée

Séquence d'insertion  
Utilisation plusieurs modalités  
(Biopsie)



# Déroulement d'une procédure percutanée

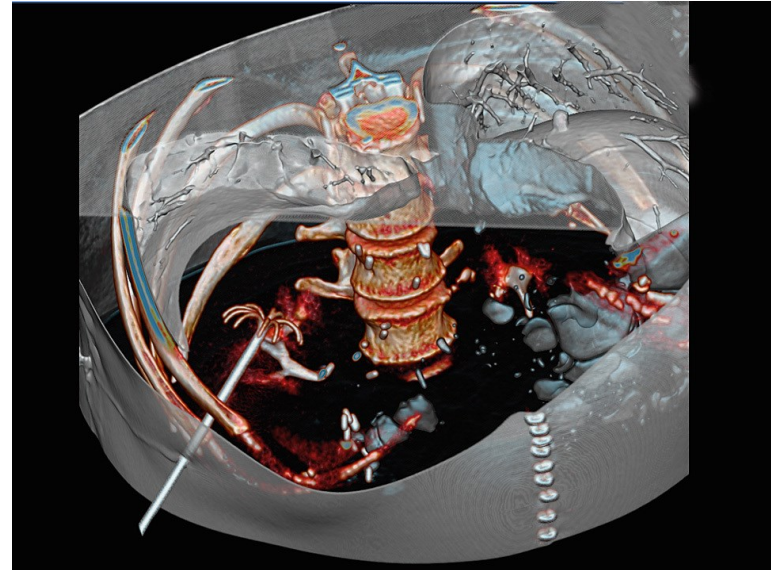
Images préopératoires

Repérage de la  
trajectoire

Insertion de l'aiguille

Traitement

Extraction



Ablation par radiofréquences sous scanner (images 3D reconstruites SIEMENS)

# Déroulement d'une procédure percutanée

Images préopératoires

Repérage de la  
trajectoire

Insertion de l'aiguille




Traitement

Extraction



Salle Scanner à Rayons X avec plusieurs modalités

# Les modalités

<b>Scanner à rayons X</b>		Coupes Images 2D	Grande précision	Imagerie temps-réelle (fortes radiations)
<b>IRM</b>		Coupes 2D quelconques	Peu disponible	Peu d'espace dans le tunnel
<b>radioscopie</b>		Projection images 2D	Repérage difficile	Imagerie temps-réelle Couplé à des robots



# Robotisation du geste percutané



# Apports de la robotique

## Besoins cliniques

- Réduire l'exposition aux rayons X
- Augmenter la précision du geste
- Guidage et planification du geste
- Ergonomie du geste
- Aide à l'apprentissage

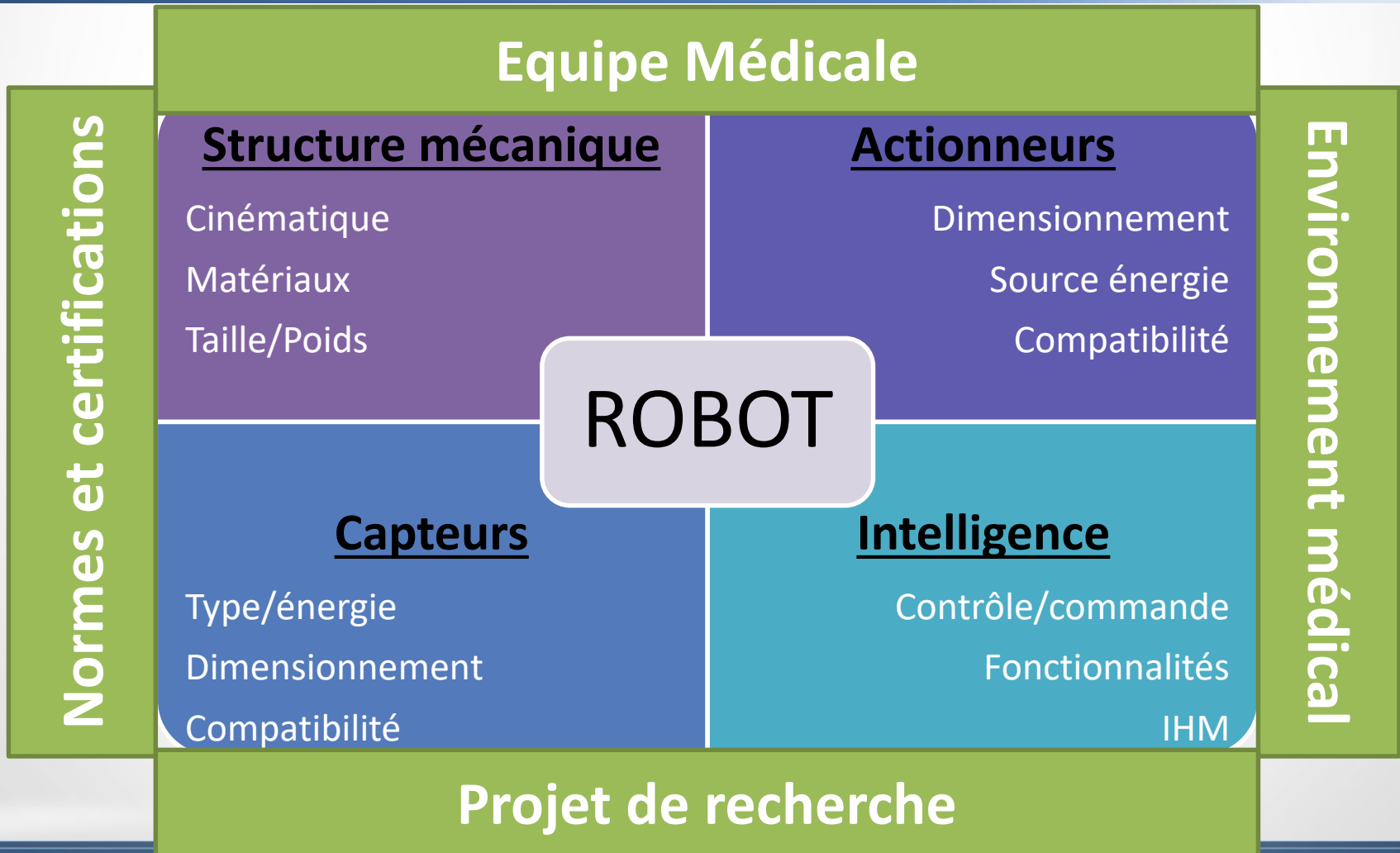
## Patients et enjeux économiques

- Réduire la durée d'intervention
- Réduire la durée d'hospitalisation
- Réduire les complications
- Réduire les coûts

- Télérobotique :
  - déporter le radiologue des rayonnements
  - démultiplier les mouvements / filtrer les tremblements
  - améliorer la dextérité
- Comanipulation : guider le geste
- Recalage et vision : fusion multimodalités, améliorer le positionnement

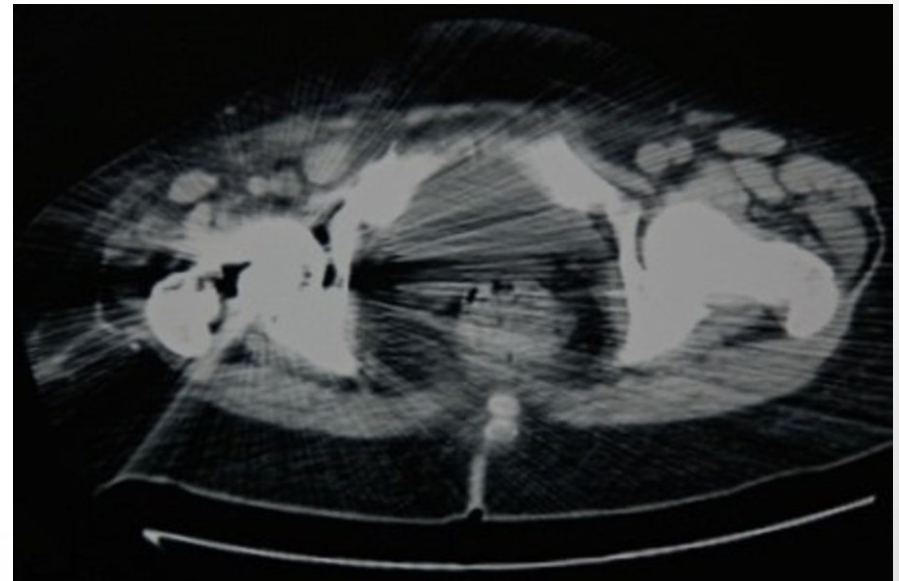


# Démarche de conception



## Contraintes technologiques – Rayons X

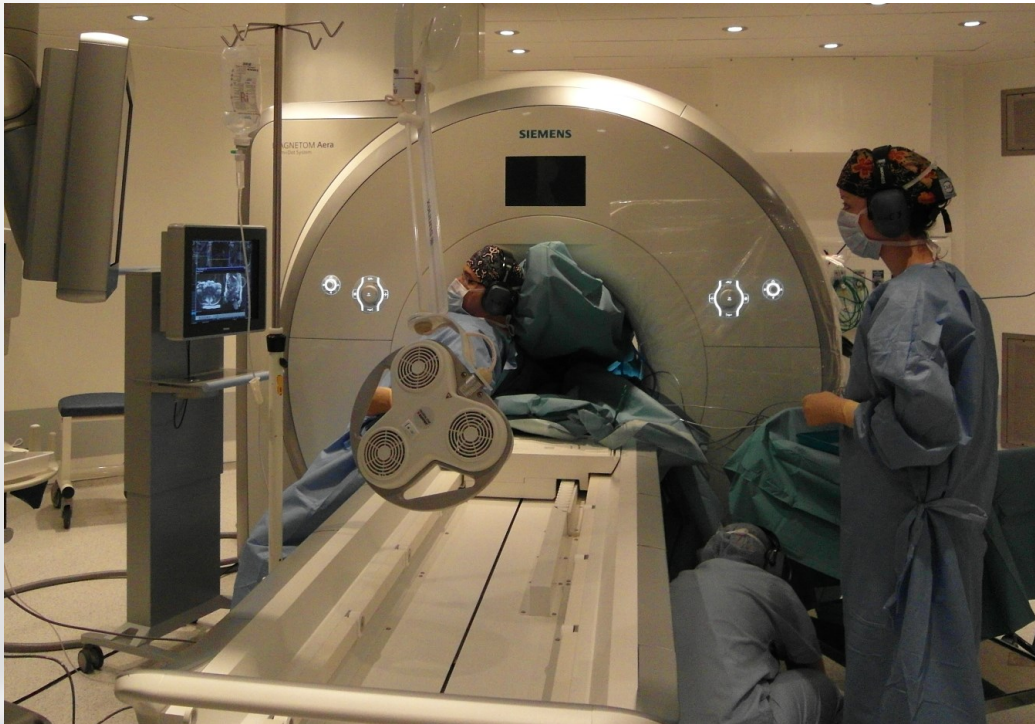
- **Artefacts dans l'image** → éléments métalliques dans la coupe
- **Exposition aux rayons X** → télémanipulation avec retour d'efforts
- **Interfaçage avec l'imageur** → récupération des images DICOM - PACS



Artefact métallique - prothèse de hanche (article Arkoulis 2012)

## Contraintes technologiques - IRM

- Champs magnétique (>1Tesla)
  - Nuisances électromagnétiques
  - Accessibilité réduite au patient
  - Communication avec l'IRM
- Pas de pièces métalliques
  - Pas de sources électroniques
  - Peu d'espace
  - Accès au protocole de comm.



# Problématiques

- Saisir une aiguille :
  - Assurer la préhension sur un revêtement lisse avec potentiellement des liquides corporels
  - Diamètre faible de 0,3 à 1,6 mm
  - Gérer le biseau
- Insérer une aiguille :
  - Efforts d'insertion jusqu'à 10 N
  - Perception des transitions en organes
  - Différentes longueurs de 10 cm à 25 cm
- Compatibilité avec les imageurs
  - Pas de matériaux ferromagnétiques dans la coupe scanner à rayon X ou dans le tunnel IRM
  - Nuisances électromagnétique dans la salle IRM
- Gestion de l'accès au tunnel
  - Être compatible avec les dimensions du tunnel / patient
  - Déporter l'opérateur de la zone à risque

# L'Expérience de ICube

# Projets en imagerie interventionnelle



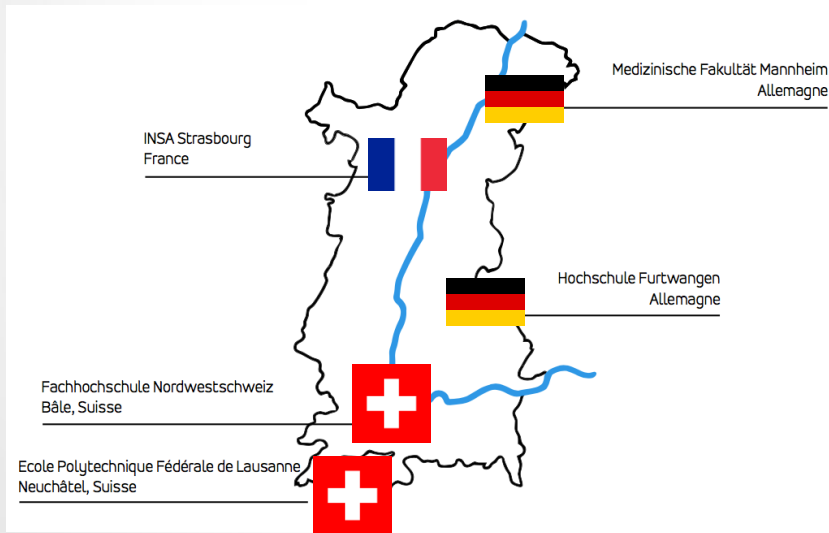
## Application Rayons X



## Applications IRM



# Projet européen SPIRITS



## Smart Printed Interactive Robots for Interventional Therapy and Surgery

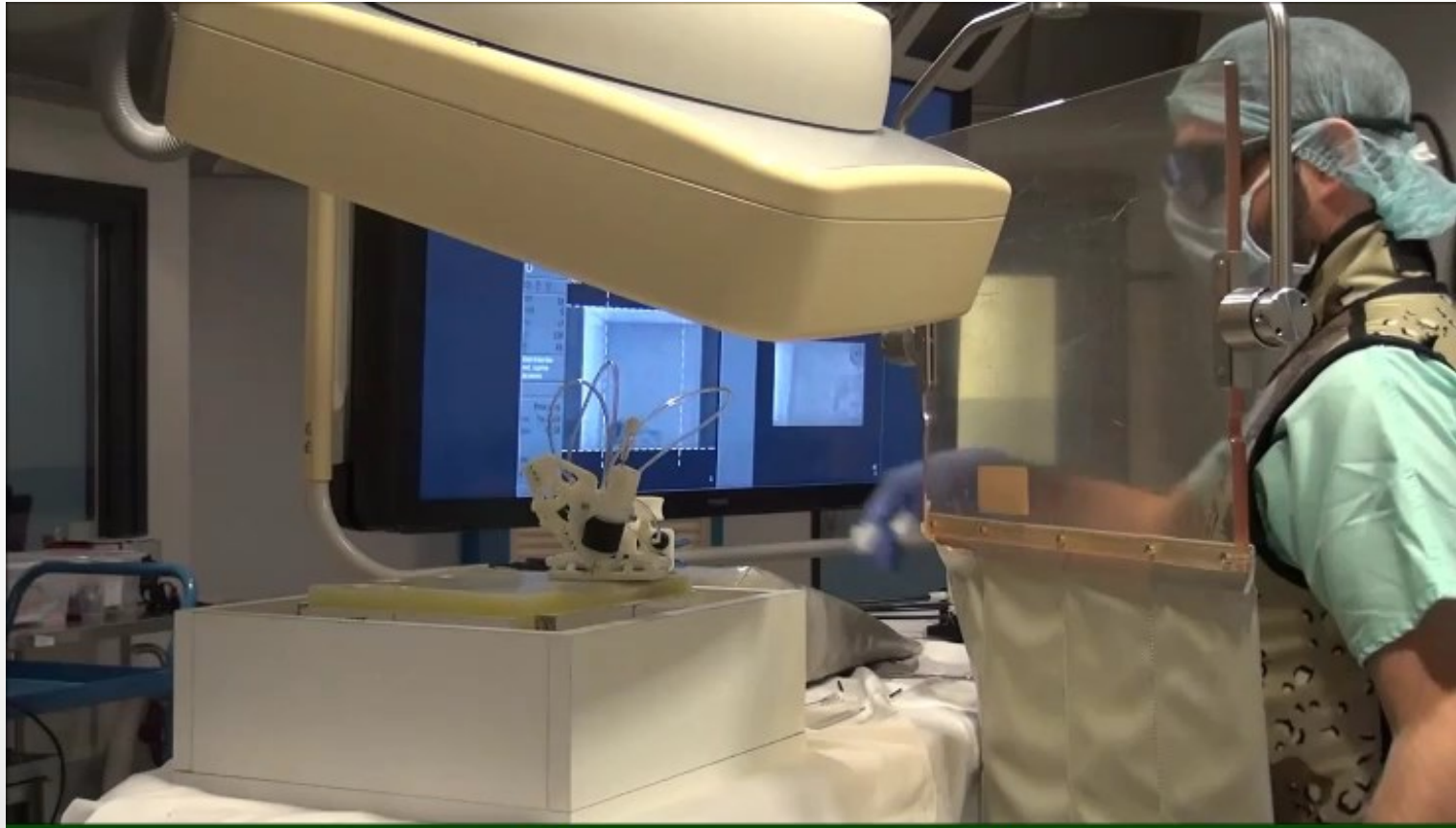
Projet Interreg Rhin Supérieur 2017-2020  
Travaux thèse Antoine Pfeil (2020)



Projet SPIRITS a visé le développement de [solutions robotiques innovantes](#) par l'impression 3D pour la [radiologie interventionnelle](#) et la chirurgie guidée par l'image.

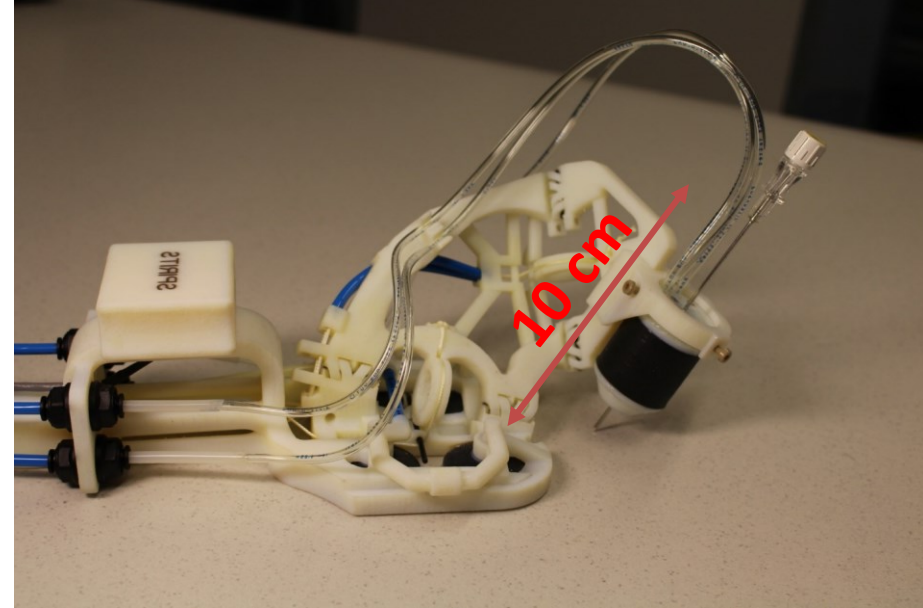
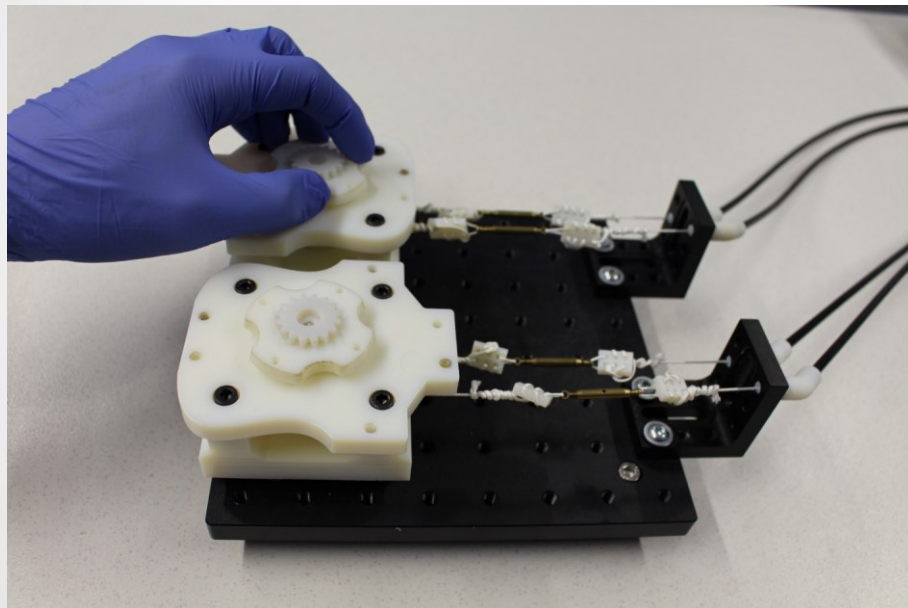


# Projet européen SPIRITS – 1<sup>er</sup> Prototype



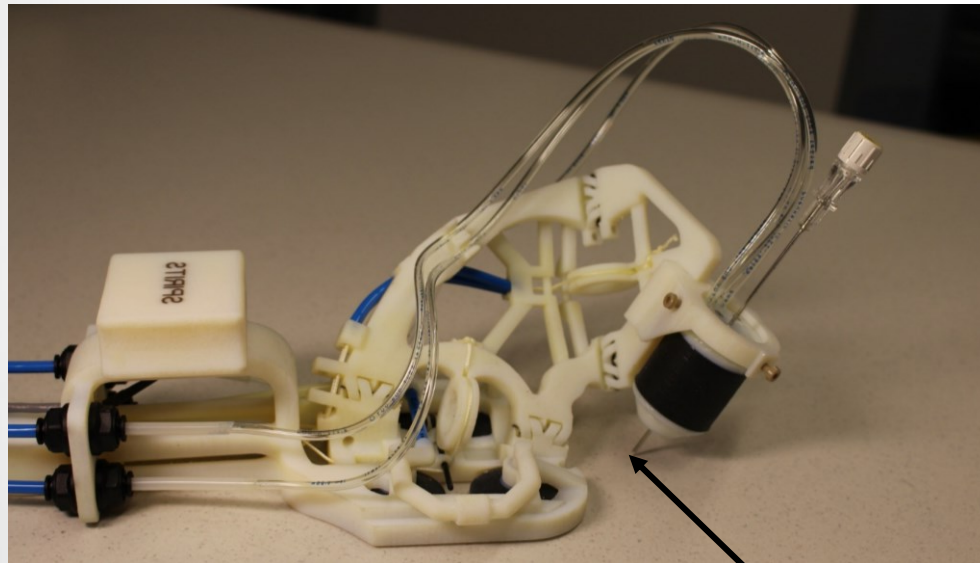
**Positionnement manuel**

# Projet européen SPIRITS – 1<sup>er</sup> Prototype

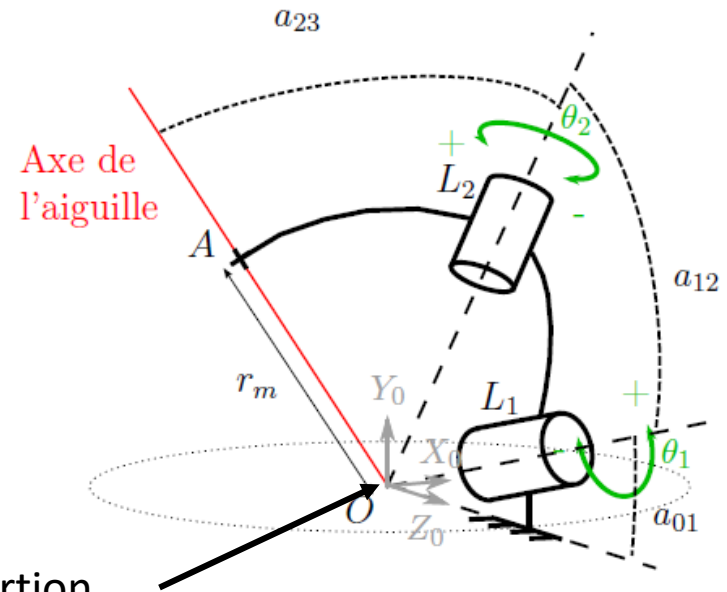


- Interface de télémanipulation
- Transmission des mouvements par câbles (1,5 m de câble)
- Système de positionnement et d'orientation d'aiguille entièrement en matériaux polymères (liberté de forme → impression 3D multimatériaux)

# Projet européen SPIRITS – 1<sup>er</sup> Prototype



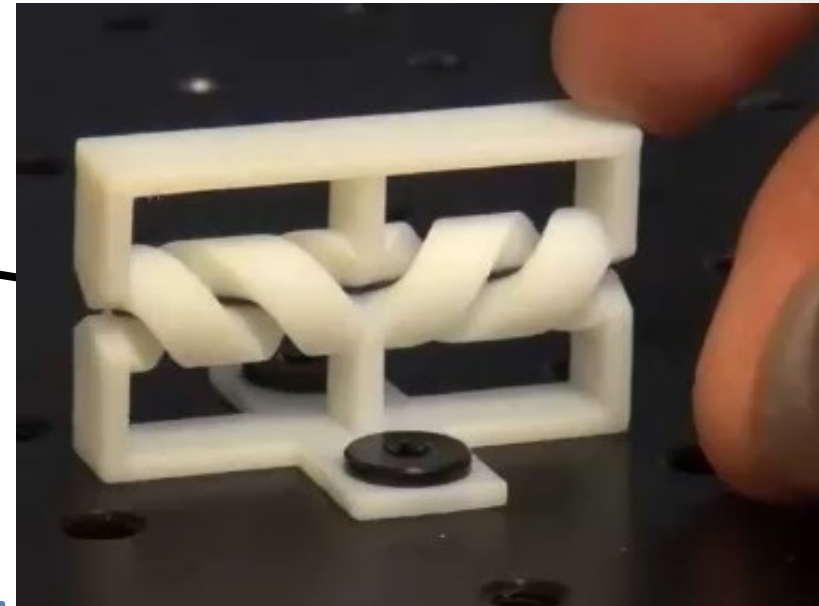
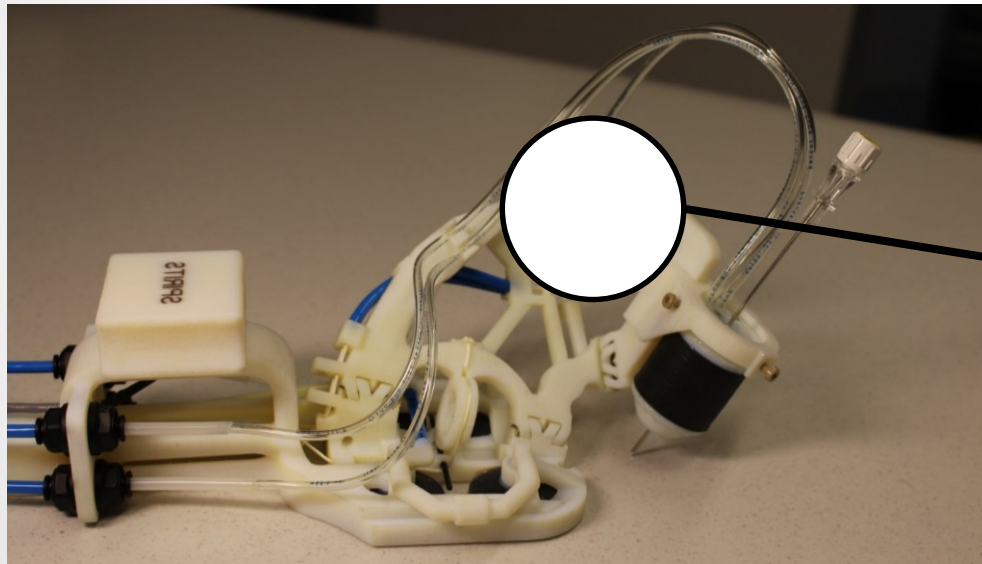
Point d'insertion



## Structure de positionnement et orientation SPIRITS [Bruyas2015 & Pfeil2020]

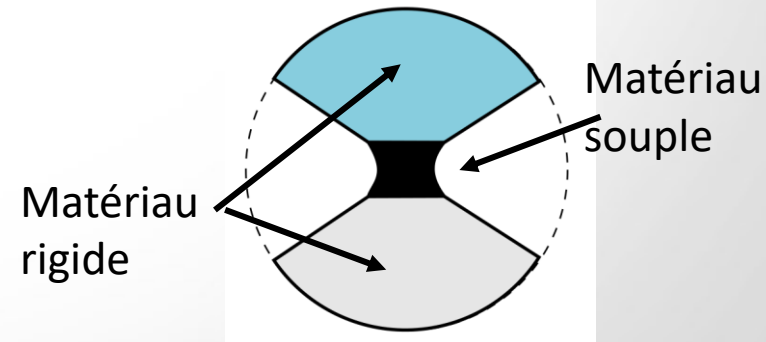
- Mécanisme sphérique série actionné par câbles
- Point d'insertion en O
- Mécanisme à centre rotation déporté

# Projet européen SPIRITS – 1<sup>er</sup> Prototype



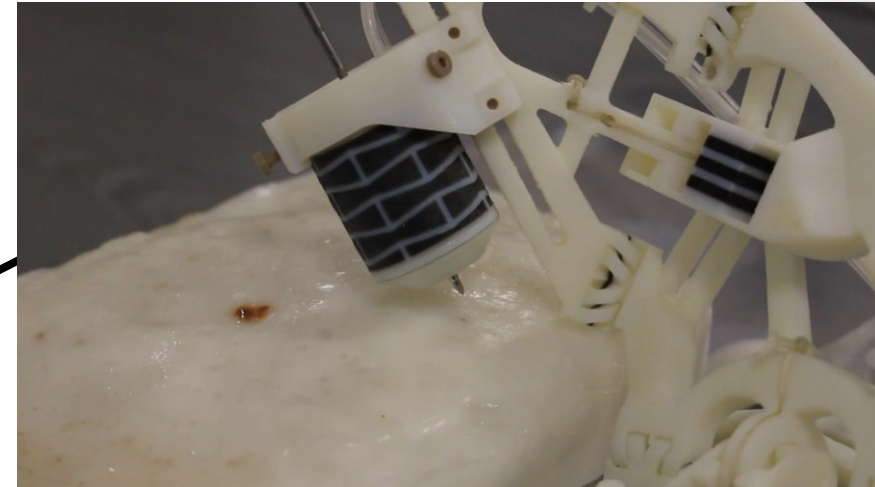
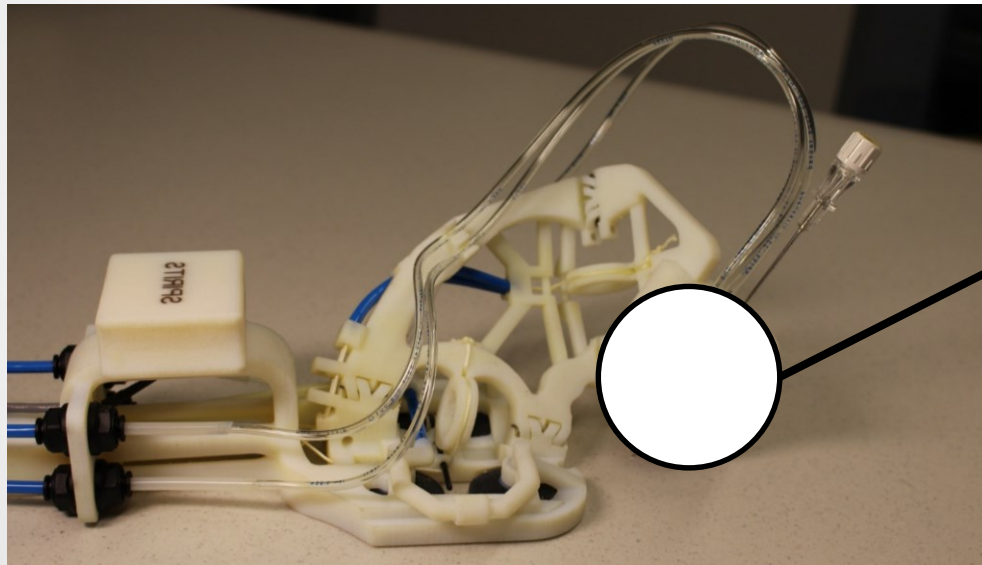
## Liaison compliante HSC (Helical Shape and Compliant) [Bruyas 2015]

- Intégration compacte
- Sans jeux
- Impression monobloc



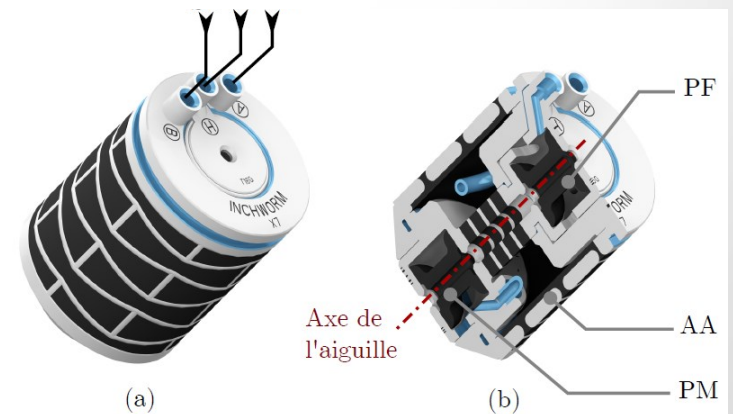


# Projet européen SPIRITS – 1<sup>er</sup> Prototype



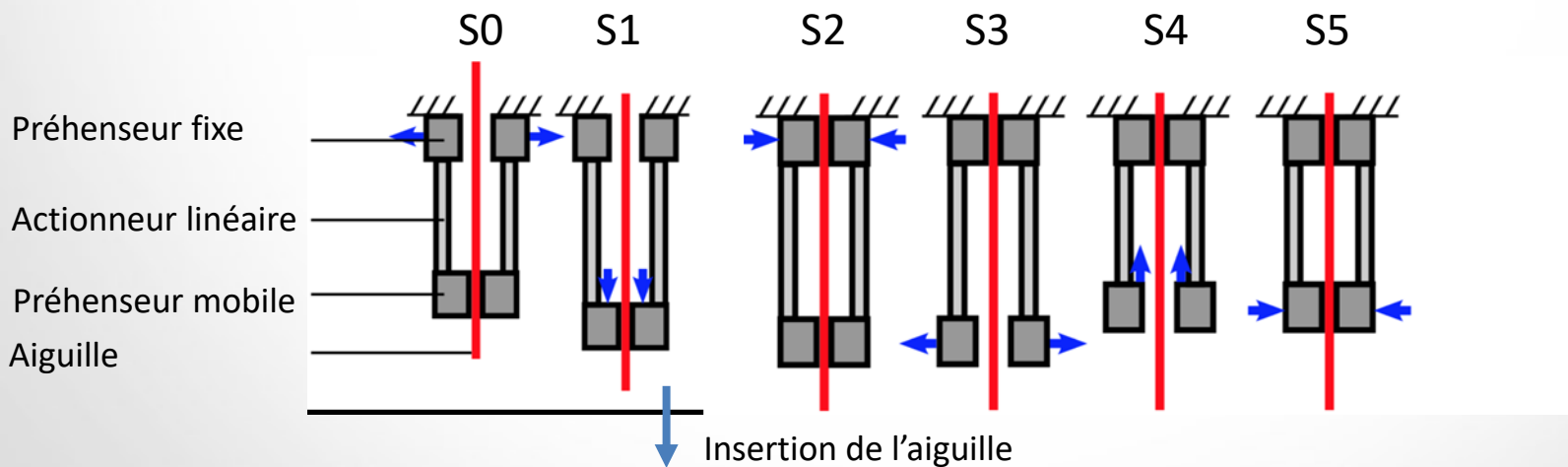
## Actionneur linéaire pneumatique pas-à-pas [Nierenberger2014]

- Cinématique bio-inspirée « inchworm »
- Entièrement polymère
- Actionnement pneumatique



# Actionneur INCHWORM – Principe de base

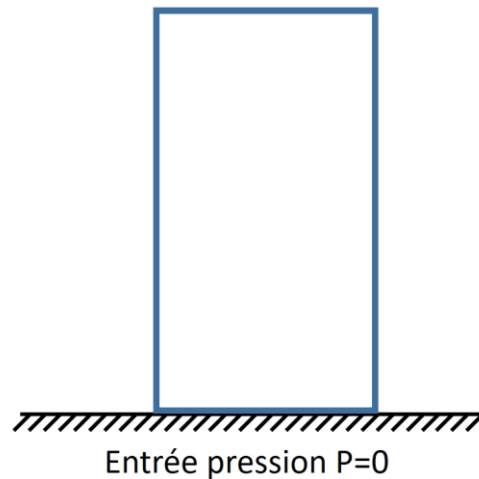
- Cinématique Inchworm avec 3 éléments actifs : 2 éléments de préhension et 1 "actionneur" situé à l'intérieur du composant
- En contrôlant l'activation des 3 éléments actifs, possibilité d'effectuer des mouvements d'avance et recule



## Actionneur INCHWORM – Principe de base

- Utilisation du principe de la chambre gonflable pour faire le déplacement axial

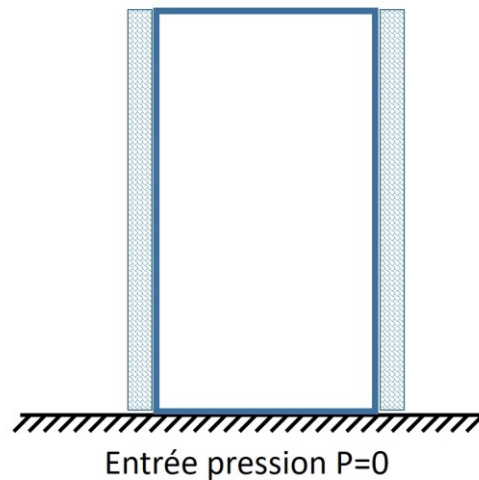
Principal problème:  
Comment maîtriser les déformations de la chambre pour imposer un mouvement





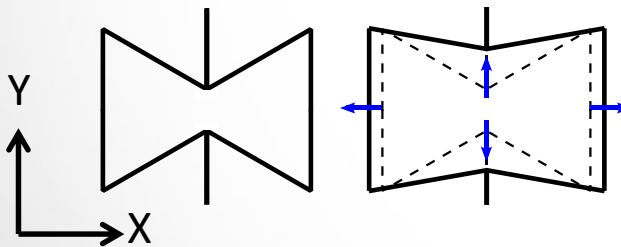
# Actionneur INCHWORM – Principe de base

- Utilisation du principe de la chambre gonflable pour faire le déplacement axial
- Ajouter une structure rigide pour imposer le mouvement linéaire

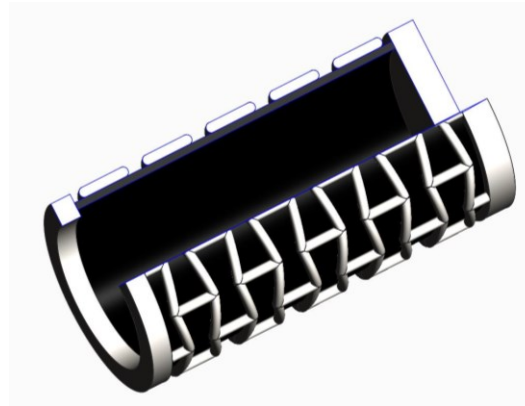


# Actionneur INCHWORM – Principe de base

- Conception de la chambre principale utilisant une **structure auxétique** afin d'obtenir à la fois une **rigidité latérale** et une efficacité lors de l'augmentation de la pression grâce à l'effet auxétique : la pression appliquée sur la surface latérale génère un allongement axial, combiné à l'allongement fourni par la pression sur la surface supérieure.



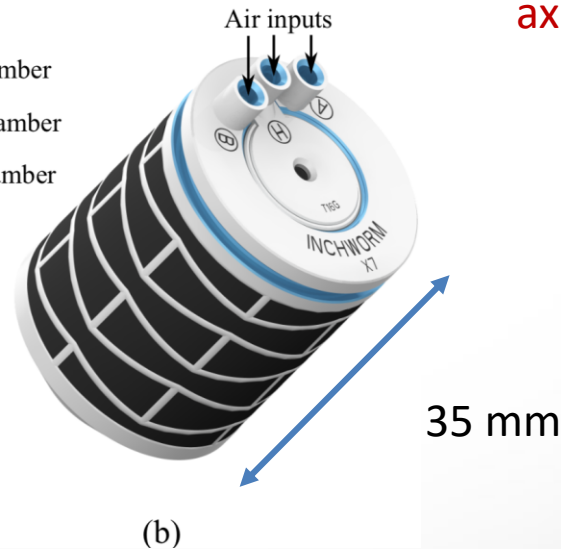
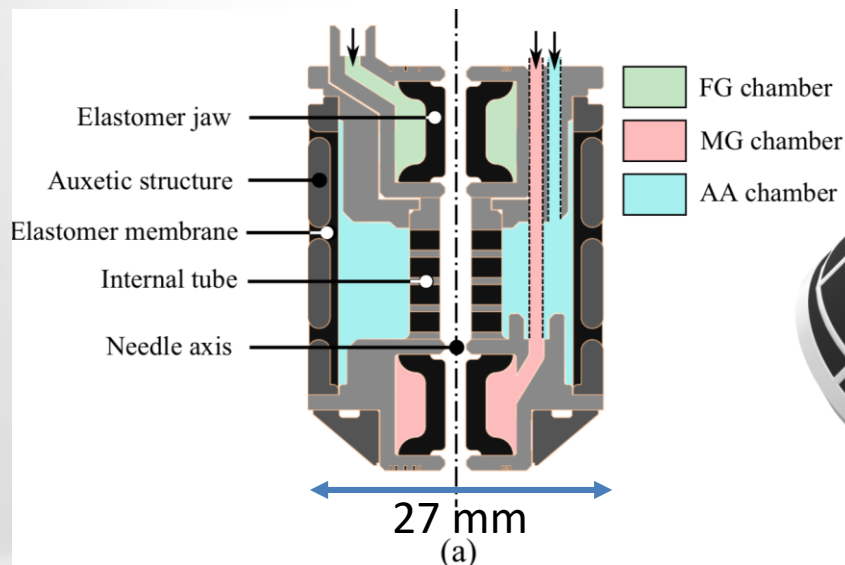
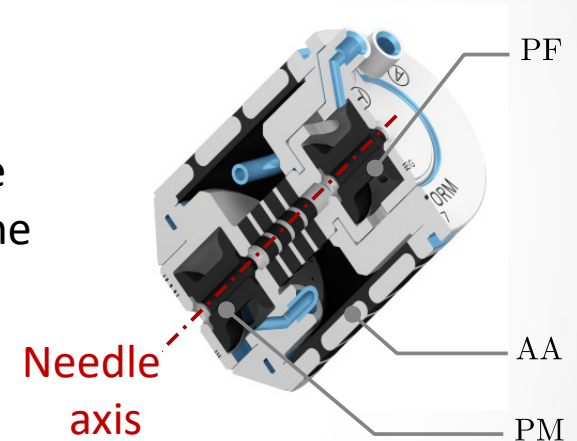
Un exemple de motif pour une structure auxétique. Une elongation selon X engender une elongation selon Y. Assimilé la structure à un métamatériau avec un coefficient de Poisson négatif



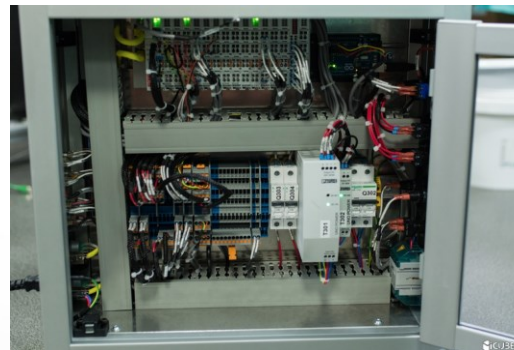
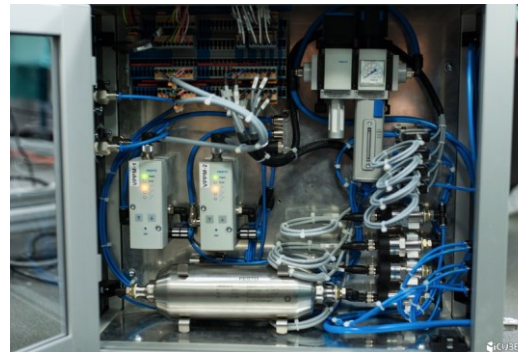
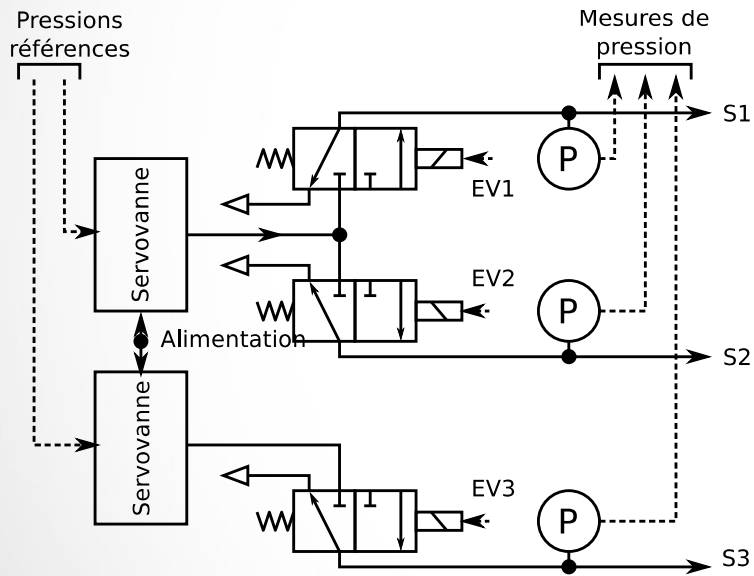
Fabrication additive multimatériaux Stratasys Polyjet

# Actionneur INCHWORM – Exemple

- Préhenseurs pneumatique réalisés en élastomère (en noir).
- Surface extérieure réalisée avec une structure auxétique
- La structure intègre un dégagement pour faire passer une aiguille



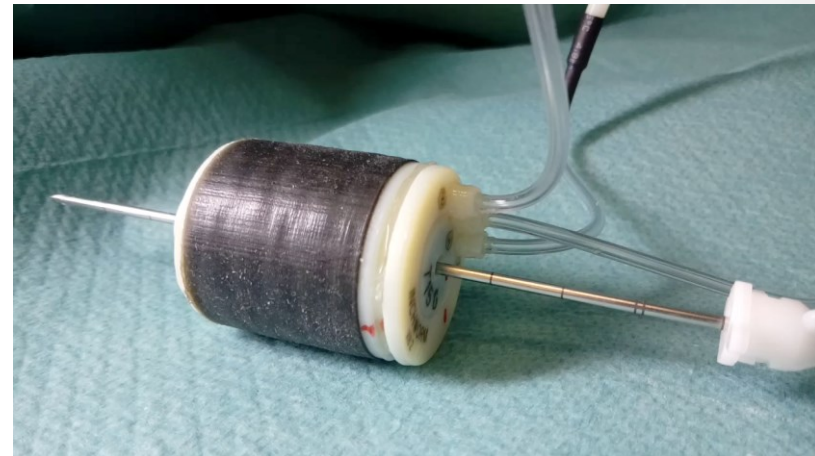
# Actionneur INCHWORM – Commande



Contrôleur  
embarquant un PC  
avec linux Temps-  
réel Xenomai

## Actionneur INCHWORM – Performances

- Insertion d'aiguille de longueur infinie et de diamètre compris entre 0,8 mm et 1,5 mm
- Force max. : dépend de la pression dans les préhenseurs 5 to 10 N
- Vitesse max de déplacement : de 0,6 à 1,4 mm/s pour une pression de 1 à 2 bars dans la chambre centrale
- Raideur hors axe dimensionnée pour guider l'aiguille sans ajout mécanique (réduction frottements et complexité)
- Dimensionnement de la structure auxétique adaptable



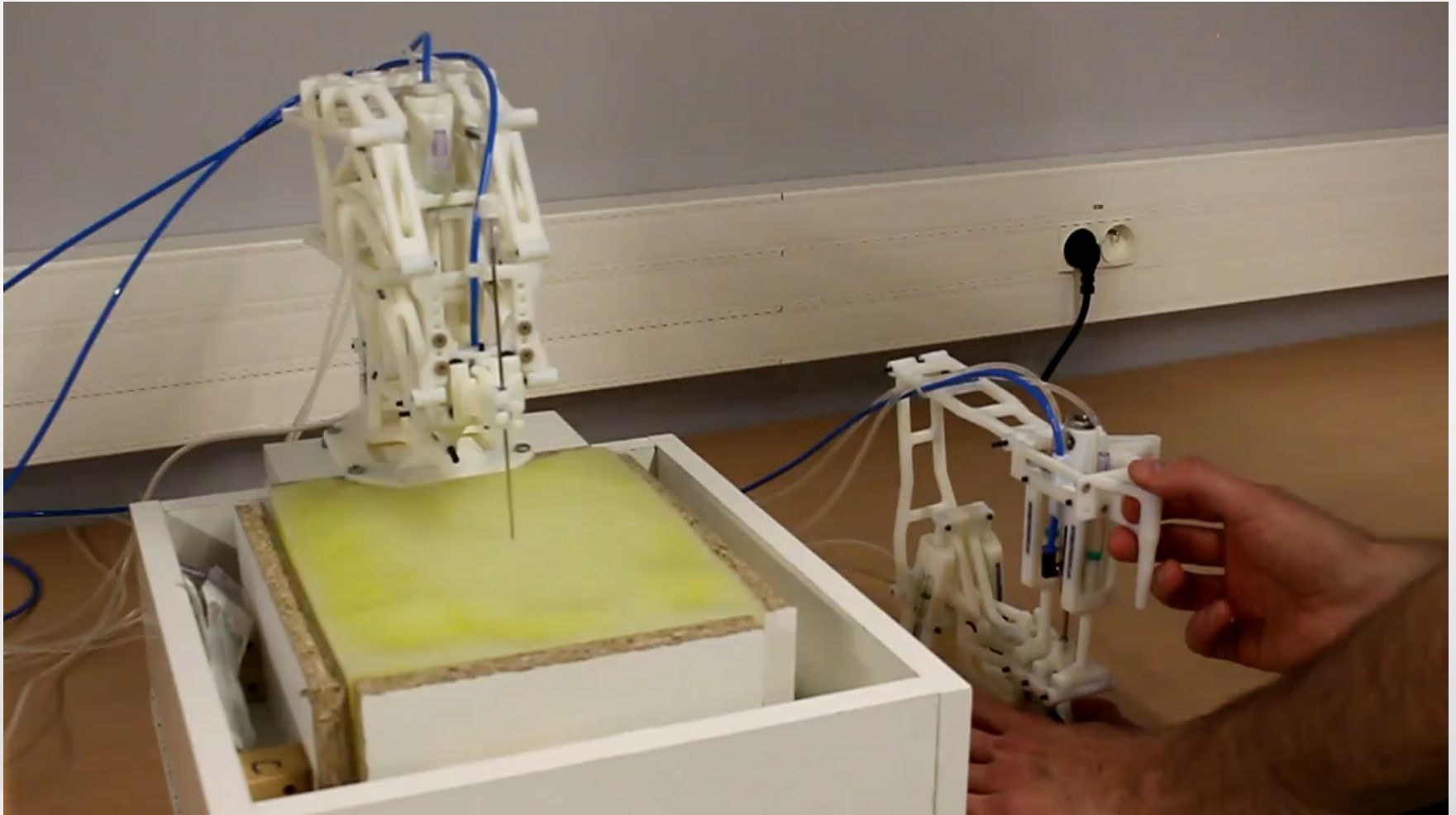
Par la suite :

- Structure auxétique usinée
- Chambre hermétique surmoulée en silicone

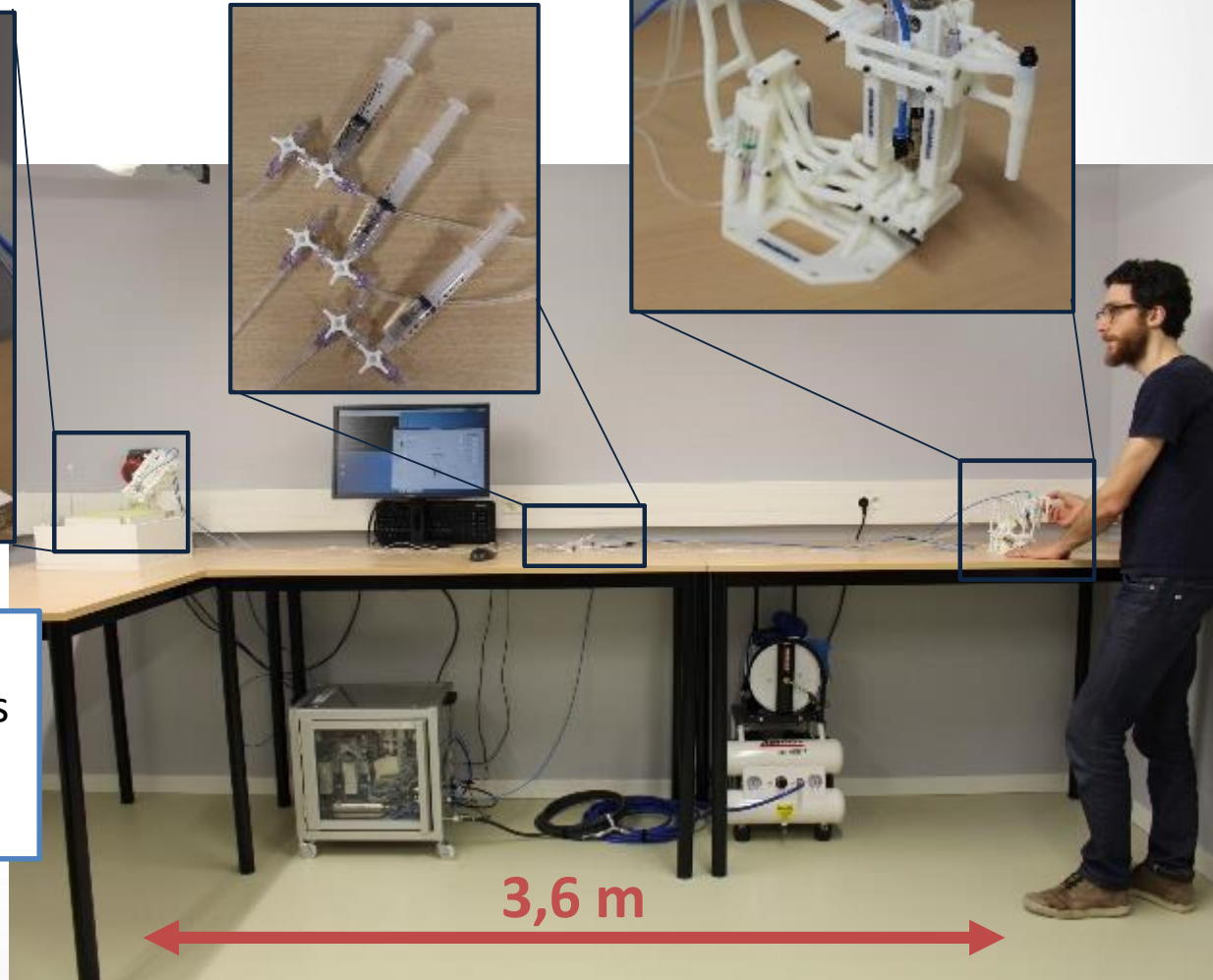
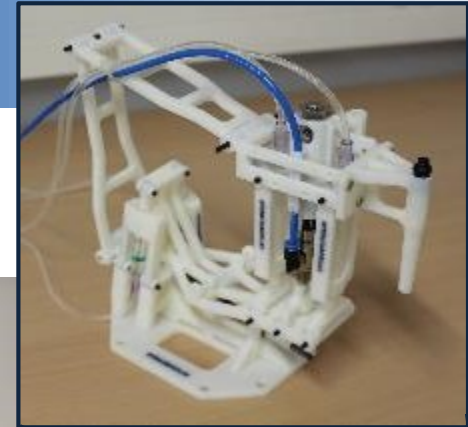
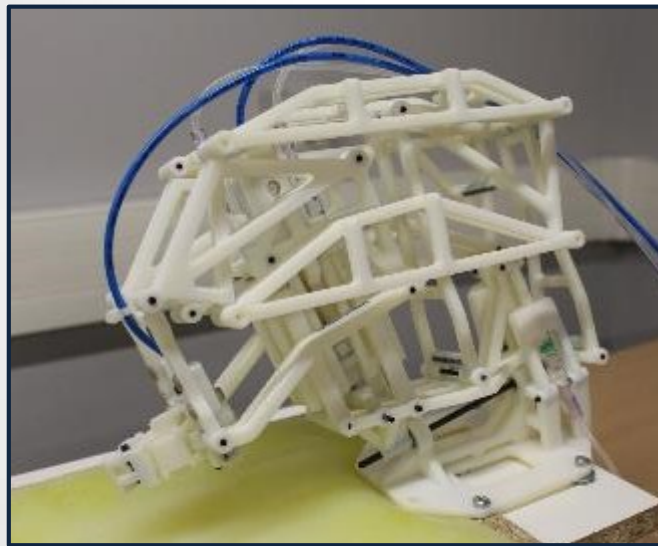
# Projet SPIRITS – Système hydrostatique compatible IRM



# Projet SPIRITS – 2<sup>ème</sup> Prototype IRM



# Projet SPIRITS – 2<sup>ème</sup> Prototype IRM

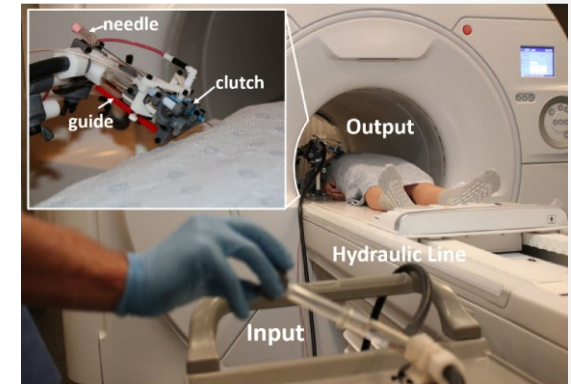


- Transmission hydrostatique entre les deux manipulateurs
- Utilisation d'éléments standards

# Projet SPIRITS – Liaison pivot hydraulique par FAMM

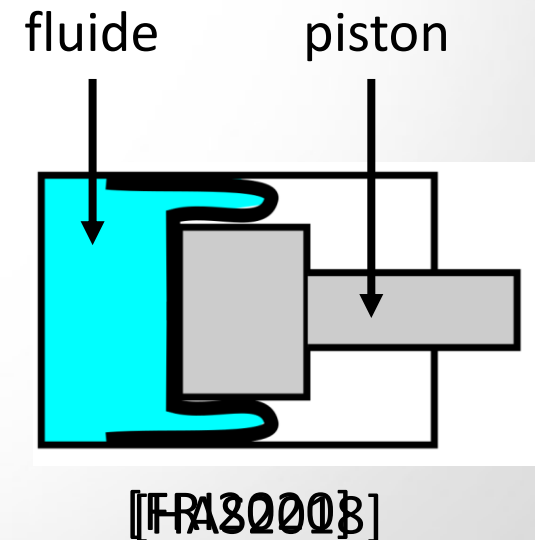
## Transmission

- Choix d'une transmission hydrostatique
  - Compatibilité IRM : distance de déport, puissance volumique [WHI2016]
  - Perception haptique [MEN2019]

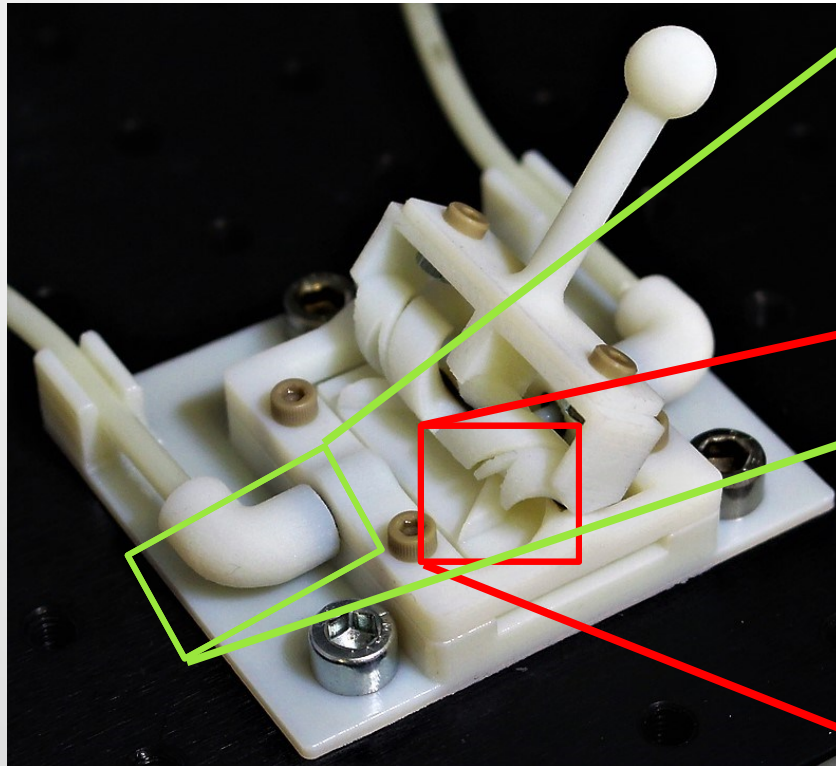


## Actionnement linéaire hydraulique

- Vérin standard :
  - Etanchéité avec joint en élastomère
  - **Compromis étanchéité/frottements**
- Alternatives pour réduire le frottement
  - Piston/cylindre ajustés mais **fuites** [FRI2020]
  - Diaphragme à membranes déroulantes, mais **ratio course/diamètre limité** [HAS2018]



# Projet SPIRITS – Liaison pivot hydraulique par FAMM



**Vérins  
miniaturisés**

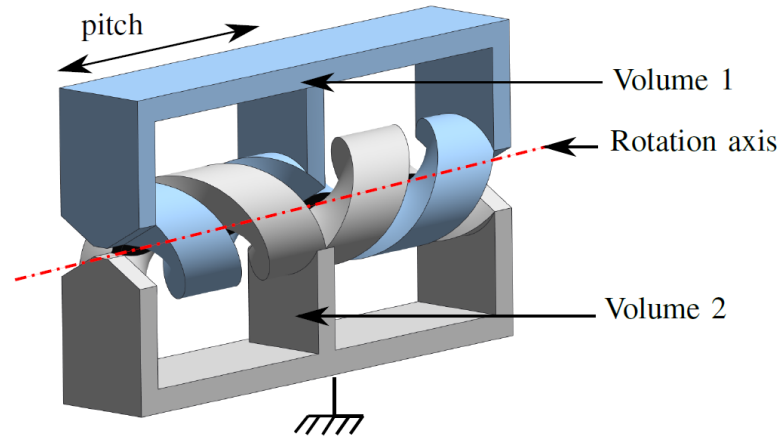


**Mécanisme  
pignon-crémaillère  
compliant**

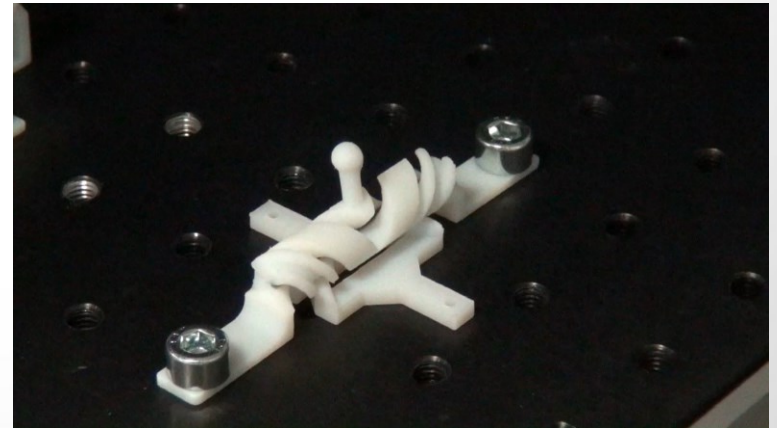
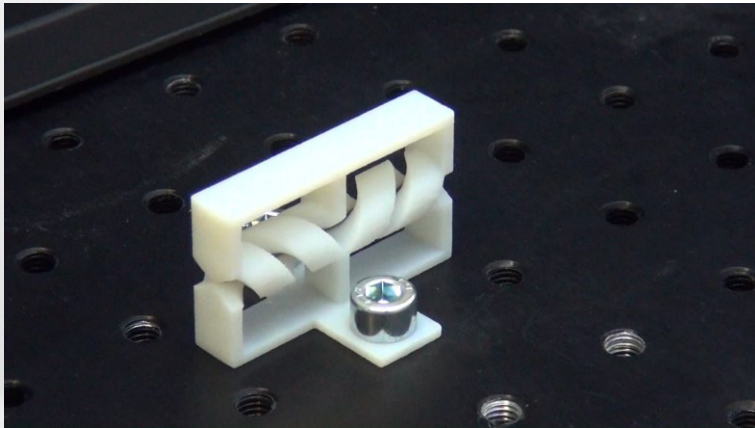
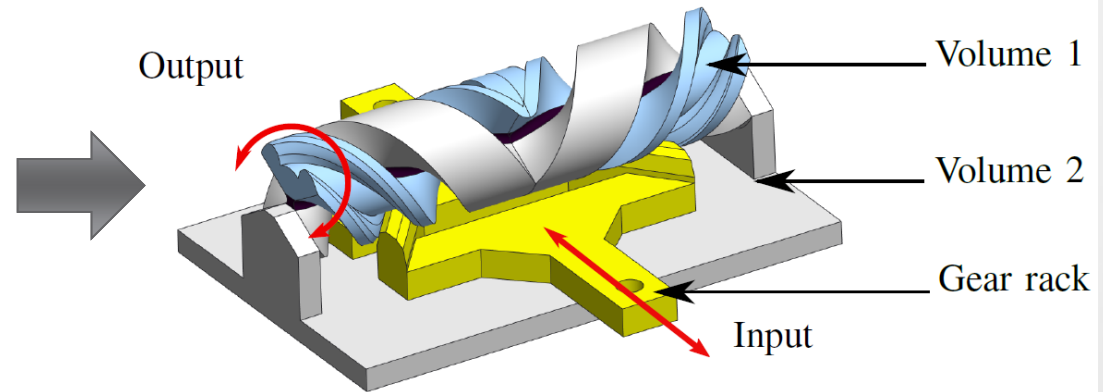


# Projet SPIRITS – Liaison pivot hydraulique par FAMM

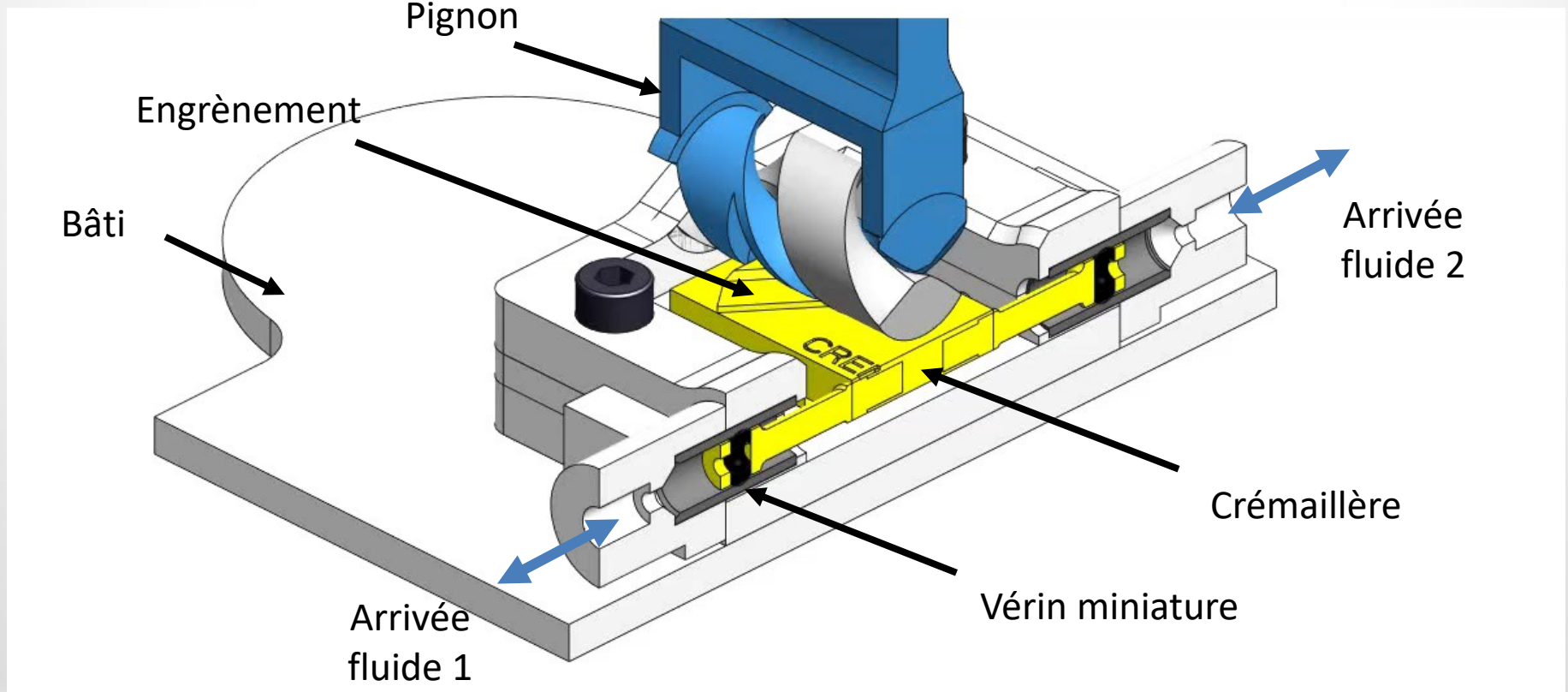
## Articulation HSC Passive



## Articulation HSC active

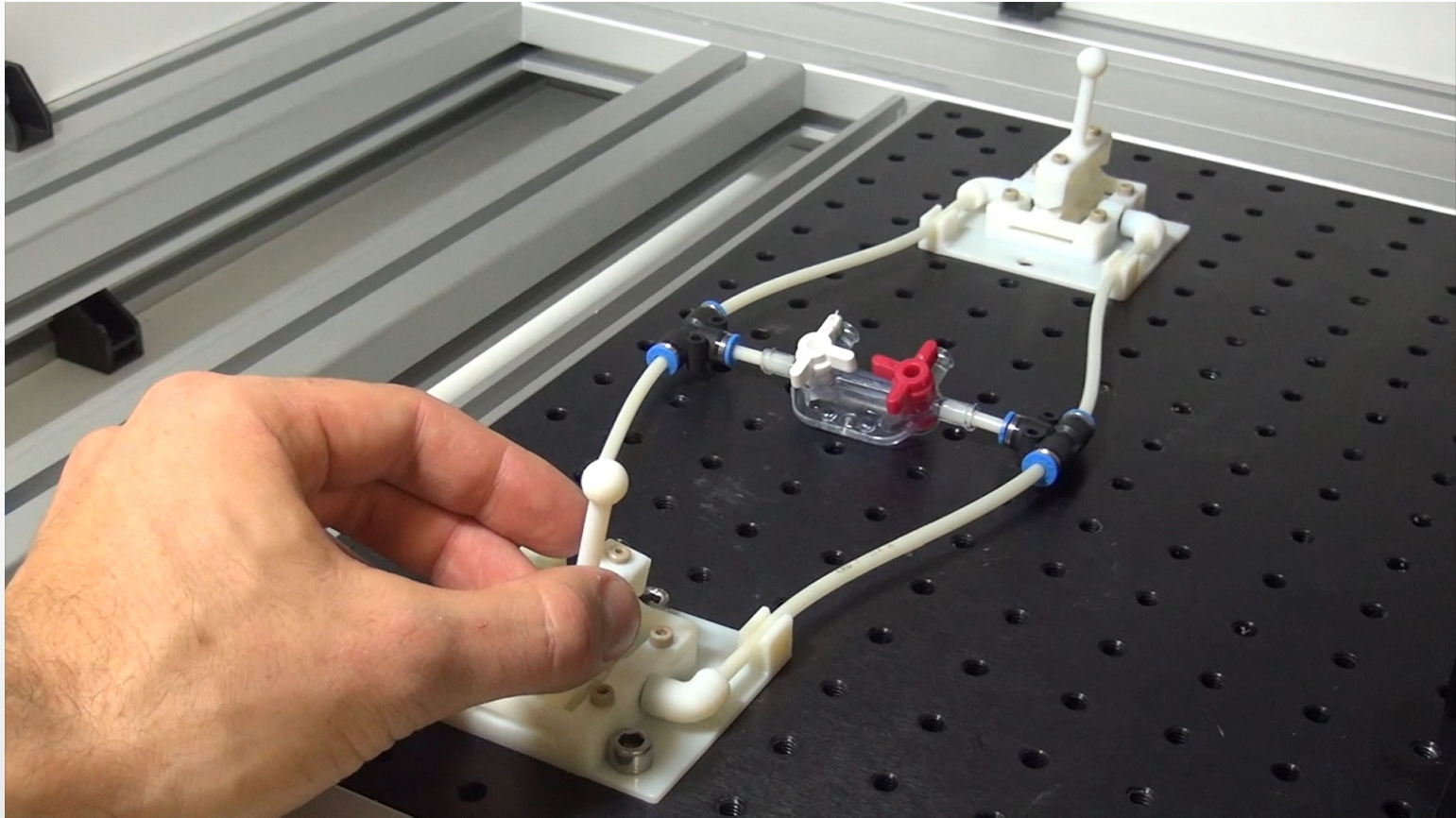


# Projet SPIRITS – Liaison pivot hydraulique par FAMM





# Projet SPIRITS – Télémanipulation 1 ddl



# Projet SPIRITS – Télémanipulation 2 ddl (POC)

## Un grand merci ...

- Pierre Renaud
- François Geiskopf
- Benoit Wach
- Arnaud Bruyas
- Antoine Pfeil
- Mathieu Nierenberger
- Quentin Boehler
- Thibaut Gayral

# Réseau 2RM (Roboticien et Mécatronicien)

- Création du réseau en 2013 avec le financement Equipex+ ROBOTEX
- Depuis 2013
  - 7 TECHDAYS – Journées Technique Robotex (50 - 70 participants)
  - 7 Journées thématiques
  - 2 Conférences ROSCon FR
  - 1 ANF Deep Robot
  - Intégré comme GT au GDR Robotique
- Au 01/04/2021 :
  - 197 personnes
  - 6 instituts du CNRS
- Depuis 2021, réseau rattaché à la MITI CNRS

## Outils

Liste de diffusion [2rm@services.cnrs.fr](mailto:2rm@services.cnrs.fr)

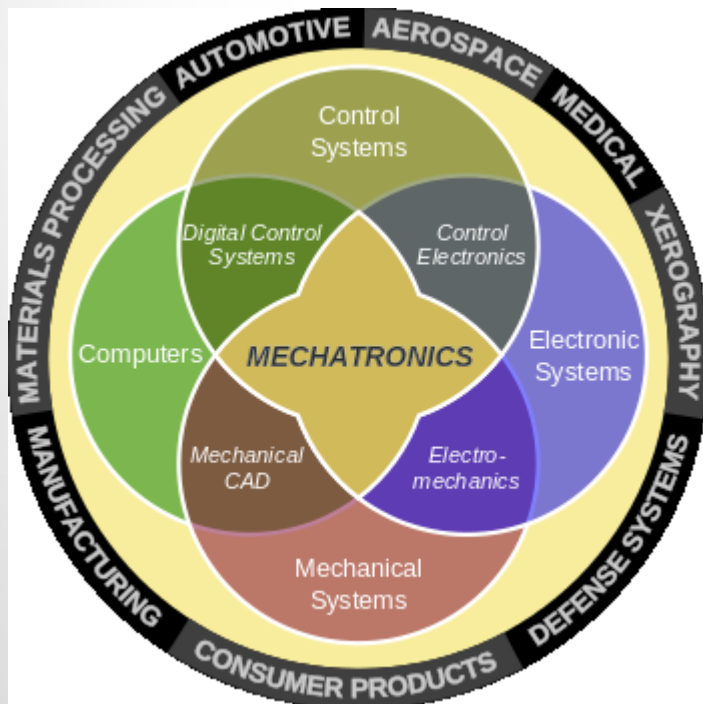
Wiki <https://wiki.2rm.cnrs.fr/>

Site Web <https://2rm.cnrs.fr/>

# Réseau 2RM (Roboticien et Mécatronicien)

Vocation du réseau

- Faire reconnaître le métier de roboticien/mécatronicien



Spécificités du métier

- Intersection entre plusieurs domaines scientifiques : informatique, mécanique, électronique, électrotechnique
- Notion de boucle fermée et de contrôle-commande temps-réel des systèmes mécaniques polyarticulés

Mots clés :

Automatique, Informatique temps-réel et embarquée, Intelligence artificielle, Middleware, Fusion de données, etc..

# Réseau 2RM (Roboticien et Mécatronicien)

## Actions à venir

- 19/10/21 : Journée Robotique mobile au LAAS
- ANF ROS2 pour l'automne 2022
- Journées Robotique souple (fin 2021 ou début 2022)
- Journées équipements structurants TIRREX
- Mettre en place les antennes régionales du réseau métier. Commencer en lançant 4 réseaux :
  - Paris, Haut de France : [arnaud.blanchard@ensea.fr](mailto:arnaud.blanchard@ensea.fr),  
[gerald.dherbomez@univ-lille.fr](mailto:gerald.dherbomez@univ-lille.fr)
  - Grand Ouest : Nantes, Limoges, Bordeaux, Poitiers, Rennes :  
[pierre.laguillaumie@univ-poitiers.fr](mailto:pierre.laguillaumie@univ-poitiers.fr)
  - Auvergne Rhône Alpes : Clermont, Lyon, Grenoble :  
[francois.marmoiton@uca.fr](mailto:francois.marmoiton@uca.fr)
  - Grand Est : Besançon, Nancy (INRIA) et Strasbourg :  
[laurent.barbe@unistra.fr](mailto:laurent.barbe@unistra.fr)