

Instrumentation Numérique Embarquée en Santé

Wenceslas RAHAJANDRAIBE

Laboratoire  iman

Colloque en Sciences Numériques et Intelligence Artificielle pour la Santé
25 et 26 novembre 2021

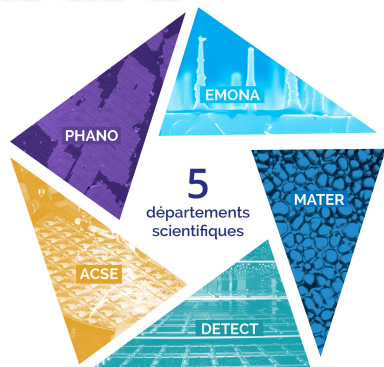
Aix-Marseille Université

0. Présentation succincte du Laboratoire IM2NP

1. Instrumentation Numérique en Santé : *e-Santé*

2. Conception de dispositif médical embarqué

3. Quelques réalisations à l'IM2NP



L'IM2NP regroupe 300 personnes : Physiciens, Chimistes et Microélectroniciens

➤ Enseignant et Chercheur en Sciences des matériaux, Microélectronique et Nanosciences

- Microstructures de croissance auto-organisées
- Nanostructuration
- Contraintes mécaniques dans les objets de petites dimensions
- Défauts étendus et nano-objets
- Magnétisme
- Microcapteurs
- Théorie, modélisation et simulation
- Composants pour l'optoélectronique et le photovoltaïque
- Conception de circuits intégrés
- Mémoires
- Signaux et systèmes

L'IM2NP en quelques chiffres



Directeur: Pr. Jean-Luc AUTRAN



*Objectifs-clés fondateurs : « Relier le **fondamental** aux **applications** dans nos domaines d'expertise »*

5 grandes directions exploratoires

- Comprendre les **Nanostructures** : construire, voir et sonder (**PHANO**)
- Elaboration et modélisation de **nanomatériaux** fonctionnels et de **nano-composants** (**EMONA**)
- Transformation, **croissance** de matériaux à différentes échelles, **de l'atome aux matériaux** (**MATER**)
- Environnements spécifiques : **détection**, caractérisation, traitement du **signal** et fiabilité (**DETECT**)
- Du dispositif émergent aux **systèmes** éco-énergétiques (**ACSE**)

PHANO (PHysique à l'échelle NanOmétrique)

EMONA (Nanostructures Fonctionnelles et Nano-composants)

MATER (Structure et Chimie des Matériaux)

DETECT (Détection, Rayonnements et Fiabilité)

ACSE (Analyse & Conception de Systèmes Electroniques)



Secteurs applicatifs clés

- Énergies** (photovoltaïque, thermoélectricité, fission/fusion nucléaire)
- sécurité & défense** (haute fiabilité, signal, furtivité)
- Transport** (aéronautique, spatial)
- Communication** (IoT, RFID)
- Environnement** (détection, catalyse)
- Santé** (E-santé)

☐ Secteur en plein essor

Valeur du marché mondial estimée à 234 milliards de dollars en 2023

+160 % entre 2019 et 2023 (*Rapport Global Health Care Outlook, 2020*)

☐ Technologie disponible mais pas toujours adoptée par le praticien

Compatibilité avec les contraintes ou pratiques médicales etc...

☐ Transformation numérique de la santé

Contraintes économiques, ouvertures technologiques vers une santé plus Prédicative, Préventive, Personnalisée et Participative (règles des 4P)

E-santé : définition

« *l'application des nouvelles technologies de l'information et de la communication (TIC) à l'ensemble des activités en rapport avec la santé* ».

Quelles sont ces nouvelles technologies ?

- ❑ **L'intelligence artificielle** : diagnostics, big data, imagerie, robot...
- ❑ **Les applications santé mobiles** : améliorer la relation entre professionnels de la santé, entre le médecin et le patient
- ❑ **La télémédecine** : technologies informatiques pour accéder à distance aux services de santé
- ❑ **Les dispositifs portés à même le corps des patients (*wearable*)** : biocapteurs permettant la surveillance et le suivi de différents aspects de la santé

Prévenir, Détecter, Contrôler les maladies de façon non intrusive

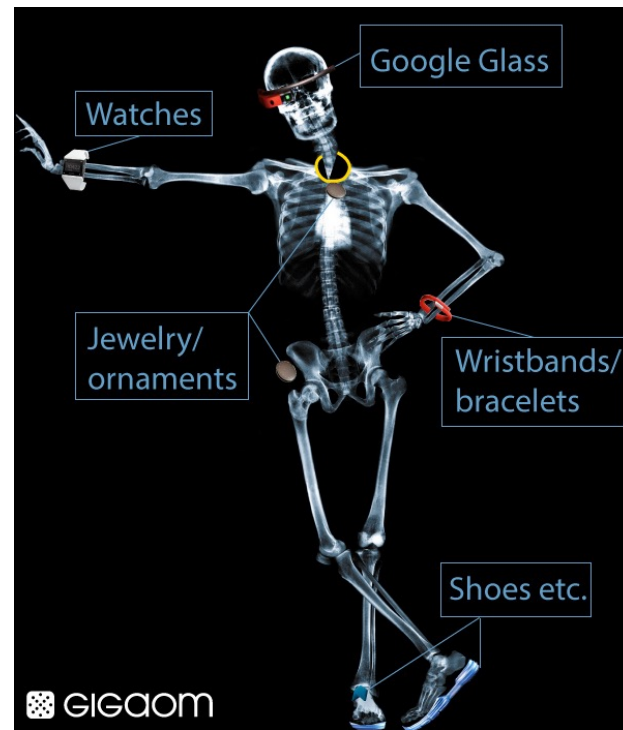


Instrumentation numérique et applications embarquées en santé

Qu'est-ce qu'un *wearable* ?

« Pour faire simple, ce mot désigne l'ensemble des technologies portables. Pas comme un téléphone, mais portable au sens d'un vêtement ou d'un accessoire »

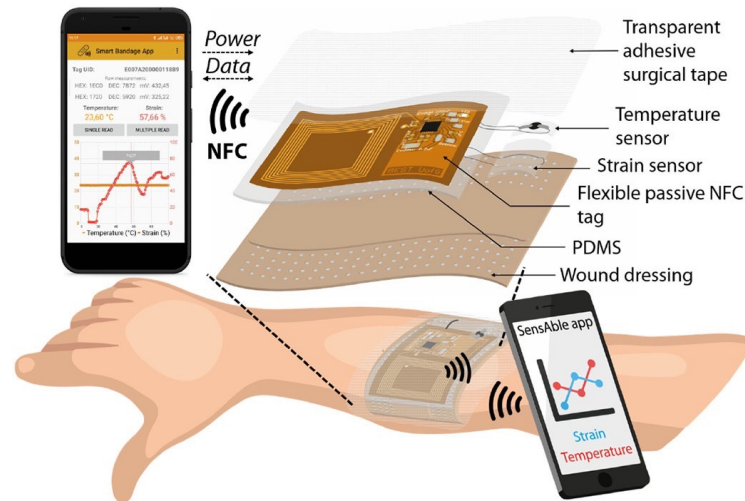
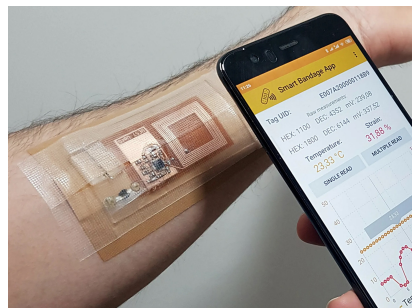
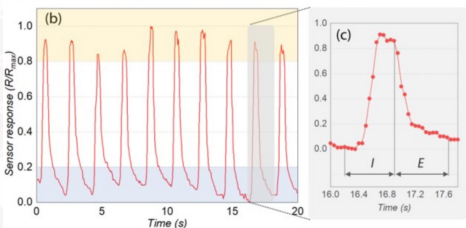
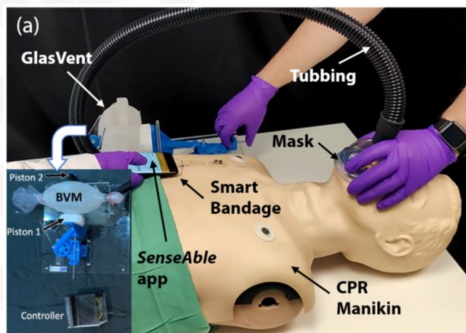
- ❑ **1,5 milliard d'objet wearable acheté par an en 2025**
- ❑ **Truffé de capteurs classés en deux catégories**
 - ❑ **Les capteurs de mouvements** (accéléromètres, magnétomètres, gyromètres, etc.)
 - ❑ **Les capteurs physiologiques** (pression artérielle, température, fréquence respiratoire, fréquence cardiaque (électrocardiographie, ECG), activité cérébrale (électroencéphalographie, EEG), activité musculaire (électromyographie, EMG), etc.)



<https://spectrum.ieee.org/tag/wearables>

Pansement intelligent (Université de Glasgow)

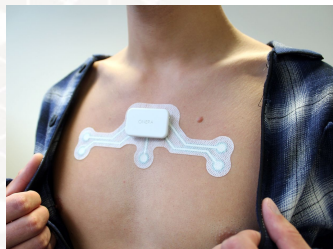
- ❑ Accélérer la guérison d'une plaie
- ❑ Surveillance de la respiration et peut détecter le COVID
- ❑ Premier pansement à utiliser des capteurs qui mesurent simultanément la pression exercée sur la peau et la température du patient



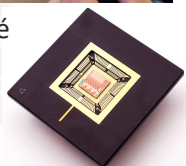
Pablo Escobedo et. al. « Smart Bandage With Wireless Strain and Temperature Sensors and Batteryless NFC Tag »
IEEE Internet of Things Journal, Vol. 8, No. 6, March 15, 2021

1. Introduction : e-santé, *Wearable*

Patch *wearable* utilisant l'apprentissage automatique pour détecter l'apnée du sommeil (IMEC et l'Université de Ghent, Belgique)¹



Circuit intégré associé



Méthode : injecter un courant très faible à une fréquence connue à travers le sujet et mesurer les tensions résultantes à différents endroits

Estimation de la respiration par la **mesure de la bio-impédance** au niveau de la poitrine
Algorithme d'apprentissage automatique pour détecter l'apnée

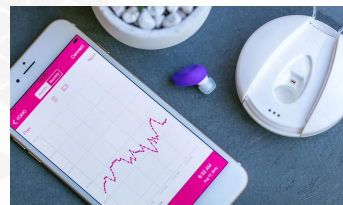
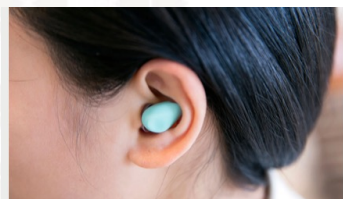
73% d'évènements (apnée du sommeil) détectés sur 25 volontaires

(1) Michelle Hampson, [IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics](#), Feb 2020

Détection et prédiction de l'ovulation par la mesure de température dans l'oreille

Méthode : statistique, big data, apprentissage automatique.

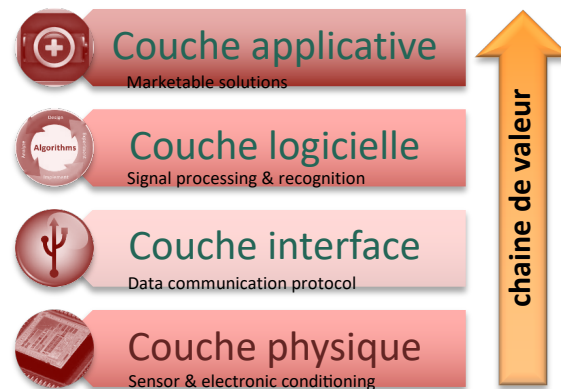
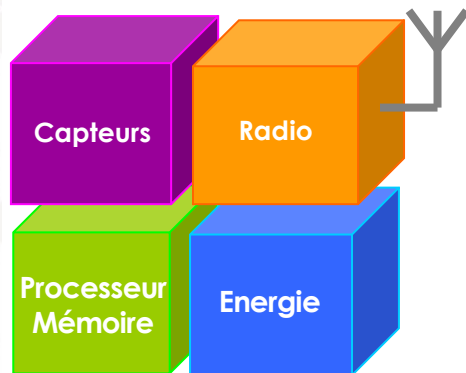
Mesure toutes les 5 minutes pendant le sommeil nocturne. Une station de base transmet les données à une application pour smartphone pour analyse. Utilisation de modèle de Markov caché (HMM) et prédiction probabiliste



(2) Lan Luo, « Detection and Prediction of Ovulation From Body Temperature Measured by an In-Ear Wearable Thermometer » [IEEE Transactions on Biomedical Engineering](#), Feb 2020,

Architecture générale

Objet



Exemple de grandeurs d'intérêts





- PPG (PhotoPléthysmoGraphe)
- ECG, Rythme cardiaque
- Mesures biochimiques (Ethanol, Glycémie...)
- Température
- Accélération

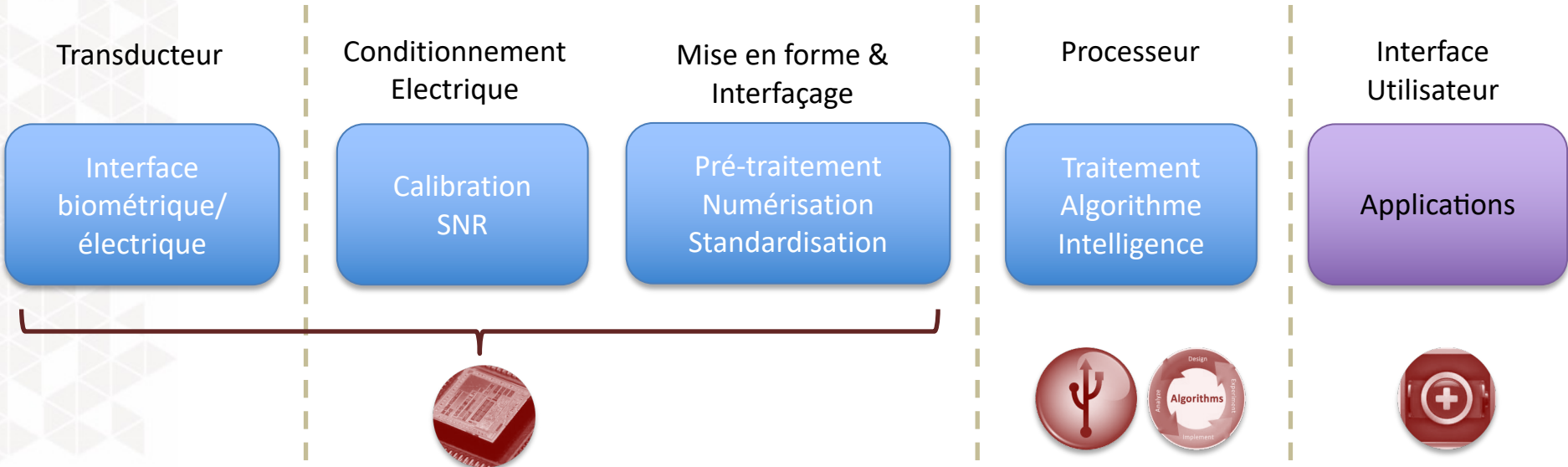
Technologie de mesure

- capteur et émetteur optiques
- capteur capacitif
- capteur résistif
- capteur résistif
- piézo, capteur capacitif, résistif (MEMS)

Architecture générale

Fonction

-  Couche Applicative
-  Couche Logicielle
-  Couche Interface
-  Couche Physique



Exigence de conception du système médical porté

Ergonomie

- Transparent pour l'utilisateur, petit et léger, non stigmatisant

Fiabilité

- Validés par les usages, pas de dérives de mesures sur la durée des paramètres souhaités

Autonomie de fonctionnement

- Limiter la maintenance

Simplicité d'utilisation

- Mesures et transmission des données automatique
- Système de transmission sans fil est donc indispensable

Robustesse

- Mesures sur la durée complète du suivi

Bas coût

- Système commercialisable

Consommation d'énergie

- Compromis entre énergie, traitement embarqué, stockage des données, communications, sécurité

Exemples de réalisation IM2NP

- Capteur de Mouvement
- Implant Cochléaire
- Mesure ECG

- Radiothérapie
- Parkinson

Projet ANR « CAPUCINE » - Partenaires impliqués:
CEA-LETI, IM2NP, Institut NEEL, MOVEA

Circuits de conditionnement et d'interfaces pour capteurs M&NEMS pour la reconnaissance de mouvement humain



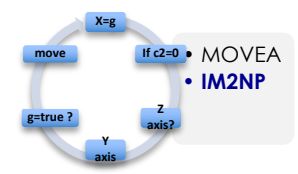
- Accelero 3D
- Magneto 3D
- LETI
- SPEC
- NEEL

- Etude matériaux
- Design capteurs



- IM2NP
- LETI

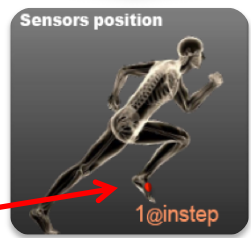
- Conditionnement
- Interface



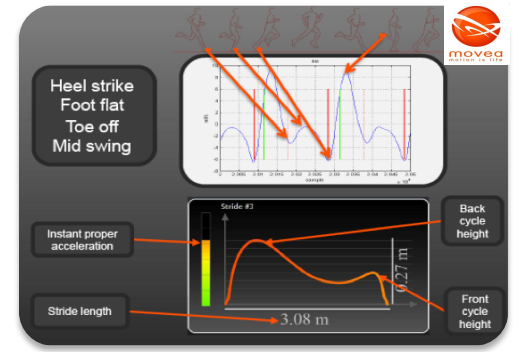
- Post-processing
- Reconnaissance mouvement

Santé, Sport, Multimedia

Prototype hétérogène,
600µA, 12bits, SPI



Post-processing, analyse mouvement : MOVEA

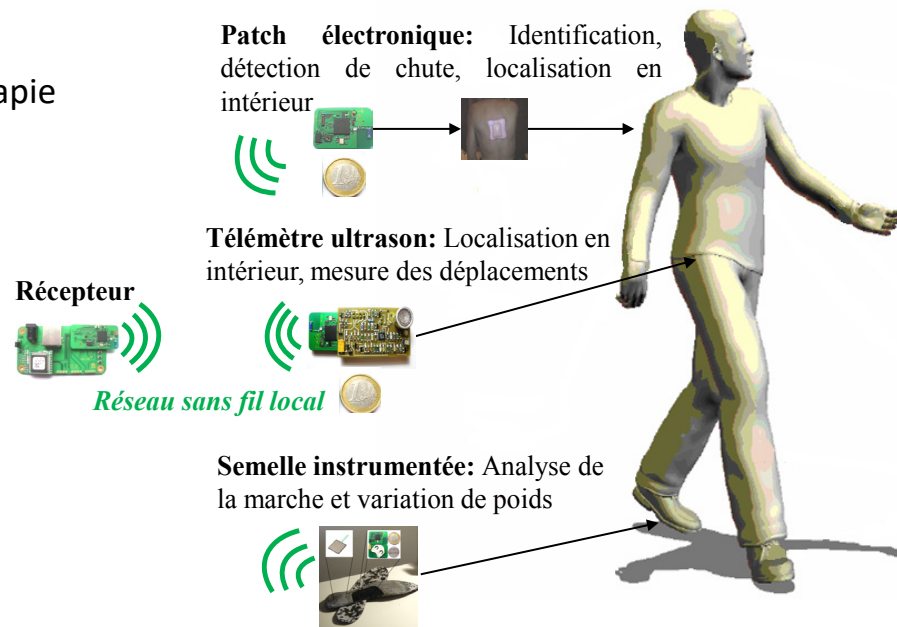


❑ Instrumentation *waearable*

- ❑ Suivi à domicile de l'état de santé des patients
- ❑ Capteurs portés et ambiants, avec logiciels de traitement et interfaces utilisateurs

❑ Applications

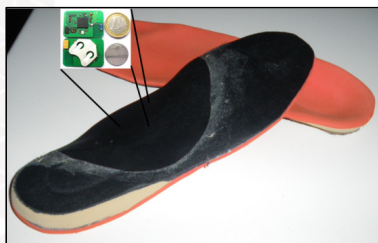
- ❑ Domotique médicale, Rééducation, Kinésithérapie
- ❑ Sport : perfectionnement des gestes



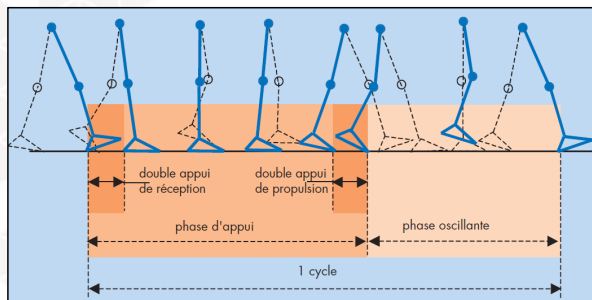
❑ Choix du capteur

- ❑ Capteur inertiel 6D : accéléromètres, magnétomètres
- ❑ Pression

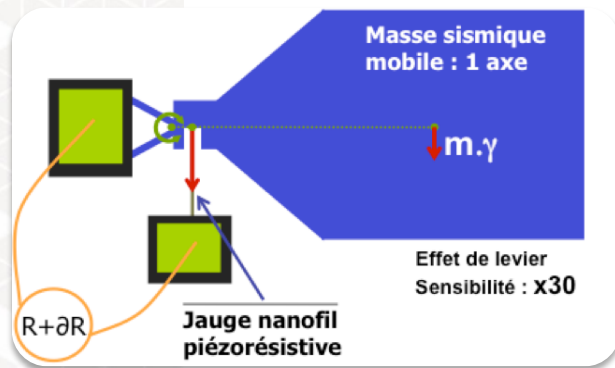
Semelle standard ou sur mesure



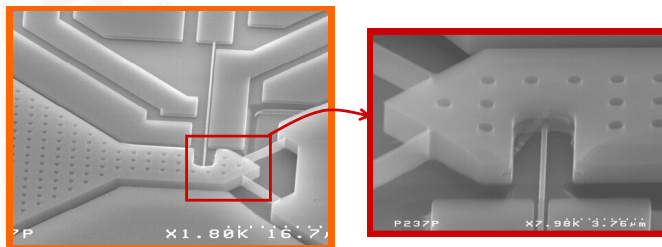
Représentation cycle de marche



Paramètres de la marche observés	Type de capteurs	Applications cliniques
Vitesse de marche et distance parcourue	Capteurs inertiels	Étude de la marche chez le sujet sain, âgé ; Parkinson
Les caractéristiques de la foulée (cadence, longueur, largeur, hauteur)	Capteurs inertiels	Étude de la marche chez le sujet sain, âgé ; Parkinson
La variabilité de la marche (répartition spatio-temporelle des cycles de marche)	Capteurs inertiels et/ou capteurs de force/pression	Étude de la marche chez le sujet sain, âgé, diabétique ; Parkinson ; AVC ; Étude de programme de rééducation
Mise en charge des membres inférieurs (% du poids du corps)	Capteurs de force/pression	Étude de la marche chez le sujet sain, âgé, diabétique ; Parkinson et arthrose du genou ; Étude de programme de rééducation ; Évaluation d'une chaussure orthopédique
L'équilibre statique et dynamique	Capteurs de force/pression	Étude de la marche chez le sujet sain, âgé, diabétique ; Parkinson et arthrose du genou ; Étude de programme de rééducation



1 axis nanowire sensor



CEA/LETI nanowire sensor

Technologie : capteur M&NEMS

- 3D accelerometer
- 3D magnetometer

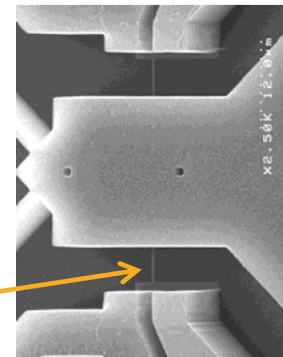
Heterogeneous integration : Sensor & Electronics

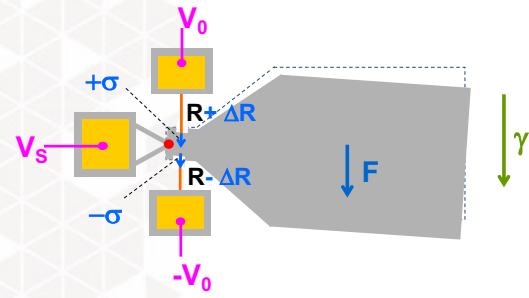
- Design (mechanical / magnetic / electronic)
- Higher precision and measurement range (**12 bits**)
- Dedicated electronic for silicon nanowire measurement

Innovative sensor

- Stress magnification due to a leverage effect and to the nanometric dimensions of the gauge section
- Size reduction without sensitivity loss

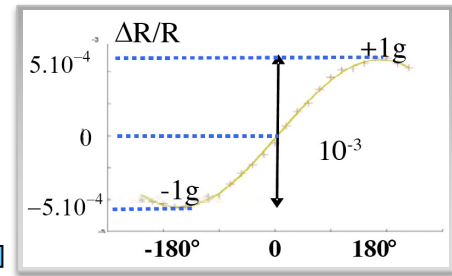
Nanofil de Silicium
150nm de diamètre et
100μm de longueur





→ F → Stress in gauges → Bridge unbalancing

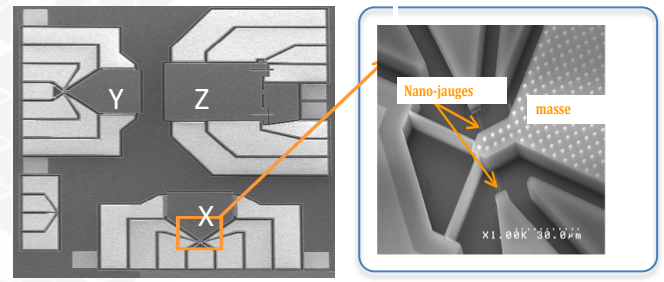
$$\frac{V_s}{V_0} = \frac{\Delta R}{R} = \pi_{44} \sigma = \pi_{44} \frac{AF}{s} = \frac{\pi_{44} AM}{s} \gamma$$



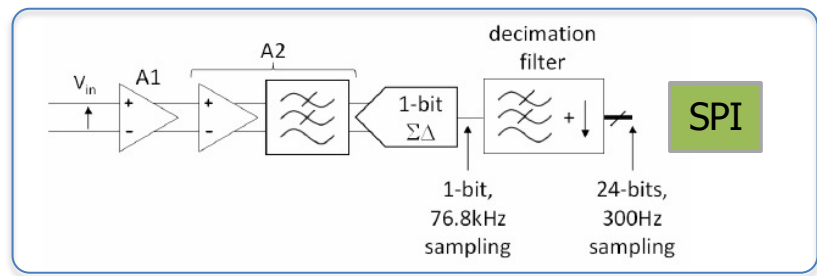
Résolution ~ 100μg

- π_{44} : Piezoresistive coefficient
- A : Amplification factor (leverage effect)
- s : Gauge section
- Variation max d'une gauge $\left. \frac{\Delta R}{R} \right|_{FS} = \pm 0.036 = \pm 3.6\%$

3-axis nanowire Accelerometer

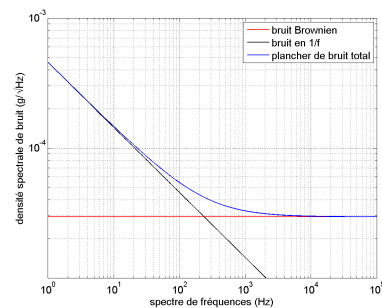
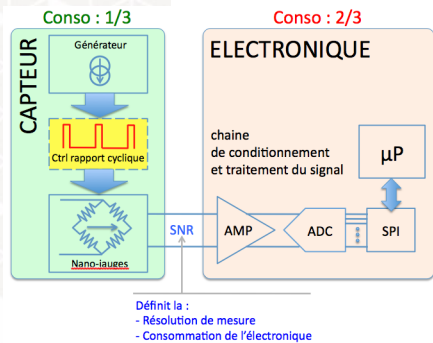


Readout electronic : Amp & ADC for one sensing axis

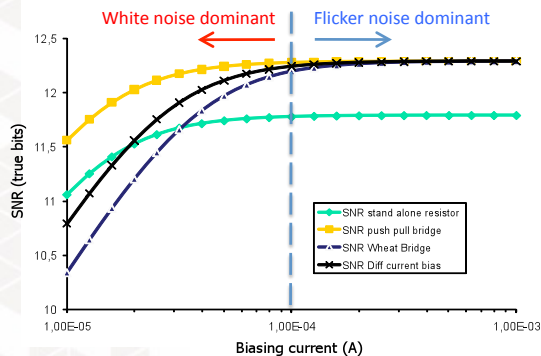
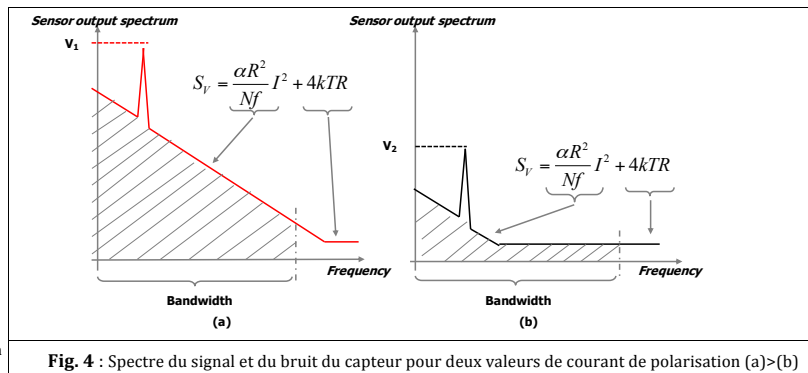


Post-traitement, Algo IA





plancher de bruit intrinsèque d'une jauge du capteur accéléromètre M&NEMS, exprimé en accélération équivalente - $K_{RR} = 205,9 \cdot 10^{-9} g^2$, $S_{BN} = 29,5 \cdot 10^{-6} g/\sqrt{Hz}$



$$S = \frac{V_{out}|_{FS}}{FS} = \frac{R}{FS} \cdot \left. \frac{\Delta R}{R} \right|_{FS} \cdot I_{bias} \quad (V/g)$$

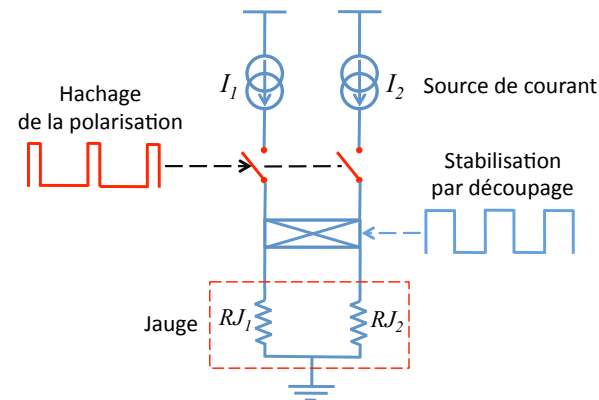
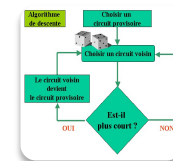
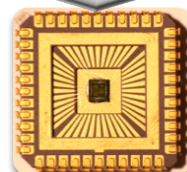
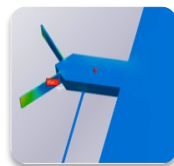
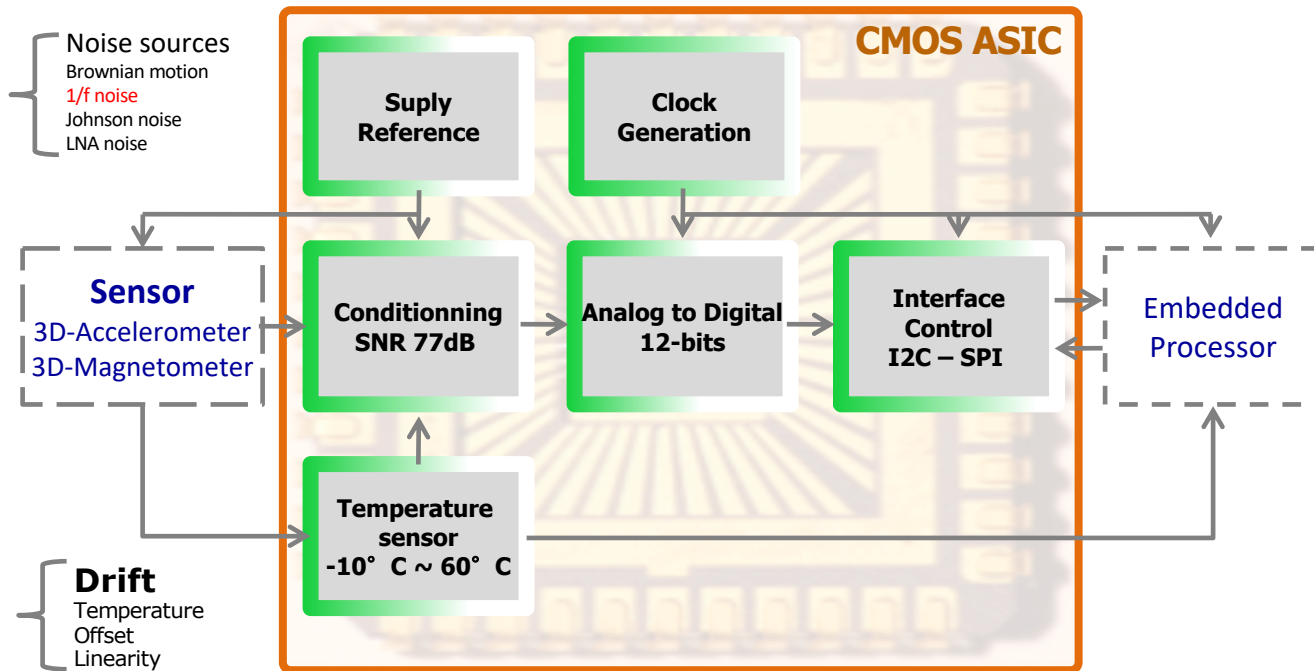
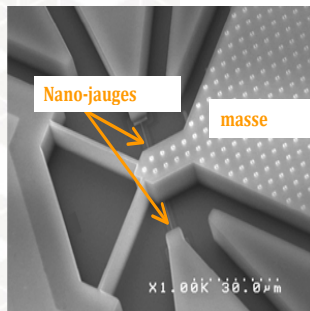
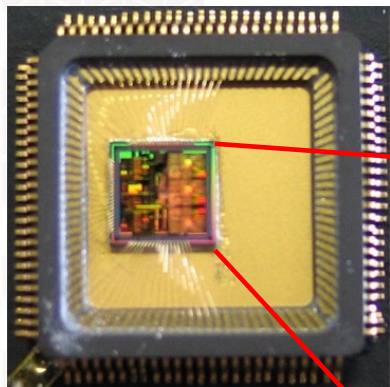


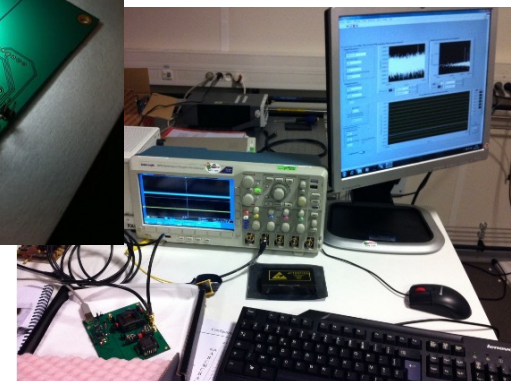
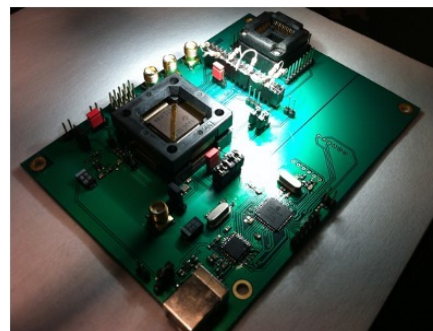
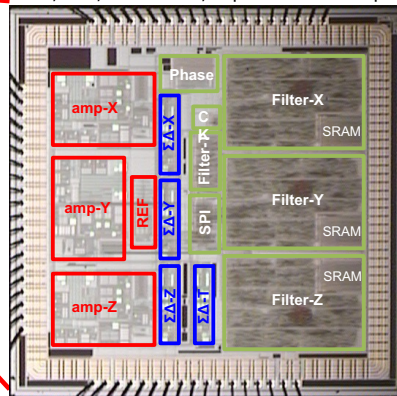
Fig. 6 : polarisation des jauges

W. Rahajandraibe et. al. US Patents, Licence, IEEE Sensors

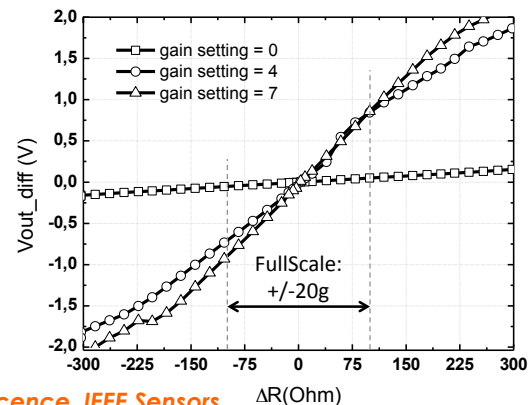




4,5 x 4,5 mm AMS 0,35- μ m CMOS test Chip



Features	TC IM2NP_01 :
Process	CMOS 0,35 μ m
Supply voltage	3.3 V
Power consumption	900- μ A
Resolution	12 bits
Interface	SPI digital output
Output data rate	200 Hz
Special feature	Interrupt generator
Temperature range	-10 to 60° C
Temp drift max (Zero g Offset)	Post calibrated
Silicon area	4580 x 4580 (mm ²)
Noise	-
Full scale	± 20 g
Shock survivability	-



W. Rahajandraibe et. al. US Patents, Licence, IEEE Sensors

Projet ANR « MADNEMS » - Partenaires impliqués: OTICON
MEDICAL, CEA-LETI, IM2NP, INSA-LYON

Réalisation de circuit d'interface pour un microphone miniature
à détection par jauge NEMS pour des implants cochléaires



❑ Concevoir le plus petit microphone du monde

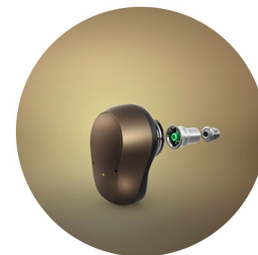
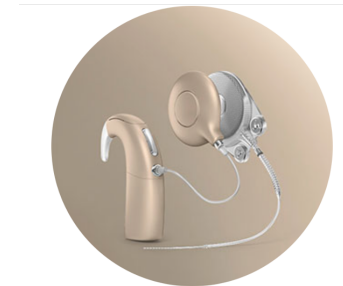
- ❑ Moins de 1 mm³
- ❑ Très grande résolution (vs. microphone à electret) pour des implants cochléaires

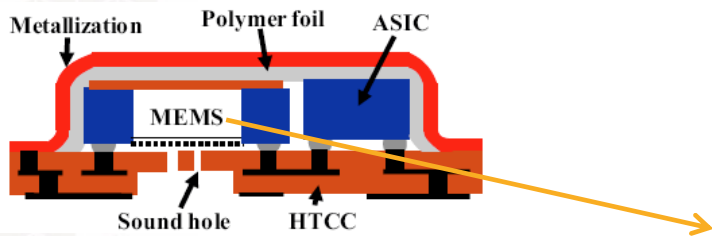
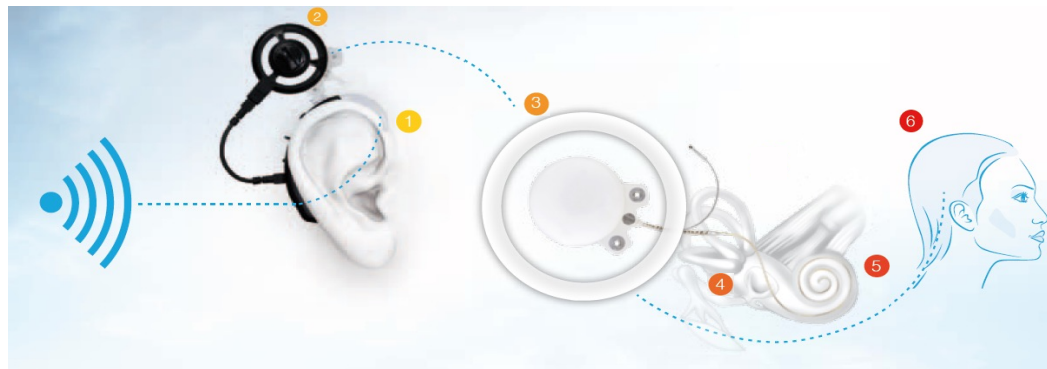
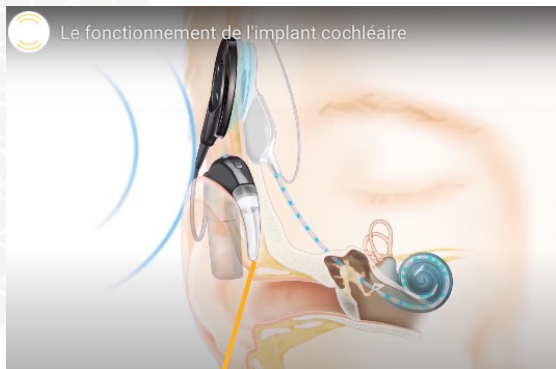
❑ Applications médicales

- ❑ Large gamme dynamique, basse conso, grande bande passante

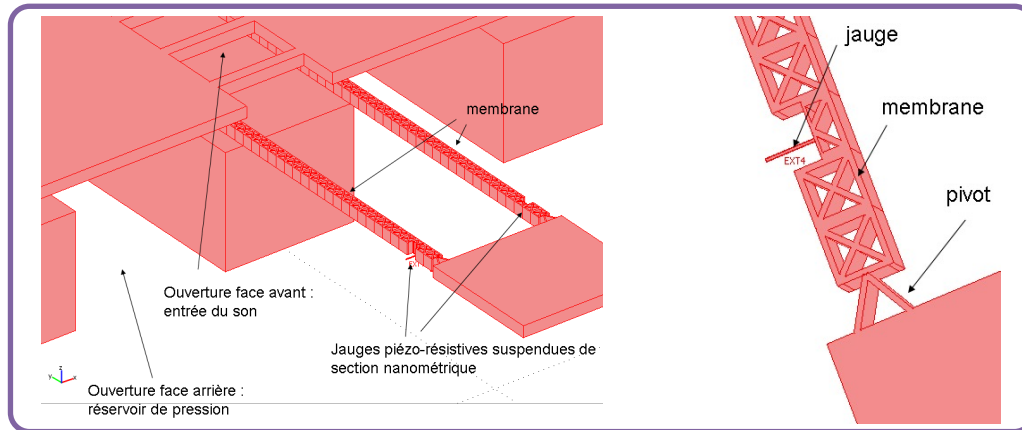
❑ Applications grand public

- ❑ Conso, très compact, bas coûts

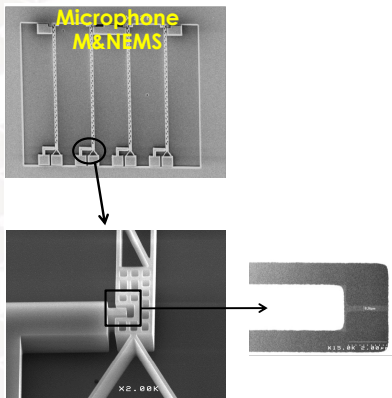




Silicon Nanowire M&NEMS microphone

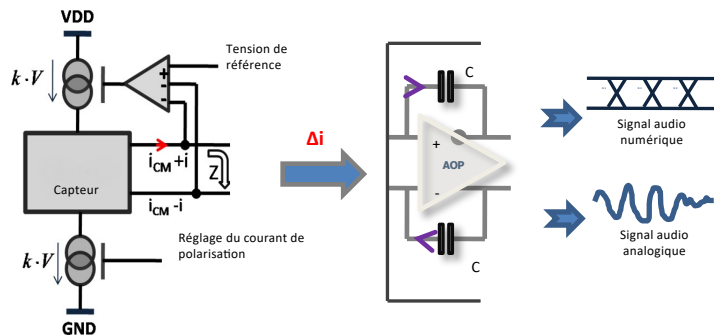


Nanowire Microphone

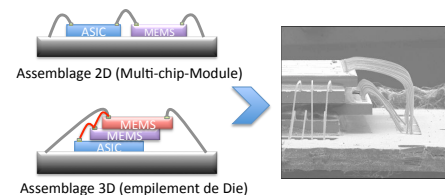
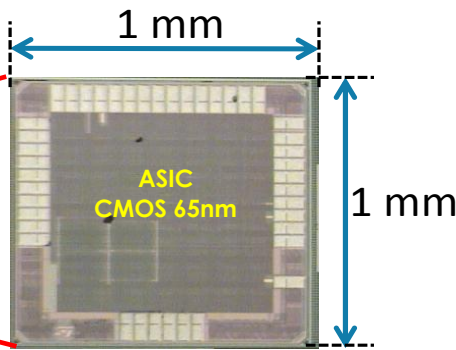
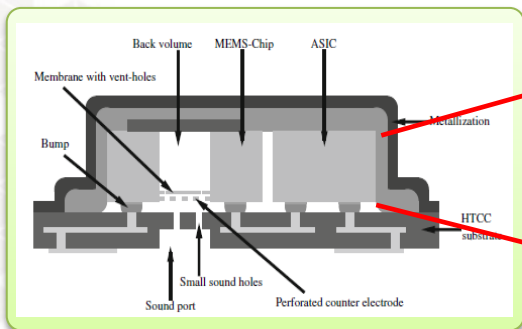


Photos MEB d'un substrat capteur M&NEMS

Conditionning circuit



Post-processing algorithm



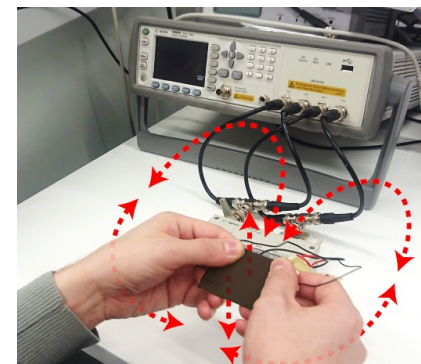
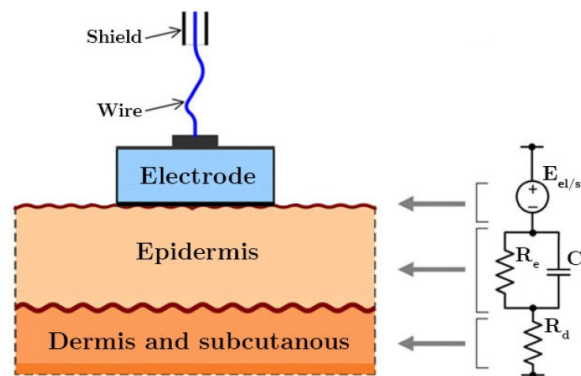
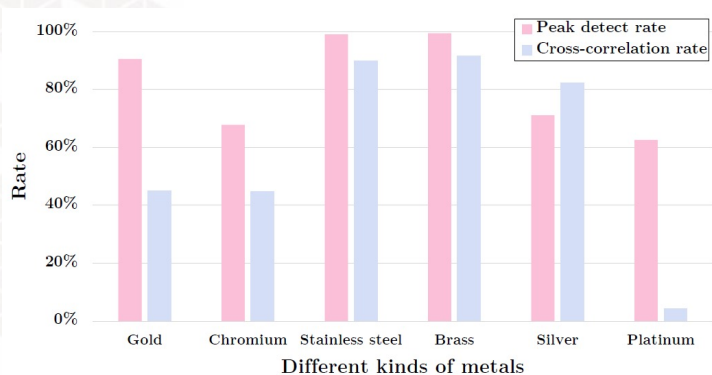
W. Rahajandraibe et. al. IEEE Sensors

Circuits de conditionnement et d'interfaces pour la mesure de Paramètres physiologiques -> Application à la prévention des troubles du rythme cardiaque



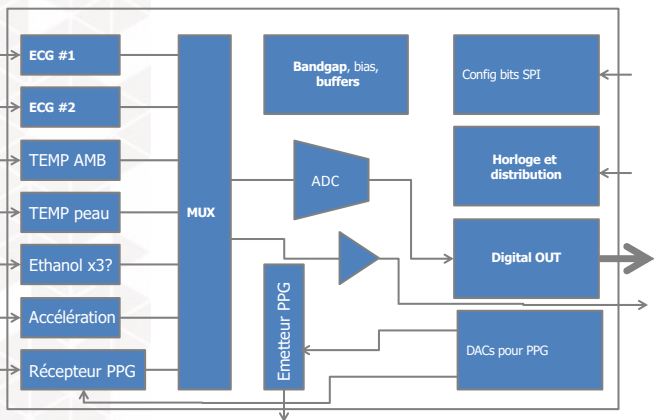
❑ Réalisation de prototype matériel pour des mesures embarquées

- ❑ Caractérisation et qualification des électrodes sèches
- ❑ Circuits de conditionnement et d'interfaçage avec un processeur

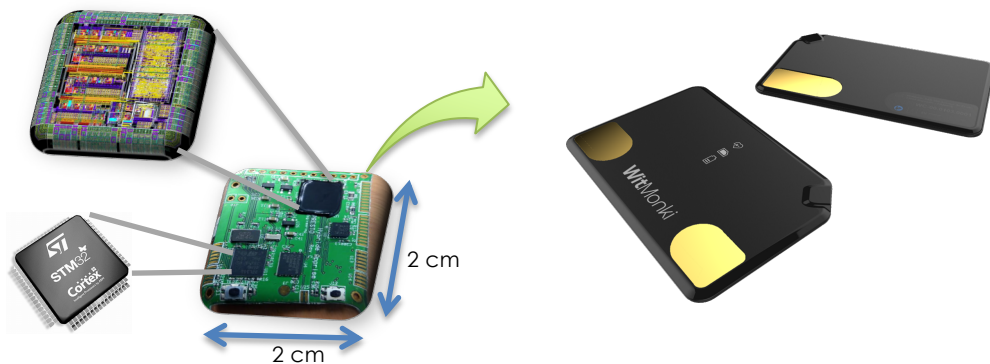
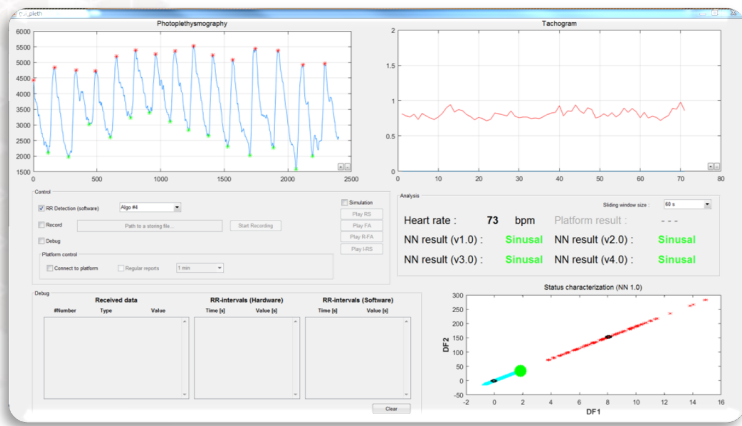
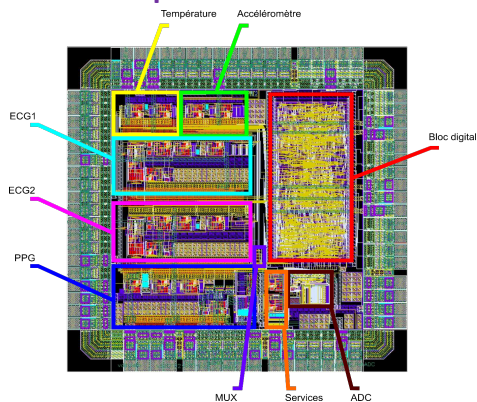


Y. Gan, W. Rahajandraibe et. al. IEEE Access 2020

Multi-sensor ASIC



Biochip : EPRIC



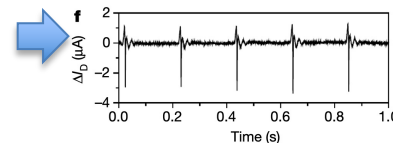
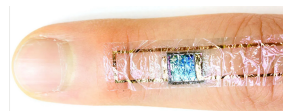
□ Sécurité

- Des données -> Cryptographie
- Des communications -> HBC : Human Body Communication



□ Autonomie énergétique

- Cellule photovoltaïque flexible¹
- Pacemaker autoalimenté par le mouvement du cœur (*Cairdac*)

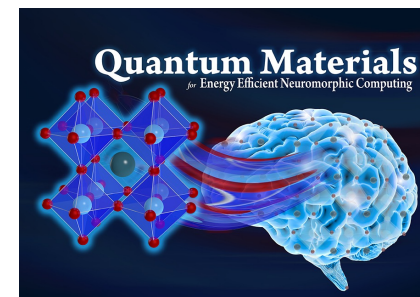


(1) Sungjun Park « Self-powered ultra-flexible electronics via nanograting-patterned organic photovoltaics », Nature 2018

□ Calcul déporté (*edge computing vs. cloud computing*)

- Intelligence Artificielle embarquée
- Processeur neuromorphique (bio-inspiré)
- Neurone artificiel à base de matériaux quantiques²

(2) UC San Diego physicists create new nano-scale 'neuristor' that mimics brain functions (Q-MEEN-C)





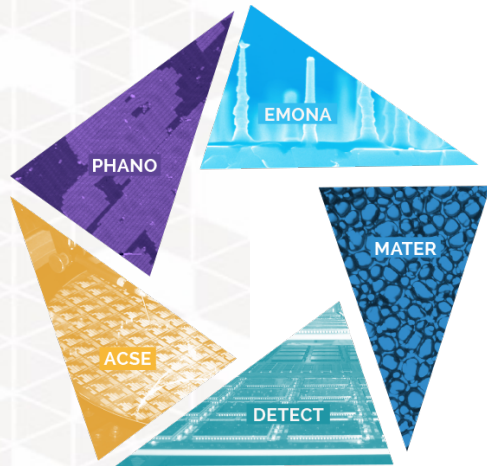
L'équipe CCSI





Institut **M**atériaux **M**icroélectronique **N**anosciences **P**rovence

Merci pour votre attention



**Relier le fondamental
aux applications
dans nos domaines
d'expertises**