

Séminaire de clôture du projet PROGYSAT

Observation de la Terre et applications

Mise au point de capteurs *in situ* complémentaires de l'imagerie satellitaire : cas de la détection directe de bio-molécules en milieu liquides réels

Olivier TAMARIN, Maxence RUBE, Martine SEBELOUE, Idris SADLI, Allyx FONTAINE, Vivien ROBINET

UMR Espace pour le développement



Séminaire final, Cayenne, le 27 juin 2023



Ce projet est cofinancé par l'Union Européenne.
L'Europe s'engage en Guyane avec le PCA.



SOMMAIRE

- **Présentation UMR Espace Dev. en Guyane**
- **Problématique des capteurs *in-situ***
- **Transducteur communicant approprié aux milieux amazoniens**
- **Résultats en milieu liquide « réel »**
- **Développement d'une plateforme « terrain »**
- **Perspectives**



Ce projet est cofinancé par l'Union Européenne.
L'Europe s'engage en Guyane avec le PCA.



PRESENTATION UMR ESPACE DEV.

Observation spatiale, modèles et science impliquée – vivre l'interdisciplinarité



é,
(tales)
odèles.

S,

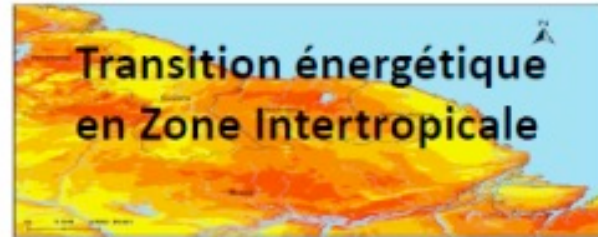


PRESENTATION UMR ESPACE DEV. GUYANE

3 axes de recherche

- 25 membres
- 1 PU, 12MCF
- 7 doctorant-es
- 1 AI
- 4 contractuels

GDR TRANS NRJ



Appui au développement de l'énergie solaire en zone intertropicale

GDR STRONG



Conception de capteurs pour la détection biochimique en milieux aérien et liquide

Systemes Embarqués Communicants Autonomes en Amazonie

GDR MADES



Modélisation de phénomènes environnementaux



Ce projet est cofinancé par l'Union Européenne. L'Europe s'engage en Guyane avec le PCA.



POURQUOI DES CAPTEURS *IN – SITU* ?

Méthodes usuelles pour l'analyse « biochimique » des eaux

Télédétection

- Précision relative due au pouvoir de résolution au sol, à la sensibilité des capteurs.
- Difficile estimation du comportement d'une cible dans la profondeur de l'eau
- Estimation compliquée en cas de couverture nuageuse

Collecte in situ d'échantillons pour analyse en laboratoire

- Opérations logistiques lourdes
- Echantillonnage limité
- Conditionnement et transport de l'échantillon à assurer
- Coût élevé pour l'analyse de l'échantillon (instrumentation et personnel)

Mesures effectuées par les populations locales

- Intérêt des populations locales
- Formation du personnel (comment faire une bonne mesure)
- Rendre la prise de mesure « amusante »

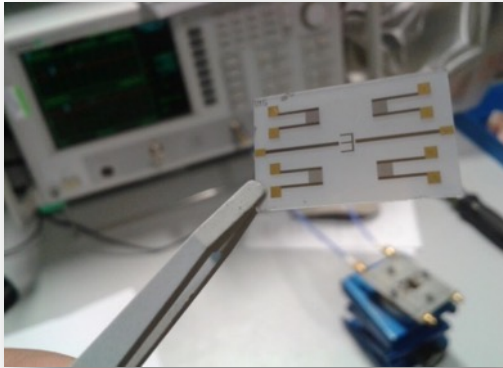


UNION EUROPÉENNE
Ce projet est cofinancé par l'Union Européenne.
L'Europe s'engage en Guyane avec le PCER.



STRATÉGIE SYSAA D'ESPACE DEV.

Du micro système
dédié « ad hoc »



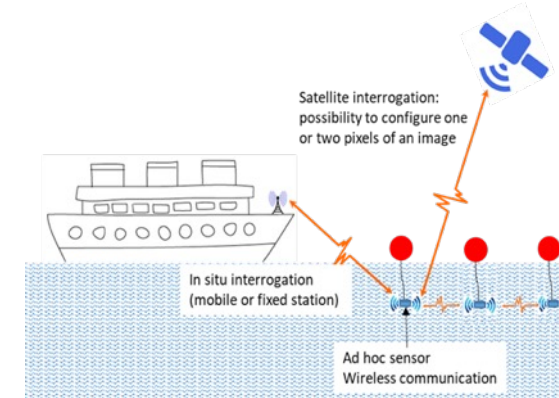
Conception et mise en œuvre
de la chaîne complète de
mesure en laboratoire

à la mise en œuvre du
laboratoire terrain mobile



Instrumentation et système
d'interrogation (trans)portables

jusqu'au réseau de
capteurs *in situ* autonome

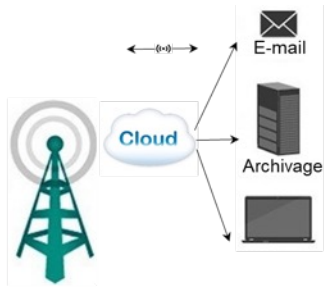
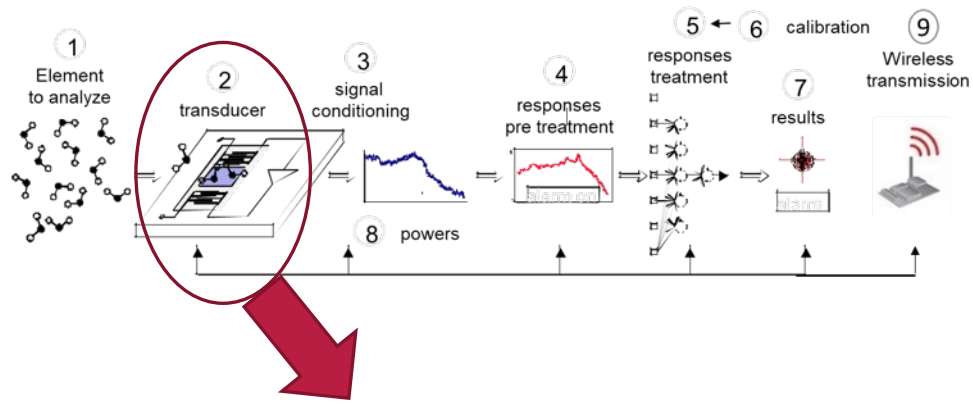


Dispositifs en nappe (réseaux)
pour le suivi de l'information en
temps réel d'un site



Plate-forme de détection (bio) chimique adaptable, compacte et communicante (IoT) pour les eaux et environnements amazoniens

CHOIX DU TRANSDUCTEUR



Transducteur à ondes acoustiques de surface (SAW):
 => Filtre Radio Fréquence très utilisé dans les télécommunications

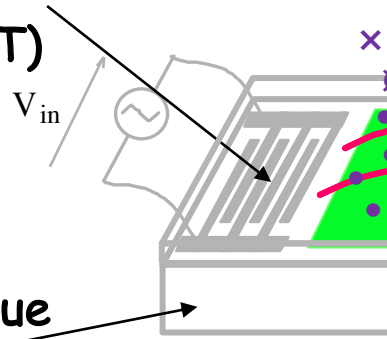
En configuration
 « capteur »

- Bonne sensibilité
- Détection en temps réel
- Fonctionnalisation en surface
- Régénérable
- Robuste
- Compatible microfluidique
- Embarquable, communicant
- Mise en réseau (IoT)
- Facile (amusant) à utiliser (logiciel)
- Faible coût (matériel, humain)

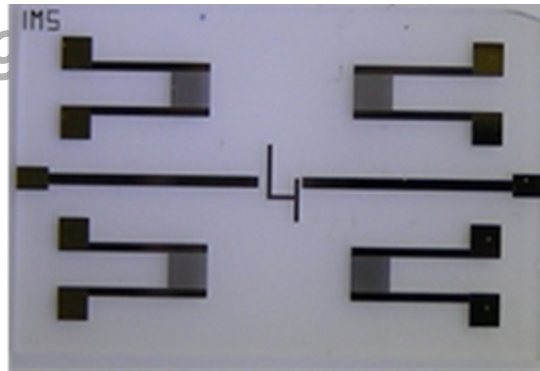
CHOIX DU TRANSDUCTEUR

Transducteur à ondes de Love pour des applications en milieu liquide

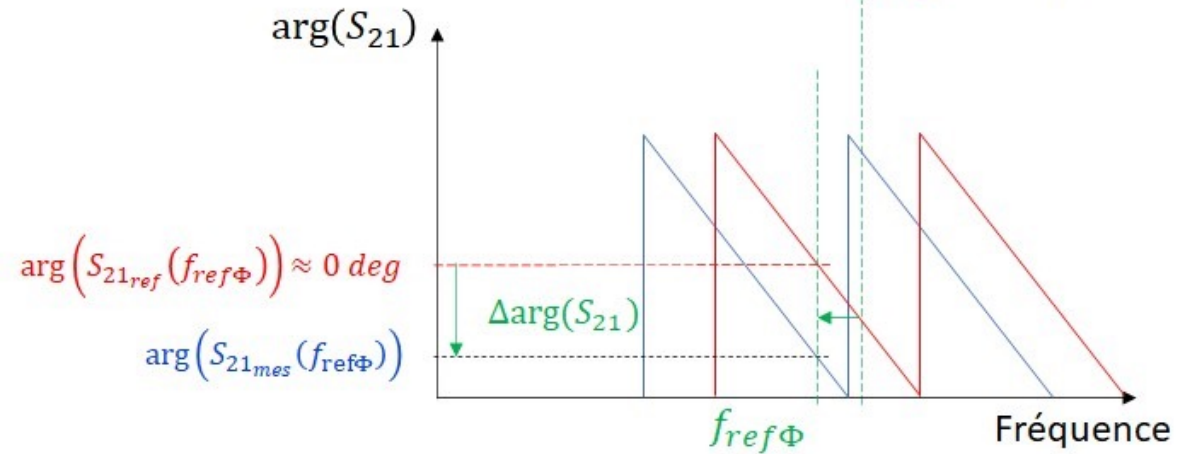
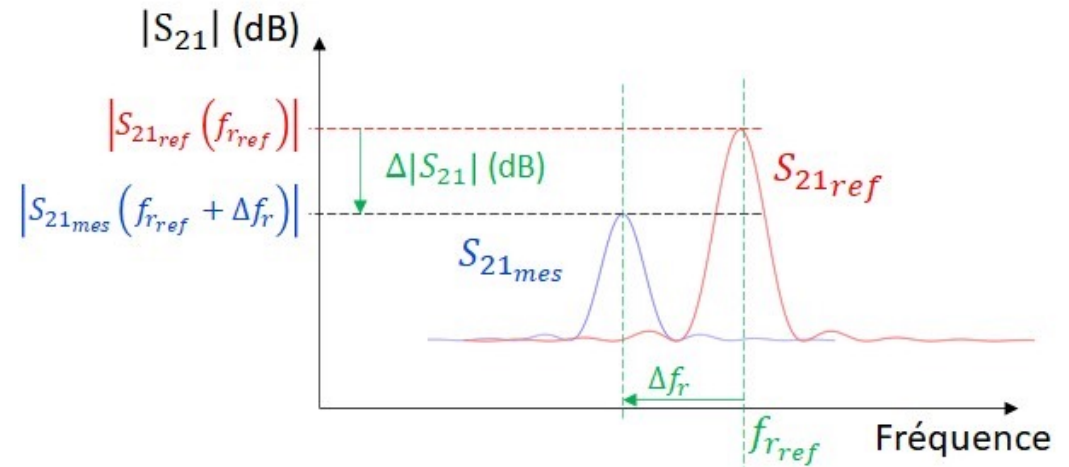
Transducteurs
interdigités (IDT)



Substrat
Piézoélectrique
(quartz)



aptteur |



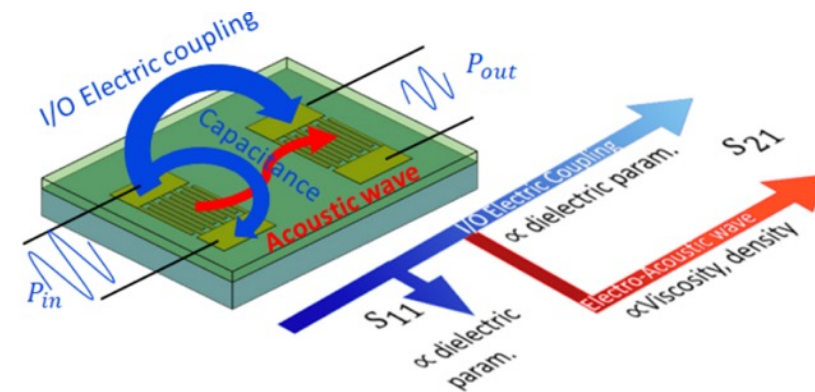
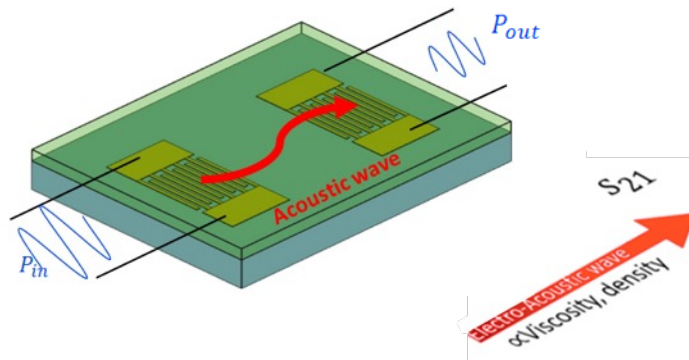
MISE EN ŒUVRE DU TRANSDUCTEUR

Application à la détection en milieu liquide amazonien

=> Protocole permettant une réponse enrichie du capteur (Thèse M. Rube)

Méthode classique : exploiter uniquement la réponse acoustique du capteur
=> Sensibilité à l'effet de masse

Méthode alternative : exploiter la réponse multiphysique du capteur (acoustique et électrique)
=> Sensibilité à l'effet de masse
=> Sensibilité aux paramètres diélectriques du liquide



M. RUBE, O. TAMARIN, M. SEBELOUE, H. HALLIL, L. LINGUET, D. REBIERE, C. DEJOURS. « A Dual Love wave and Impedance-based Sensor: Response Enrichment. » 2020 IEEE Sensors Virtual Conference October 25-28, 2020 WTC Rotterdam, pp. 1-4, **3rd - Best student paper Award.**

O. TAMARIN, M. RUBE, C. BOISSIERE, J.L. LACHAUD, H. HALLIL, C. DEJOURS, D. REBIÈRE, « Finite Element Modelling design and optimization of Love Wave mesoporous transducers for biochemical detection in liquid medium. » 2018 3rd International Symposium on Instrumentation Systems, Circuits and Transducers (INSCIT), Bento Goncalves, 2018, pp. 1-6. – **Best Paper Award of the Conference**

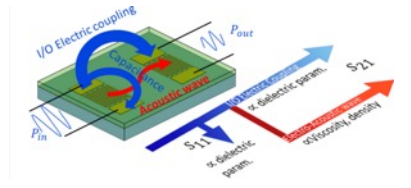
M. RUBE, O. TAMARIN, M. SEBELOUE, I. SADLI, H. HALLIL, L. LINGUET, D. REBIERE, C. DEJOURS. « Unconventional protocol for SAW sensor: multi-physic response enrichment in liquid medium ». *IEEE Sensors Journal*, 02 July 2021, DOI: 10.1109/JSEN.2021.3094299.



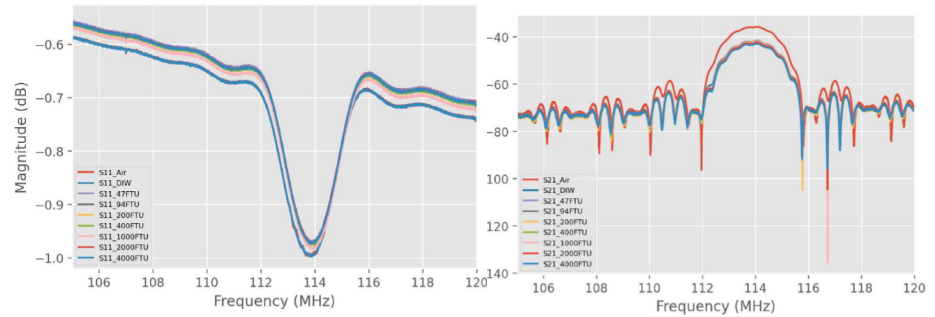
REPONSE DU TRANSDUCTEUR

Mise en œuvre du capteur en milieu liquide turbide

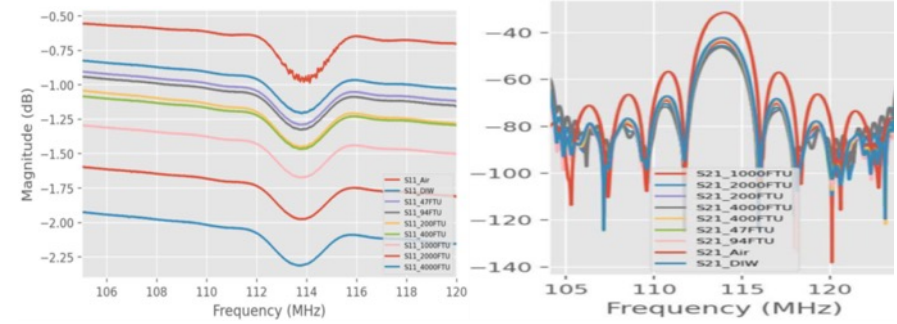
Réponse du capteur aux solutions de Formazine (-> 4000 FTU) - Thèse A. Choudhari.



Méthode classique



Méthode alternative



Réponse d'un spectrophotomètre

Samples (FTU)	450 nm		880 nm		940 nm	
	Trans (%)	Abs	Trans (%)	Abs	Trans (%)	Abs
2000	0.1	2.974	0.4	2.421	0.5	2.326
1000	0.4	2.410	1.6	1.800	1.8	1.745
400	3.9	1.411	13.3	0.875	14.8	0.830
280	7.2	1.147	20.2	0.692	22.15	0.655
200	16.0	0.790	33.7	0.474	35.6	0.441
94	48.2	0.318	65.5	0.184	68.2	0.167
47	67.1	0.174	78.7	0.105	79.7	0.099
7	83	0.080	90	0.046	90.5	0.044

➔ 16 % du signal émis à 200 FTU

Réponse d'une sonde commerciale

Liquid sample (FTU)	EC (µS/cm)	TDS (ppm)
2000	3999 (max limit)	2000 (max limit)
1000	3684	18775
400	1888	965
280	1198	675
200	914	459
94	368	188
47	253	129
7	117	59
DI water	0	0

➔ Saturation du signal à 2000 FTU

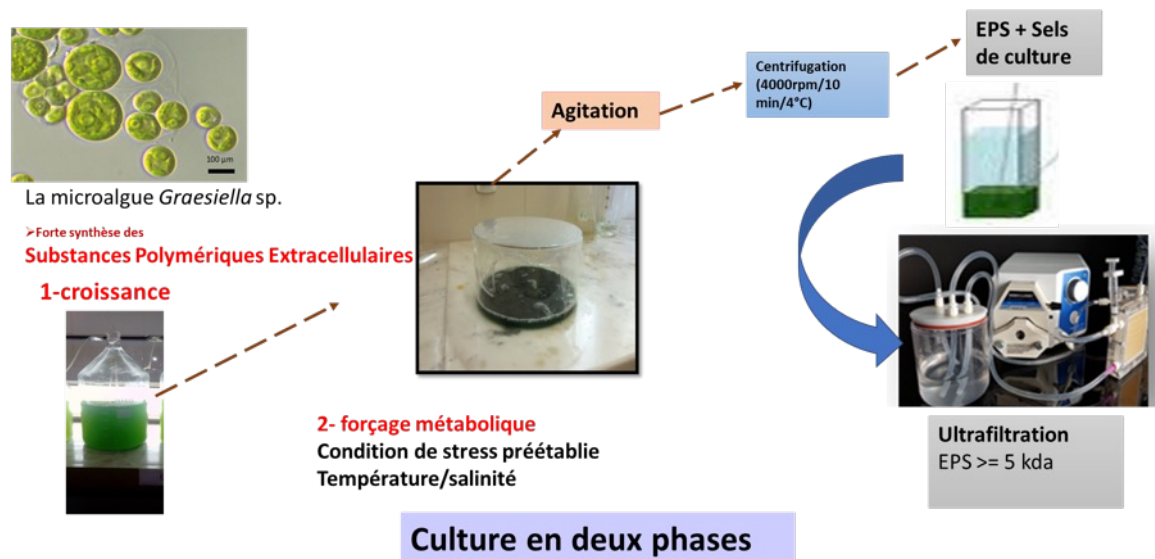


REALISATION DE LA COUCHE SENSIBLE

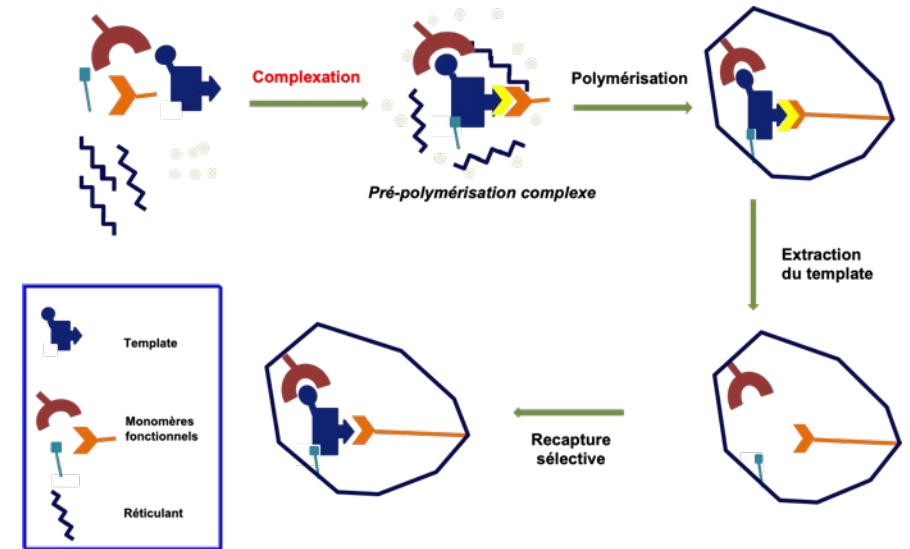
INSTM centre de Monastir

PRISM

Substances Polymériques Extracellulaires (EPS)



Polymères à empreintes moléculaires (MIP)



Avantages des polymères en général

- Grande sélectivité et affinité à la molécule cible dans le cas des MIPs
- grande robustesse physique (températures, pressions)
- Peu coûteux à synthétiser
- durée de conservation élevée

Avantages spécifiques à la transduction acoustique

- Compatibilité acoustique
- Porosité de la couche sensible



DETECTION EN MILIEU LIQUIDE « REEL »

Mesures utilisant le protocole enrichi : Post Doc Wejden GONGI 2021-2022
Préparation des échantillons à base de mercure

Solution turbide de laboratoire



Boues

Masse par échantillons
 10-20- 40 and 100g

Dissolution dans
 500ml d'eau

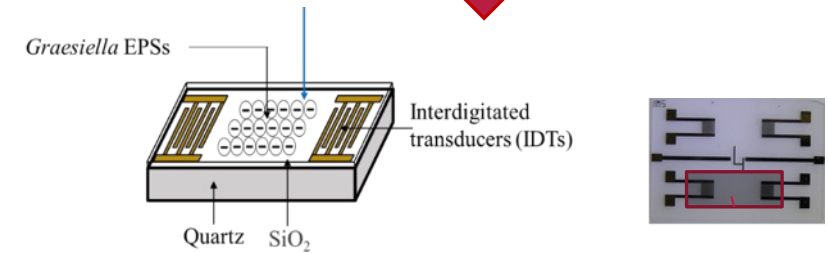


Echantillons terrain



Incorporation de mercure à différentes concentrations dans les milieux turbides

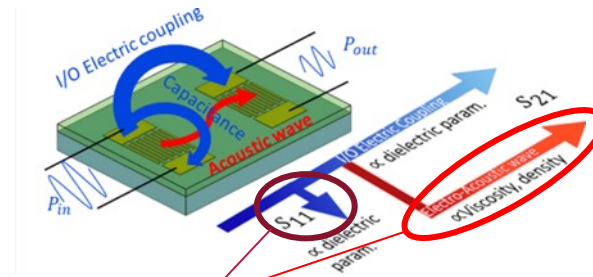
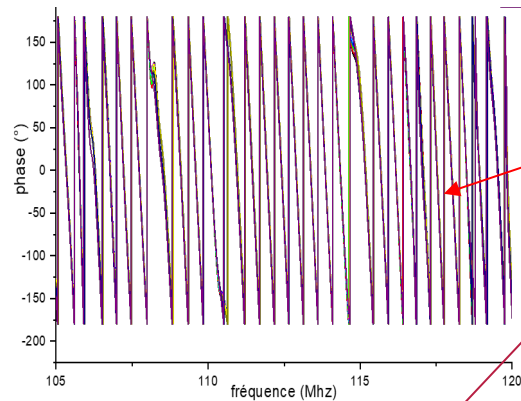
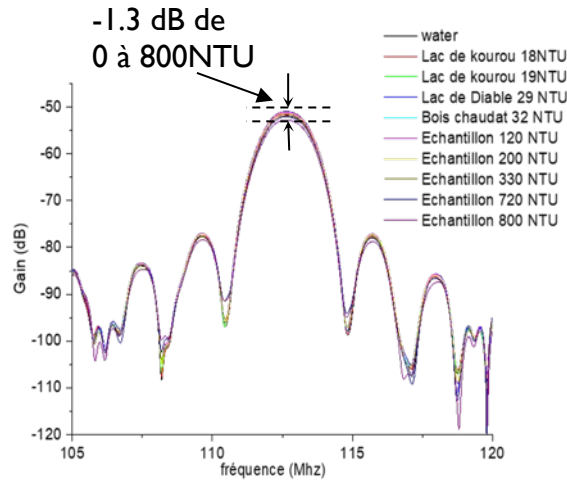
Samples	DO (500nm)	Turbidity (NTU)
1	0.193	100.37
2	0.31	300.15
3	1.55	836.87
Bois chaudat	0.026	32.98
Diable	0.016	26.18
lac de kourou	0.0012	19.10



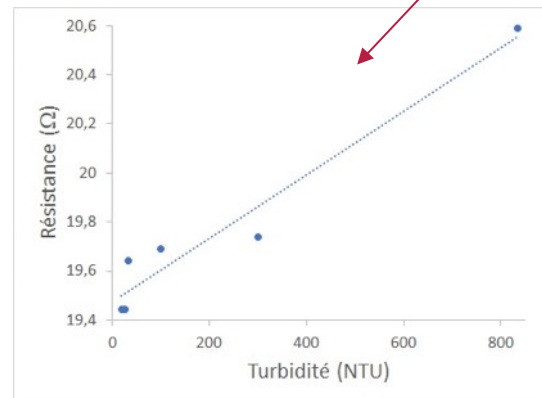
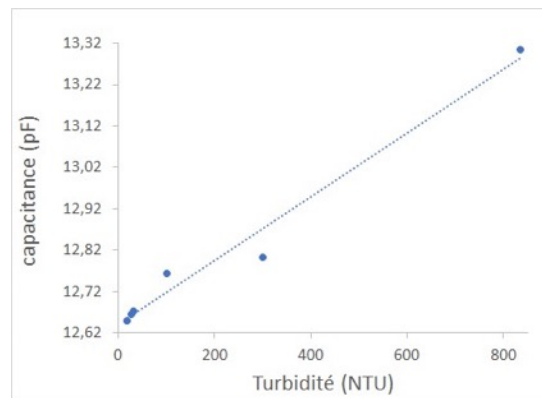
Test sur les EPS issus de la microalgue Graesiella en tant que couche sensible sur toute la surface du capteur

DETECTION EN MILIEU LIQUIDE « REEL »

Réponse du capteur à ondes de Love avec couche sensible EPS sans métaux lourds



- ✓ Une variation de turbidité dans une gamme de 0 à 800 NTU ne modifie pas significativement la réponse acoustique du capteur à ondes de Love
- ✓ La réponse impédimétrique du capteur à ondes de Love (capacitance and résistance) augmente « linéairement » en fonction de la turbidité (caractéristiques diélectriques) du milieu liquide



Réponse du capteur LW utilisable pour la détection biochimique :

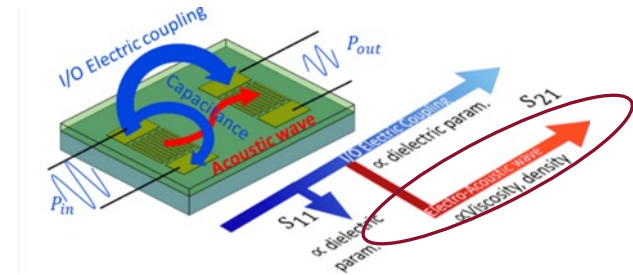
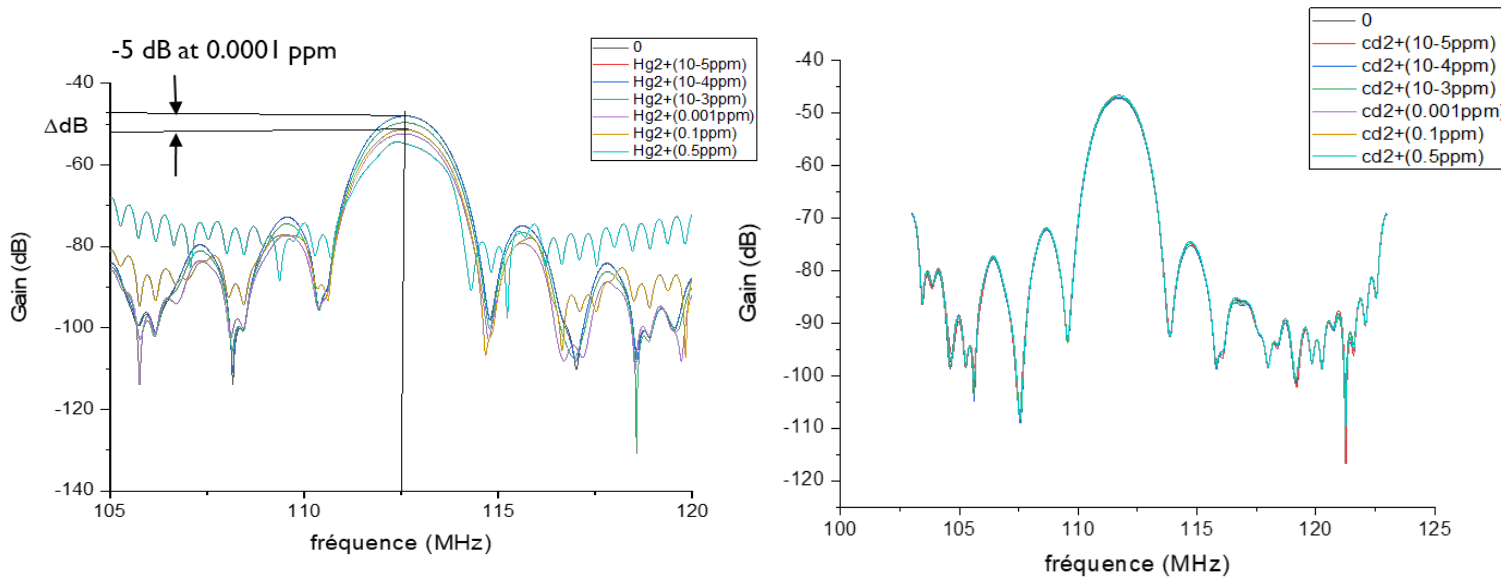
- S_{21} : effet de masse (biodétection classique)
- S_{11} : Estimation des propriétés diélectriques du liquide

DETECTION EN MILIEU LIQUIDE « REEL »

Réponse du capteur à ondes de Love avec couche sensible EPS en milieu liquide réel (19 NTU) avec des métaux lourds (Hg^{2+} , Cd^{2+})



UNION EUROPÉENNE
Ce projet est cofinancé par l'Union Européenne.
L'Europe s'engage en Guyane avec le PCA.



- ✓ Réponse significative LW et EPS à 0,0001 ppm de Hg^{2+}
- ✓ Pas de détection significative de Cd^{2+} quelle que soit la concentration

Possibilité d'utiliser le revêtement sensible Graziella EPS associé au capteur à ondes de Love comme indicateur de la présence de mercure dans une eau turbide réelle de 19 NTU

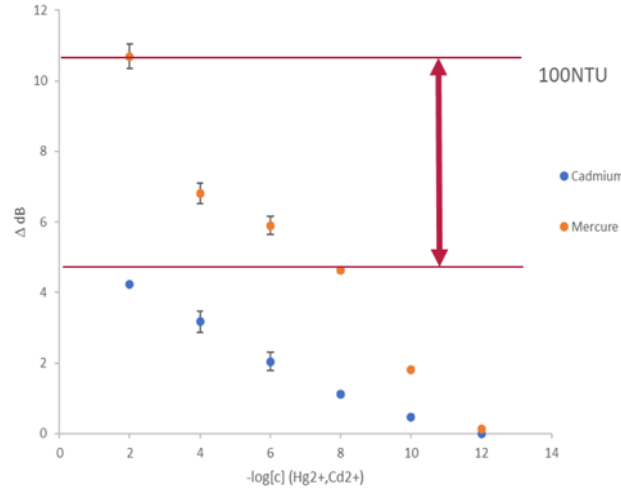
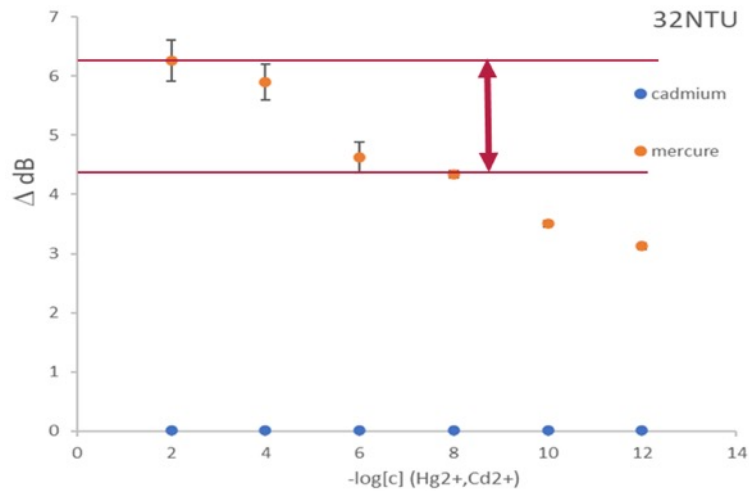
DETECTION EN MILIEU LIQUIDE « REEL »



Réponse acoustique LW et EPS dans 2 différents liquides turbides réels avec des métaux lourds (Hg^{2+} , Cd^{2+})



Ce projet est cofinancé par l'Union Européenne.
L'Europe s'engage en Guyane avec le FEDER.



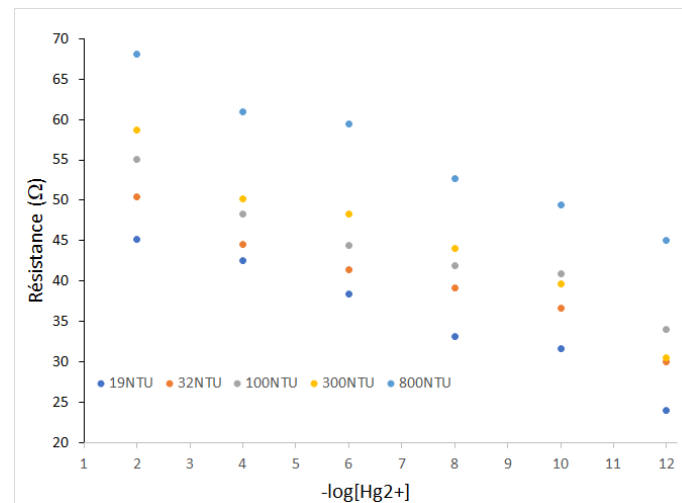
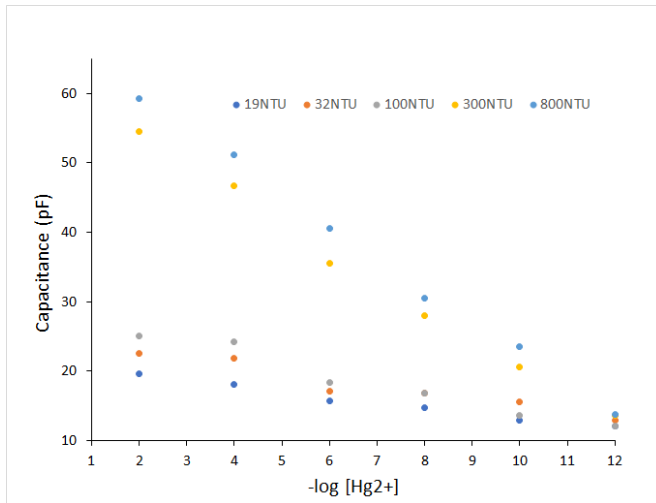
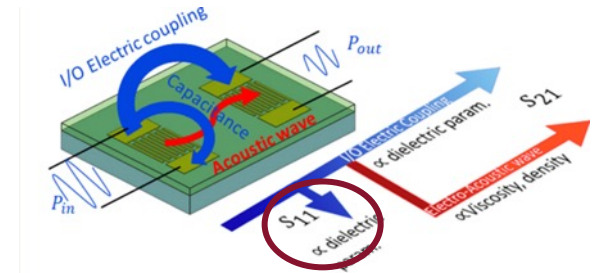
- La réponse acoustique LW et EPS est plus élevée pour la même concentration de Hg^{2+} pour 2 liquides turbides différents
- Étonnamment, la réponse LW et EPS devient significative pour la détection de Cd^{2+} dans un échantillon de liquide turbide de 100 NTU
- Cette observation reste valable pour les liquides avec des turbidités plus élevées.

- Ce comportement peut s'expliquer par la présence d'agents chélateurs dans les liquides turbides amazoniens qui agrègent les métaux lourds
- Ainsi, nous pouvons observer une augmentation de la masse de la cible de métaux lourds qui est détectée par le dispositif LW et EPS

- Cette augmentation de la masse augmente « l'effet de masse » et donc la réponse du capteur LW et d'EPS, et peut générer une mauvaise estimation de la concentration initiale en métaux lourds.
- Nécessité d'avoir une estimation de la turbidité de l'échantillon liquide pour assurer la mesure (protocole enrichi)

DETECTION EN MILIEU LIQUIDE « REEL »

Réponse S_{11} LW et EPS dans des liquides réels contaminé au mercure



- La capacité et la résistance du capteur impédimétrique LW et EPS restent linéaires
- La pente de la capacité linéaire du capteur impédimétrique LW et d'EPS est liée à la turbidité de l'échantillon liquide et à la concentration de Hg^{2+}
- La pente du capteur impédimétrique LW et EPS à résistance linéaire est liée uniquement à la concentration de Hg^{2+}

→ Possibilité avec les réponses impédimétriques et acoustiques du capteur LW et EPS d'estimer la turbidité (propriétés diélectriques) de la solution tout en mesurant la concentration de Hg^{2+} à une limite de détection de 1 ppb.

→ Des recherches supplémentaires sont nécessaires pour valider cette approche et garantir une réponse non ambiguë du capteur dans des liquides réels.



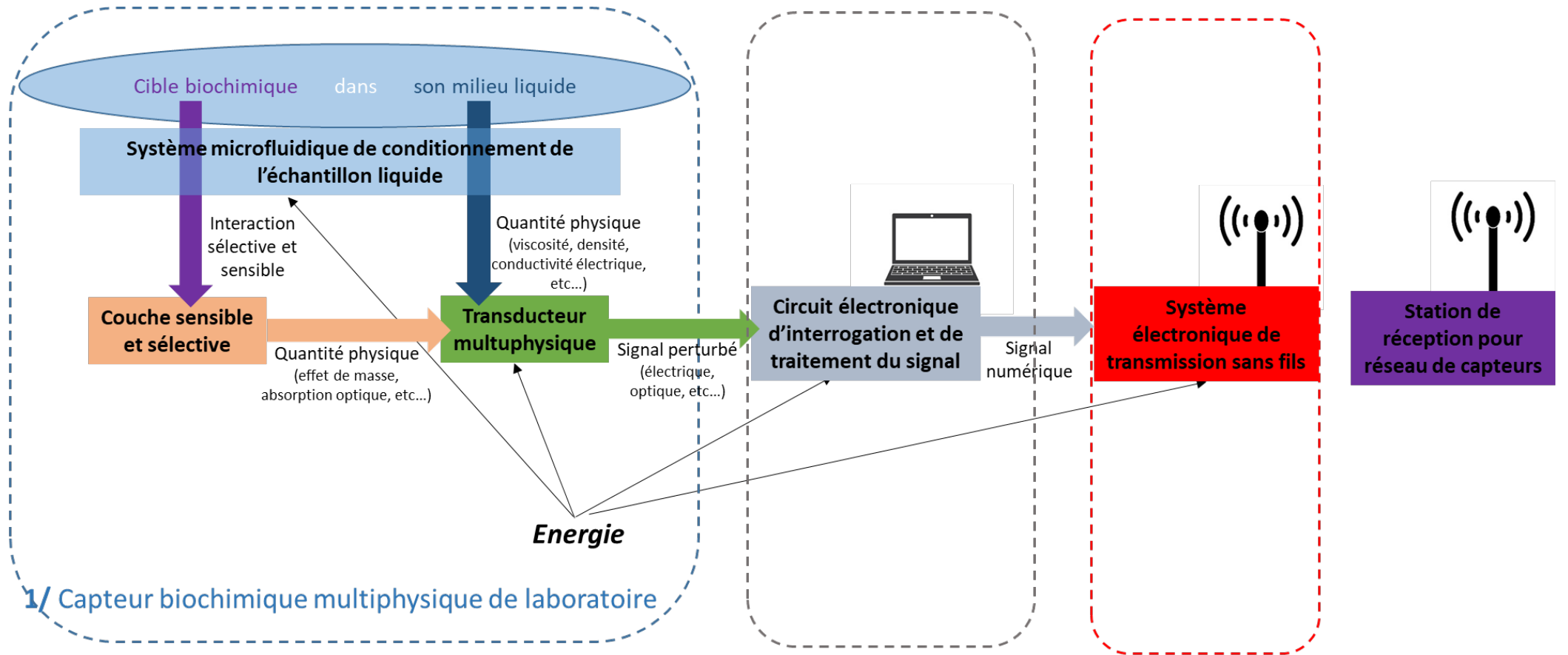
UNION EUROPÉENNE

Ce projet est cofinancé par l'Union Européenne.

L'Europe s'engage en Guyane avec le PCIA.



MISE EN ŒUVRE DU SYSTEME TERRAIN



2/ Capteur biochimique multiphysique utilisable sur le terrain ou *in situ*

3/ Capteur biochimique multiphysique autonome *in situ* en configuration réseau



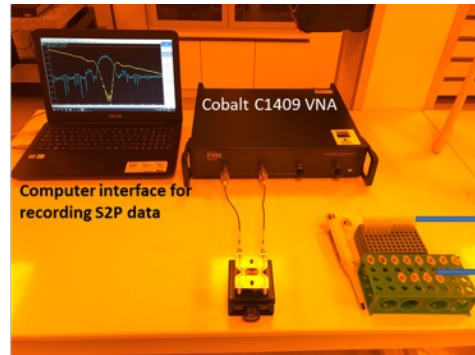
Ce projet est cofinancé par l'Union Européenne. L'Europe s'engage en Guyane avec le PCA.



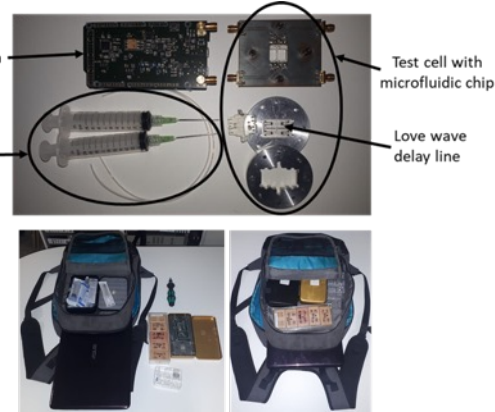
MISE EN ŒUVRE DU SYSTEME TERRAIN

Electronique d'interrogation

Projet FEDER CARTEL



Micro pipette for drop-casting turbid solution : 150µL and 75µL respectively for open and closed cavities PDMS chips

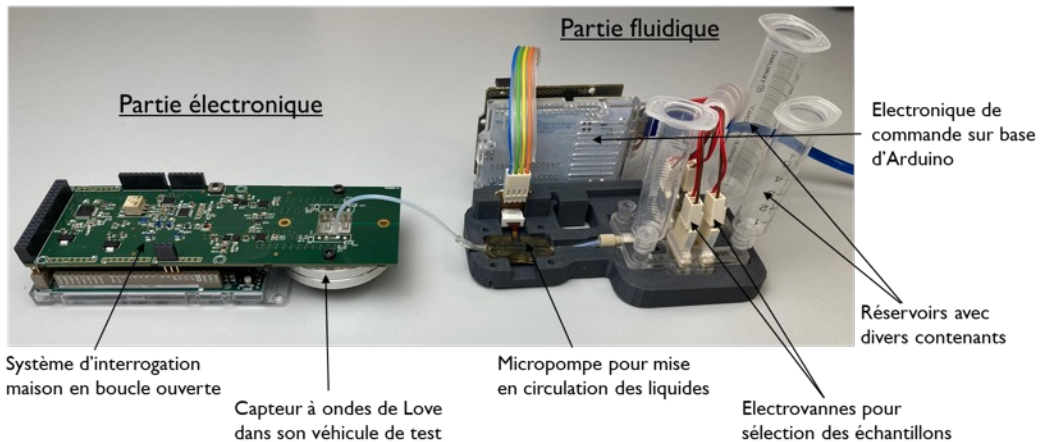


Des mesures en laboratoire

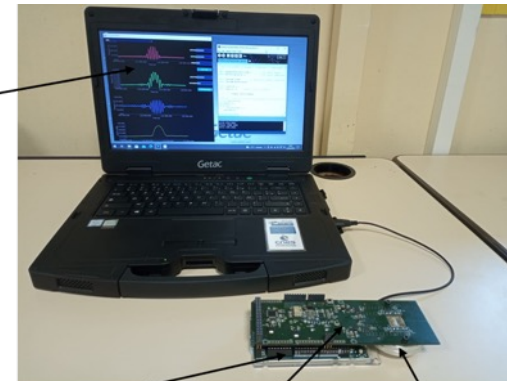


à l'expérimentation terrain (laboratoire mobile)

Systeme microfluidique de traitement des échantillons transportable



Interface logicielle pour configuration et interrogation différentielle du transducteur

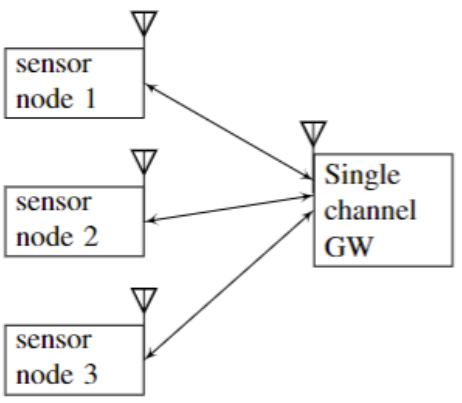


O. TAMARIN, M. RUBE, J.L. LACHAUD, V. RAIMBAULT, D. REBIERE, C. DEJOURS. « Mobile Acoustic Wave Platform Deployment in the Amazon River: Impact of the Water Sample on the Love Wave Sensor Response ». Sensors 2020, 20, 72. DOI: 10.3390/s20010072

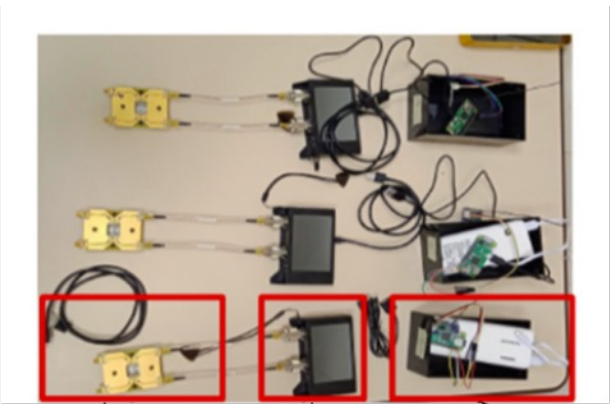
MISE EN ŒUVRE DU SYSTEME TERRAIN



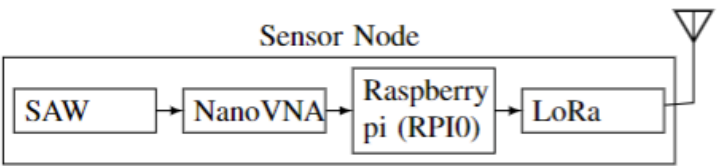
Systeme d'interrogation sans fils utilisant le reseau LORA



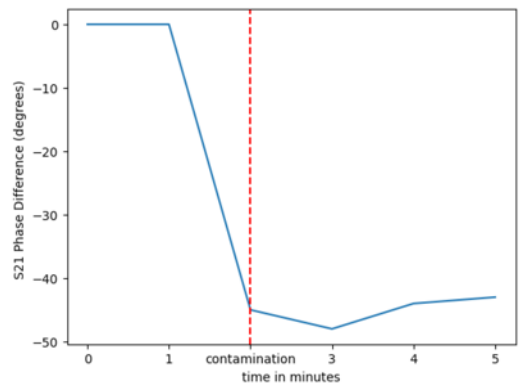
Architecture de reseau de capteurs LW basée sur un seul canal qui communique individuellement avec les noeuds capteurs en utilisant Modules LoRa RFM98.



Capteur ondes de Love dans son véhicule de test
 NanoVNA (analyseur de reseau vectoriel bas coût)
 Alimentation électrique, Raspberry PI, module LORA 433MHz

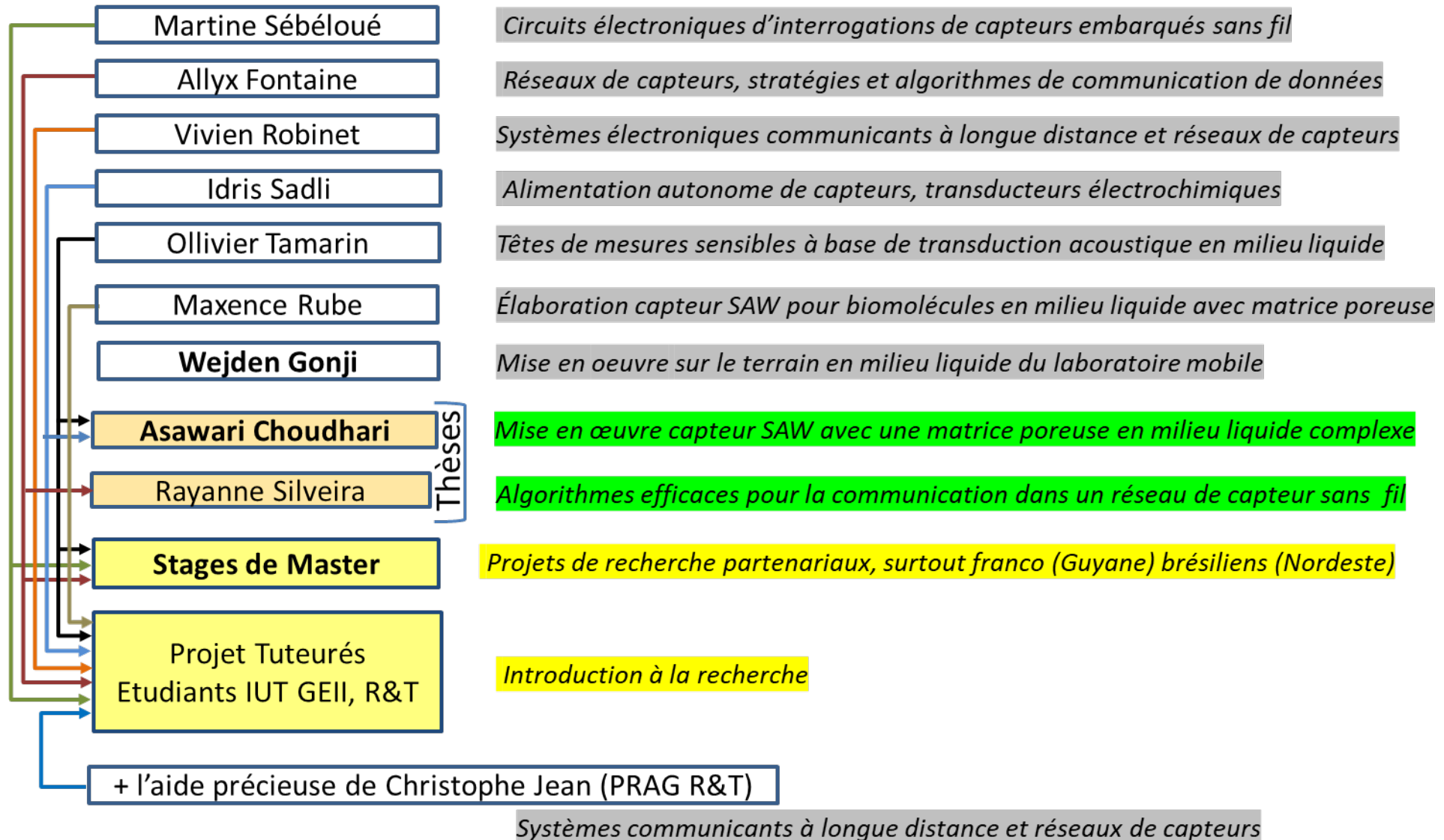


Noeud du reseau de capteur sans fils LW basée sur LoRa



Mesure sans fil du déphasage de la réponse du capteur LW du à l'apparition d'une goutte d'eau

L'ÉQUIPE « SYSTÈMES EMBARQUÉS »



CONCLUSIONS - PERSPECTIVES

- ✓ Dispositifs à ondes de Love utilisables en lieu liquide turbide « réel » pour la détection biochimique dans la colonne d'eau, lorsque que les approches classiques peuvent montrer des limites
- ✓ Validation de cette approche en cours (Thèse A. Choudhari) dans le cas de la détection sélective de toxines en milieu turbide (LVV + MIP)
- ✓ Protocole enrichi permet de fiabiliser une mesure, voire de faire une sonde multi-paramètres bas coût
- ✓ Mise en œuvre d'un laboratoire mobile possible, puis d'un nœud autonome
- ✓ Travaux supplémentaires nécessaires pour continuer à exploiter toutes les potentialités non explorées des dispositifs à ondes de Love



Ce projet est cofinancé par l'Union Européenne.
L'Europe s'engage en Guyane avec le FEDER.

