

ALEYİN

Soutenance de thèse pour obtenir le grade de Docteur en électronique de l'Université de Montpellier

Bouclier acoustique pour robot d'exploration karstique

Mohammad ALARAB

15 Octobre 2021

| | | |
|---------------------------|--|-----------------------|
| Philippe ROUX | Professeur, ISTerre, Université Grenoble Alpes | Rapporteur |
| Jérôme FORTINEAU | Professeur, INSA Centre Val de Loire | Rapporteur |
| Christophe LAOT | Professeur, IMT Atlantique Bretagne-Pays de la Loire, Brest | Examineur |
| Franck AUGEREAU | Maître de conférences, IES, Université de Montpellier | Encadrant de thèse |
| Didier LAUX | Maître de conférences, HDR, IES, Université de Montpellier | Co-Directeur de thèse |
| Lionel LAPIERRE | Maître de conférences, HDR, LIRMM, Université de Montpellier | Directeur de thèse |
| Emmanuel LE CLEZIO | Professeur, IES, Université de Montpellier | Invité |



Contexte : Crise d'eau douce et besoin d'exploration karstique

Pollution



Sècheresse



Stress démographique



Accroissement de la consommation



Evolution du mode de vie



Manque d'approvisionnement



Crise en eau douce

SOLUTIONS

Gestion intelligente des ressources

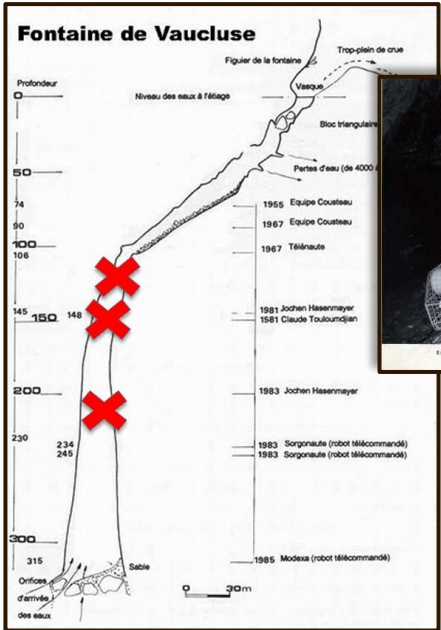
METHODES

Exploration et inspection des karsts

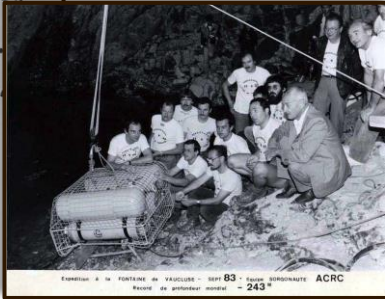


Réseau karstique

Contexte : L'exploration karstique



➤ Sorgaunote



RENAULT

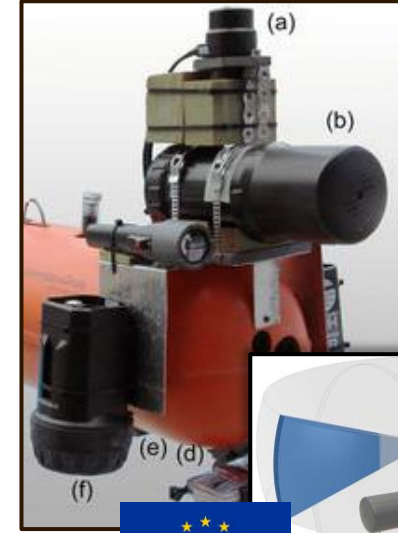
- 1982 - 1988
- Quatre robots
- Collaboration avec Renault
- Télécommandé par câble ombilical



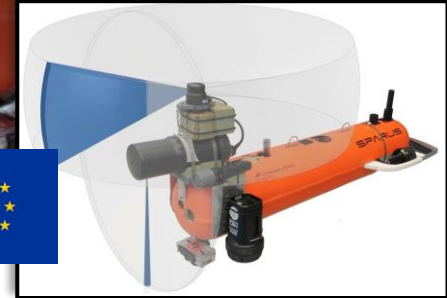
➤ DepthX



- 2003
- 46 x sonars
- Sponsorisé par la NASA
- Autonome



➤ Sparus



- 2014
- 2 x profilomètres
- Sponsorisé par 4 programmes-cadres UE
- Guidé par des plongeurs

Contexte : Le projet ALEYIN



ALEYIN : SYSTÈME D'EXPLORATION KARSTIQUE



Robotique



Nouveaux capteurs

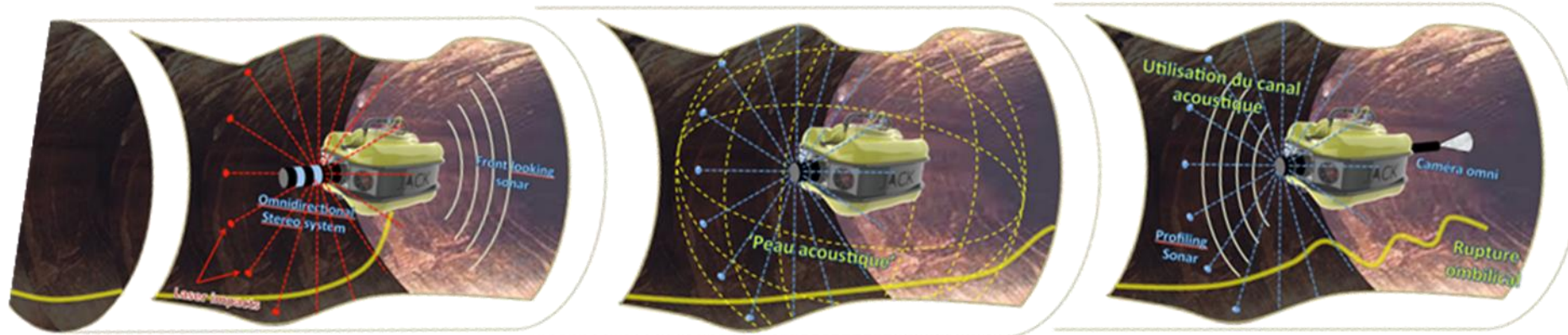


Reconstruction de cartes



Hydrologie

Phase d'exploration : Acquisition de données, construction de cartes, co-contrôle



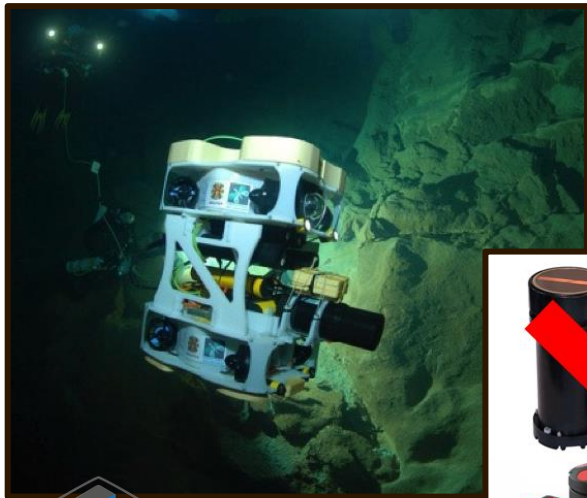
Phase de retour : Non-câble, navigation autonome

Contexte : Objectif de la thèse

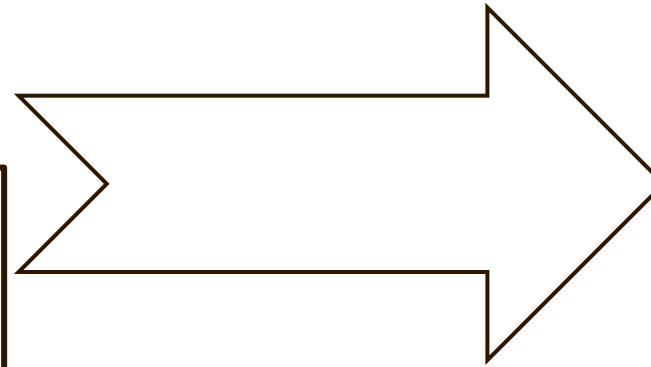
Navigation autonome

Anticollision

Cartographie



 LIRMM



Nécessité de développer
un système **SPECIFIQUE**
de mesure de distance



Le Bouclier Acoustique

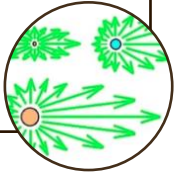
- Ulysse
 - Caméra acoustique
 - Sonar profilométrique
 - DVL (Doppler Velocity Log)

Contexte : Le Bouclier Acoustique

- Eau trouble



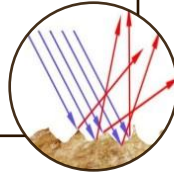
Atténuation
acoustique



- Paroi complexe



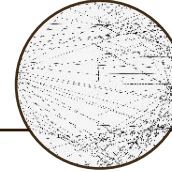
Réflexion non
maîtrisée



- Variations brutales



Portée
variable



- Embarqué



Limitation des
ressources



Autonome
Reconfigurable
Auto-adaptatif
Miniaturisé
Intelligent

Plan



- **Compréhension du milieu**
 - Effet de la turbidité
 - Caractérisation des sédiments en suspension
- **Conception du système**
 - Architecture du système
 - Choix des capteurs
 - Choix de l'électronique
 - Architecture Software
- **Validation**
 - Banc de test
 - Caractérisation des performances
 - Evaluation contre surfaces rocheuses
- **Conclusion générale**

Compréhension du milieu



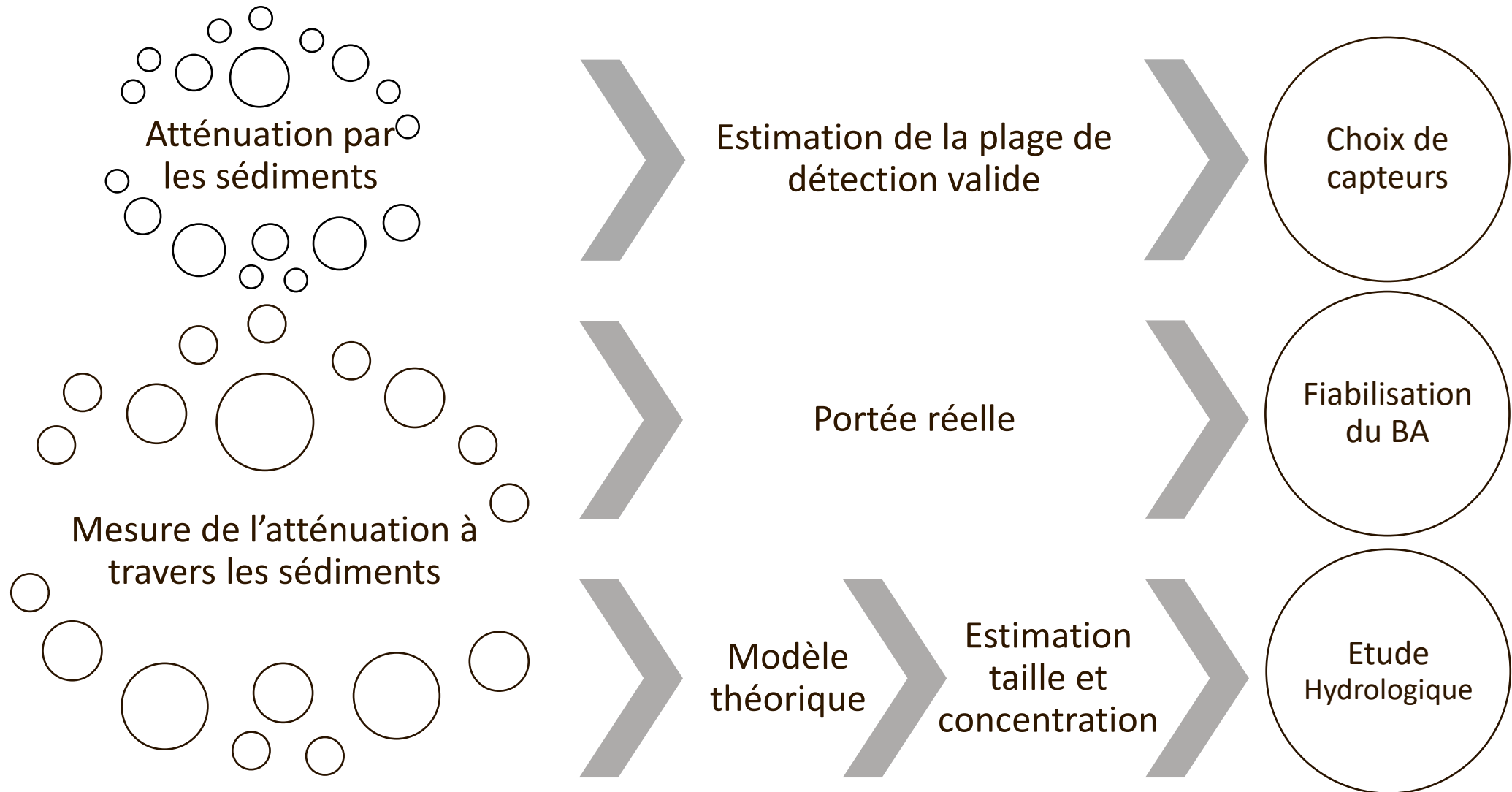
Conception du système

Validation

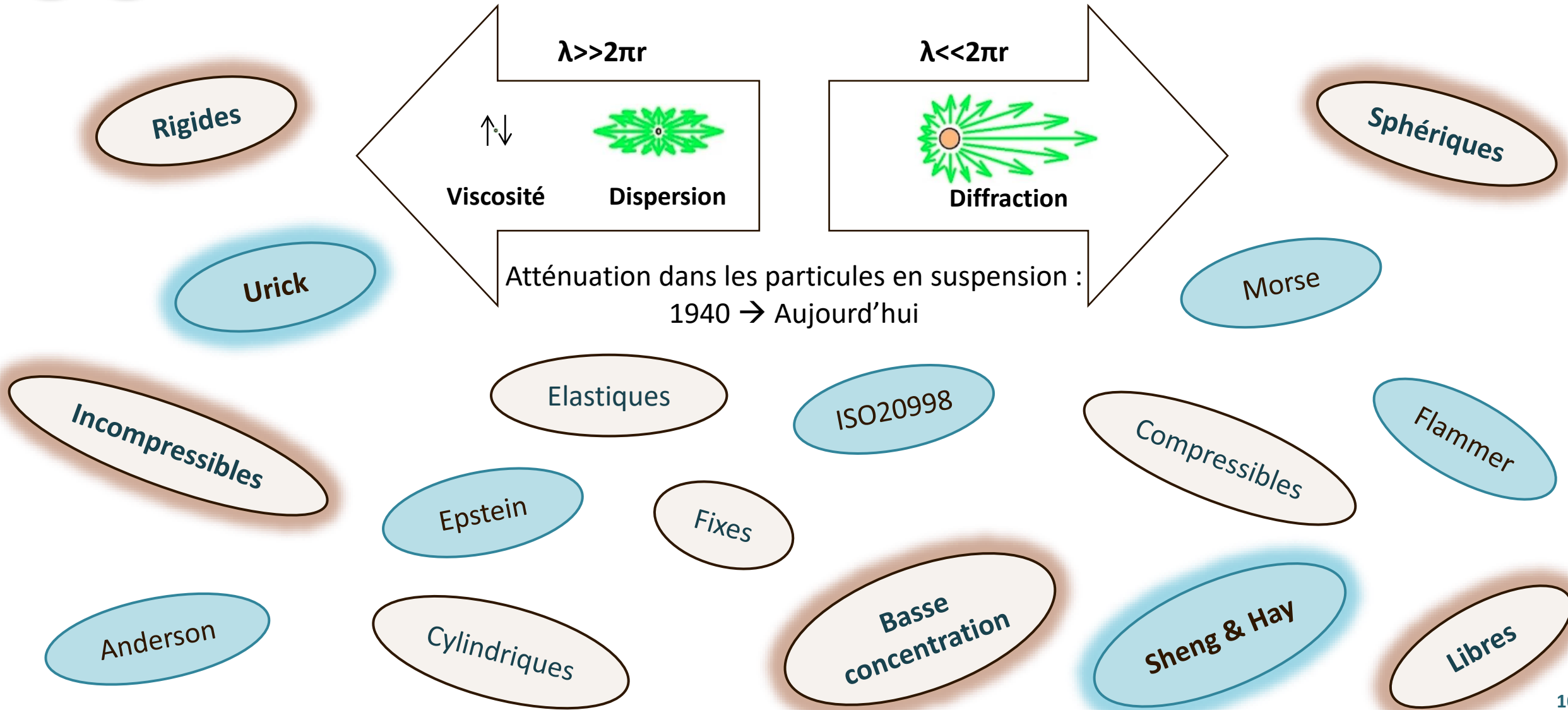
Conclusion générale

- Effet de la turbidité sur la propagation des ondes ultrasonores
- Caractérisation des sédiments par mesure du coefficient d'atténuation
- Conclusion

Effet de la turbidité



Effet de la turbidité: Interaction Onde-Particules



Effet de la turbidité: Modèles théoriques

Pertes visco-inertielles

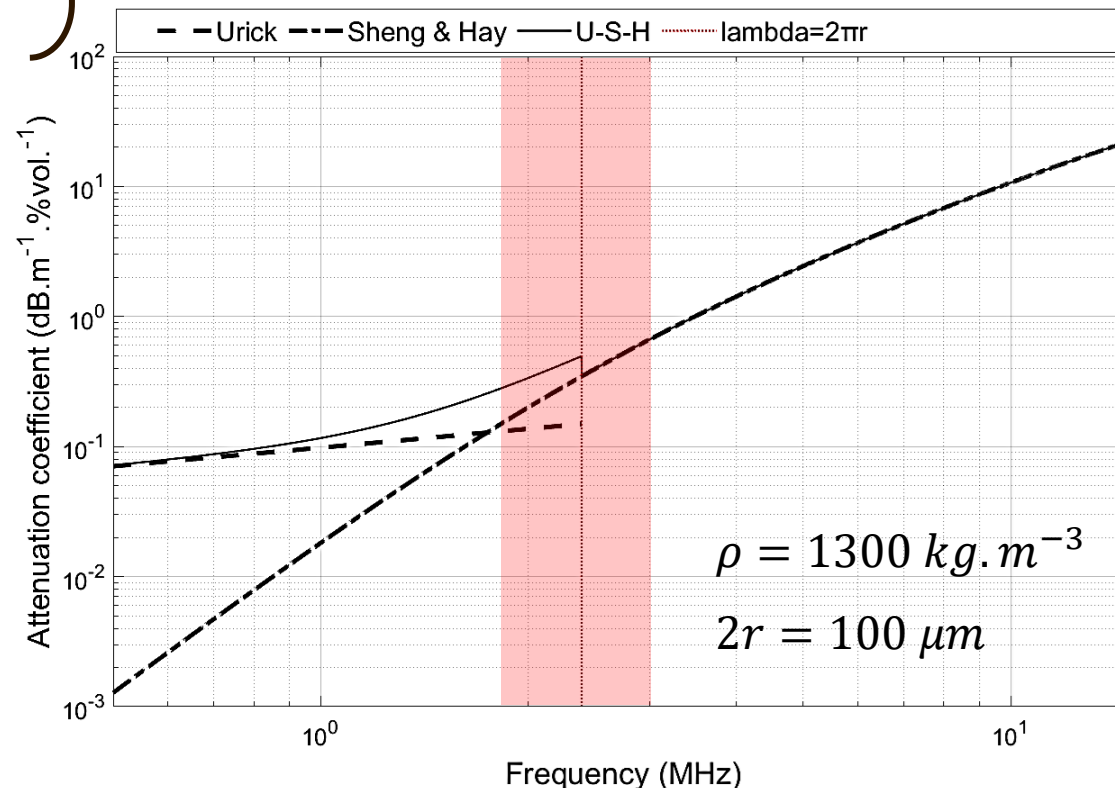
(Urlick 1948)

$$\alpha_{Urlick} = \frac{C}{2} k(\sigma - 1)^2 \frac{s}{s^2 + (\sigma - \tau)^2}$$

- Compatible avec les sédiments
- Proportionnel à la concentration

$$\alpha = \alpha_{eau} + \alpha_{vis_sed} + \alpha_{disp} + \alpha_{diff}$$

Equation Hybride : U-S-H



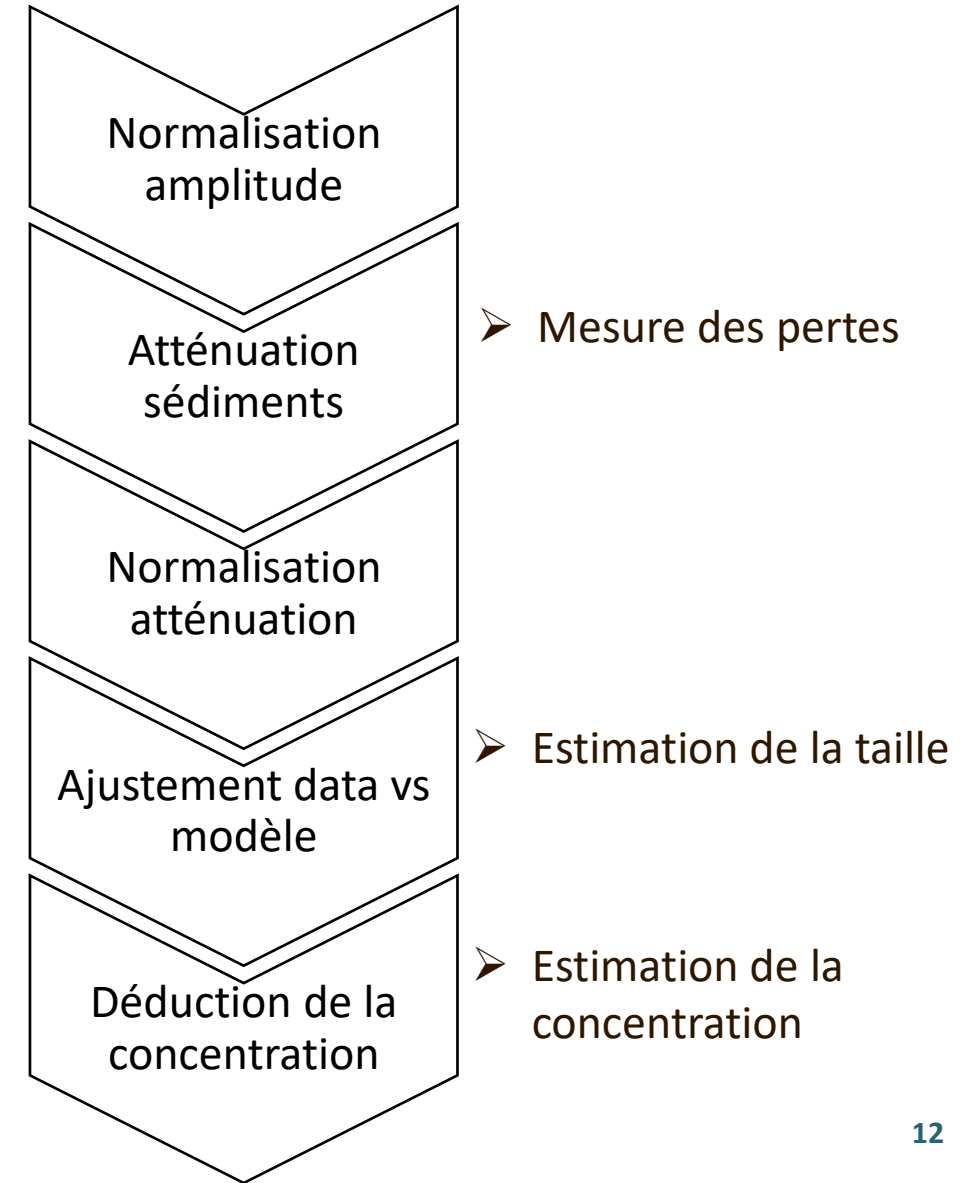
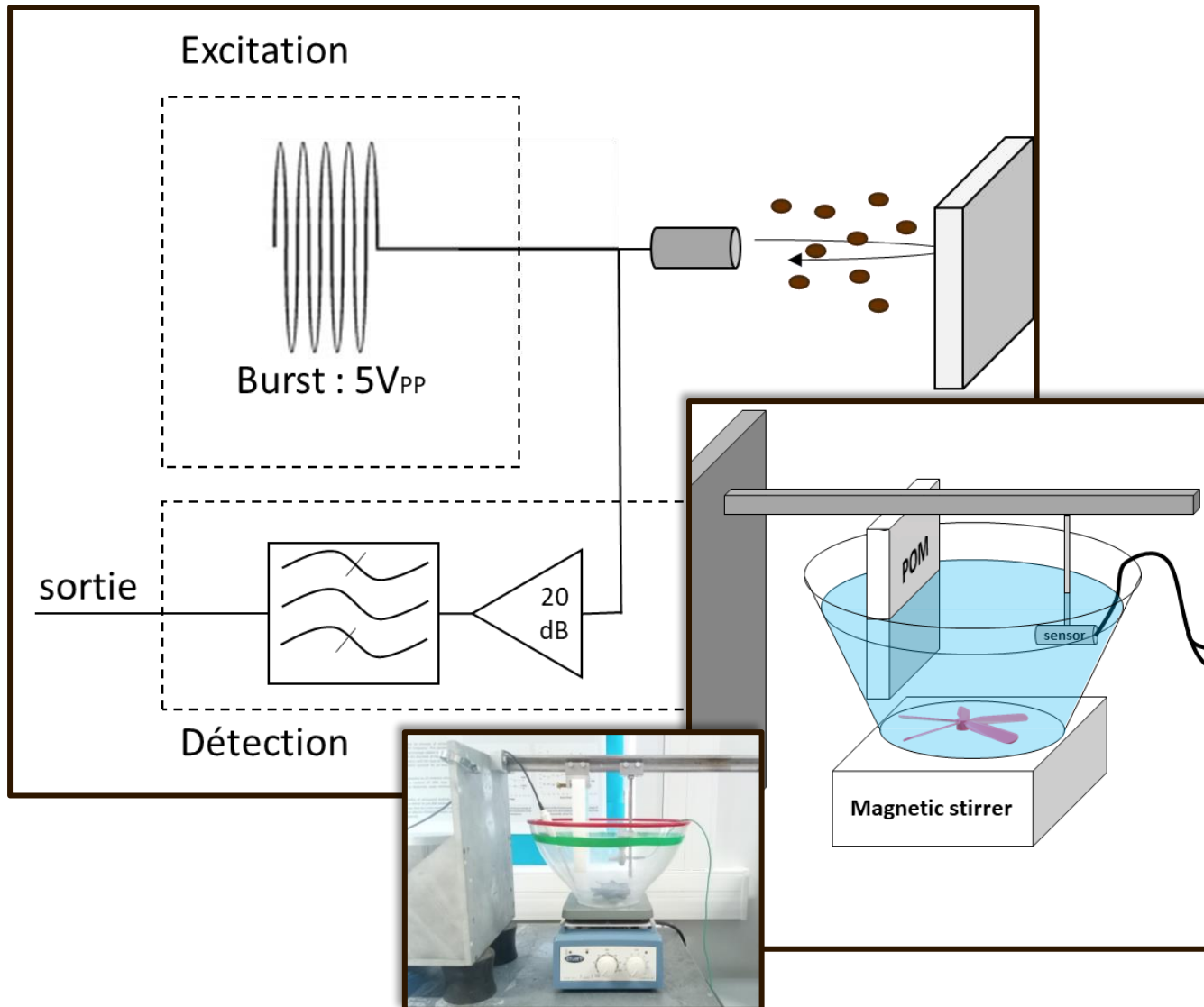
Dispersion et diffraction

(Sheng & Hay 1988)

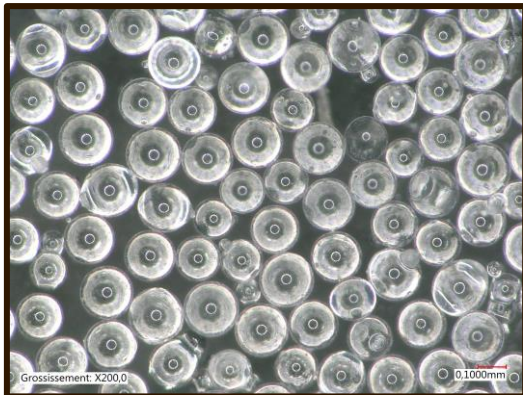
$$\alpha_{S\&H} = \frac{CK_{\alpha}X^4}{r \left(1 + \xi X^2 + \frac{4}{3} K_{\alpha} X^4 \right)}$$

- Expression analytique
- Nbr de paramètres réduits

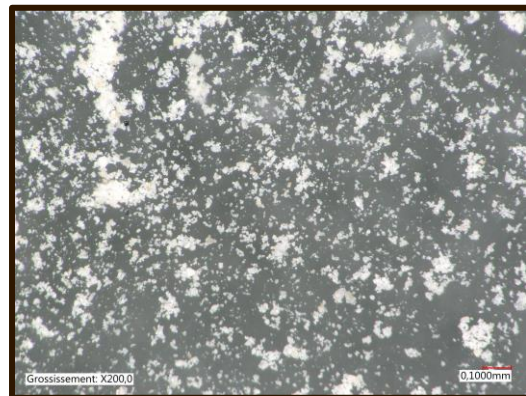
Caractérisation des sédiments : Approche et procédure expérimentale



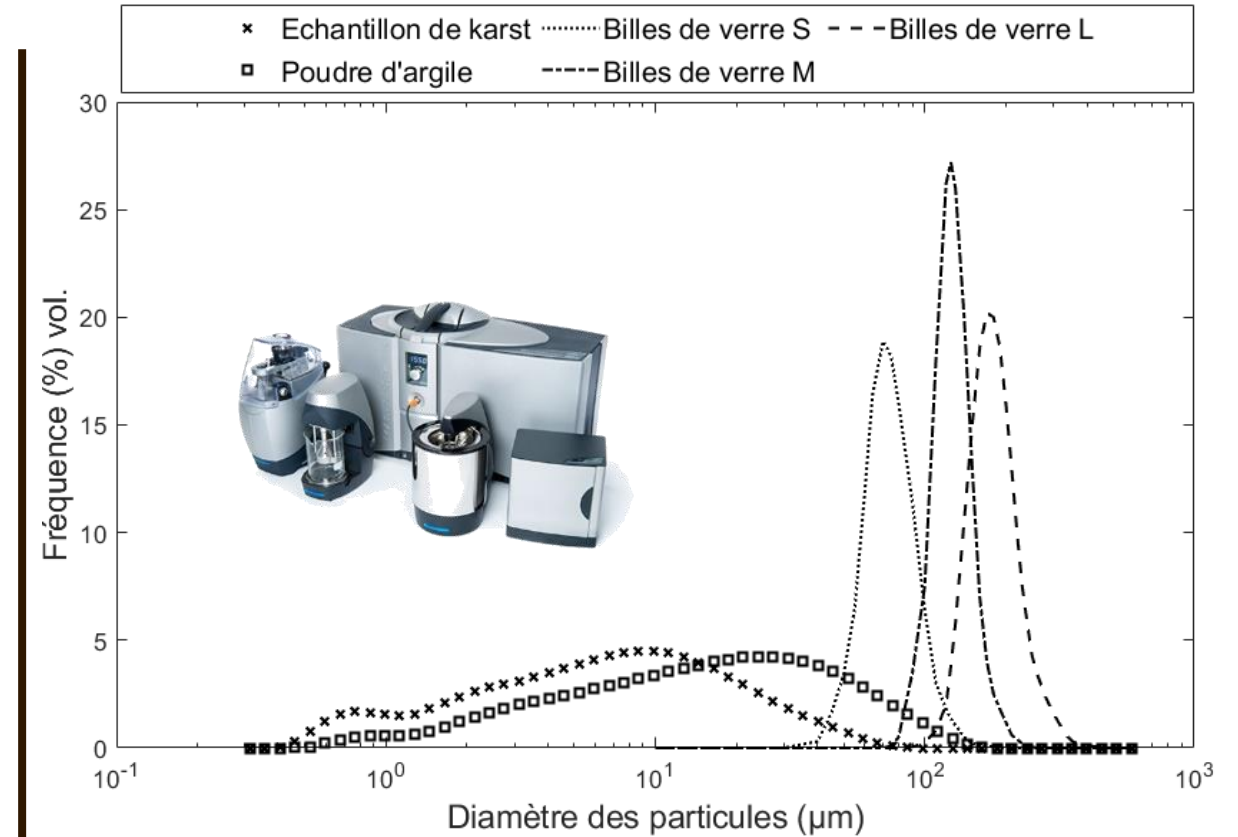
Caractérisation des sédiments : Echantillons d'expérimentation



➤ Billes de verre 100-200 μm
(image optique x200)



➤ Poudre d'argile tamisée 40 μm
(image optique x200)



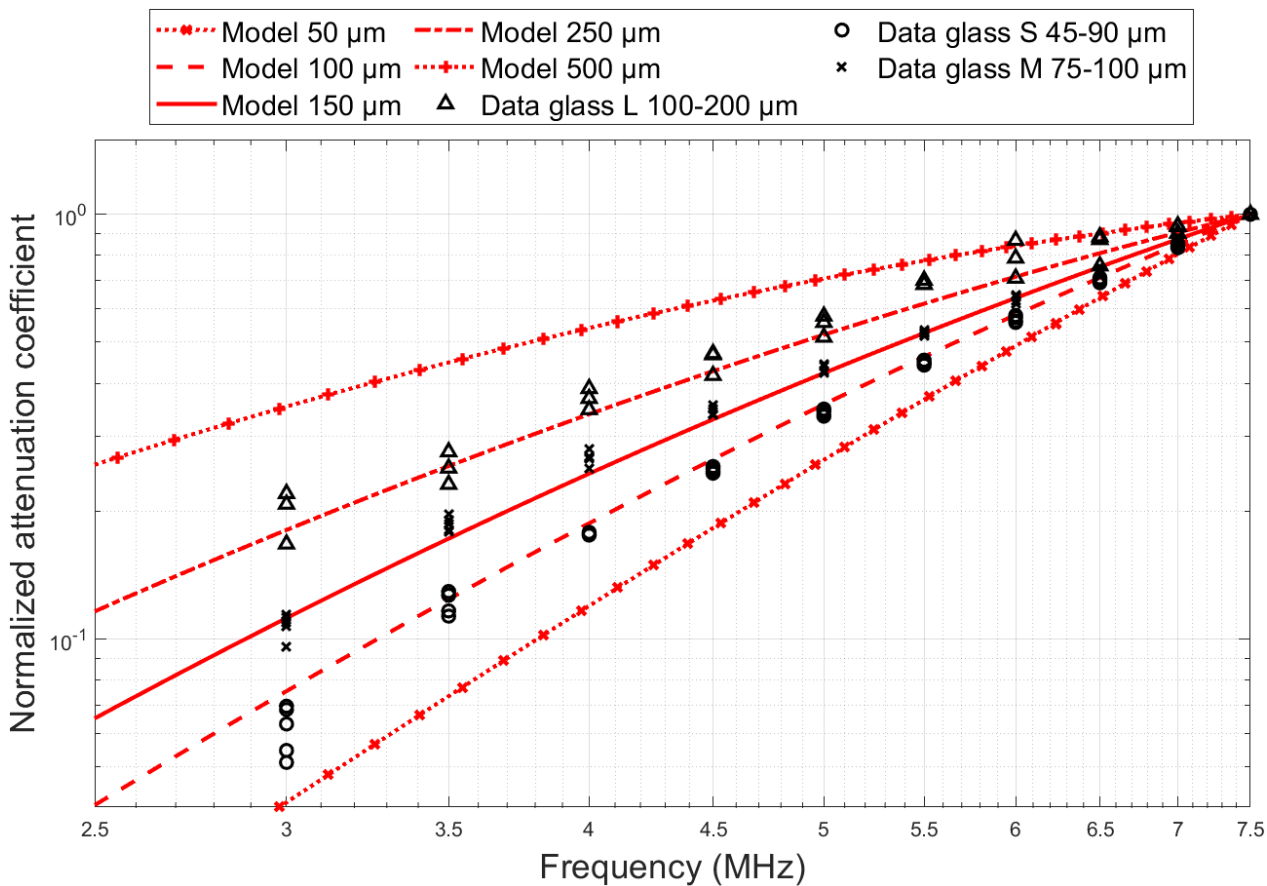
Paramètres de dispersion

Dv_{10}

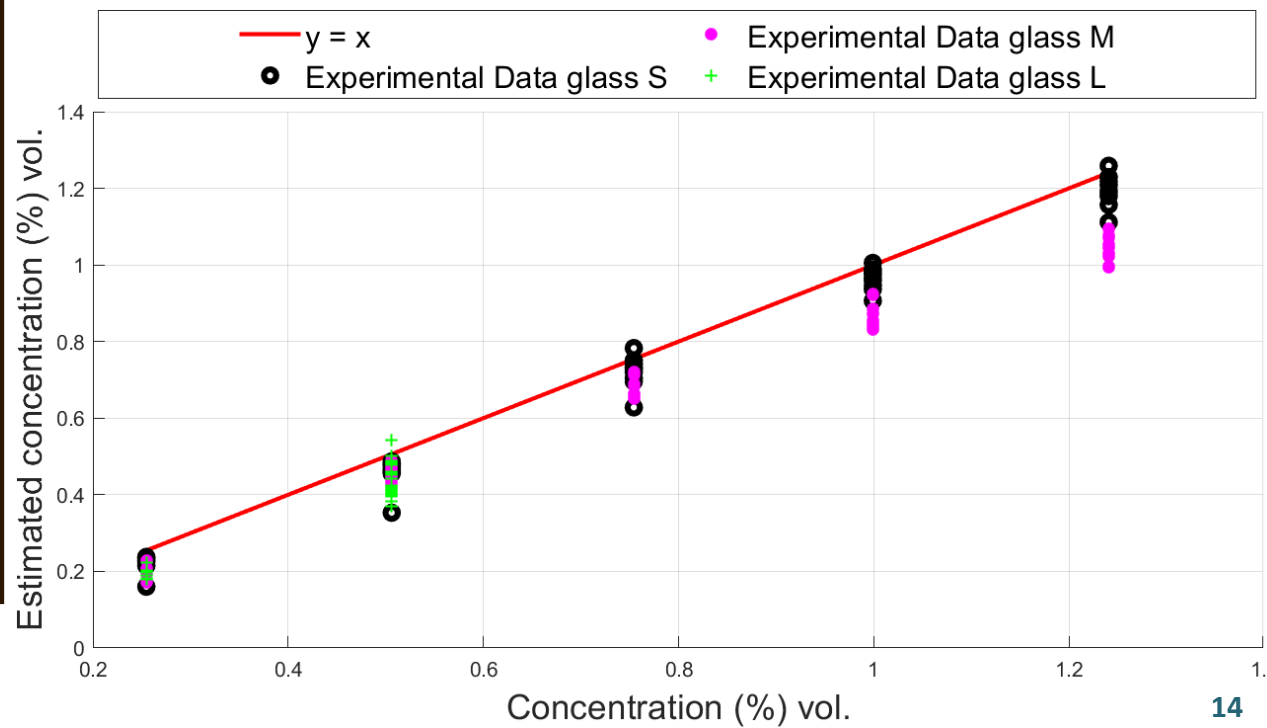
Dv_{50}

Dv_{90}

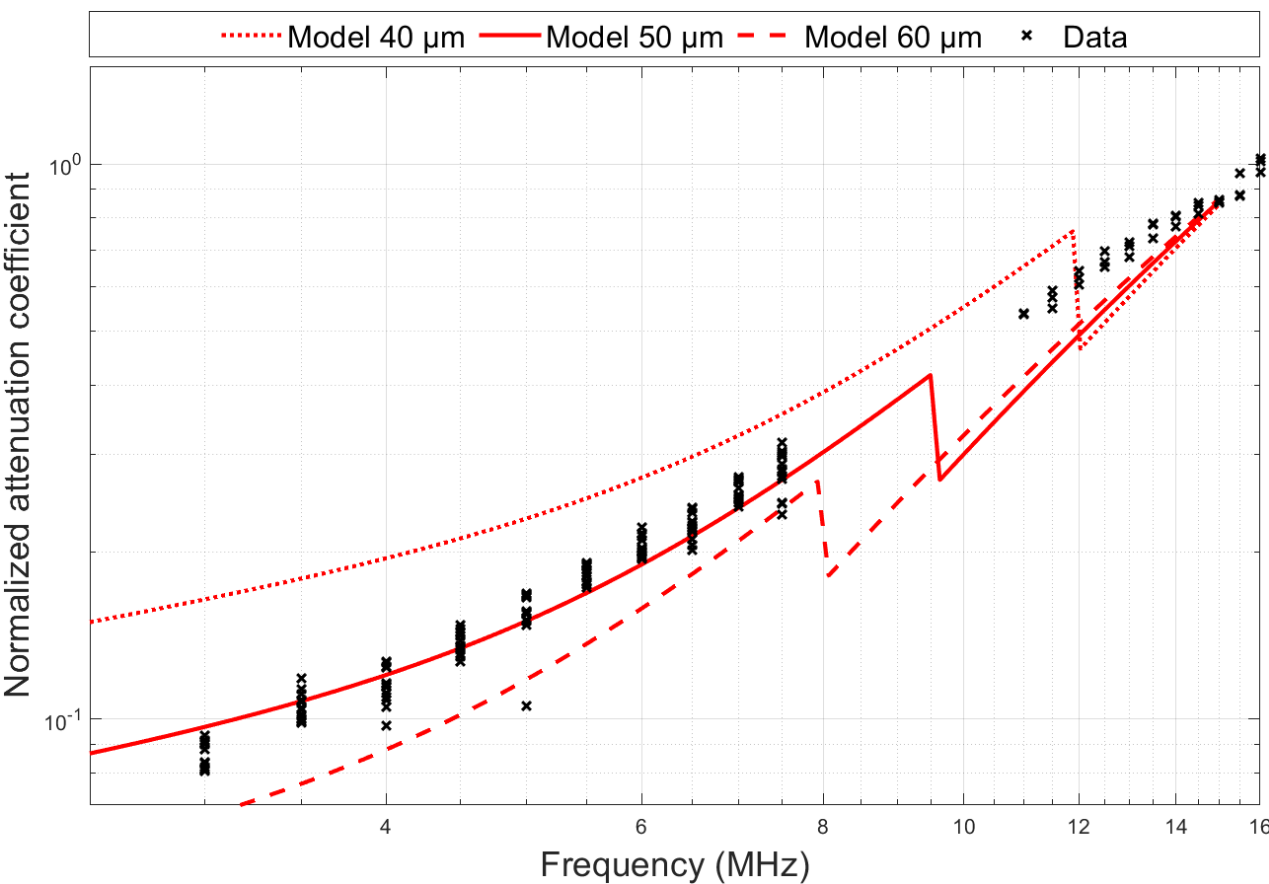
Caractérisation des sédiments : Résultats sur les billes de verre



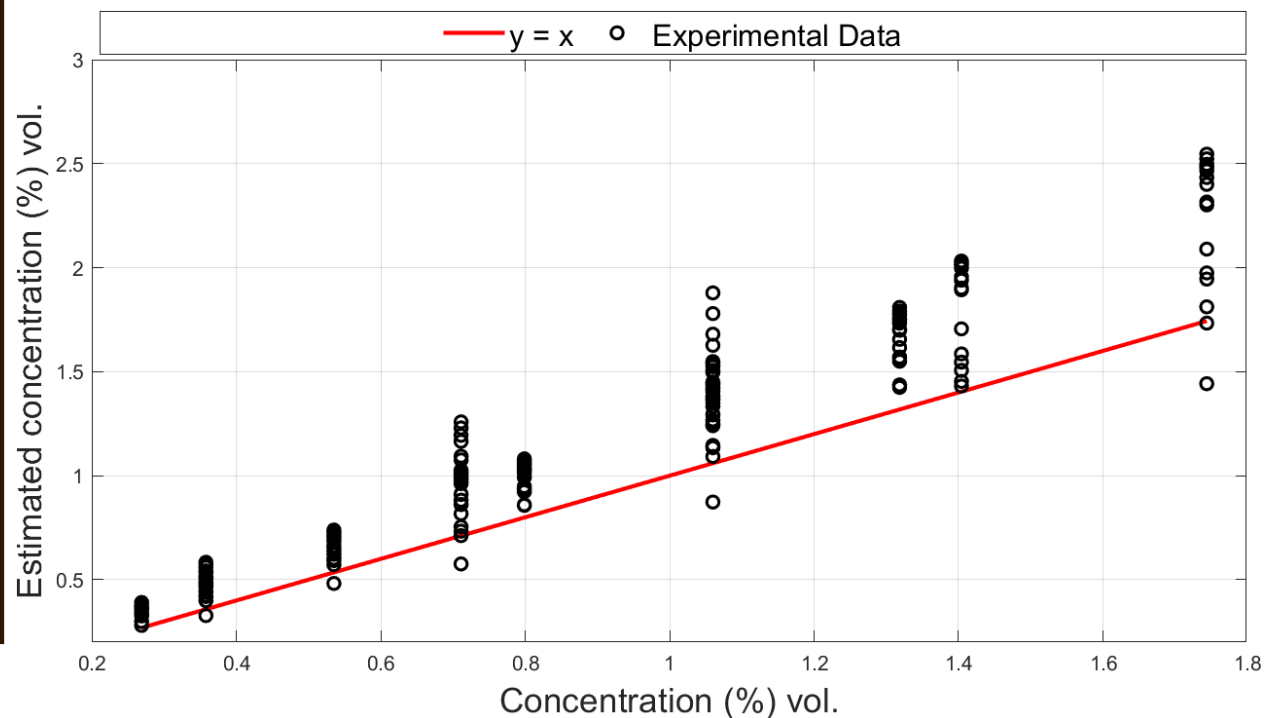
| | Dv90 [μm] | US [μm] |
|----------|------------------------|----------------------|
| S | 92 - 95 | 96 - 104 |
| M | 140 - 146 | 144 - 156 |
| L | 210 - 219 | 210 - 290 |



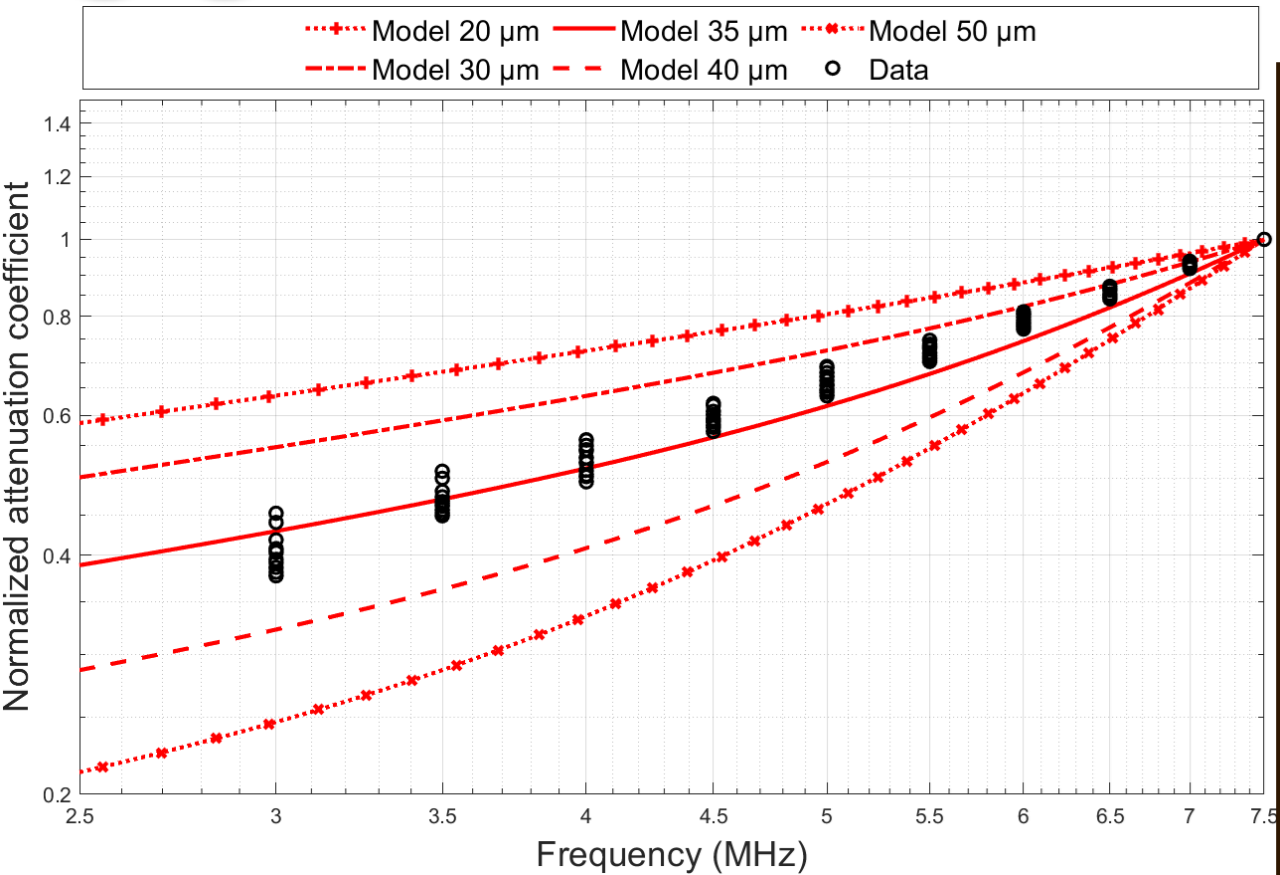
Caractérisation des sédiments : Résultats sur la poudre d'argile



| Dv90 [μm] | US [μm] |
|------------------------|----------------------|
| 53 - 62 | 46 - 54 |



Caractérisation des sédiments : Résultats sur l'eau turbide d'un karst



| Dv90 [μm] | US [μm] |
|------------------------|----------------------|
| 26 - 30 | 30 - 40 |



| Concentration [%vol] | US [%vol] |
|----------------------|-----------|
| 2.5 | 2.24 |

Conclusion : Effet des sédiments et caractérisation de l'eau turbide

Checklist

- Sélection du modèle
- Outil de prédiction du niveau de pertes
- Banc de caractérisation de sédiments
- Approche simple et efficace pour la mesure de l'atténuation
- Traitement simple pour l'estimation
- Preuve de faisabilité d'un dispositif embarqué



Compréhension
du milieu

Conception du
système

Validation



Compréhension du milieu

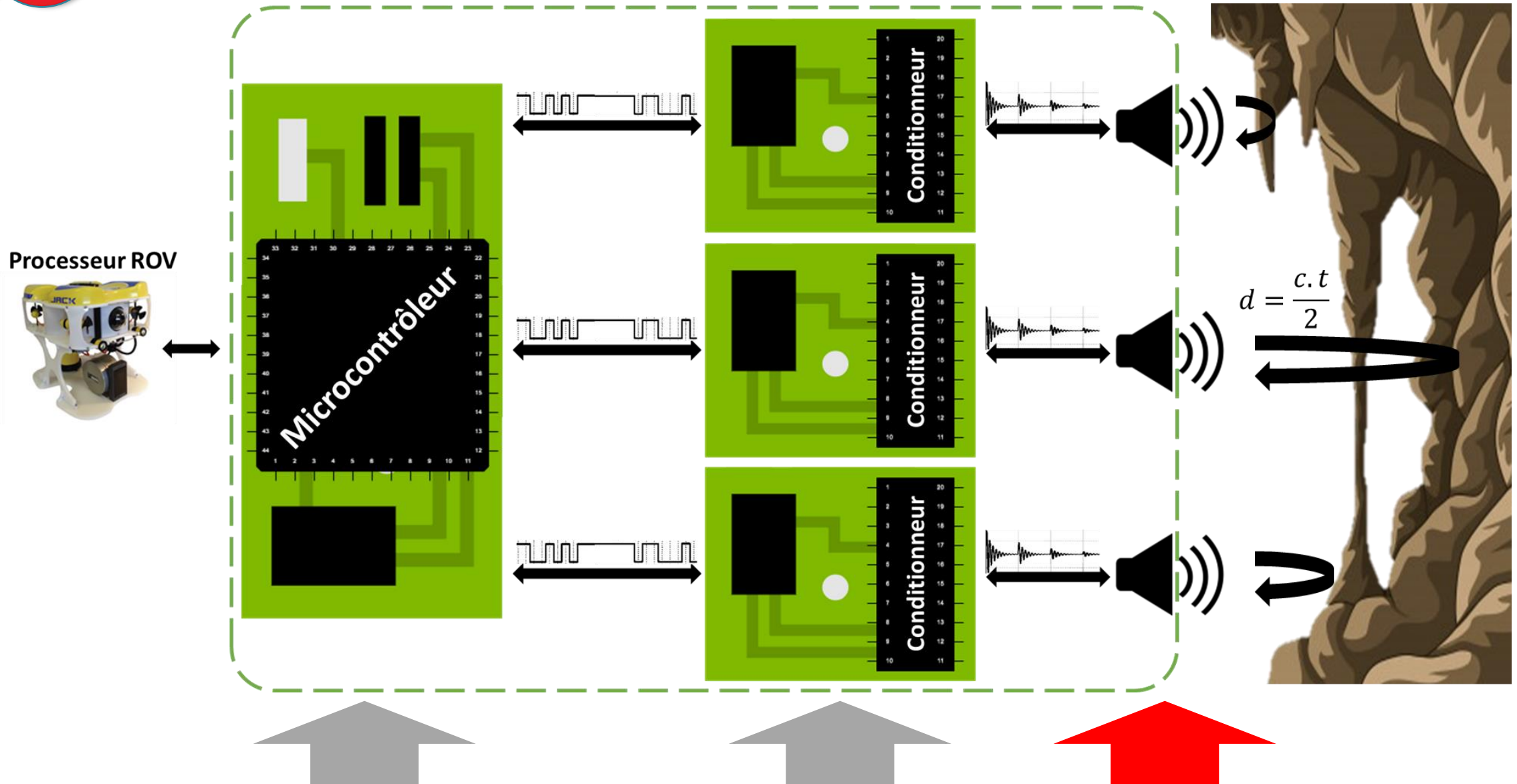
Conception du système

Validation

Conclusion générale

- Architecture du système
- Choix des capteurs
- Sélection de l'électronique
- Architecture Software
- Conclusion

Architecture du système : Chaîne d'acquisition



Choix des capteurs : Equation du sonar

Choix de capteur ⇔ Portée de l'onde

Equation du sonar

$$SL - TS - 2TL - NL + DI + GT \geq DT$$

200 dB

Niveau d'émission

SL

$- TS$

$- 2TL$

$- NL$

$+ DI$

$+ GT$

$\geq DT$

Seuil de détection

-5 à -15 dB

-3 à -10 dB

Indice de cible

TS

Niveau de bruit

0 dB

$2TL$

NL

DI

GT

DT

Gain électronique

20 à 40 dB

Pertes de transmission

Fréquence

Portée

Diamètre

Indice de directivité

20 à 26 dB

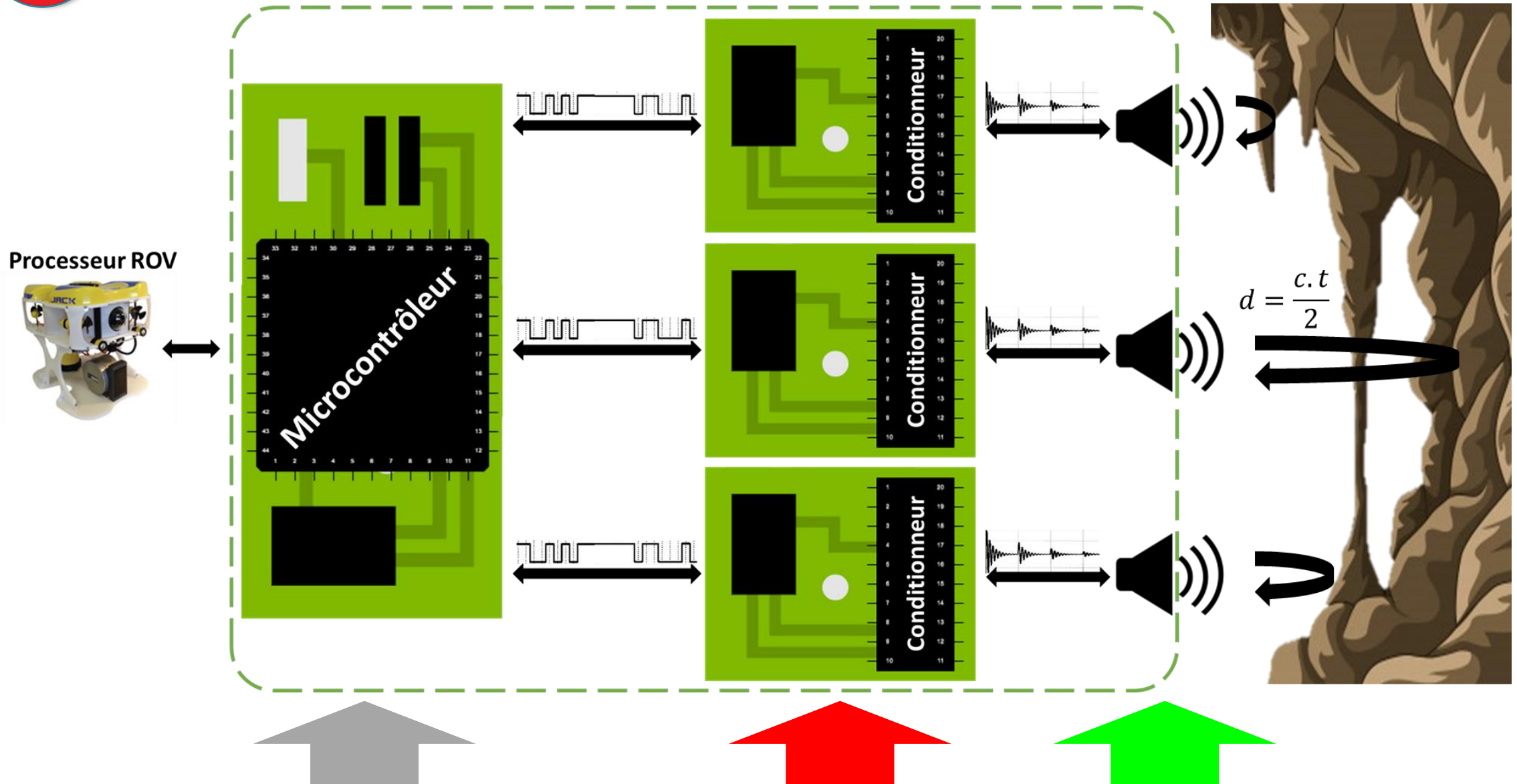
Fréquence

Diamètre

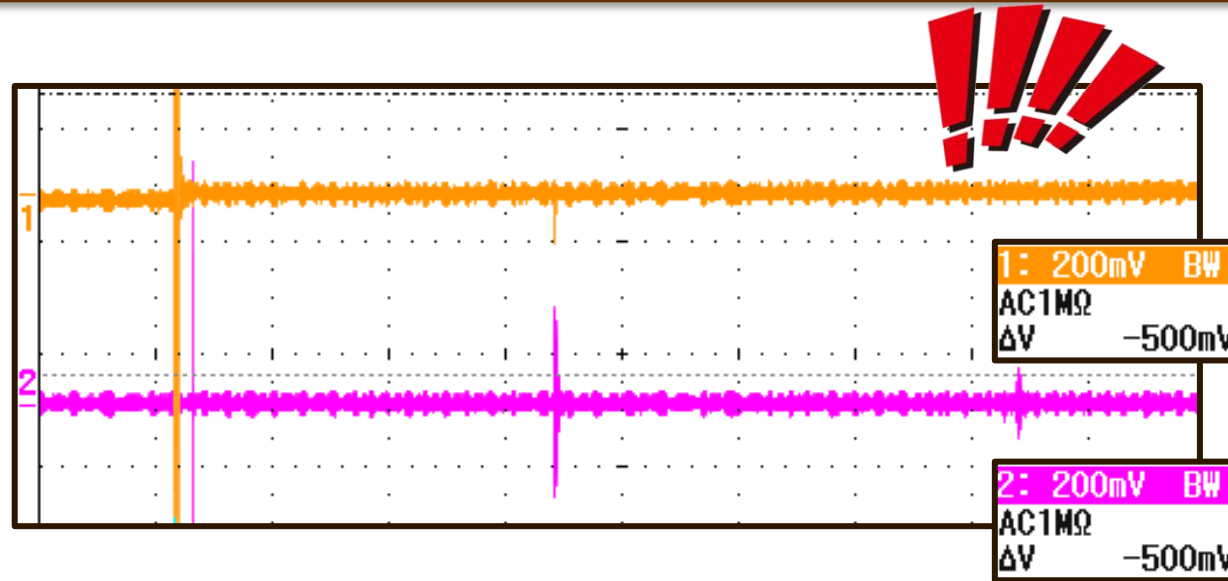
- Atténuation dans l'eau
- Atténuation à travers les sédiments
- Divergence géométrique

Portée maximale : 4 m
Fréquence : 0,5 à 1 MHz
Diamètre : 1,5 à 6 cm

Architecture du système : Chaîne d'acquisition



Choix de l'électronique : Pour une mesure automatique de distance



- **Signal :**
 - Faible
 - Bruité
- **Information utile :**
 - Fortement atténuée
 - Difficilement localisable

Conditionnement adapté

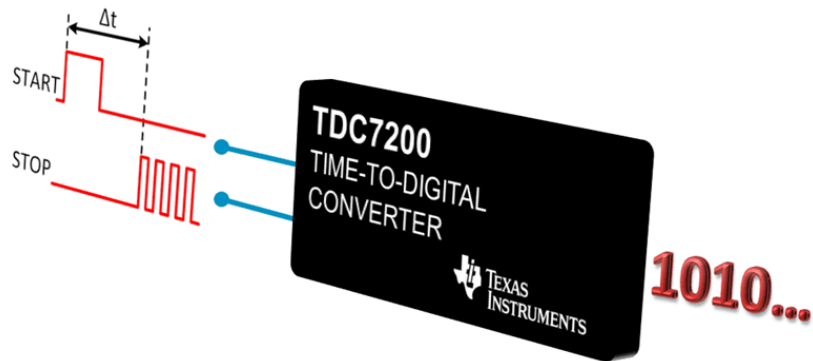
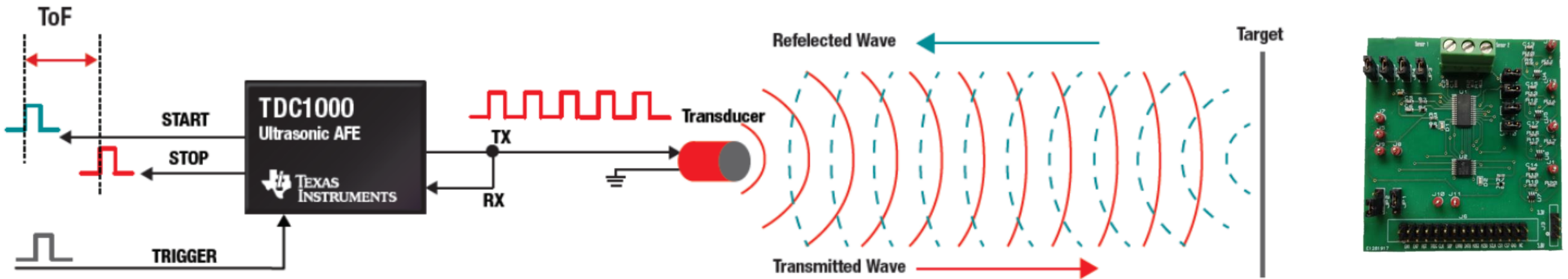
Débruitage et amplification du signal

Mesure automatique

Numérisation et communication

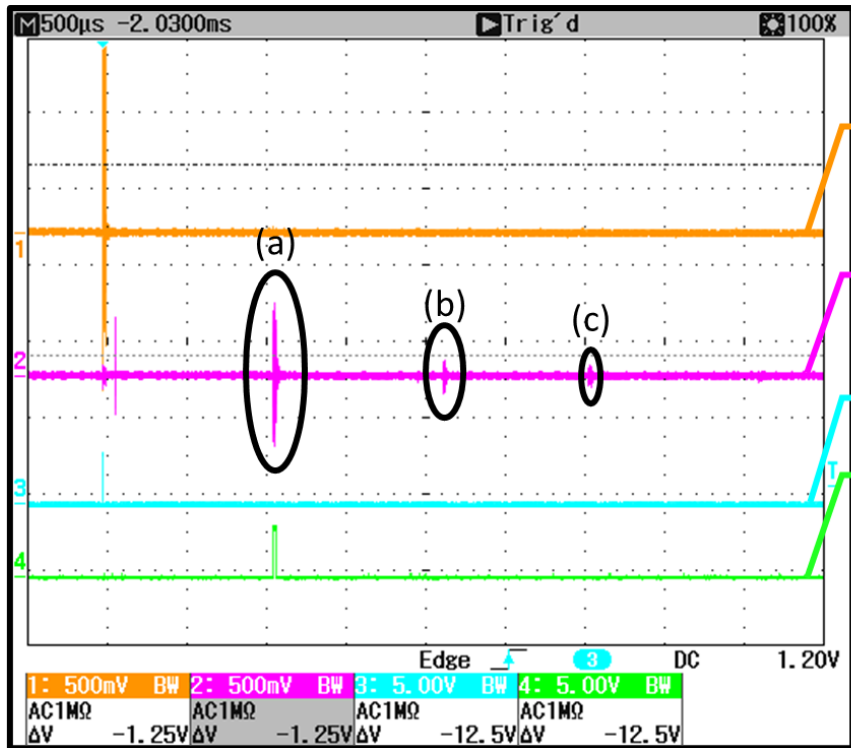
Tout en prenant compte des contraintes de l'application embarquée !

Choix de l'électronique : Les composants TDC



- **Avantages :**
 - Couvre les plages de portée / fréquence visées
 - Conditionnement du signal à l'émission
 - Conditionnement à la réception jusqu'au calcul du TOF (temps de vol)
 - Composants programmables offrant une possibilité de modification dynamique des paramètres de mesure

Choix de l'électronique : Difficultés liées à la détection



Sensor

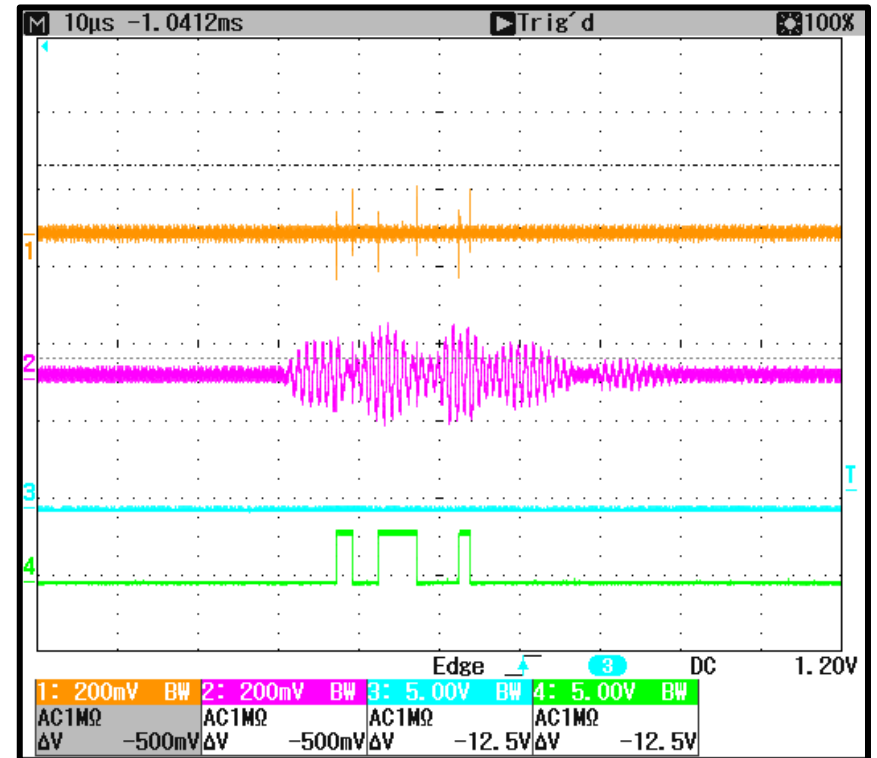
COMPIN

START

STOP

Nombre d'échos détectés :

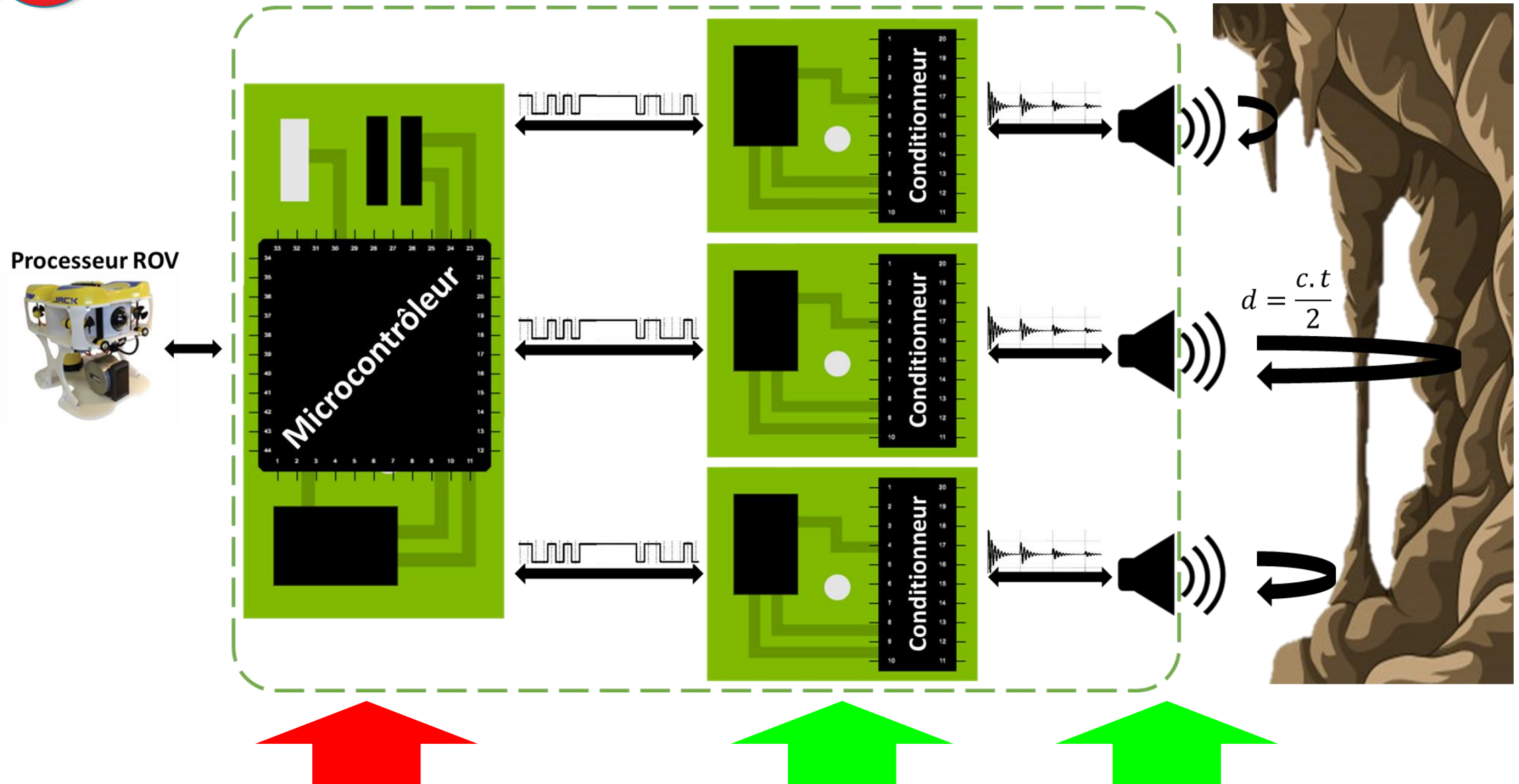
- Seuil ?
- Gain ?



Détection :

- de plusieurs réflexions successives
- de réflexion diffuse

Architecture du système : Chaîne d'acquisition





Architecture Software : Optimisation des performances



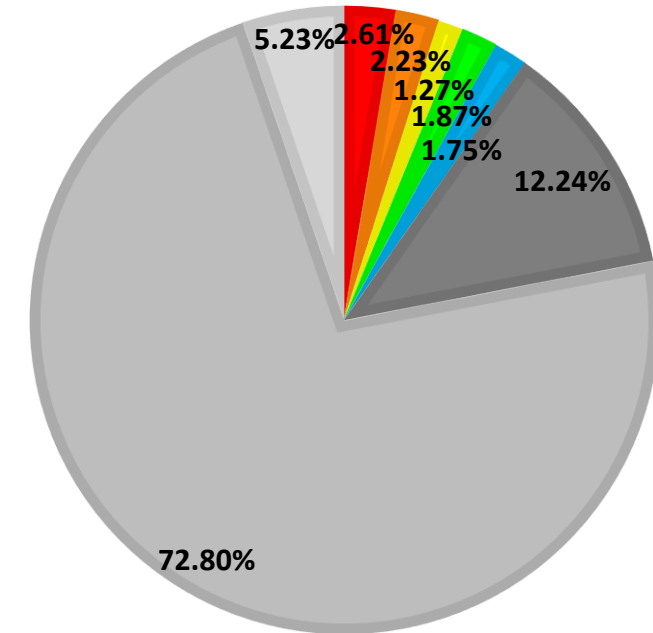
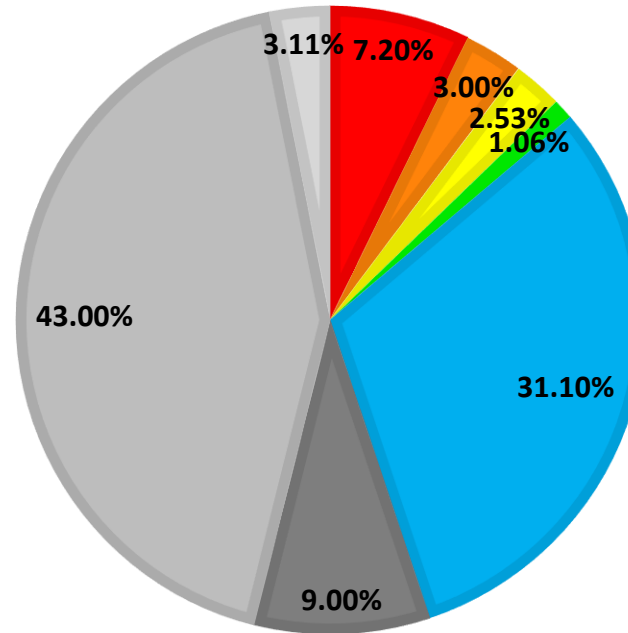
100 ms



STM32L4

$f_{sys} = 48 \text{ MHz}$

■ Task 1 ■ Task 2 ■ Task 3 ■ Task 4 ■ Task 5 ■ Tracage ■ Libre ■ Autre



Pour 1 cycle/50 ms ?

≈ 2 cartes

≈ 10 cartes

Pour 1 cycle/100 ms ?

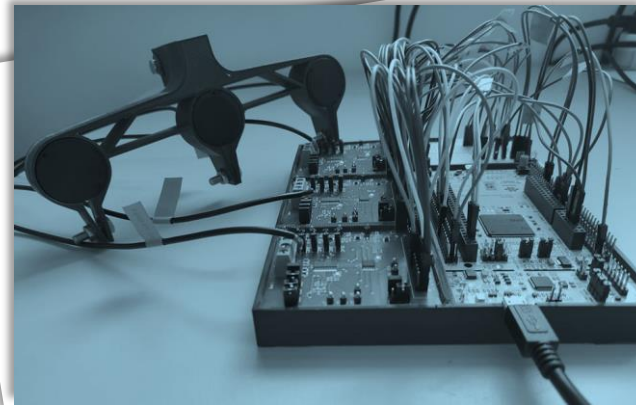
> 4 cartes

> 20 cartes

Conclusion : Chaîne d'acquisition pour système de mesure de distance

Checklist

- Choix de capteurs (0,5-1 MHz ; 1,5-6 cm)
- Mise en place de l'électronique de conditionnement
- Développement d'un programme avec OS temps réel
- Mise en place d'un système complet autonome et reconfigurable
- Niveau de performance : jusqu'à 20 capteurs pour 1 cycle / 100 ms
- Prototype opérationnel



Compréhension
du milieu

Conception du
système

Validation



Compréhension du milieu

Conception du système

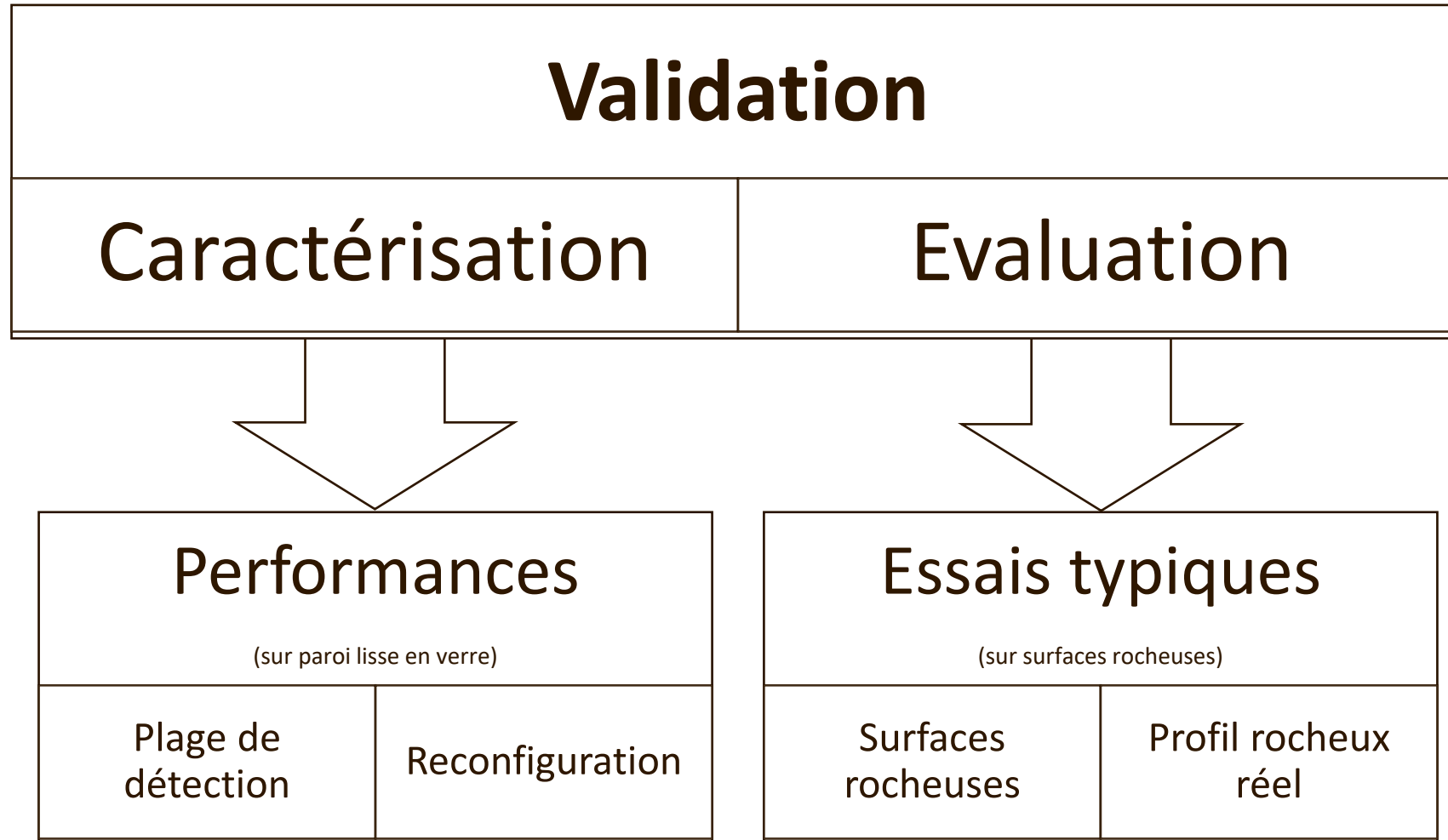
Validation

Conclusion générale

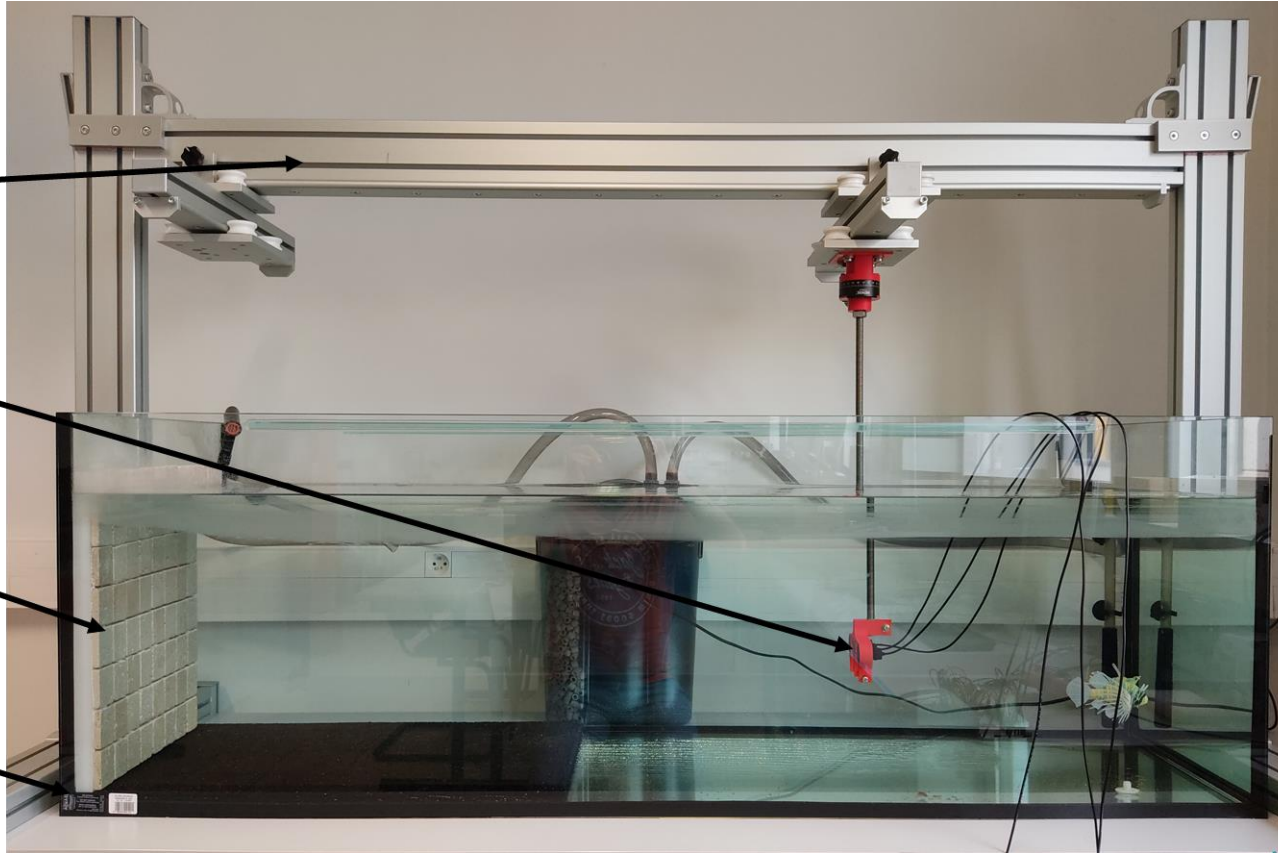
- Banc de test
- Caractérisation du système
- Validation sur surfaces rugueuses
- Conclusion



Validation :



Banc de test



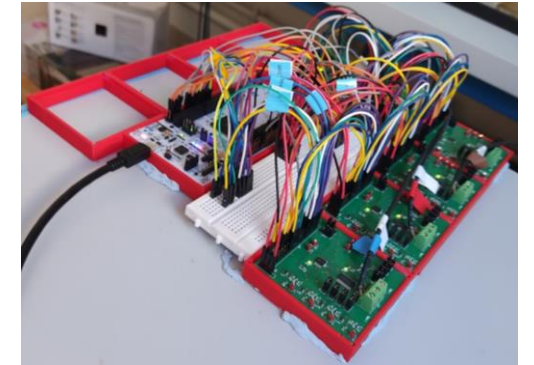
Portique de déplacement

Réseau de capteurs

Obstacle à détecter

Cuve d'expérimentation

➤ Banc mécanique

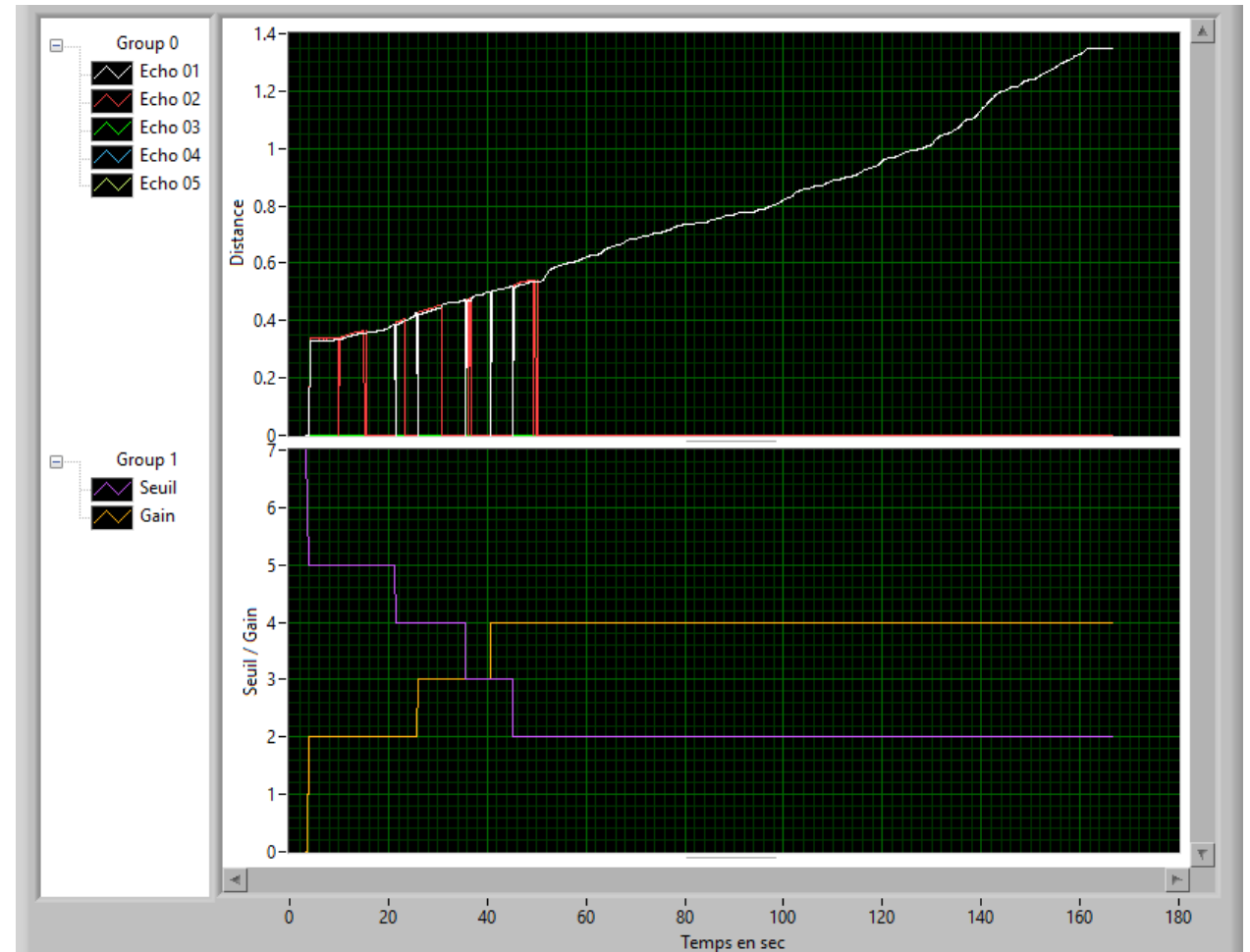
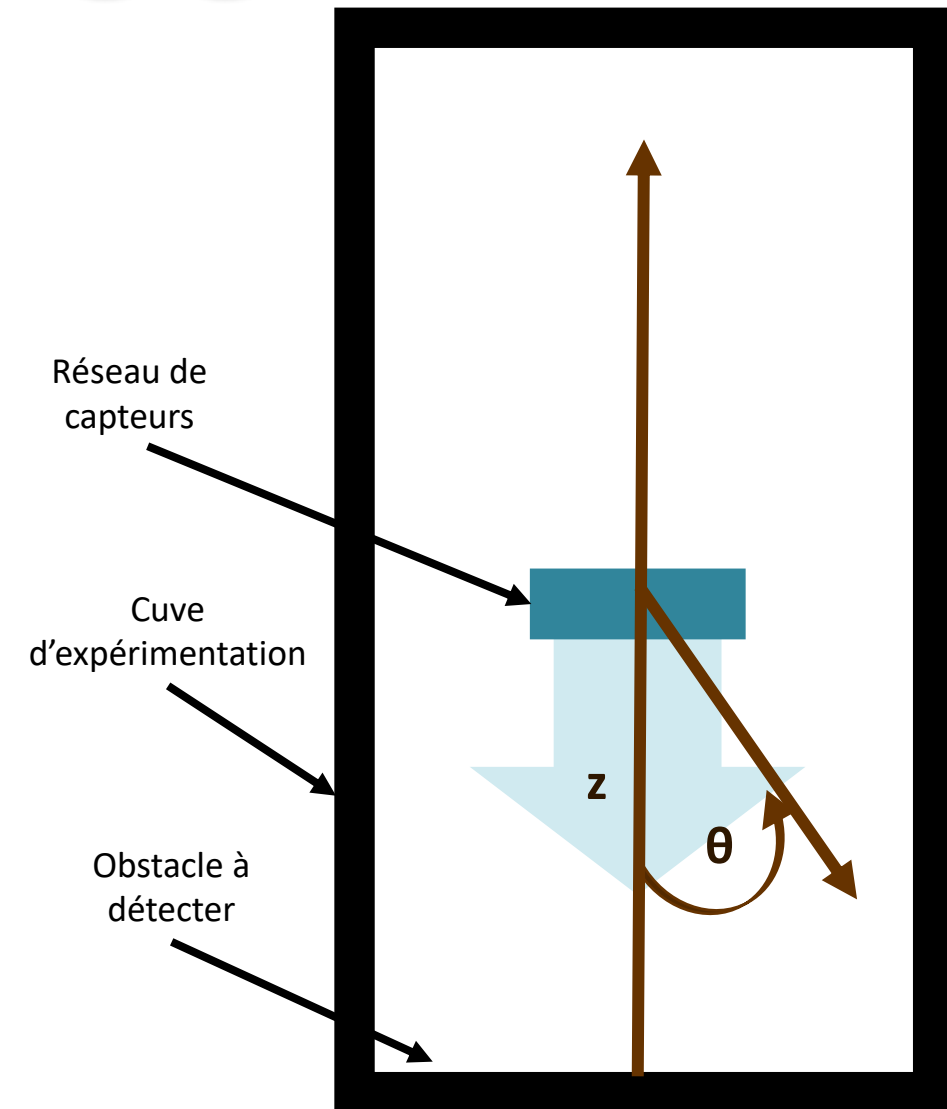


➤ **Electronique du Bouclier Acoustique**



➤ **Interface d'acquisition**

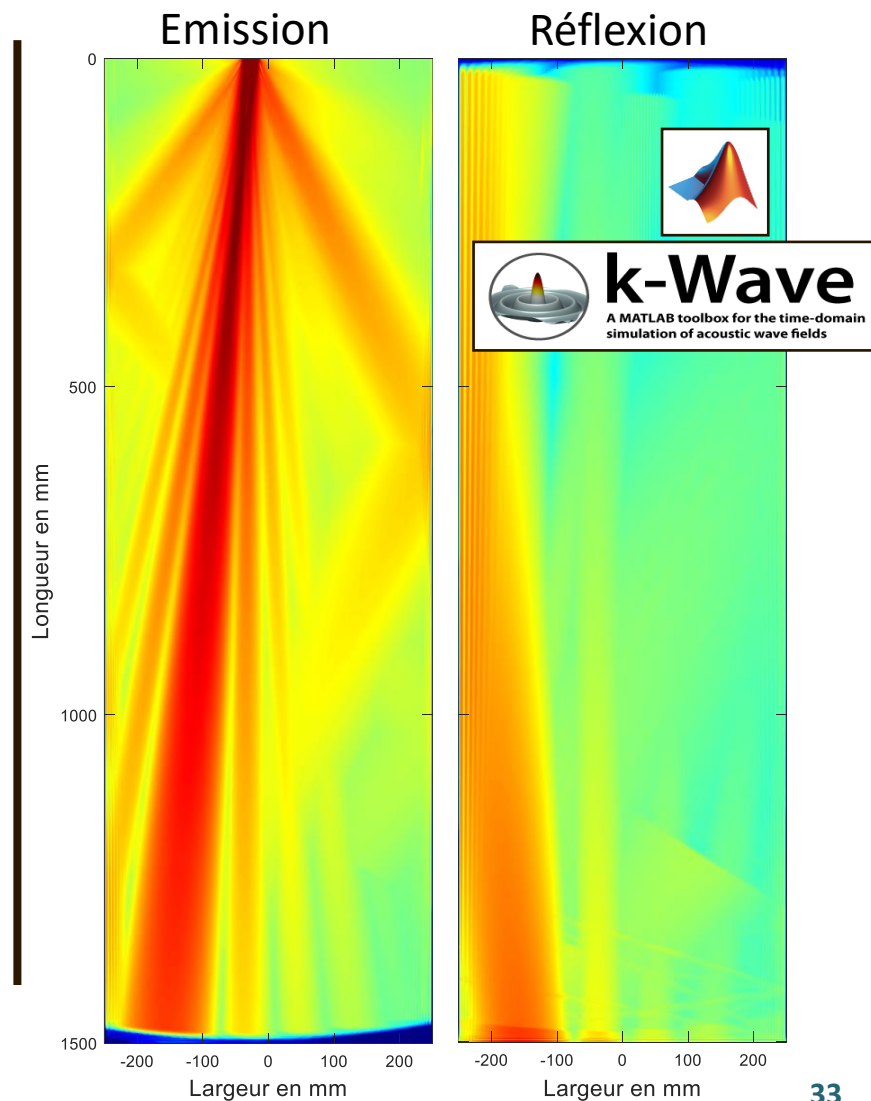
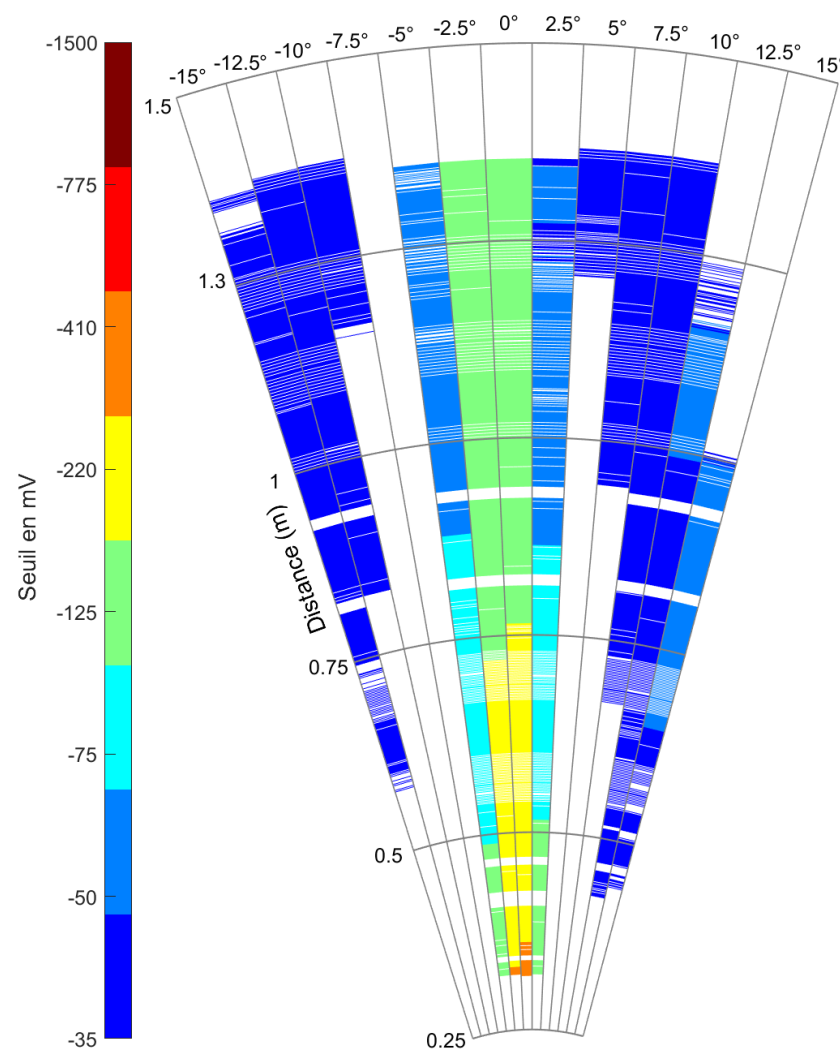
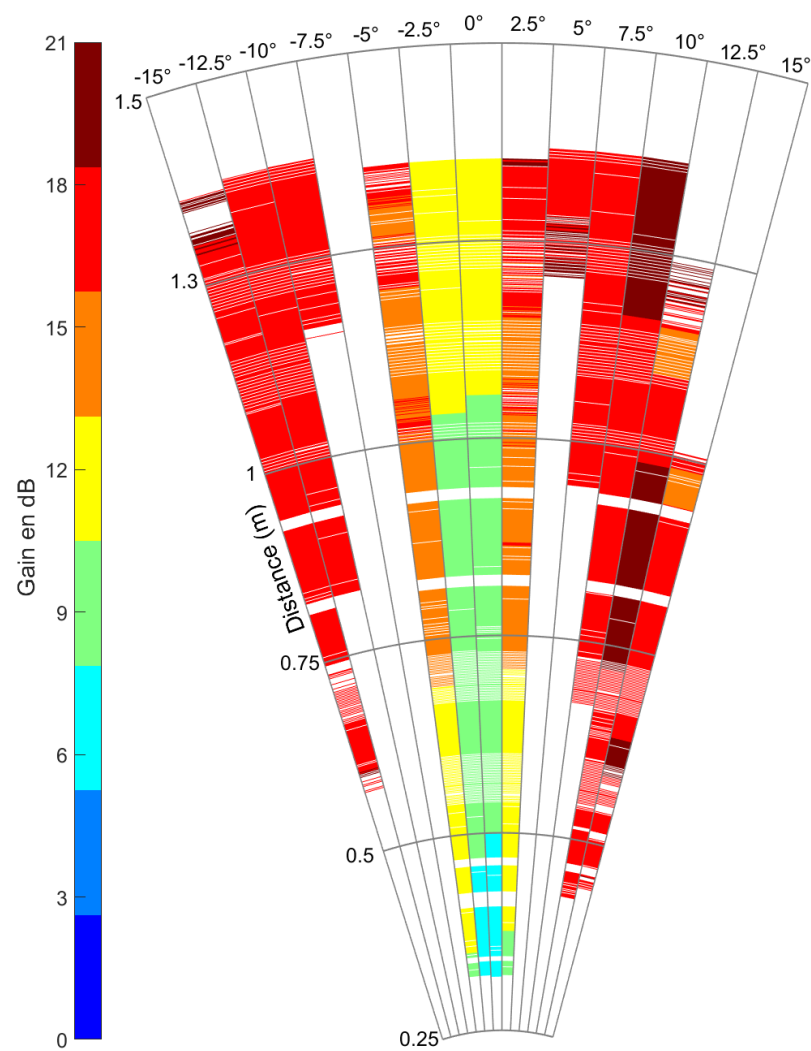
Caractérisation du système



➤ Données acquises

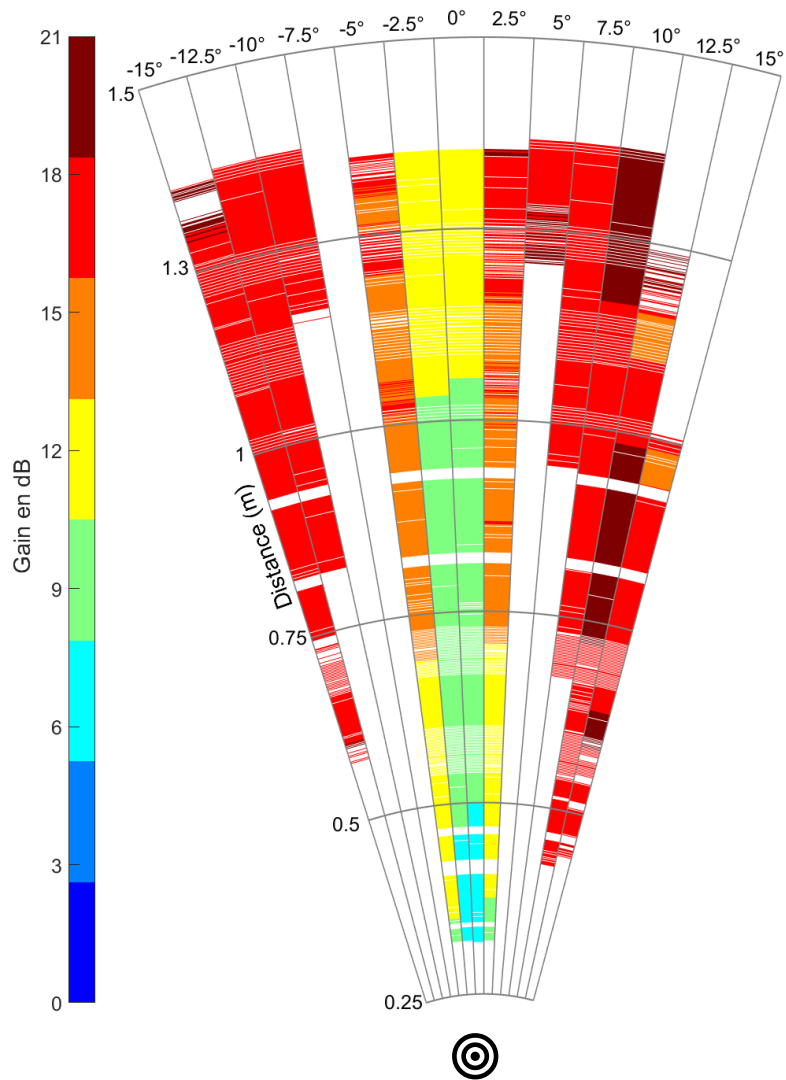
Caractérisation du système : Avec 1 seul capteur

Autoconfiguration du seuil et du gain

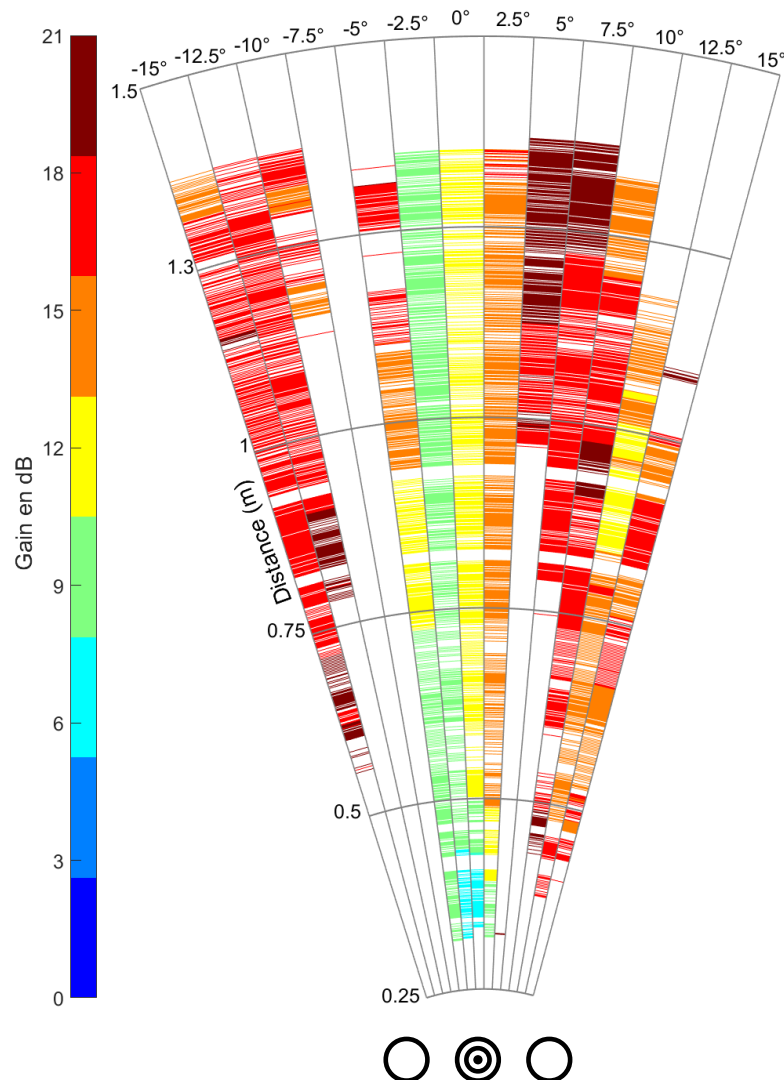


Caractérisation du système : Avec trois capteurs

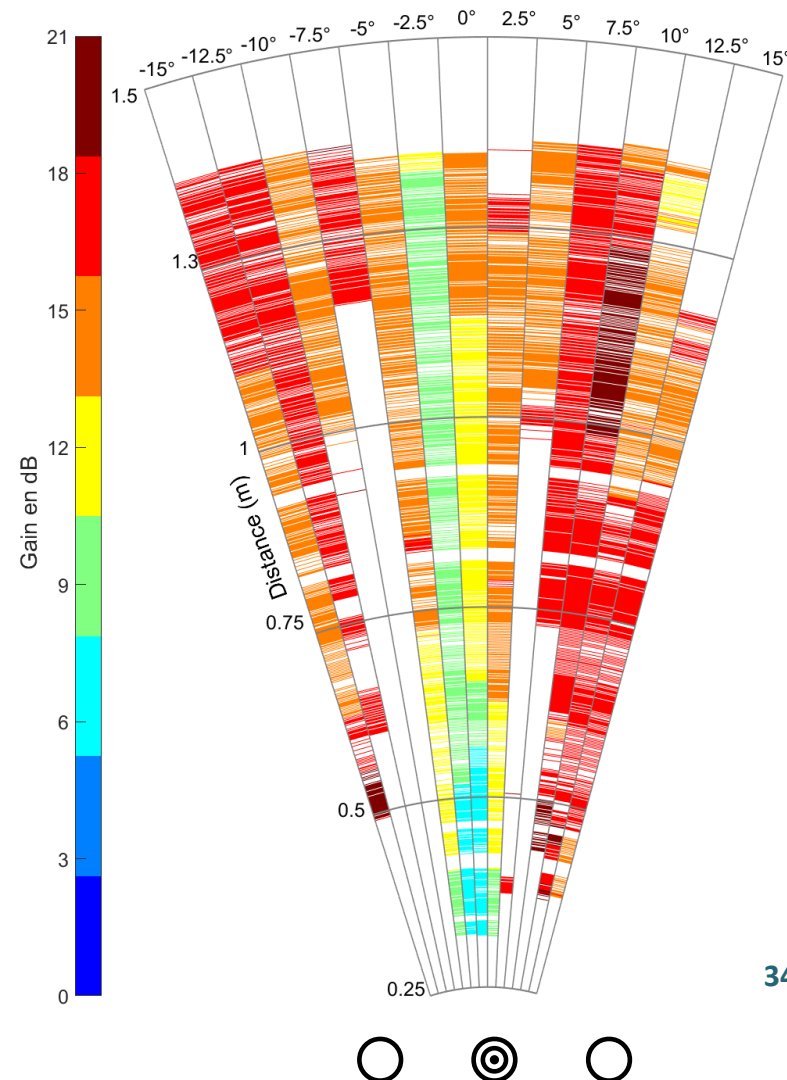
1 capteur



3 capteurs / 3 cm

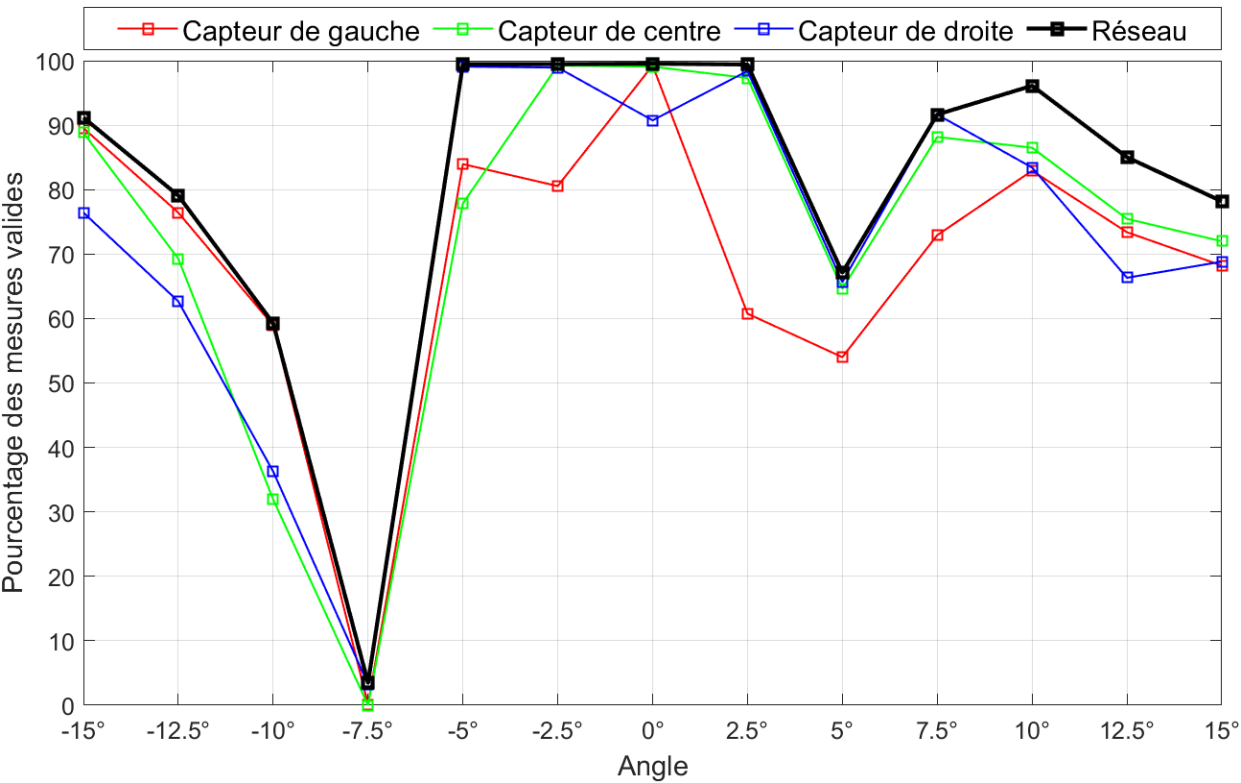


3 capteurs / 5 cm

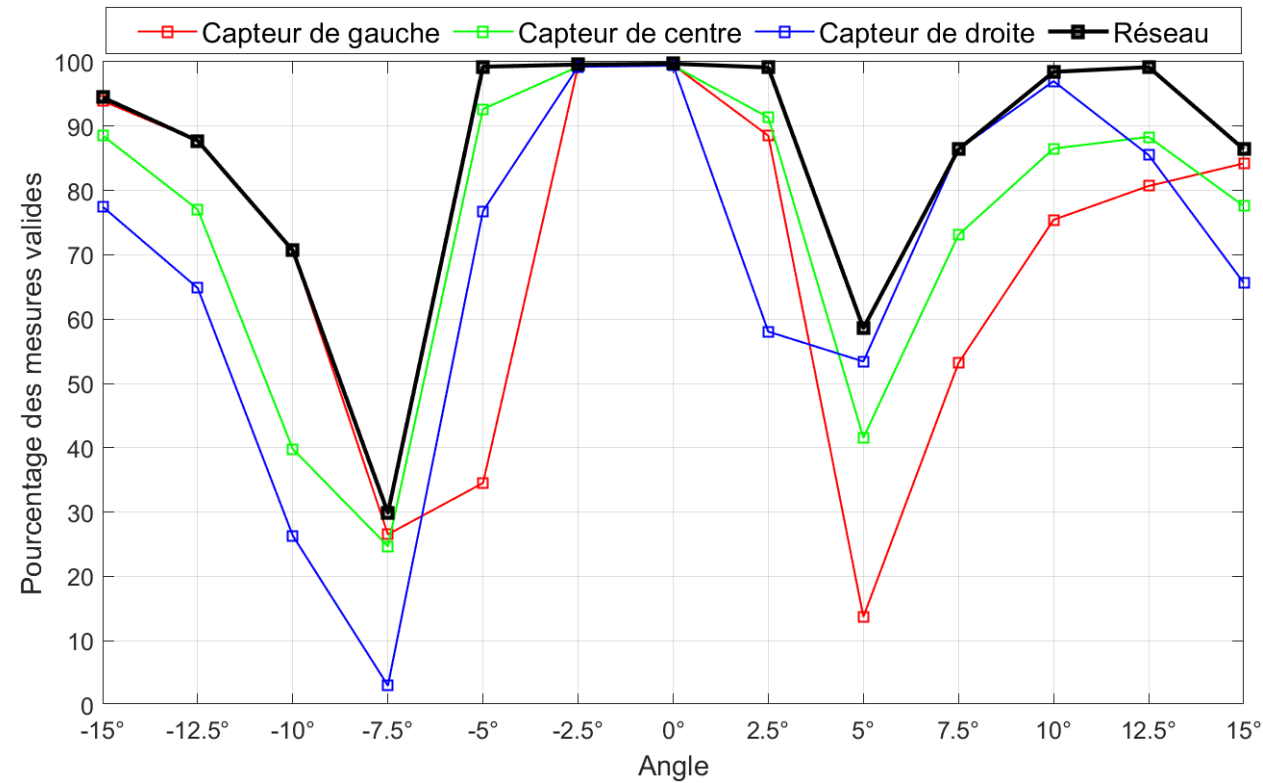


Caractérisation du système : Avec trois capteurs

3 capteurs / 3 cm



3 capteurs / 5 cm



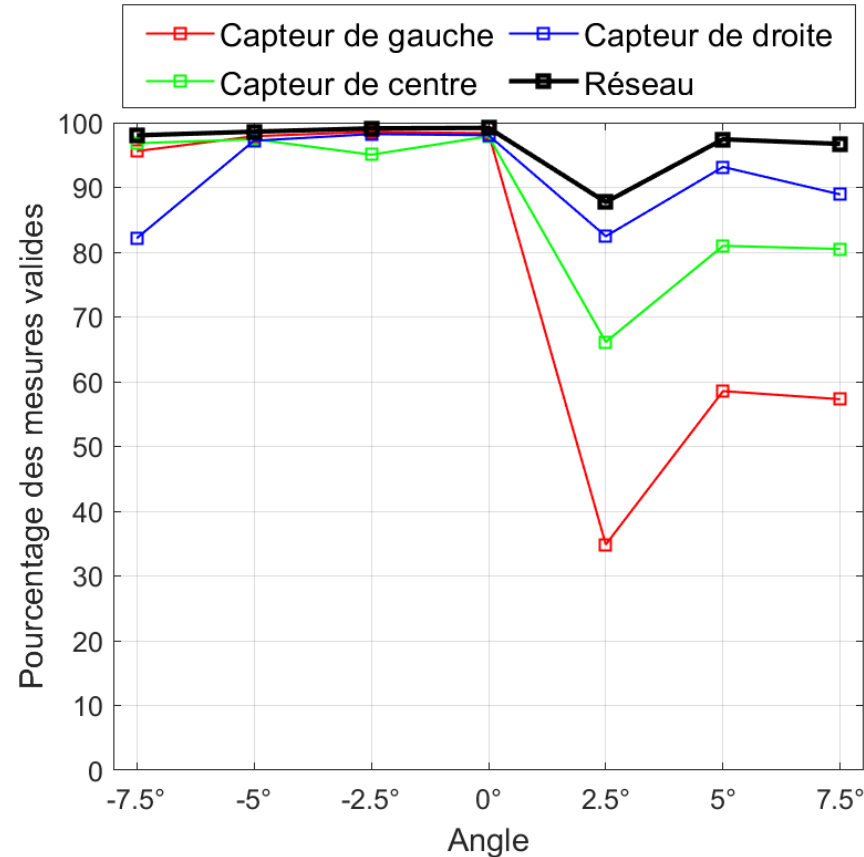
$$\% \text{ de mesures valides} = \frac{\text{nombre d'aquisitions justes}}{\text{nombre total}}$$

Validation sur surfaces rugueuses : Paroi plane et rugueuse

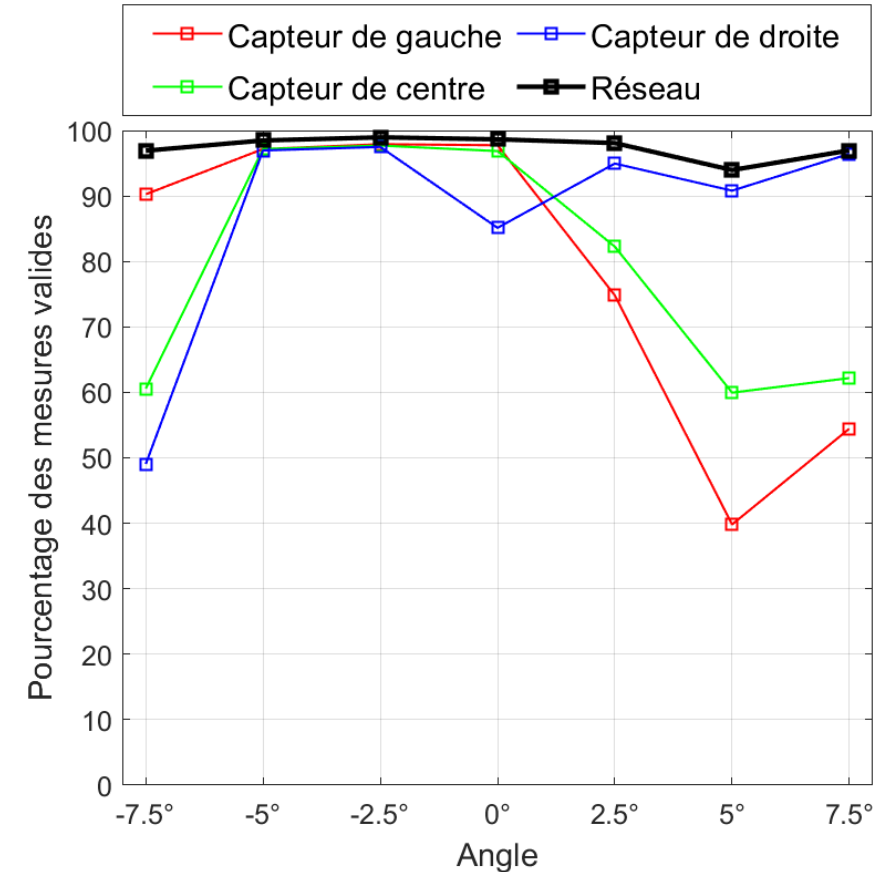


➤ Plan rocheux de travertin, poreux et rugueux

3 capteurs / 3 cm



3 capteurs / 5 cm

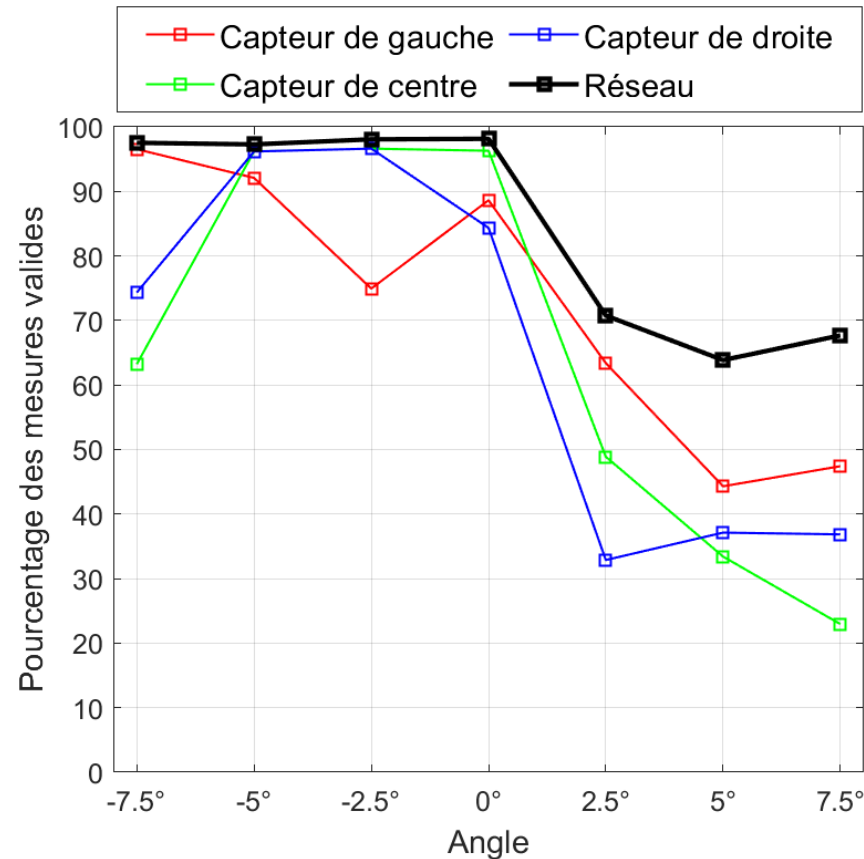


Validation sur surfaces rugueuses : Paroi irrégulière

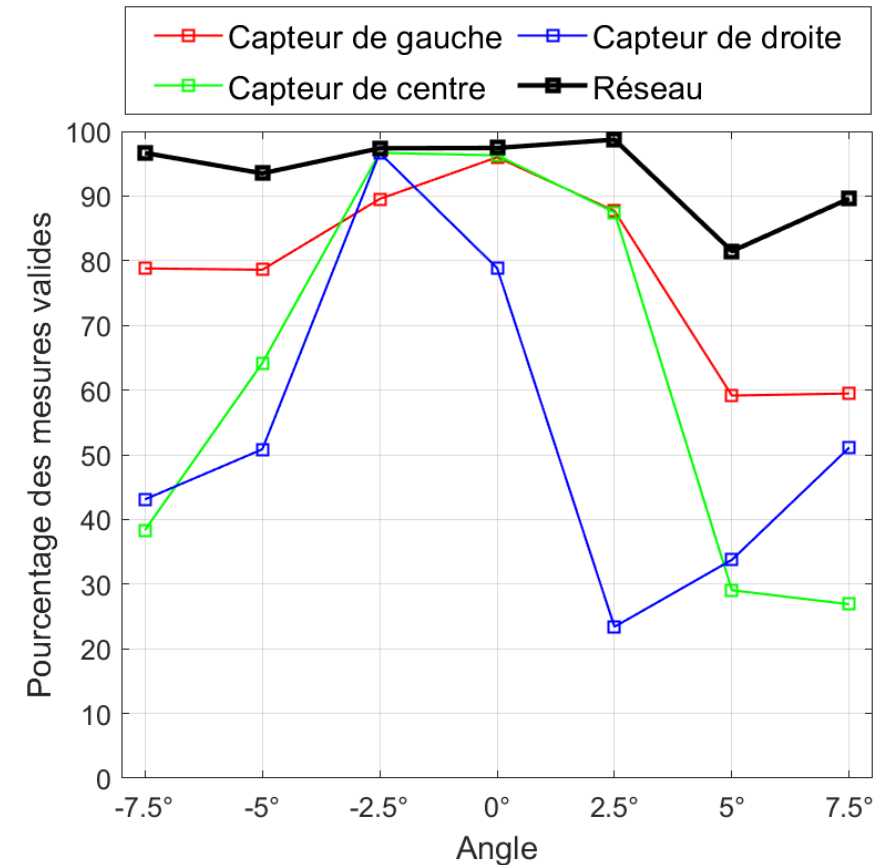


➤ Plan rocheux de quartzite sédimentaire, irrégulier et rugueux

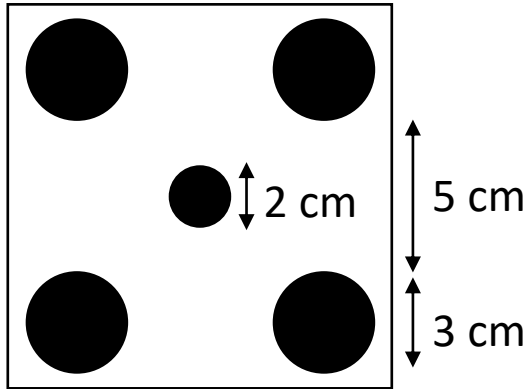
3 capteurs / 3 cm



3 capteurs / 5 cm



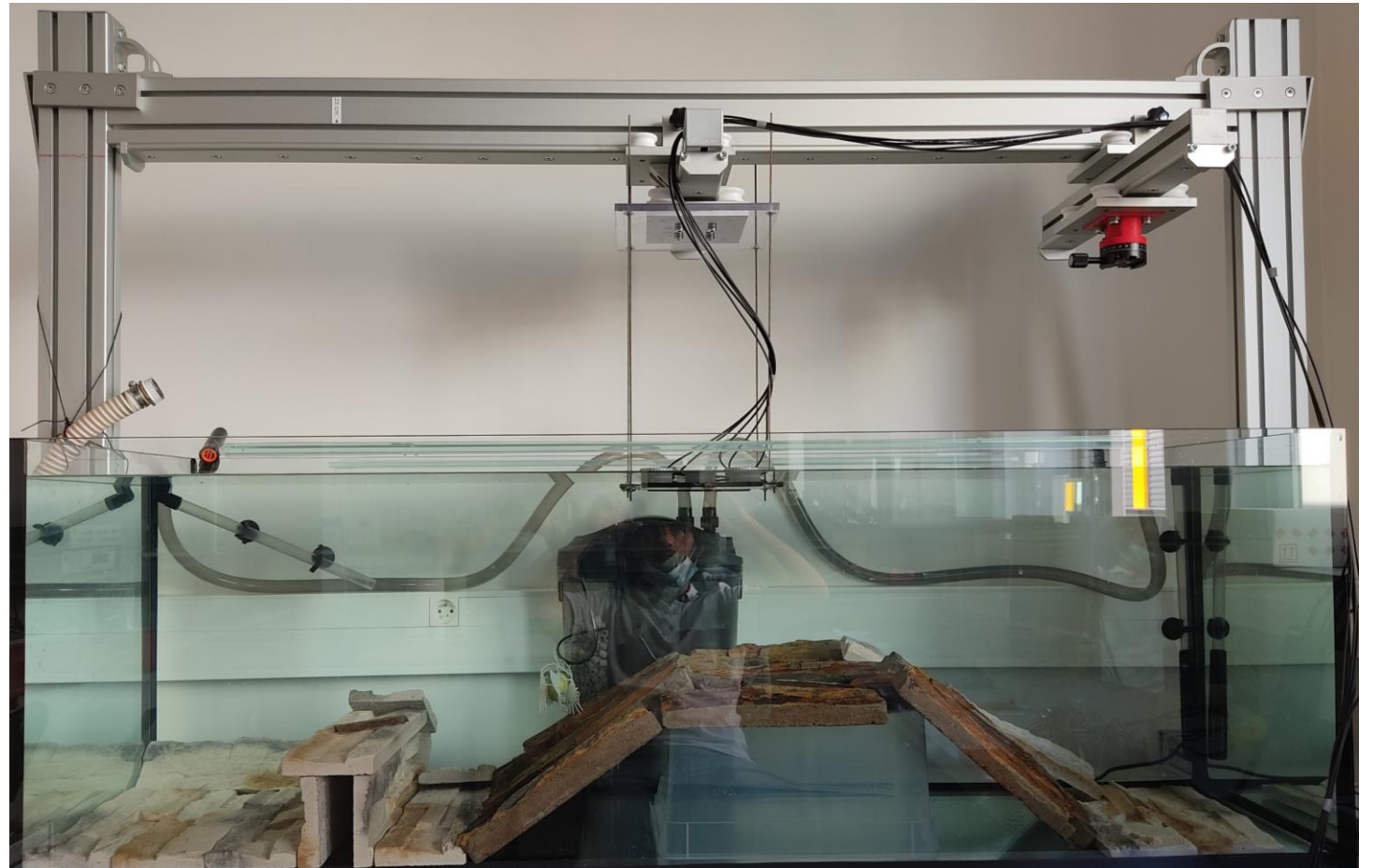
Validation sur surfaces rugueuses : **Traçage d'un profil**



- Géométrie de la structure
5 capteurs



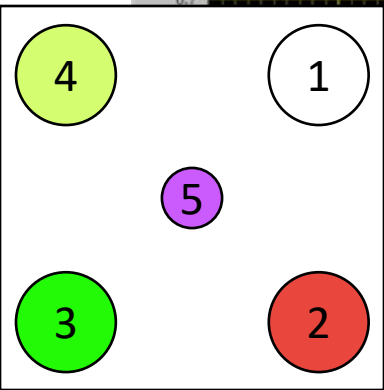
- Structure 5 capteurs
fabriqués au laboratoire



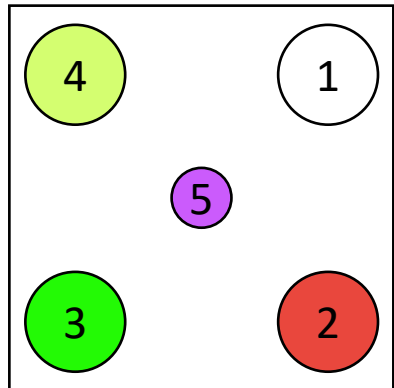
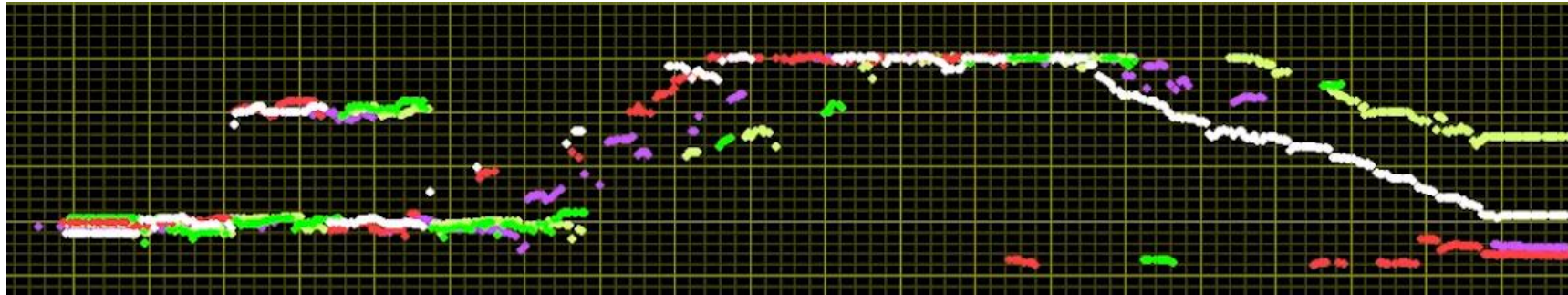
- Profil rocheux variable



Validation sur surfaces rugueuses : **Traçage d'un profil**



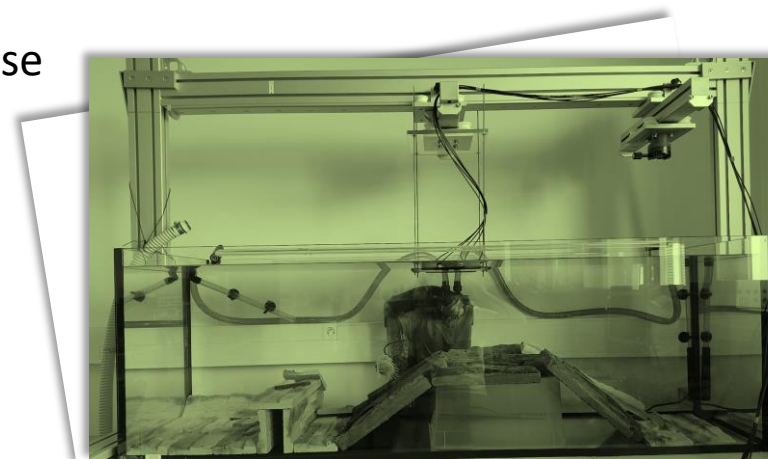
Validation sur surfaces rugueuses : **Traçage d'un profil**



Conclusion : Performances de détection

Checklist

- Portée validée à 1,5 m et estimée au moins jusqu'à 5 m
- Plage de détection angulaire à $\pm 5^\circ$ environ sur paroi lisse
- Détection sur des parois rocheuses, rugueuses et irrégulières
- Plage angulaire élargie par la réflexion diffuse
- Reconstitution d'un profil type



Compréhension
du milieu

Conception du
système

Validation



Compréhension du milieu

Conception du système

Validation

Conclusion générale

- **Conclusion**
- **Perspectives**

Conclusions :

Checklist

Système de caractérisation

- Outil de prédiction du niveau de pertes dans l'eau turbide
- Approche simplifiée pour la caractérisation des sédiments
- Validation sur un échantillon d'eau trouble naturelle

Bouclier Acoustique

- Prototype opérationnel embarquable
- Portée de quelques centimètres jusqu'à plusieurs mètres
- Système autonome, reconfigurable et auto-adaptatif
- Gestion possible jusqu'à 20 capteurs
- Efficace contre les parois rocheuses, rugueuses et irrégulières







Conclusions : Technology Readiness Level







| TRL | Système de caractérisation | Bouclier acoustique |
|-----|---|---------------------|
| 1 | Principes de base | |
| 2 | Concepts ou applications de la technologie formulés | |
| 3 | Fonction critique analysée et expérimentée ou preuve caractéristique du concept | |
| 4 | Validation en laboratoire du composant ou de l'artefact produit | |
| 5 | Validation dans un environnement significatif du composant ou de l'artefact produit | |
| 6 | Démonstration du modèle système / sous-système ou du prototype dans un environnement significatif | |
| 7 | Démonstration du système prototype en environnement opérationnel | |
| 8 | Système réel complet qualifié à travers des tests et des démonstrations | |
| 9 | Système réel prouvé à travers des opérations / missions réussies | |

Checklist

Système de caractérisation

-  Elargissement de l'étude sur différents échantillons de karst
-  Automatisation du protocole d'ajustage et d'estimation
-  Miniaturisation
-  Conception et développement du dispositif de caractérisation autonome

Bouclier Acoustique

-  Optimisation et miniaturisation de l'électronique
-  Intégration de fonctionnalités supplémentaires de traitement et de reconfiguration
-  Montée en nombre de capteurs
-  Etude de la répartition des capteurs
-  Mise à niveau pour une couverture multidirectionnelle
-  Validation du BA dans une mission réelle

Publication & congrès

Mohammad Alarab, Franck Augereau, Didier Laux, Lionel Lapierre. Estimation of particle size in turbid water using ultrasonic attenuation - Application for immersed cave exploration. *Forum Acusticum*, Dec 2020, Lyon, France. pp.2303-2306, ([10.48465/fa.2020.0078](https://doi.org/10.48465/fa.2020.0078)). ([hal-03240215](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03240215))



e-Forum Acusticum 2020

Dec 7-11, 2020

Mohammad Alarab, Franck Augereau, Didier Laux, Loyal Dahdouh, Lionel Lapierre. Simplified ultrasonic approach to estimate sediments size and concentration in turbid water. Soumission en cours dans *acta-acoustica*

Merci pour votre attention

Lauréat 3eme prix du Jury _ Occitanie 2020



mohammad.alarab@hotmail.com

