



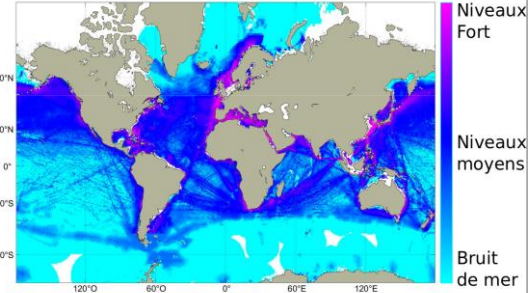
Nathalie FAVRETTO-CRISTINI,
Paul CRISTINI & Vadim MONTEILLER

L'intérêt d'une modélisation numérique full-wave 3D pour
décrire la propagation UBF des ondes par petits fonds marins

SERENADE 2022
28 juin 2022

La propagation des ondes en UBF : quels enjeux?

Bruit du trafic maritime (model. janv. 2012) - Shom



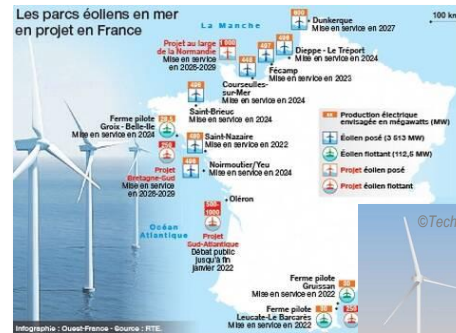
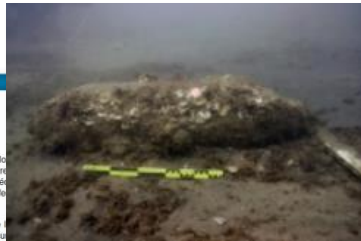
Au cœur d'enjeux

- militaires** : e.g., détection dans un contexte de lutte anti sous-marine, bruit de fond vs signal utile
- civils/environnementaux** : e.g., bruits anthropiques tels que trafic maritime, battage de pieux, contre-minage d'engins historiques, air guns

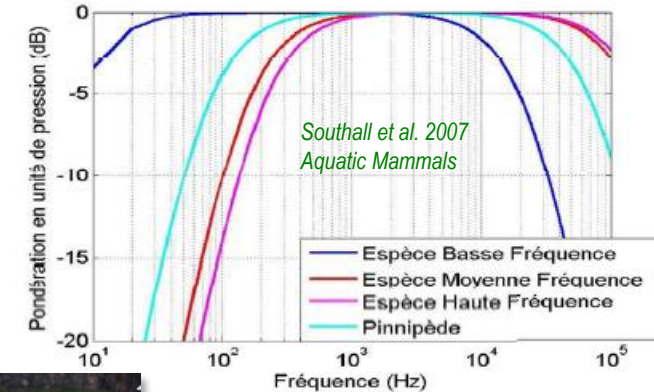
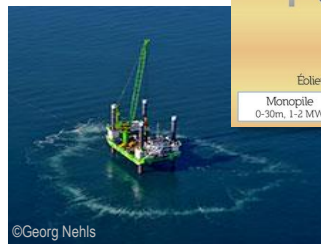


Impact sur l'écosystème marin

~ 1 – 300 Hz



~ 5 Hz – 3 kHz



La propagation des ondes en UBF : de quoi parle-t'on?

UBF

1 – 100/150 Hz

Longueurs d'onde (eau)

10 – 1 500 m

Hauteur d'eau (petits fonds)

qqs 100^e à qq^s λ_{eau}

Un simple chargement au regard des ondes

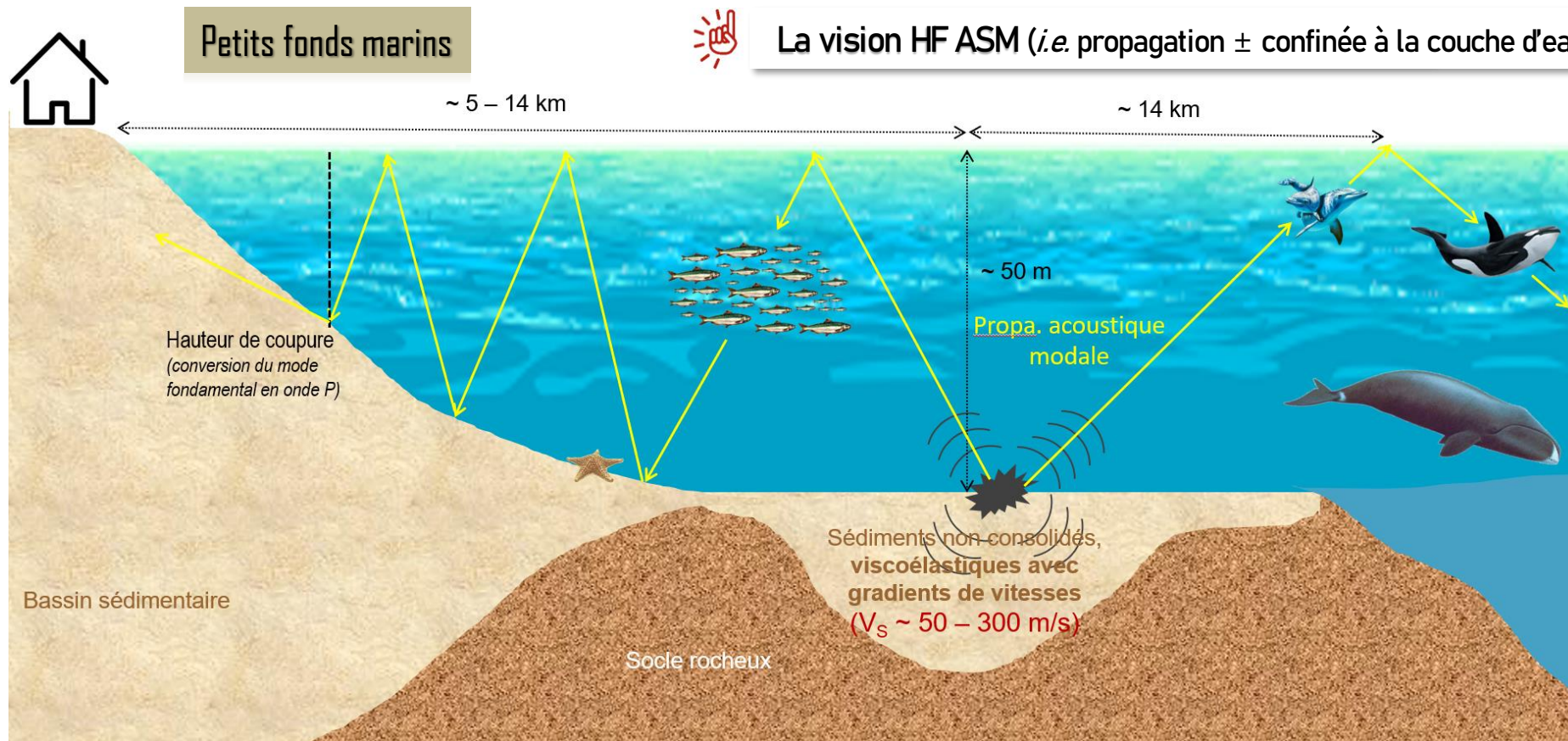
La propagation des ondes en UBF : de quoi parle-t'on?

UBF
1 – 100/150 Hz

Longueurs d'onde (eau)
10 – 1 500 m

Hauteur d'eau (petits fonds)
qqs 100^e à qq^s λ_{eau}

Un simple chargement au regard des ondes



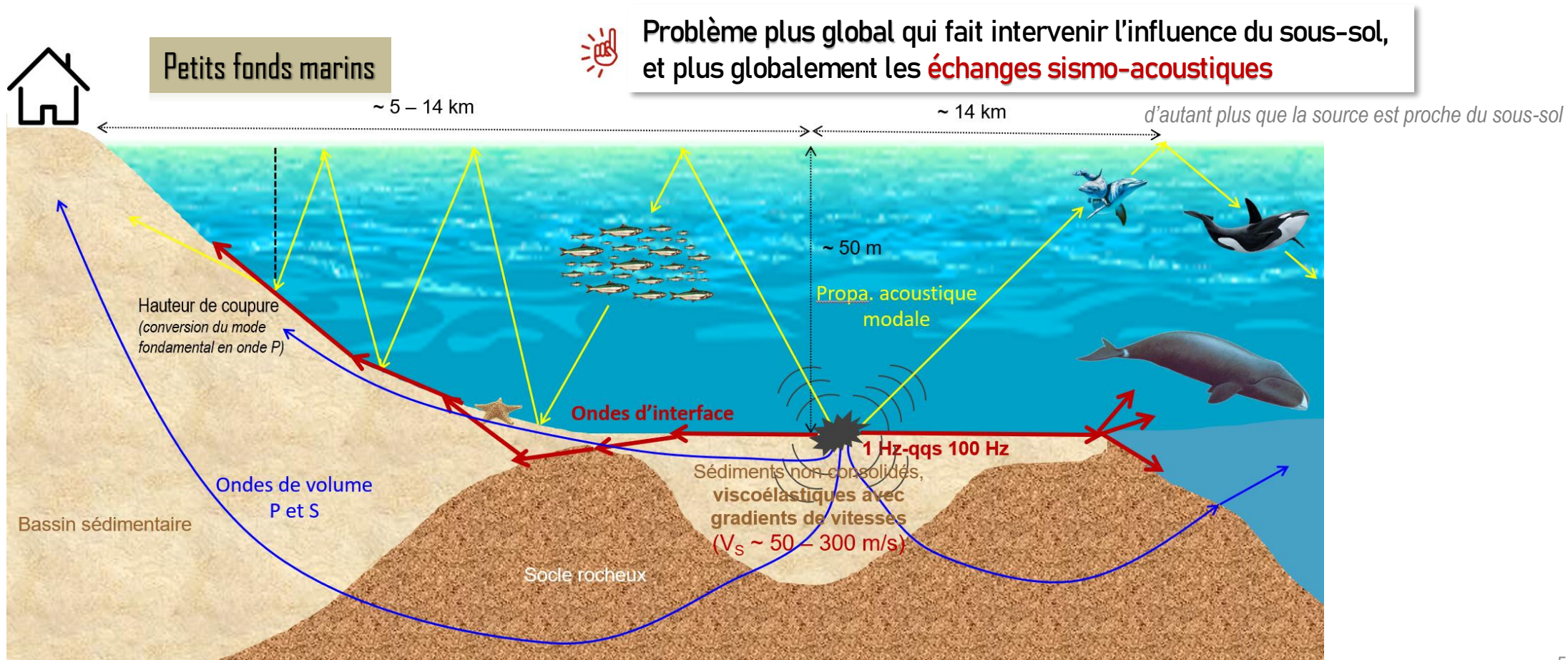
La propagation des ondes en UBF : de quoi parle-t'on?

UBF
1 – 100/150 Hz

Longueurs d'onde (eau)
10 – 1 500 m

Hauteur d'eau (petits fonds)
qqqs 100^e à qqqs λ_{eau}

Un simple chargement au regard des ondes



La propagation des ondes en UBF : la vision sismo-acoustique

UBF
1 – 100/150 Hz

Longueurs d'onde (eau)
10 – 1 500 m

Hauteur d'eau (petits fonds)
qqq 100^e à qqq λ_{eau}

Un simple chargement au regard des ondes

Dans la perspective de la création d'un jumeau numérique de l'océan



Les problèmes doivent être abordés par le **prisme sismo-acoustique**
Besoin de comprendre et de prendre en compte la **propagation**
« **full wave** » et son **interaction avec l'environnement**

Propagation modale

Fréquence/hauteur
de coupure pour
chaque mode N

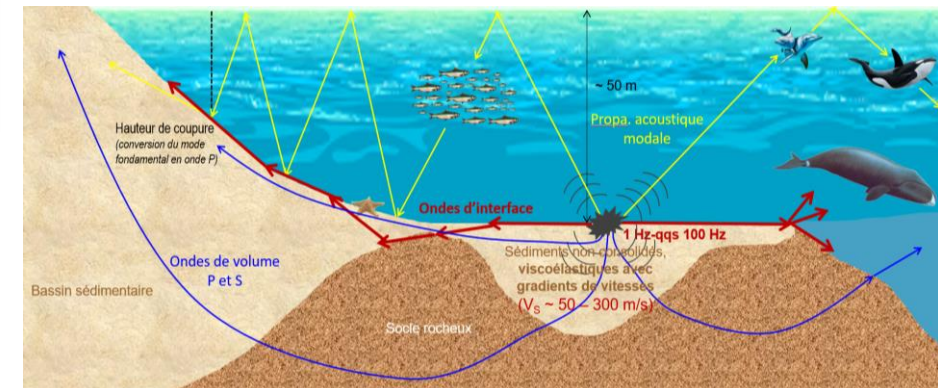
$$f_c = \frac{V_w \left(N - \frac{1}{2} \right)}{2h \left[1 - \left(\frac{V_w}{V_{P\text{sed}}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

Ondes de volume P et S dans le sous-sol

« Diving waves » dues au
gradient de propriétés
(sédiments)

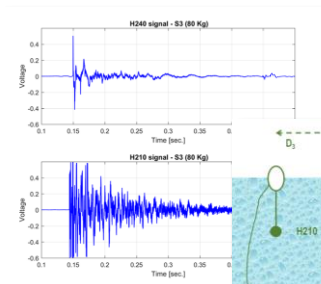
Ondes d'interface/surface

- de différents types selon le ratio h_{eau}/λ et/ou $h_{\text{sédiments}}/\lambda$: Stoneley-Scholte, Leaky Rayleigh, Rayleigh, Rayleigh-Sezawa
- de différentes natures : « pures » ou « modes »
- peuvent jouer un rôle non négligeable dans la contribution globale des échanges sismo-acoustiques

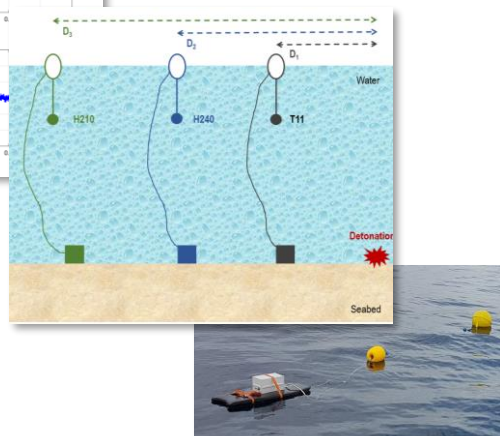


Retour d'expérience du projet POSA (2016-19)

Un pionnier !

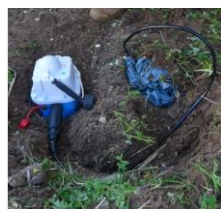


Hydroacoustic measurements

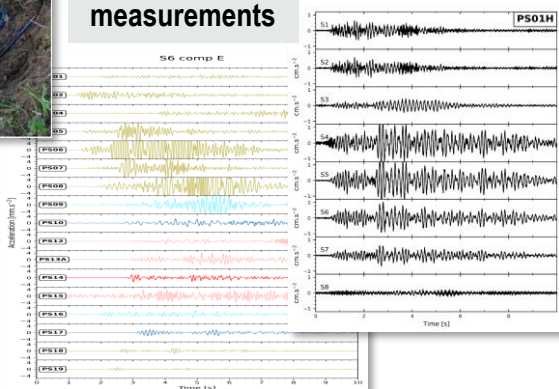


Broadband spectrum
0-300 Hz @ -6dB

Main contribution of
the bubble pulse in
the 0-30 Hz range



Seismic measurements



Relation Charge/Magnitude spécifique à l'environnement via une confrontation entre données réelles acoustiques et sismiques et modélisation numérique de la propagation des ondes

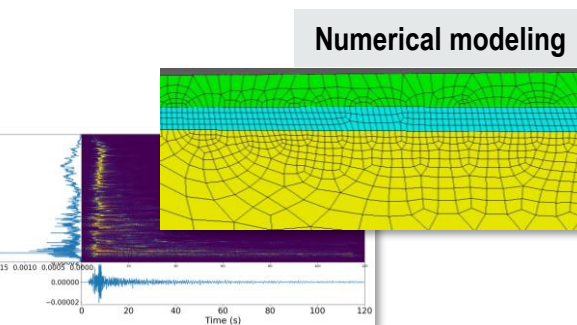
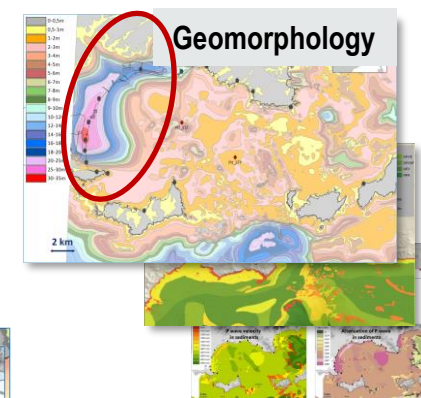


December 11-12,
2018

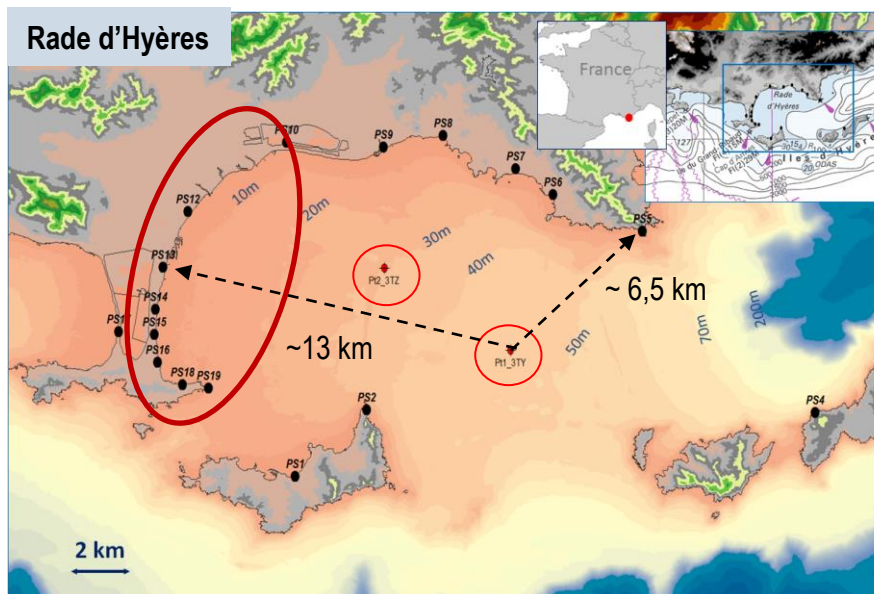


Detonation

80 – 680 kg
éq. TNT



Numerical modeling



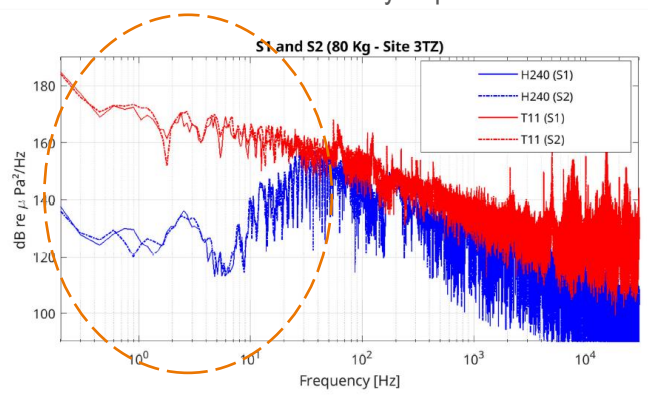
Retour d'expérience du projet POSA (2016-19)

Constats sur les données

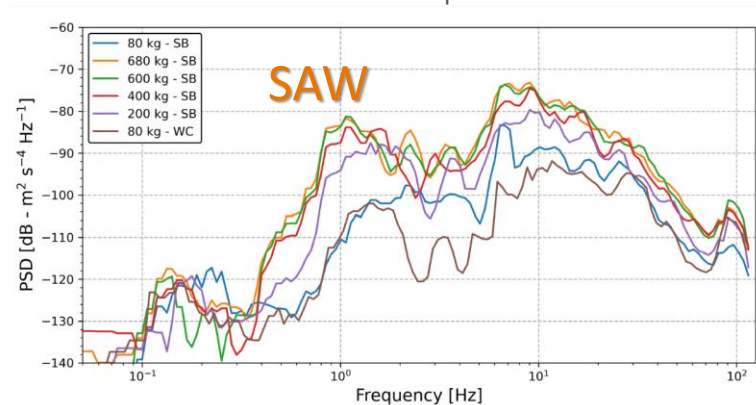
Favretto-Cristini et al. (2022) IEEE J. Oceanic Eng. - Assessment of risks induced by counter-mining unexploded large-charge historical ordnance in a shallow water environment: Part 1. Real case study.

- Pas de propagation modale UBF dans le guide d'onde (eau) en direction de la côte – Les ondes acoustiques « plongent » dans le sol
- Les HF se propagent plus difficilement dans le sol
- Amplification de l'amplitude et shift vers les BF au voisinage des bassins sédimentaires

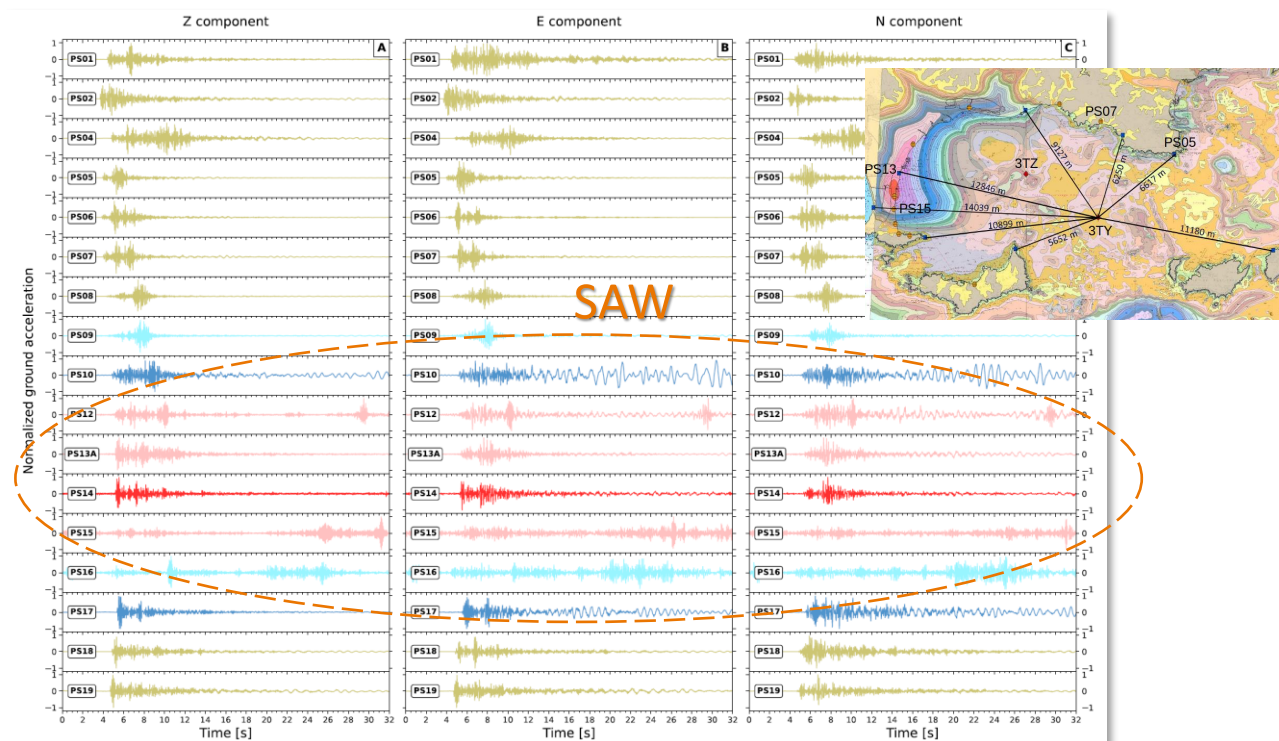
Sonde de choc et Hydrophone



Stations sismiques



Stations sismiques



Retour d'expérience du
projet POSA (2016-19)

Analyse physique & Modélisation numérique

Favretto-Cristini et al. (2022) IEEE J. Oceanic Eng. -
Assessment of risks induced by counter-mining unexploded
large-charge historical ordnance in a shallow water environment:
Part 2. Modeling of seismo-acoustic wave propagation.

Pour autant, de l'énergie se propage dans l'eau !

Les ondes d'interface

- Bathymétrie
- Caractéristiques de la couche sédimentaire
 - épaisseur
 - vitesse et atténuation des ondes S
 - gradient de vitesse avec la profondeur



« Droit de vie et de mort » sur
les ondes et modes
d'interface/de surface

Série de livres édités par le NATO-SACLANT dans les années 1980
(J. Hovem, D. Rauch, F. Jensen, H. Schmidt, T. Aka...)
Foti et al. (2015) Surface wave methods for near-surface site characterization
Favretto-Arès (1996) Acta Acustica, Favretto-Arès (1997) Thèse Univ. Méditerranée

Retour d'expérience du
projet POSA (2016-19)

Analyse physique & Modélisation numérique

Favretto-Cristini et al. (2022) IEEE J. Oceanic Eng. -
Assessment of risks induced by counter-mining unexploded
large-charge historical ordnance in a shallow water environment:
Part 2. Modeling of seismo-acoustic wave propagation.

Pour autant, de l'énergie se propage dans l'eau !

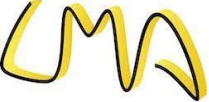
Les ondes d'interface

- Bathymétrie
- **Caractéristiques de la couche sédimentaire**
 - épaisseur
 - vitesse et atténuation des ondes S
 - gradient de vitesse avec la profondeur



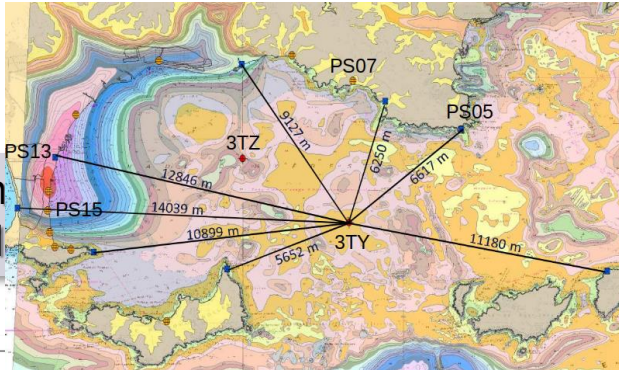
« Droit de vie et de mort » sur
les ondes et modes
d'interface/de surface

Série de livres édités par le NATO-SACLANT dans les années 1980
(J. Hovem, D. Rauch, F. Jensen, H. Schmidt, T. Aka...)
Foti et al. (2015) Surface wave methods for near-surface site characterization
Favretto-Anrès (1996) Acta Acustica, Favretto-Anrès (1997) Thèse Univ. Méditerranée



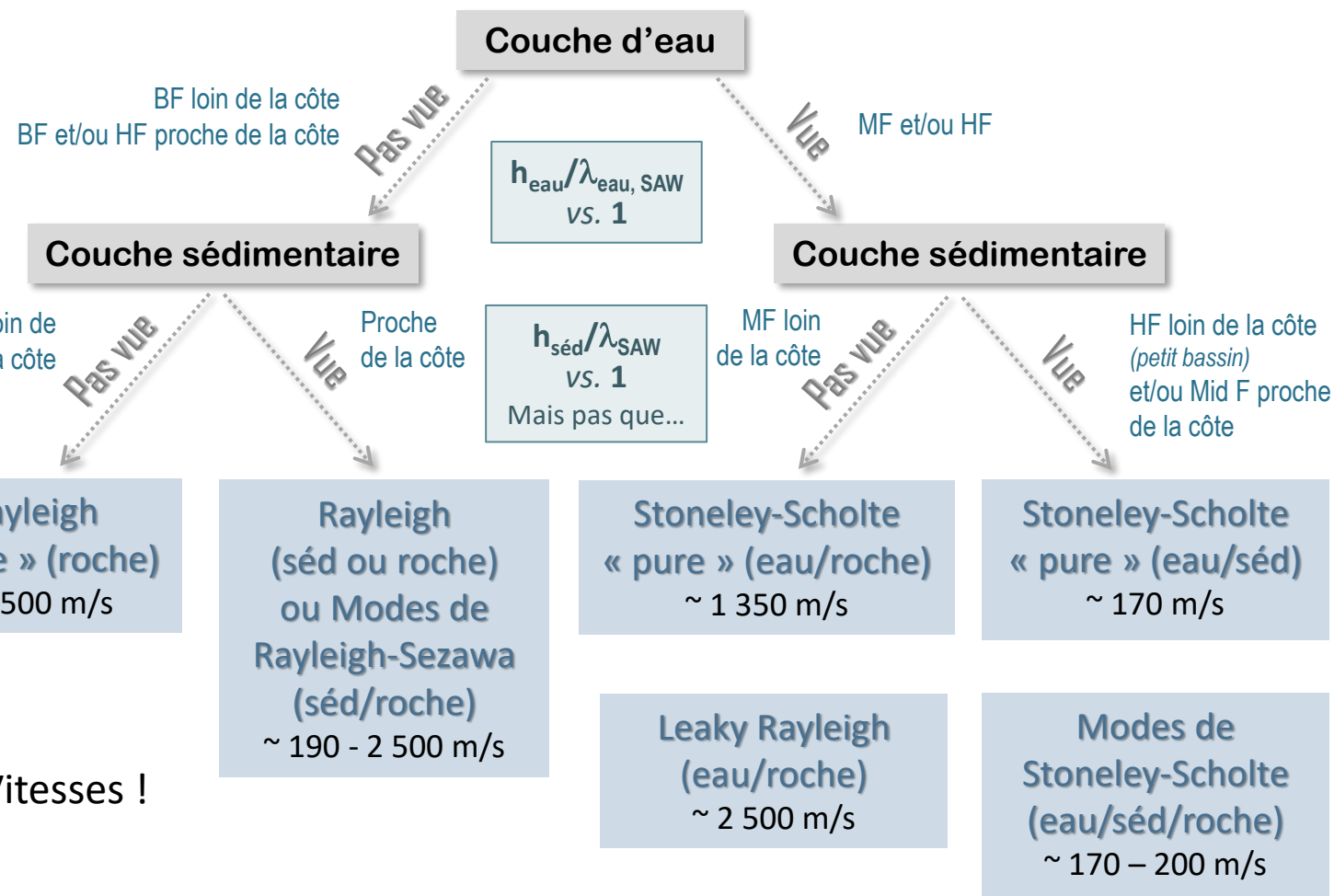
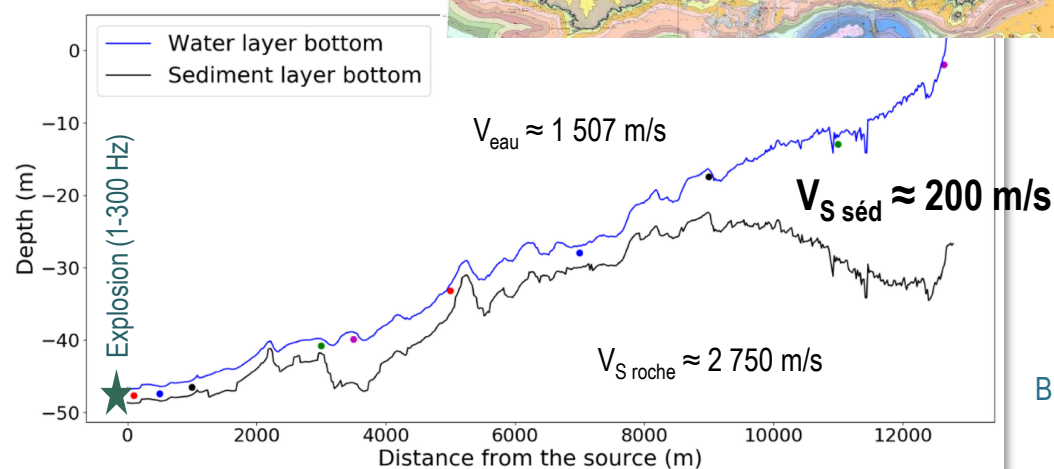
Exemple de propagation UBF par petits fonds

Retour d'expérience
projet POSA (2011)



Acoustique & Modélisation numérique

Favretto-Cristini et al. (2022) IEEE J. Oceanic Eng. -
Assessment of risks induced by counter-mining unexploded
large-charge historical ordnance in a shallow water environment:
Part 2. Modeling of seismo-acoustic wave propagation.



Domaine
fréquentiel
1 - 30 Hz

Distinguo entre
limites BF et HF
de ce domaine

Variabilité de la
hauteur d'eau et
de l'épaisseur
des sédiments

Partition du
domaine spatial
selon ces limites

Exemple de propagation UBF par petits fonds

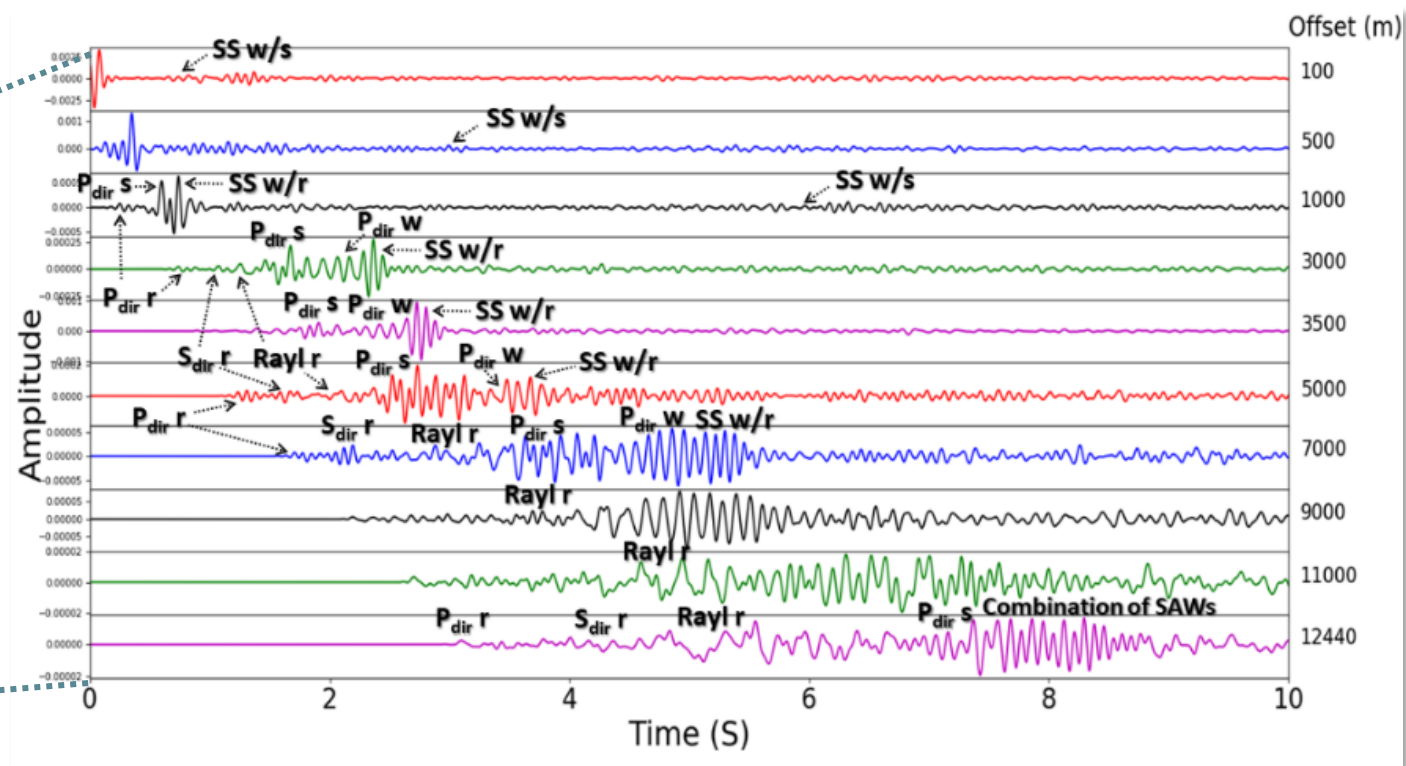
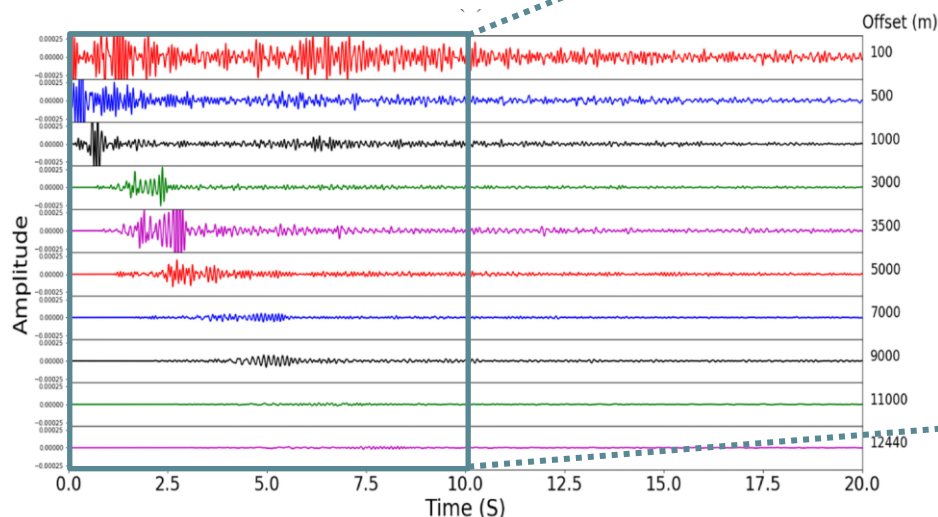
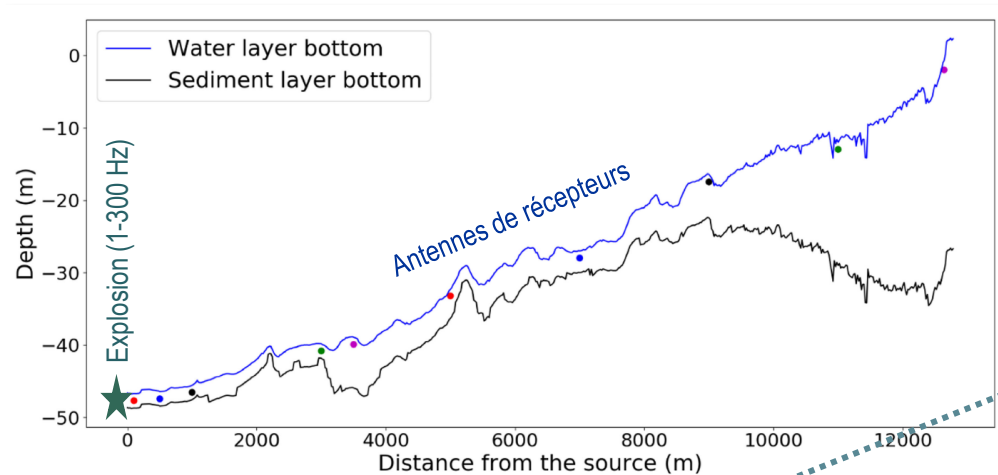
Retour d'expérience du projet POSA (2016-19)

Analyse physique & Modélisation numérique

Favretto-Cristini et al. (2022) IEEE J. Oceanic Eng. - Assessment of risks induced by counter-mining unexploded large-charge historical ordnance in a shallow water environment: Part 2. Modeling of seismo-acoustic wave propagation.

Simus 3D axisymétriques full wave dans la gamme 0-20 Hz
(méth. des éléments finis spectraux - SPECFEM)

- Selon le rapport épaisseur/ λ , conversion d'ondes d'interface (*Stoneley-Scholte, Leaky Rayleigh, Rayleigh-Sezawa*)
- Selon la forme des bassins sédimentaires, génération d'ondes d'interface BF de forte amplitude



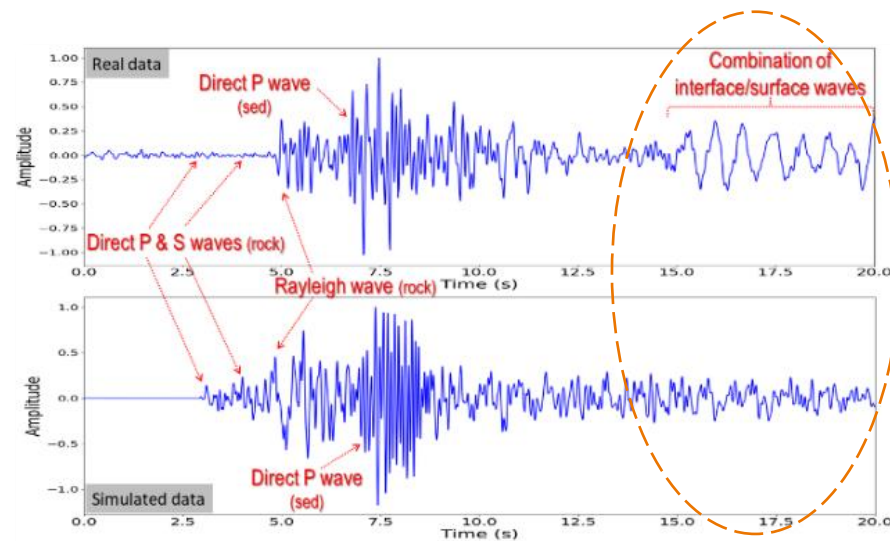
Rôle joué par les **ondes d'interface** en acoustique UBF en environnement marin

- Indéniable, en petits fonds
- Ça dépend, en grands fonds



Les problèmes BF/UBF doivent être abordés par le **prisme sismo-acoustique**
Besoin de prendre en compte la **propagation « full wave »** et son **interaction avec l'environnement**

Retour d'expérience du projet POSA (2016-19)



Vitesse et atténuation des ondes S dans les sédiments mal évaluées

Sous-sol marin \neq Milieu fluide



« I have a dream ... »

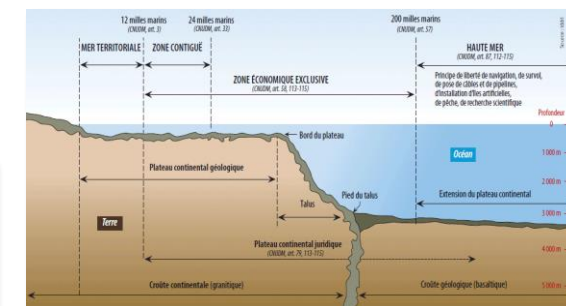
Mesures directes ou indirectes, permettant de caractériser la **couche sédimentaire** et le **socle rocheux** aux fréquences d'intérêt (**BF et UBF**)

- épaisseur
- vitesse et atténuation des ondes S
- gradient de vitesse avec la profondeur



« I have a dream ... »

Disposer d'un **outil numérique fiable** capable de modéliser avec « exactitude » la **propagation 3D full-wave des ondes** au sein d'environnements marins de **grandes dimensions** (30 à 300 km x 50 km x 4 km) et de propriétés géométriques et physiques variables (50 – 5000 m/s), en intégrant les **phénomènes physiques sous-jacents de 1^{er} ordre dans une large gamme de fréquences** (1 Hz – qqs centaines de Hz)



Au-delà de notre capacité actuelle en termes de ressources de calcul



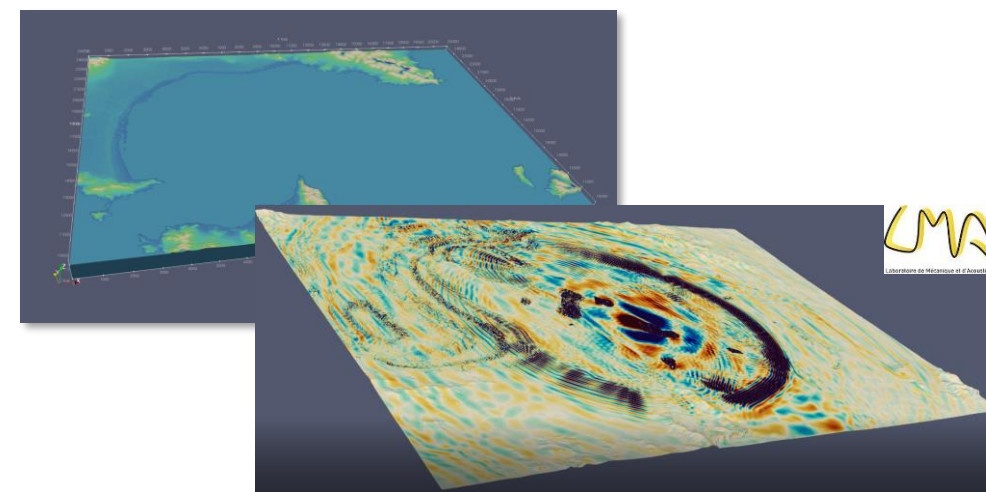
(2018-22) « Towards Exascale Supercomputing »

- **Simulation 3D HPC** de la propagation sismo-acoustique dans la Rade d'Hyères (15 km x 20 km x 0.5 km) dans la gamme de fréquences 1-30 Hz
- Calculs sur **1 000 à 3 000 GPU** (20 h) – **24 milliards de DDL / 8 millions de pas de temps**



La suite avec ChEESE-2P

Couplage de méthodes numériques






 Projet ANR-15-ASTR-0001 POSA



Th. Garlan
O. Morio



F. Wang



A. Deschamps
D. Ambrois



E. Beucler
M. Bonnin



X. Demoulin



D. Mercerat



M. Arrigoni
R. Schwab



A. Zegna-Rata — Stages alternance Recherche 2019-21