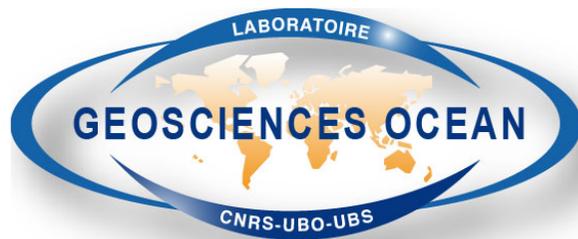


Séminaire au Laboratoire Leprince Ringuet – 17 octobre 2016  
Ecole Polytechnique - Palaiseau

# Acoustique & tectonique active sous-marine

Jean-Yves Royer

A. Deschamps †, H. Piété, V. Ballu \*, P. Sakic <sup>d</sup> \*



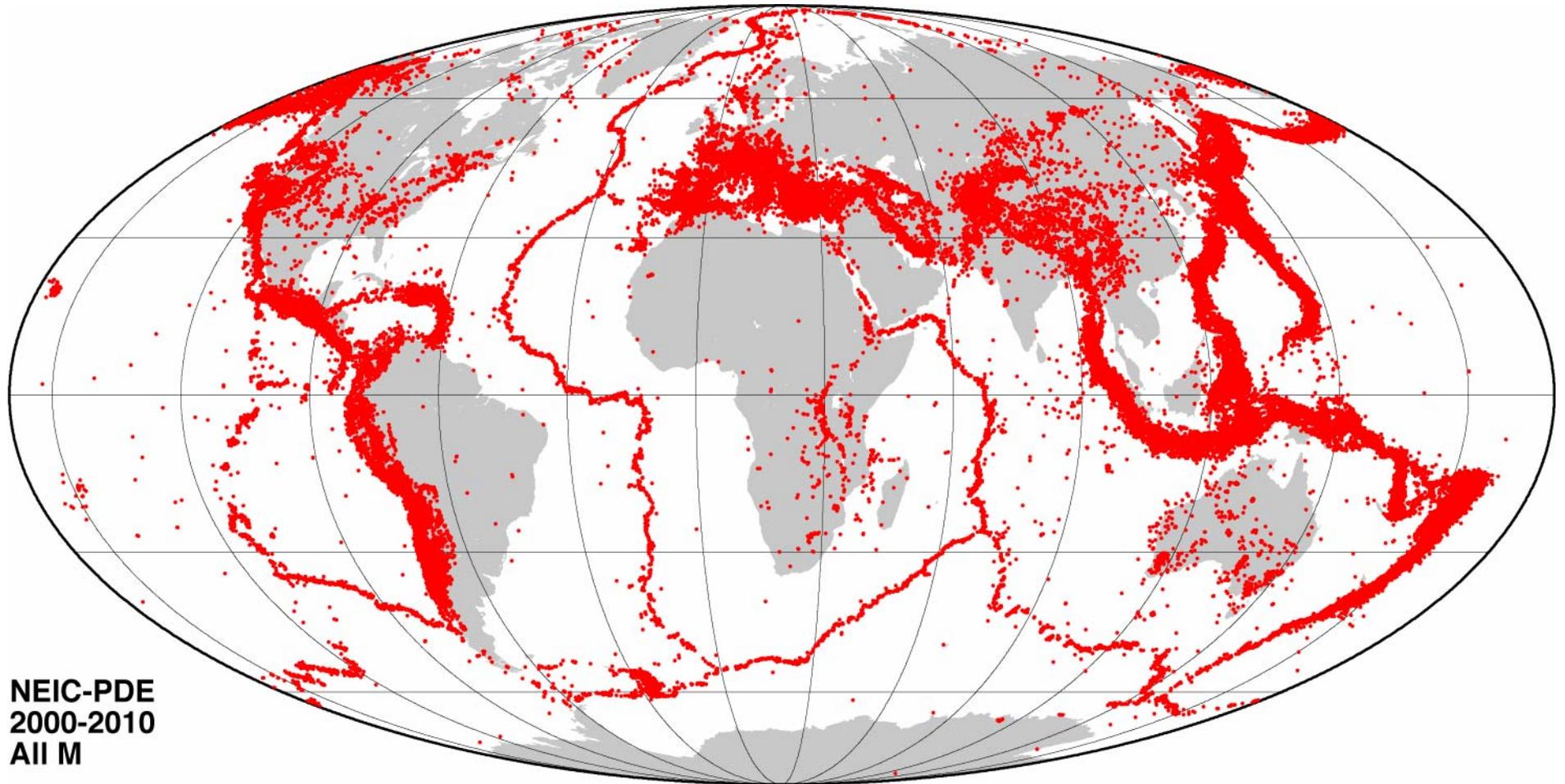
*CNRS & Université de Brest*



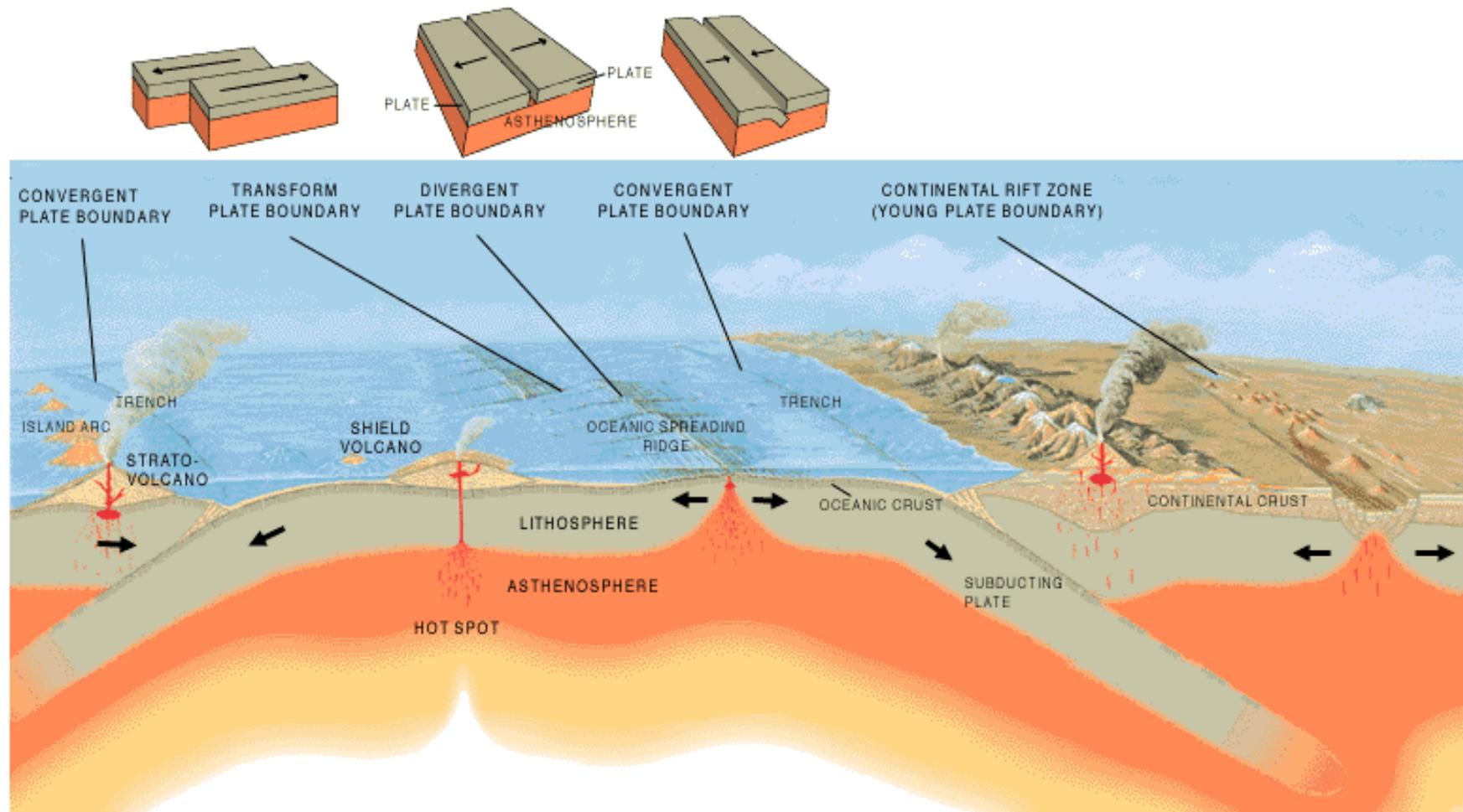
*(\*) CNRS & Univ La Rochelle*

# 90% des frontières de plaques actives sont sous-marines

Carte de sismicité mondiale 2000-2010



# 90% des frontières de plaques actives sont sous-marines



3 types: divergentes, convergentes, en coulissement

# Comment accéder à la dynamique des frontières de plaque actives ?

- 70% de la planète sont recouverts par les océans : superficie 361 Mkm<sup>2</sup>, profondeur moyenne ~4000m
- Les observatoires permanents sont restreints aux terres émergées: réseaux sismologiques, stations GPS ...
- La tranche d'eau est un obstacle majeur pour leur observation
- Pour la franchir et s'en affranchir: **l'acoustique active et passive**

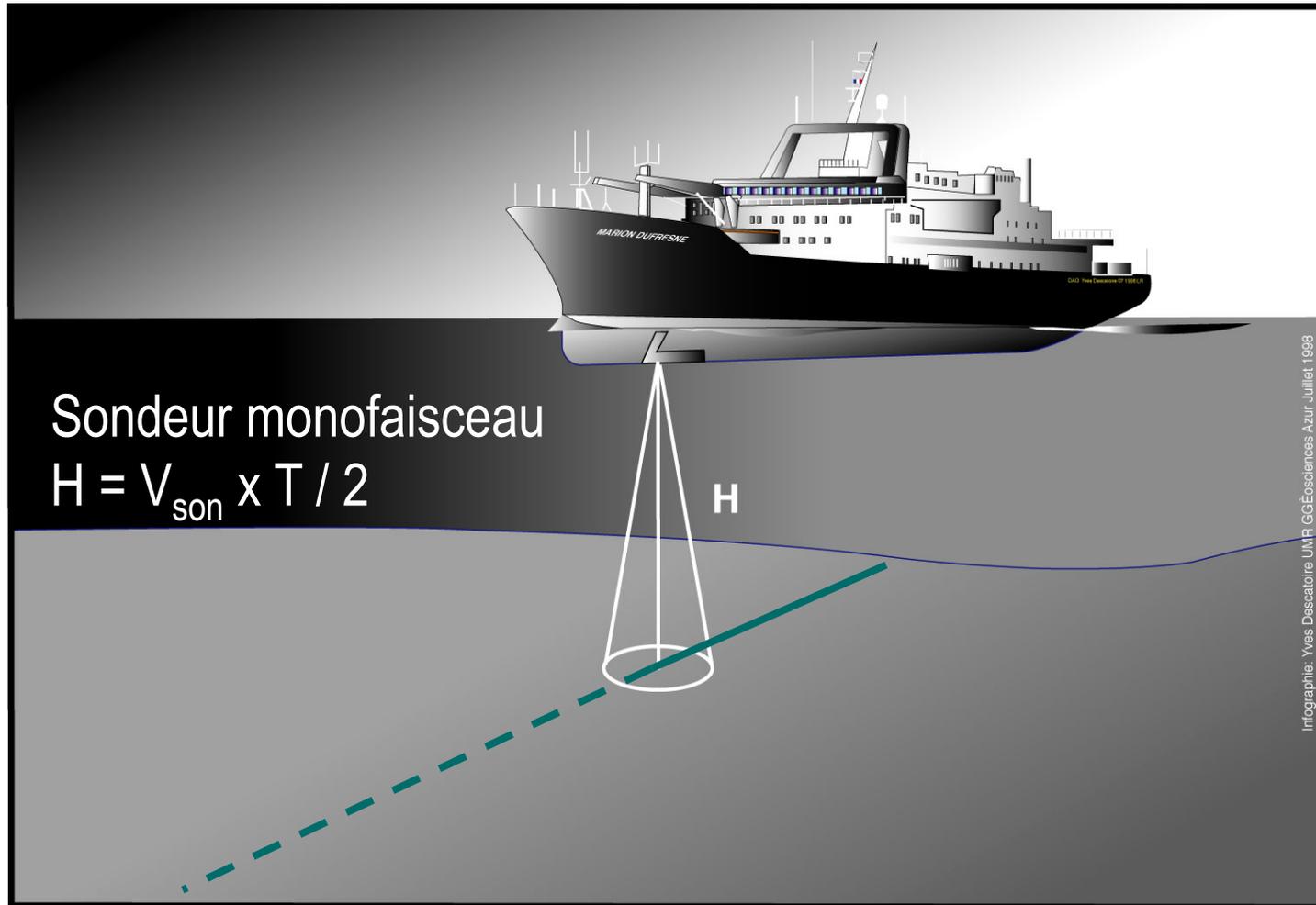


# Comment accéder à la dynamique des frontières de plaque actives ?

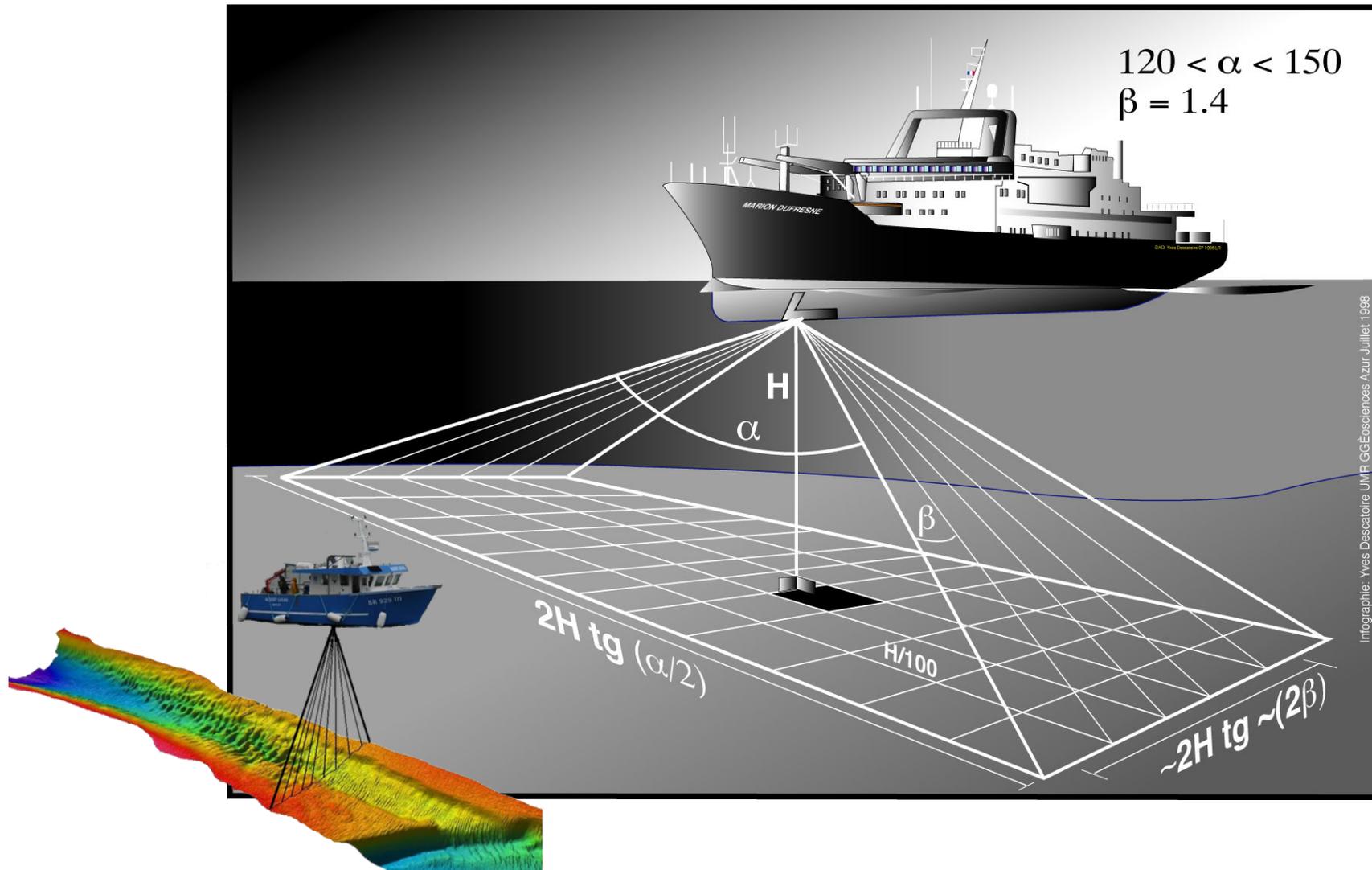
- Approches par acoustique active
  - Sondeurs bathymétriques
  - Télémétrie sous-marine
  - Positionnement absolu fond de mer
- Approche par acoustique passive
  - Réseaux hydroacoustiques

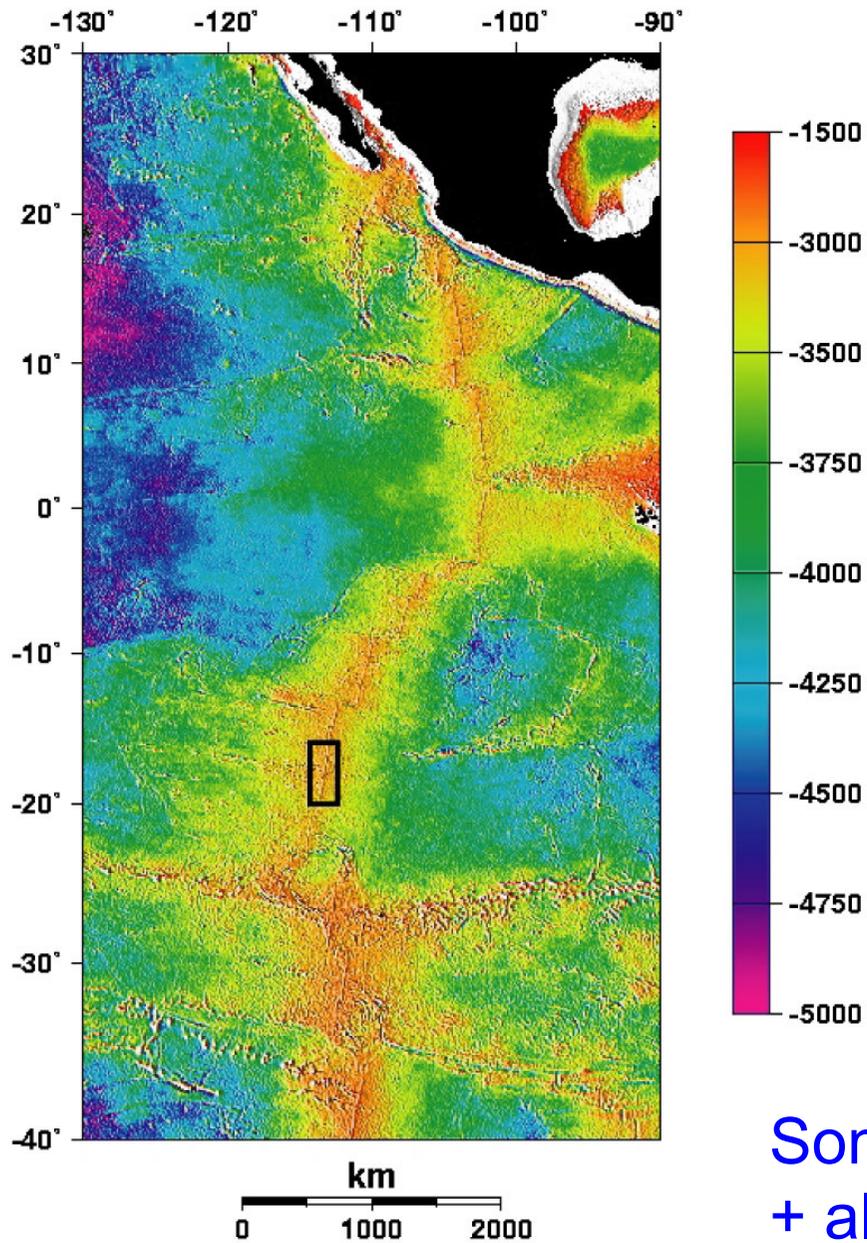


# Acoustique active: les sonars



# Acoustique active: les sonars

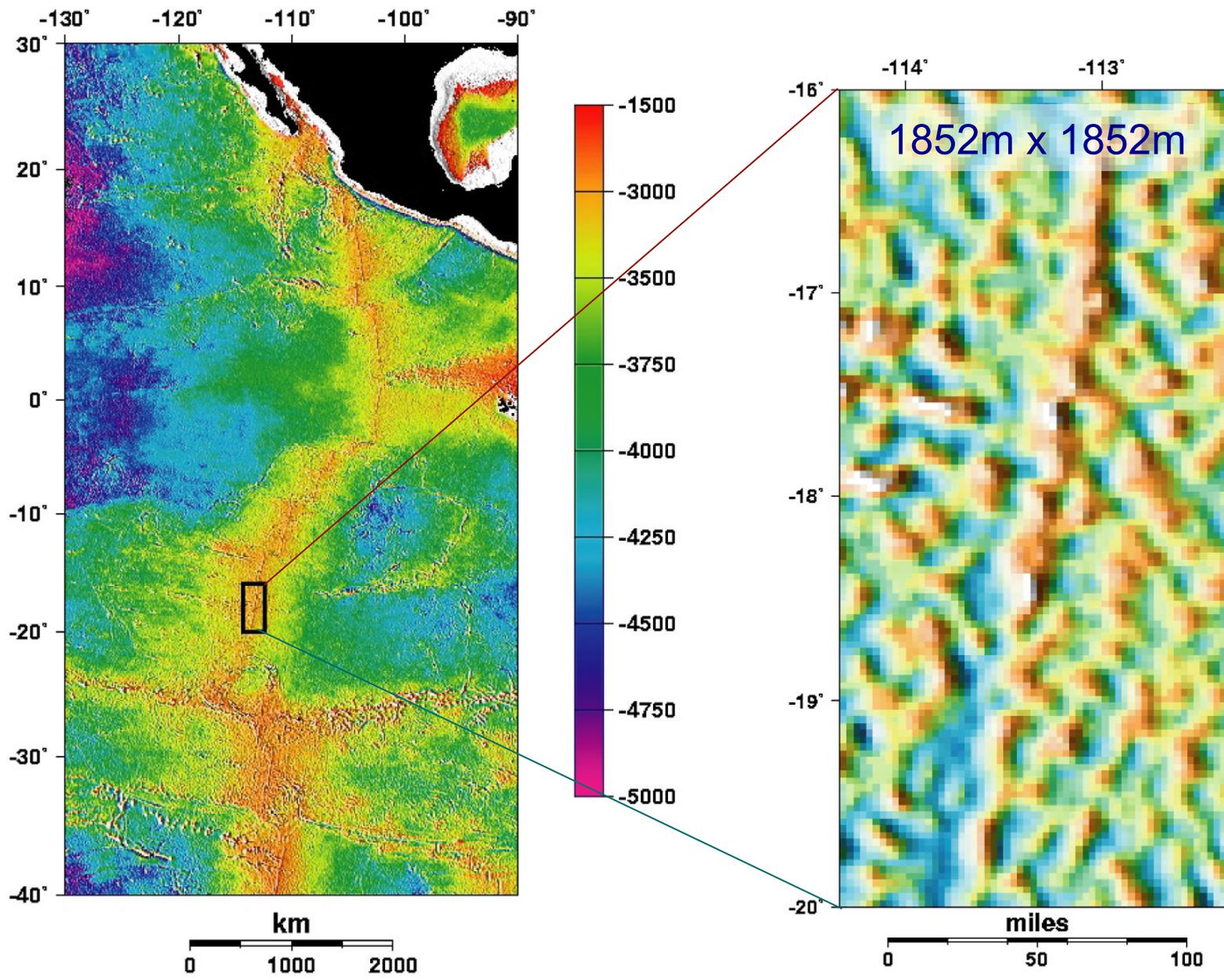


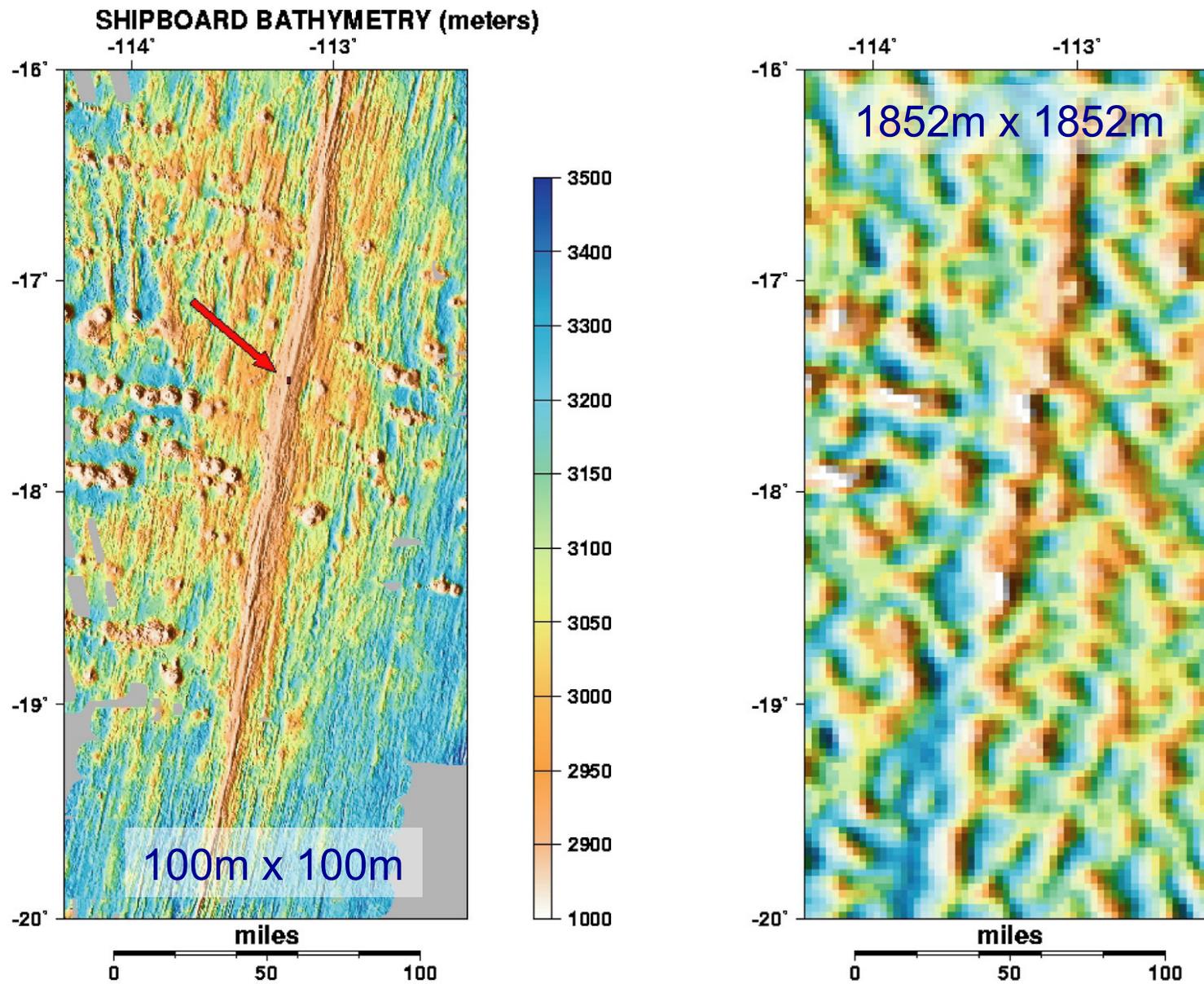


# Levés bathymétriques

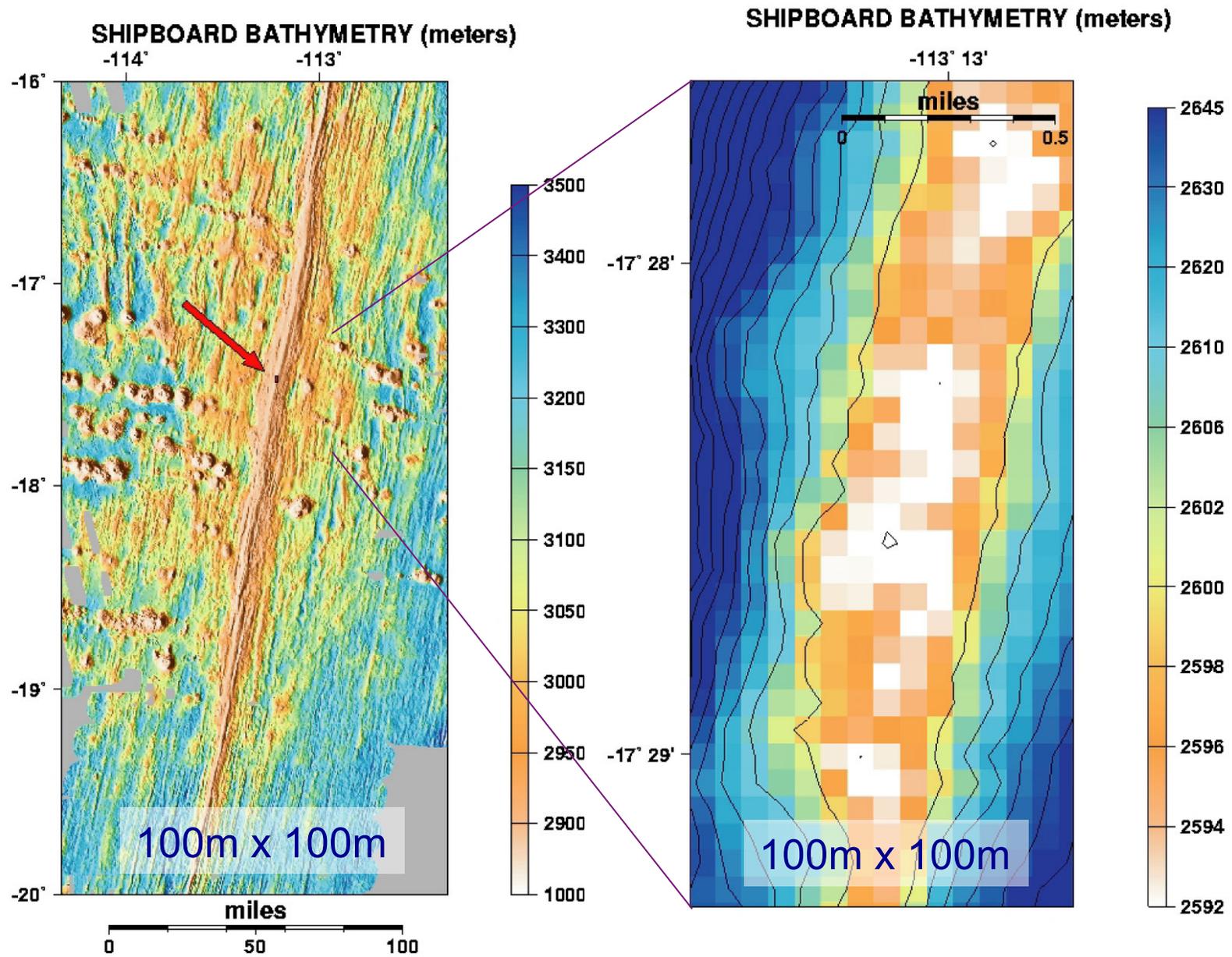
Une résolution croissante

Sondeurs monofaisceau  
+ altimétrie satellitale

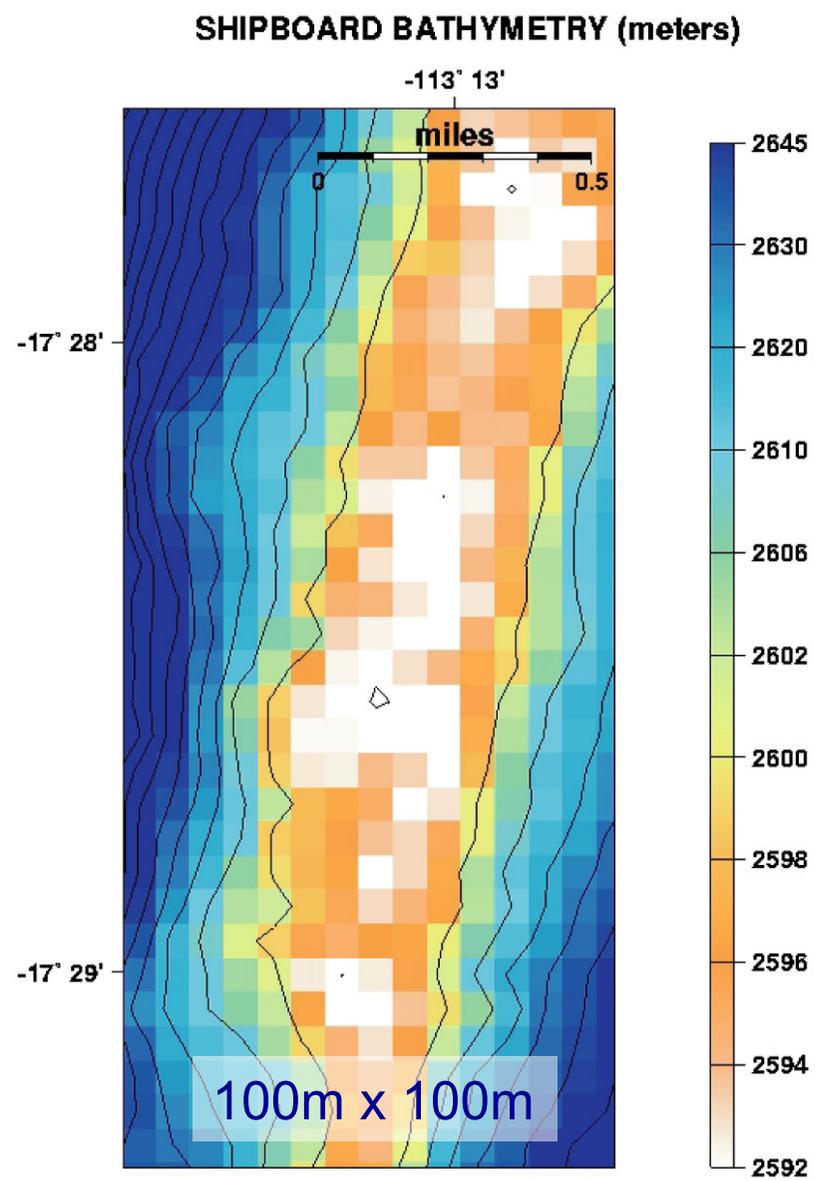
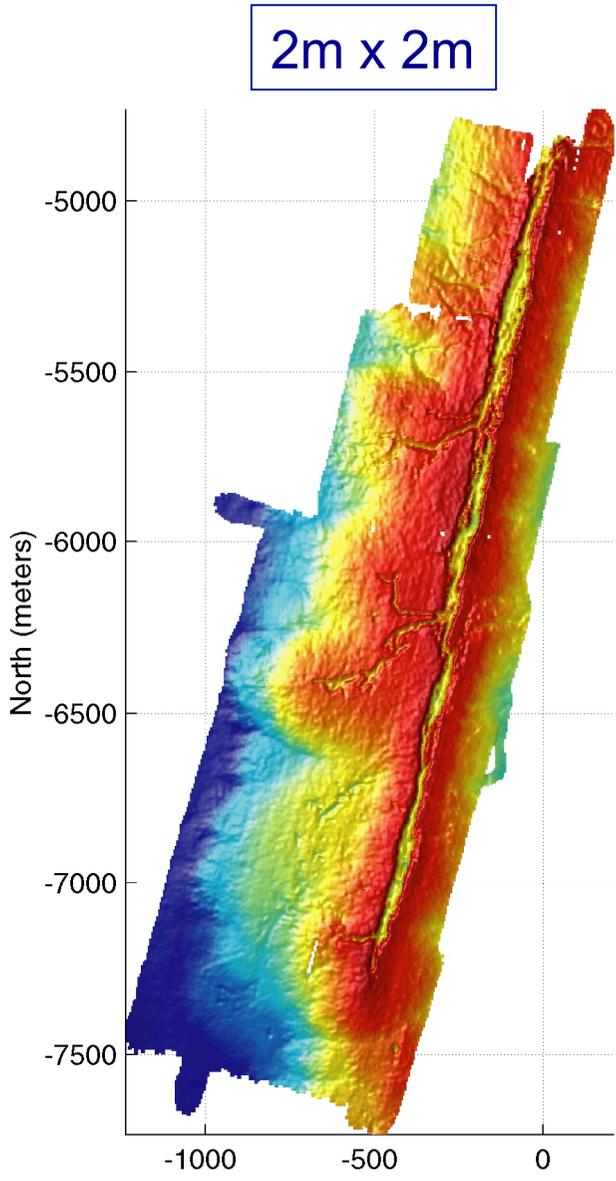




Sondeur multifaisceaux depuis la surface



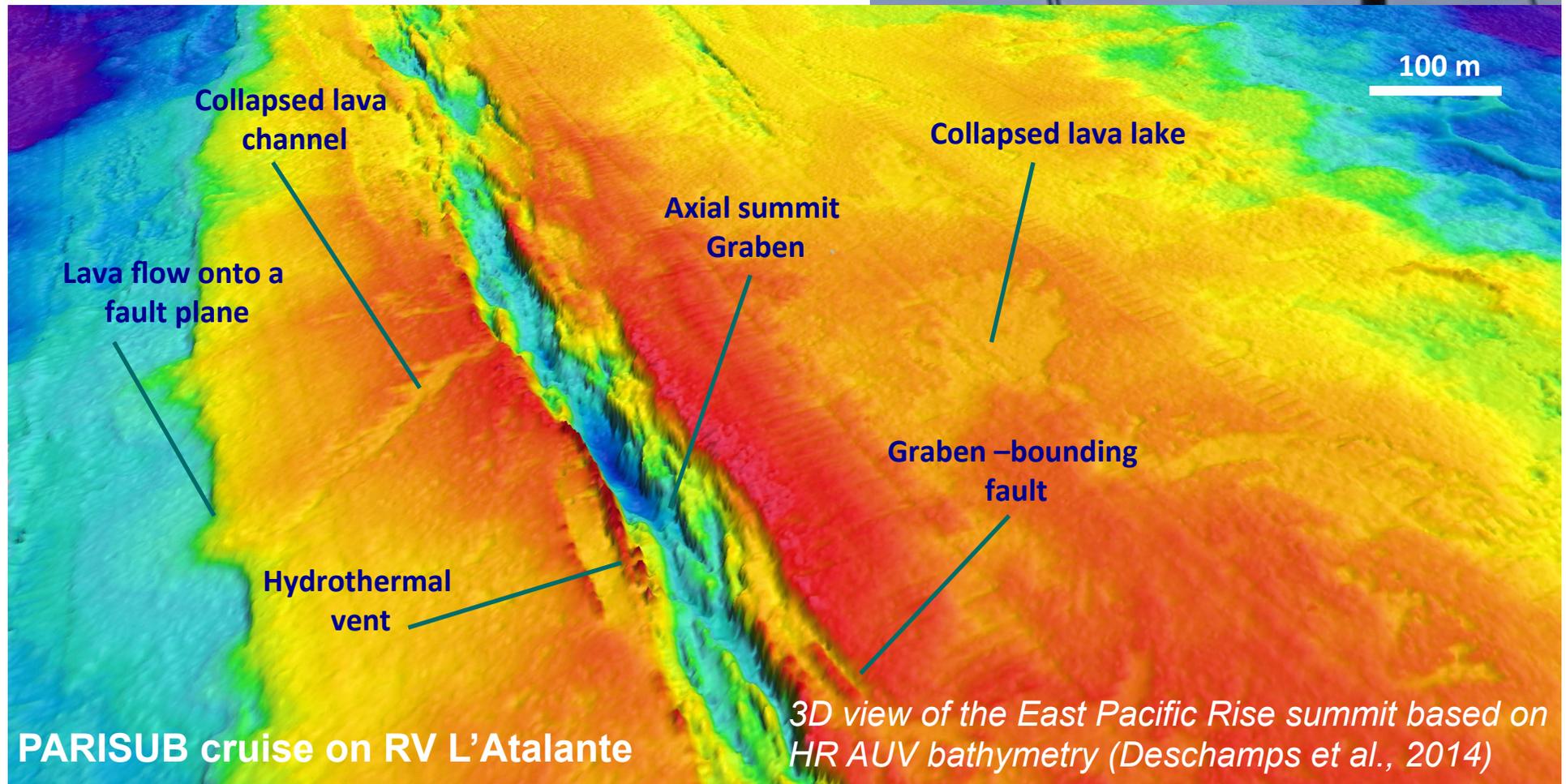
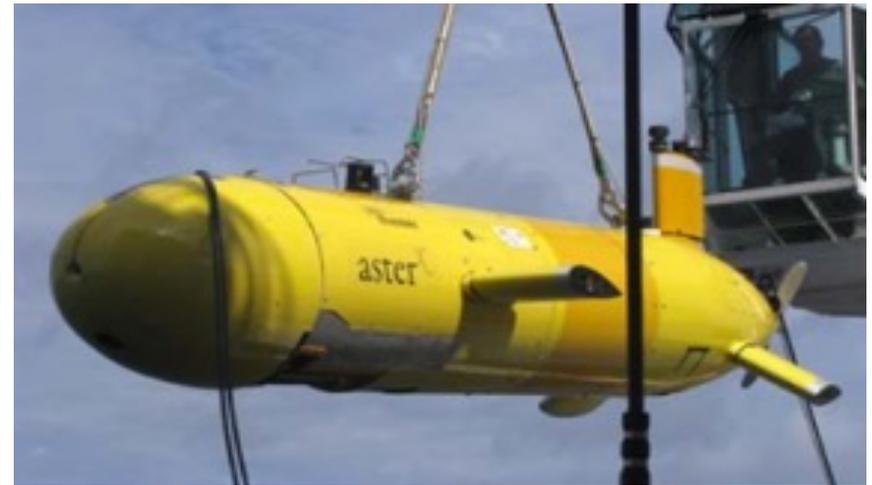
Sondeur multifaisceaux depuis la surface



Sondeur multifaisceaux proche du fond

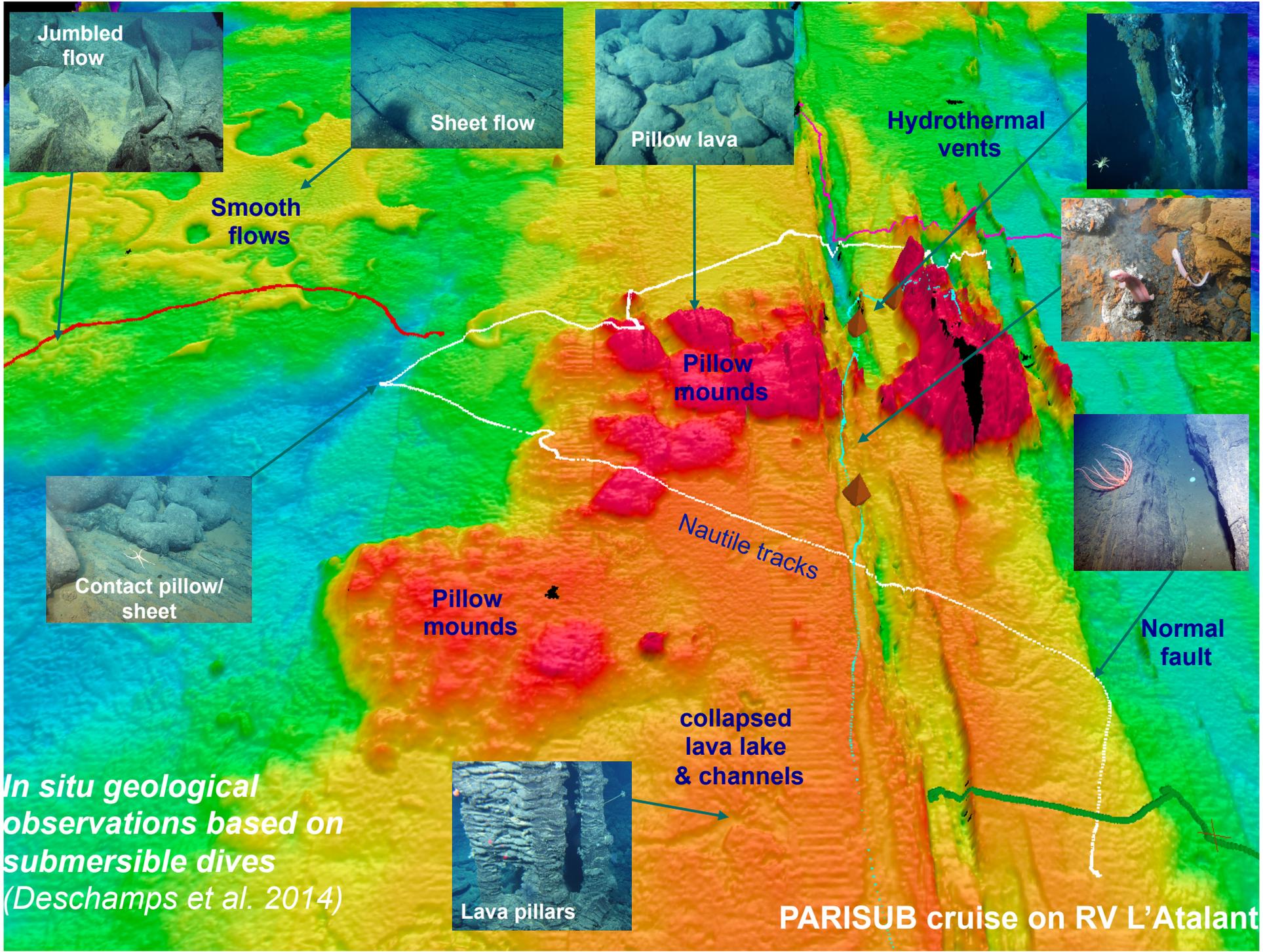
## Autonomous Underwater Vehicle Aster-X

- high-resolution bathymetry (2 m cells)
- magnetism, nephelometry...
- operated 70 m above the seafloor
- speed: 3 knt
- 14 dives of 8h
- 612 km of lines
- 112h of dive
- coverage: 122 km<sup>2</sup>



PARISUB cruise on RV L'Atalante

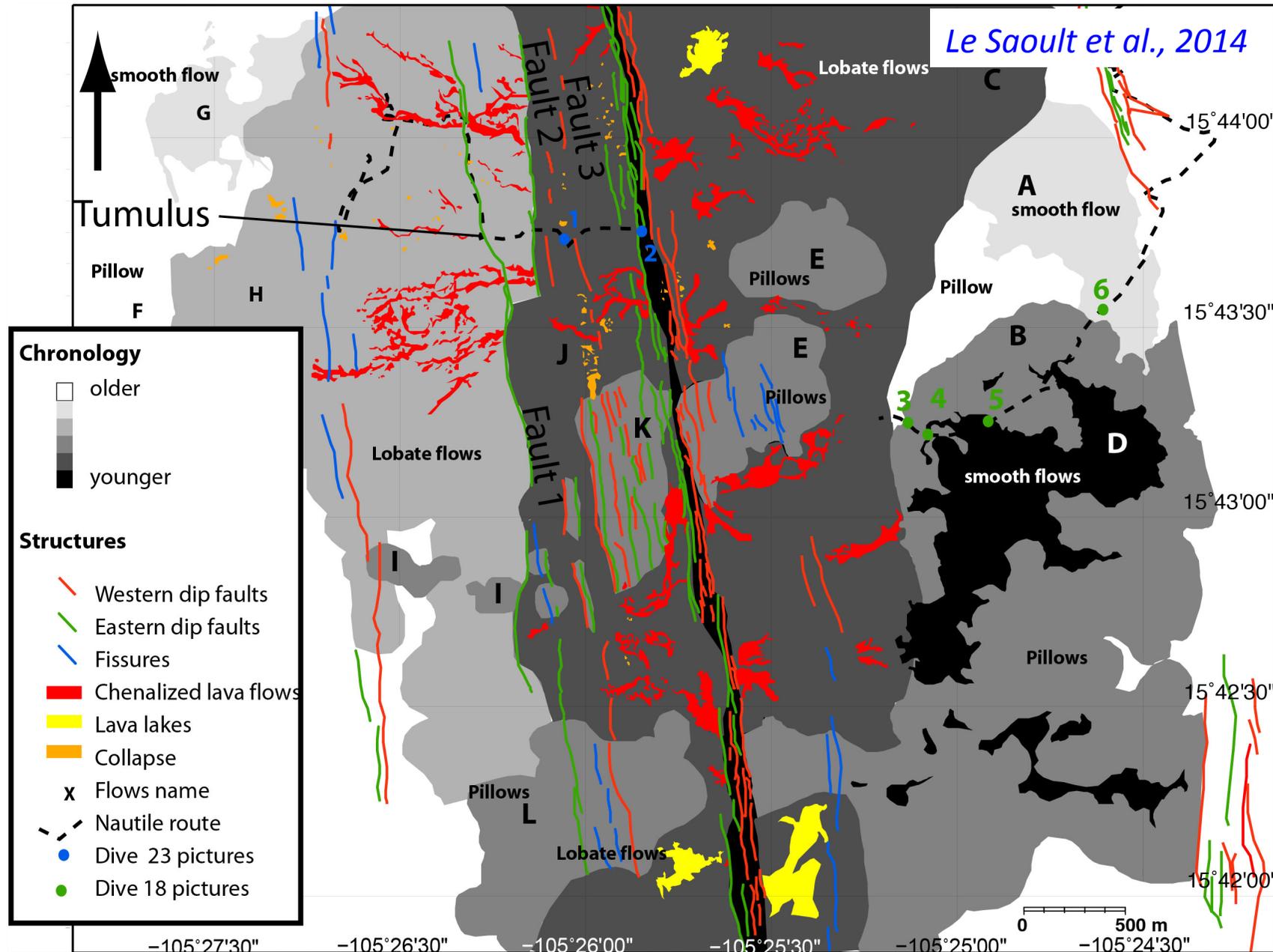
3D view of the East Pacific Rise summit based on HR AUV bathymetry (Deschamps et al., 2014)



*In situ geological observations based on submersible dives (Deschamps et al. 2014)*

PARISUB cruise on RV L'Atalant

# Carte structurale & chronologie relative



# Apport de la micro-bathymétrie

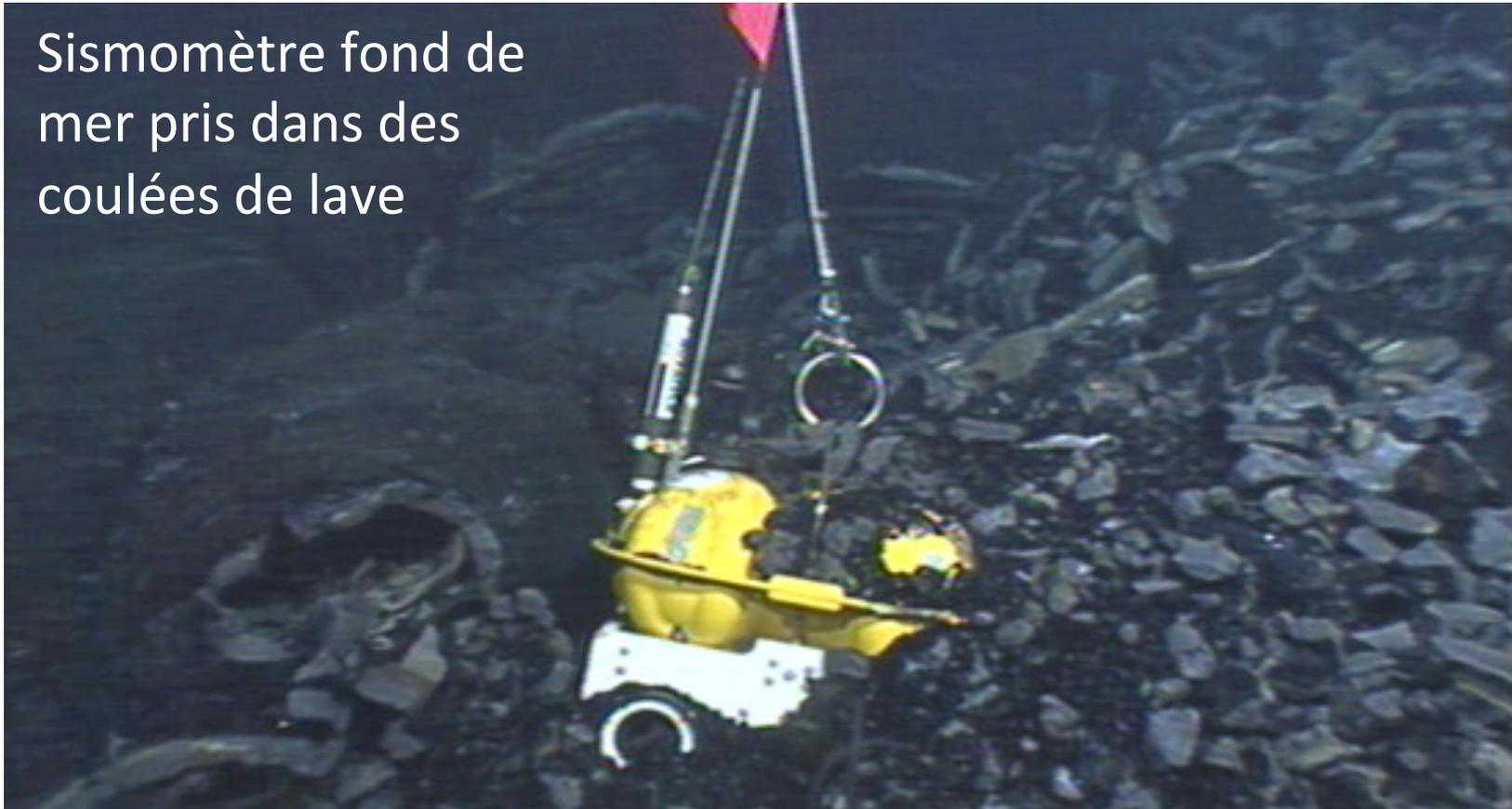
- Identification des structures (répartition, géométrie)
- Quantification des failles et des fissures
- Identification des coulées de laves (et datation)
- Chronologie relative entre fracturation et volcanisme
- Localisation de l'activité hydrothermale



Une échelle de travail presque analogue à celle du géologue de terrain !

# Eruption volcanique récente

Sismomètre fond de mer pris dans des coulées de lave

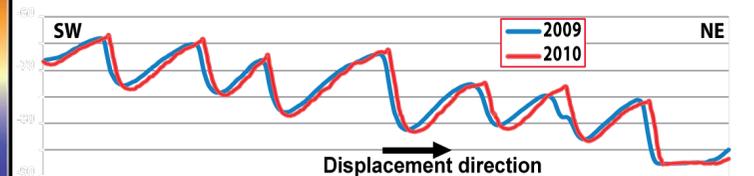
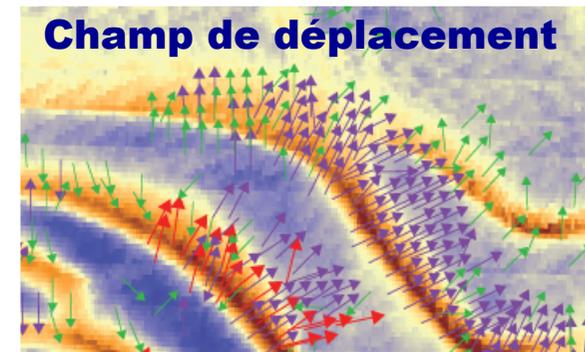
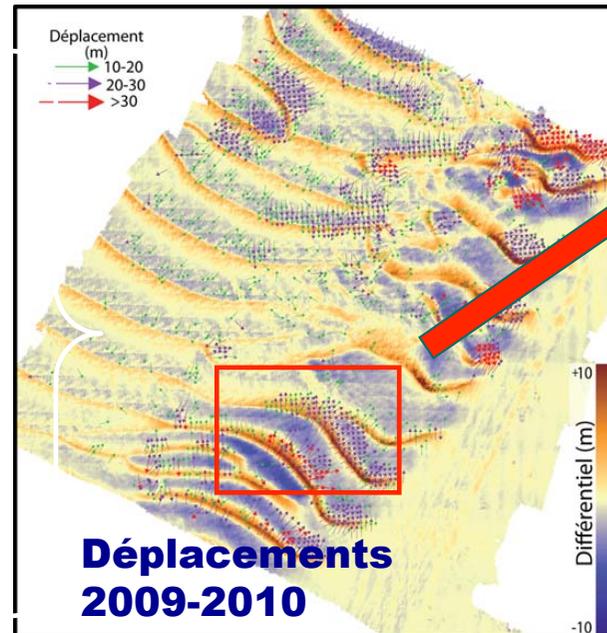
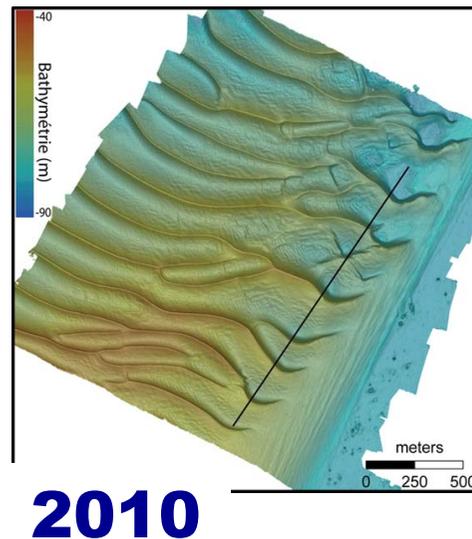
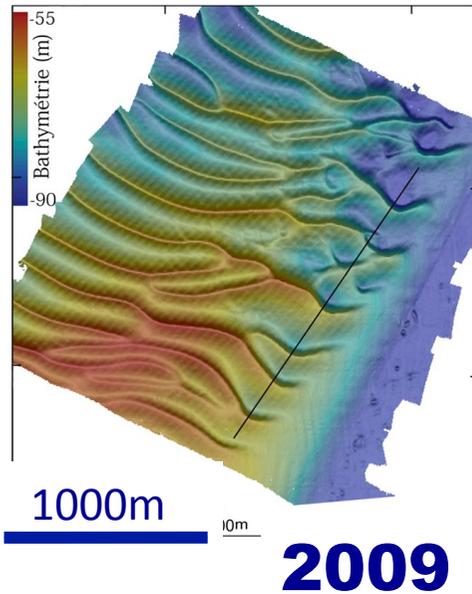


Mis à l'eau en 2005 pour une récupération en 2006

[www.who.edu](http://www.who.edu)

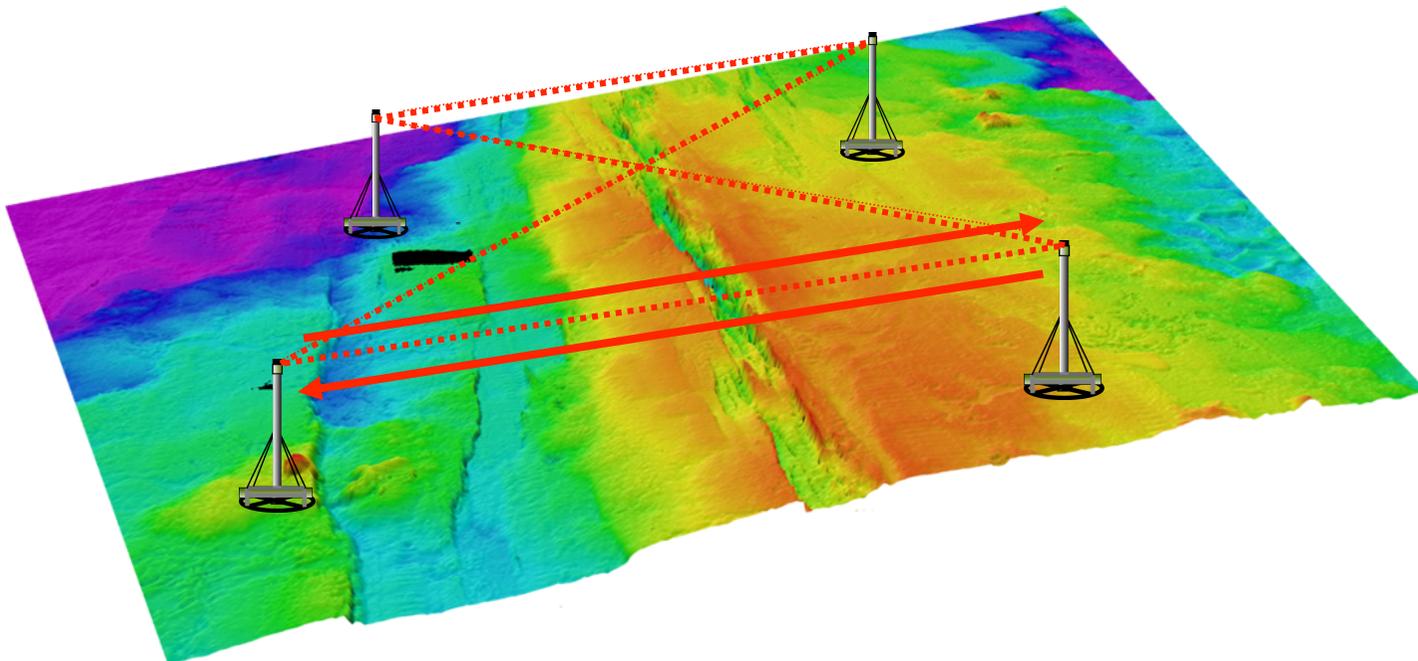
# Mesure de déformations

- Levés diachroniques d'un champ de dunes (chenal du Four)
- Mesure des mouvements :
  - Horizontaux par corrélation
  - Verticaux par différence
- Résolution attendue : ~10 cm à partir de MNT à 1 m



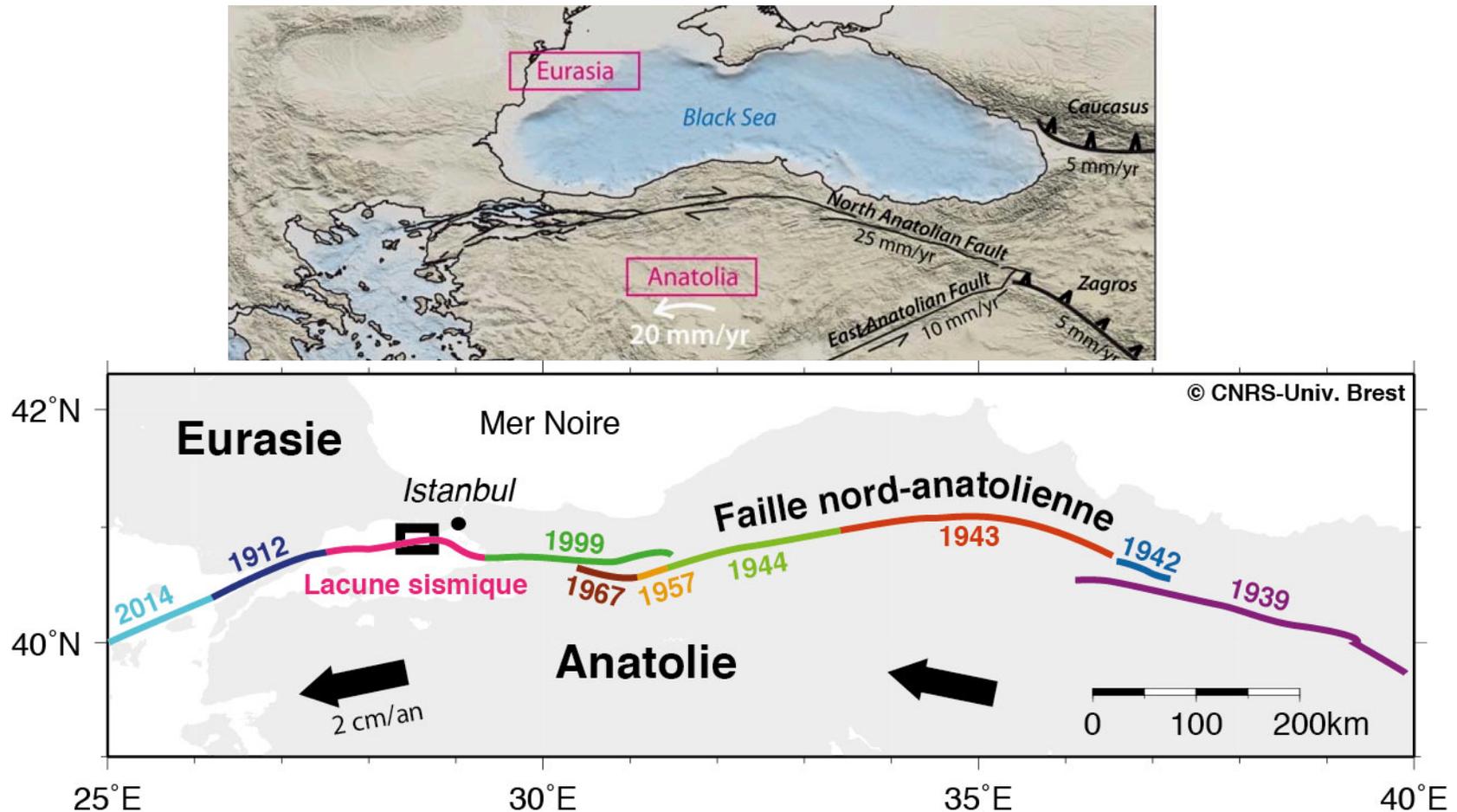
# Acoustique active: télémétrie

- Suivi continu de déformations par télémétrie acoustique
  - Mesure de temps de parcours d'un signal entre paires de balises placées de part et d'autre d'une structure active
- Défis :
  - Résolution de qq mm sur des lignes de qq centaines de mètres
  - Balises autonomes et stables sur plusieurs années



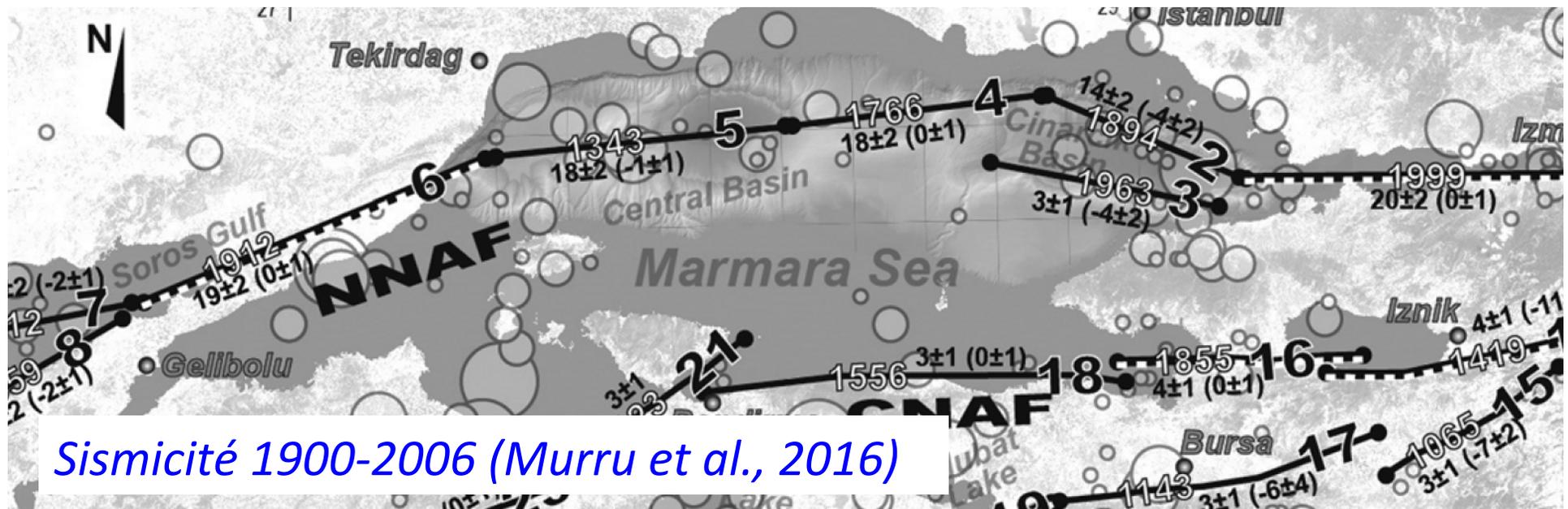
# Expérience Marsite en mer de Marmara

- Identifier une faille sous-marine “rapide” et accessible:
  - Partie immergée de la faille nord-anatolienne (~25 mm/an)
  - Faille en décrochement dextre (déplacement horizontal)



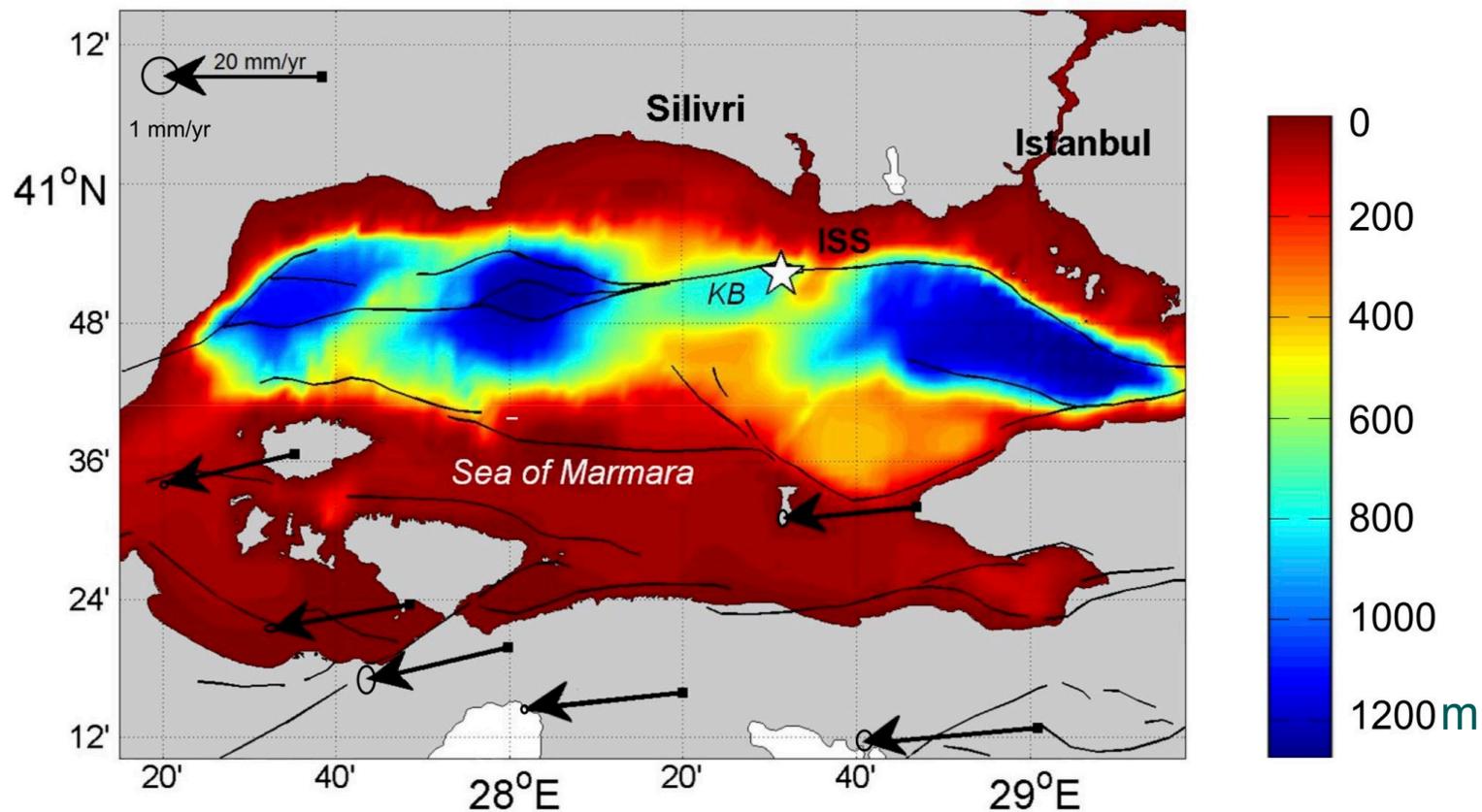
# Expérience Marsite en mer de Marmara

- Le segment Istanbul-Siliviri: une lacune sismique depuis 1766 !
  - Faille bloquée => accumulation de contraintes ?
  - Ou glissement asismique ?



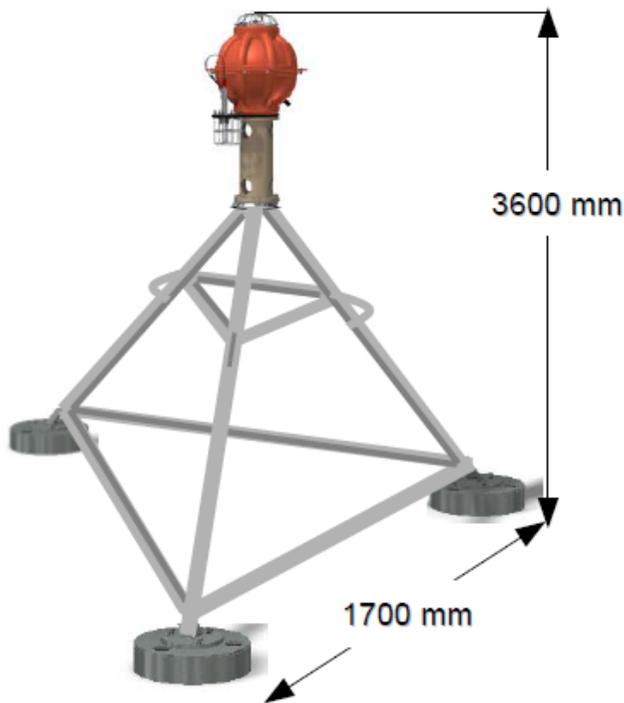
# Expérience Marsite en mer de Marmara

- Le segment Istanbul-Silivri: une lacune sismique depuis 1766 !
  - Faille bloquée => accumulation de contraintes ?
  - Ou glissement asismique ?
  - Mouvement relatif en champ lointain (GPS): 20-25 mm/an

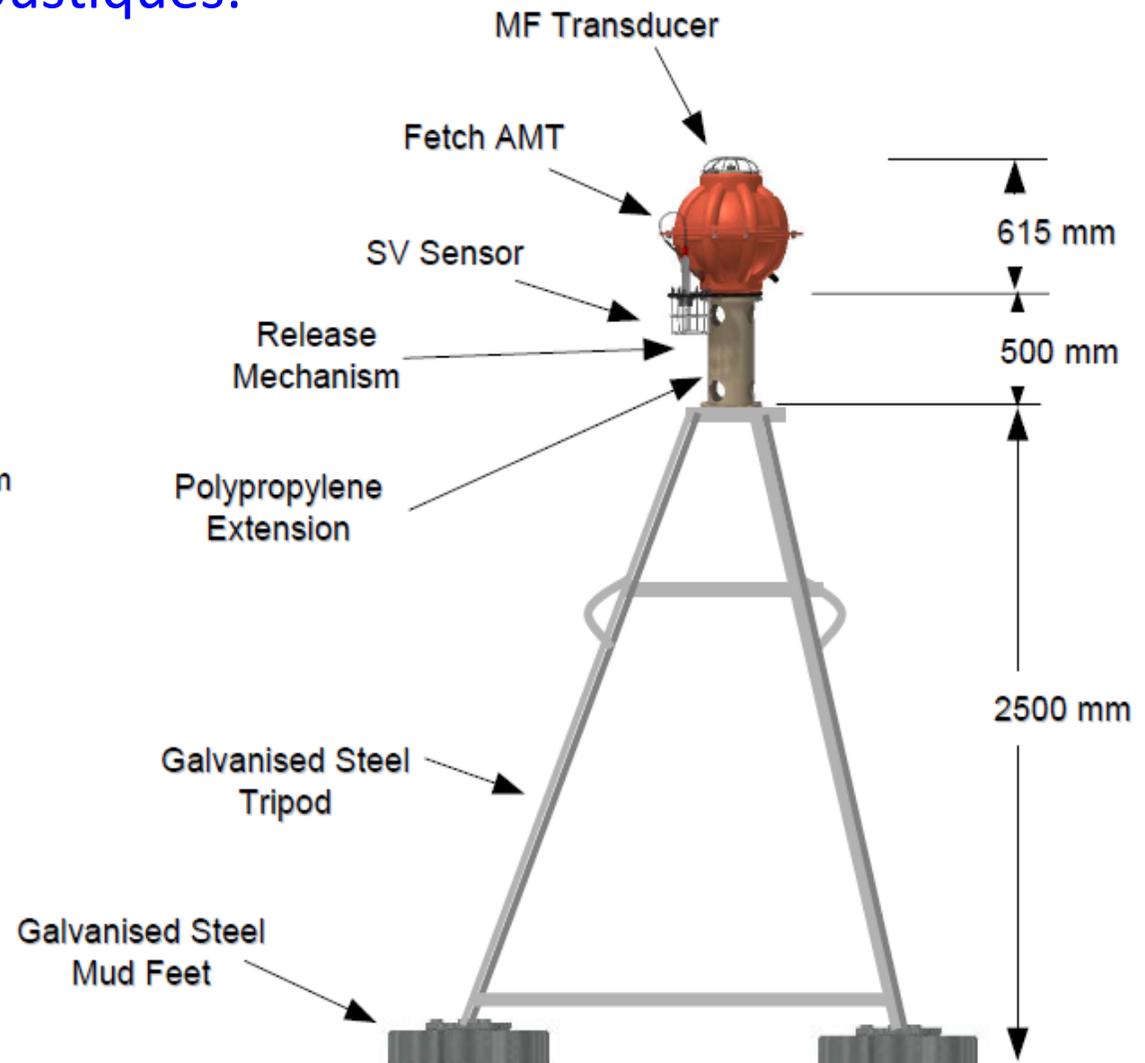


# Expérience Marsite en mer de Marmara

- Réseau de balises acoustiques:
  - 22 kHz
  - Autonomie 4-5 ans

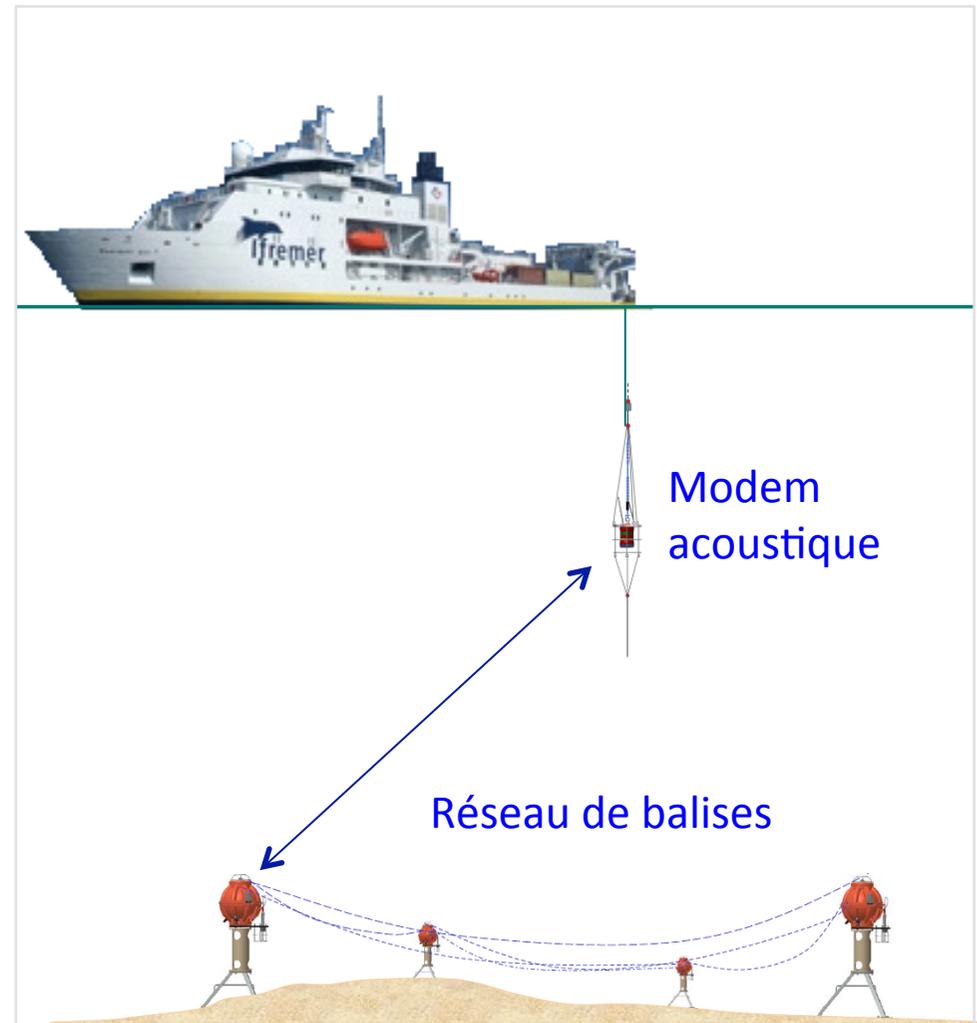


*Poids (air/eau): ~200/120 kg*



# Expérience Marsite en mer de Marmara

- Modem de communication
  - Bulletin de santé des balises
  - Téléchargement des données
  - *Re-configuration des balises*



# Expérience Marsite en mer de Marmara

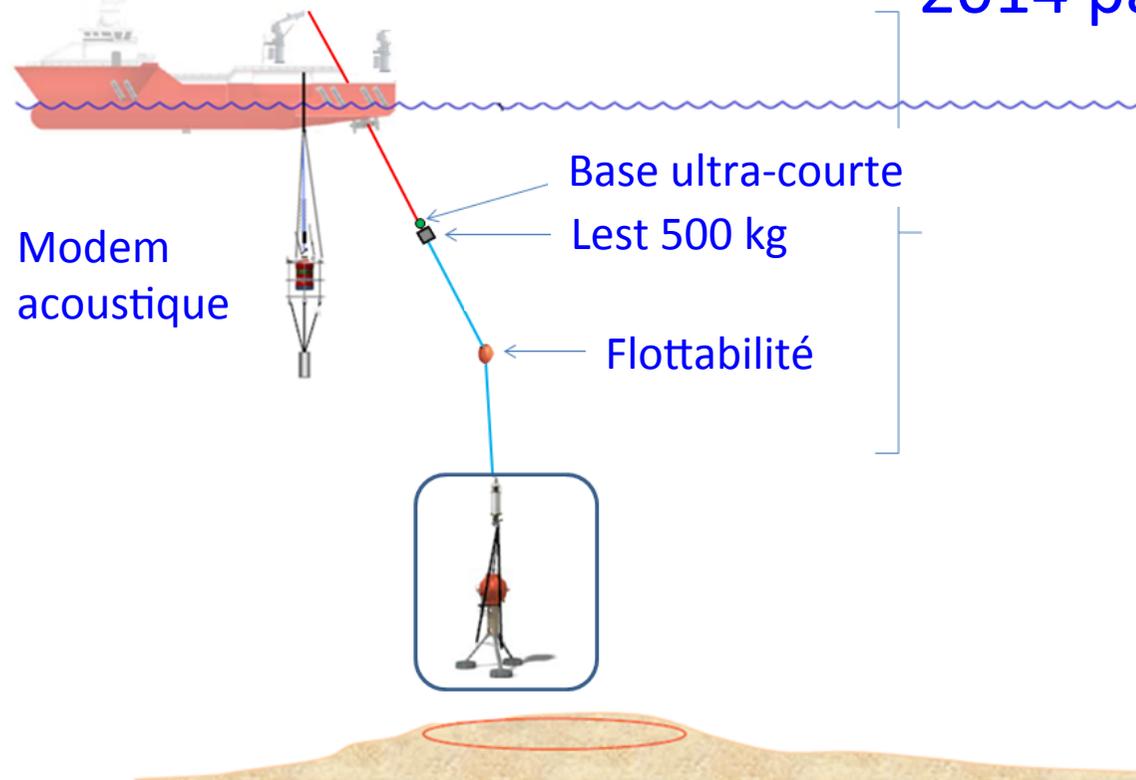


- Déploiement fin octobre 2014 par le NO Pourquoi Pas?
  - Campagne MARSITE  
*Ifremer/ CEREGE/KOERI/ITU*



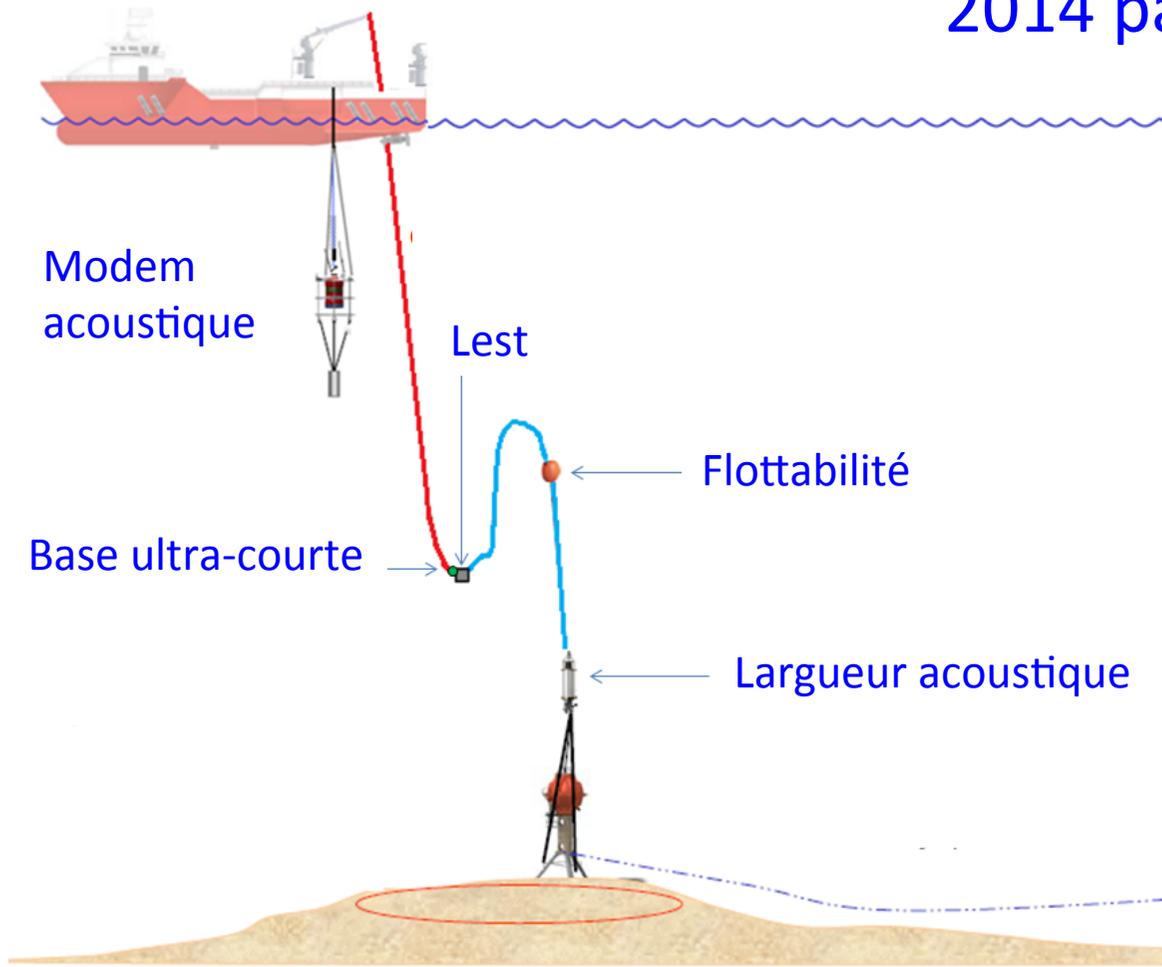
# Expérience Marsite en mer de Marmara

- Déploiement fin octobre 2014 par le NO Pourquoi Pas?

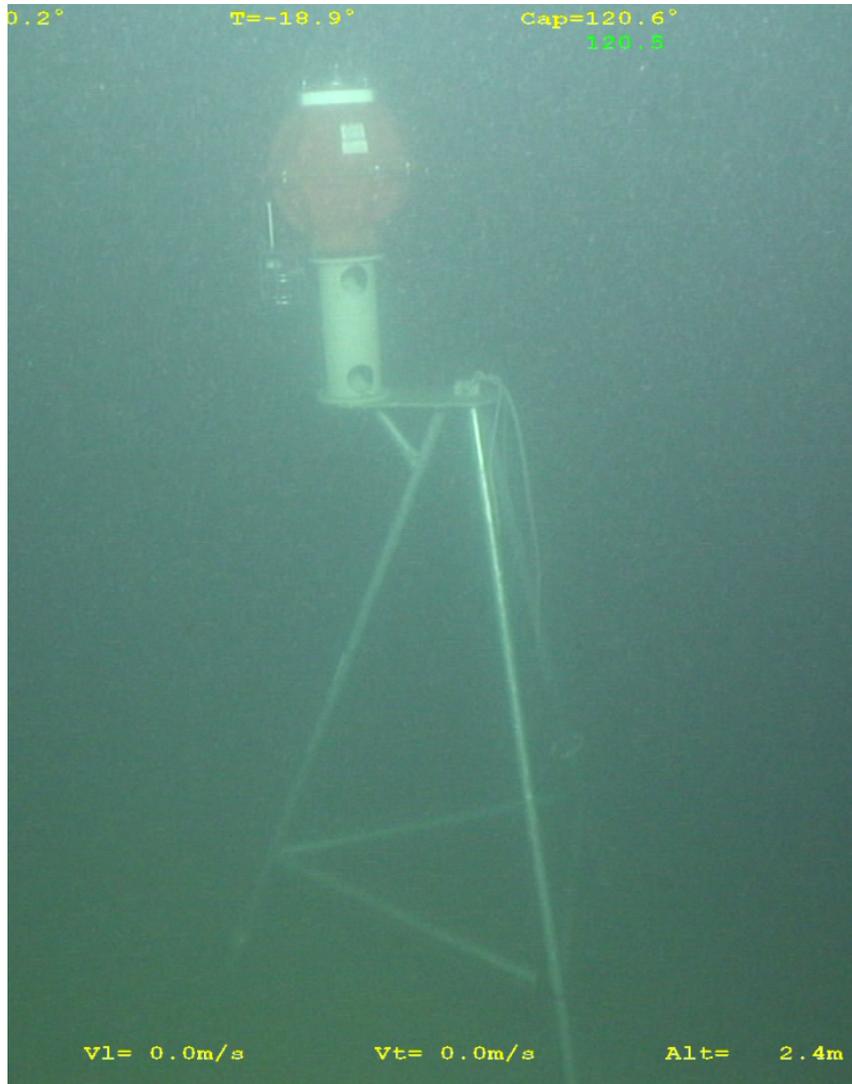


# Expérience Marsite en mer de Marmara

- Déploiement fin octobre 2014 par le NO Pourquoi Pas?



# Expérience Marsite en mer de Marmara



- Visite des stations après déploiement, avec le ROV Victor
  - Vérification
  - Orientation



2 inclinomètres,  
balise orientée par  
rapport au trépied

# Expérience Marsite en mer de Marmara

## Acoustic stations

Number of stations	4
Acoustic transponder	Sonardyne AMT (22.5 kHz)
Temperature sensor	Valeport
Pressure sensor	Paroscientific Digiquartz
Sound-speed sensor	Valeport
Inclinometer sensors	Jewell

## Session parameters

Session interval	1h
Wake-up interval as Master	5 min

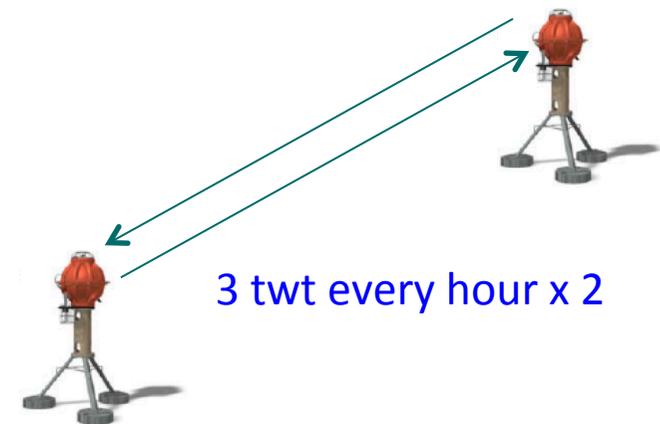
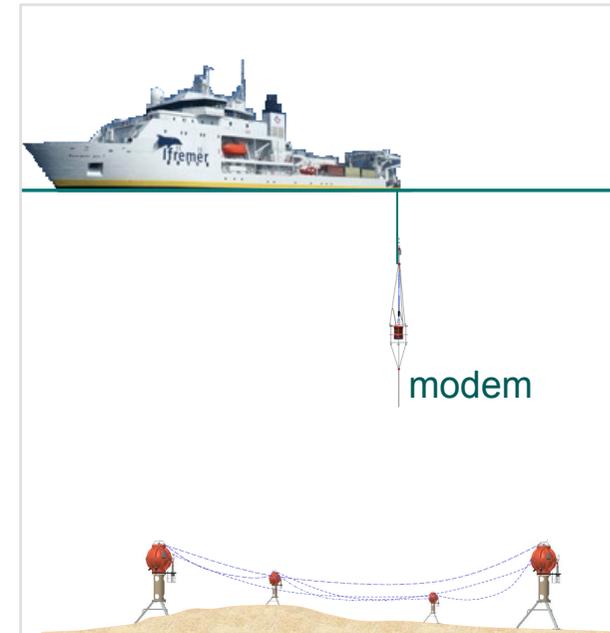
## Number of samples / session

Ranges	3 at 5s interval
Sound-speed	10 (1 as Master + 3*3 as Slave)
Temperature	10 (1 as Master + 3*3 as Slave)
Pressure	1
Attitude (on orthogonal axes)	1 every 24h (24 sessions)

## Number of ranging per baseline

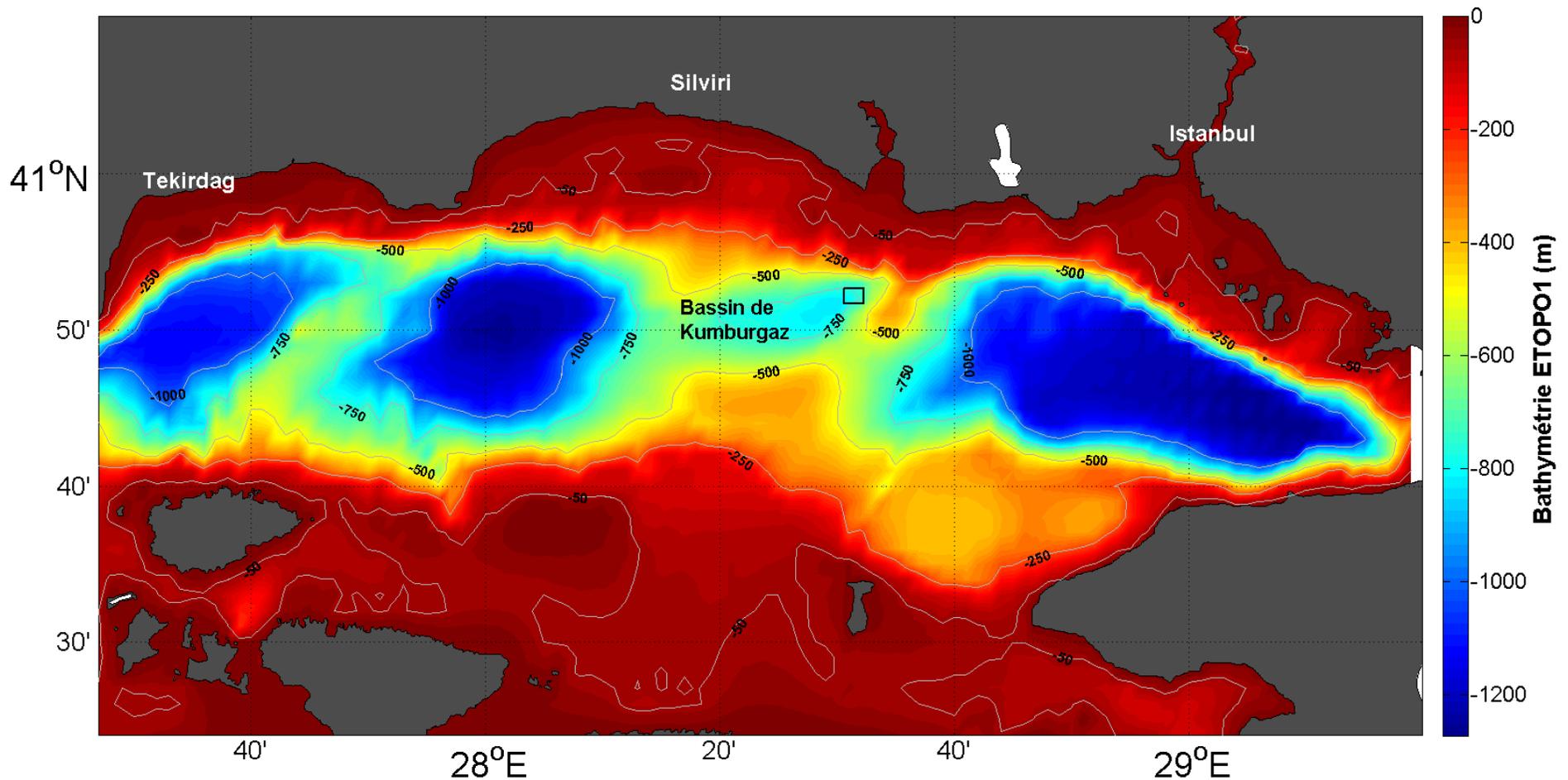
Per session	6
Per day	144

**Expected autonomy** 5 years



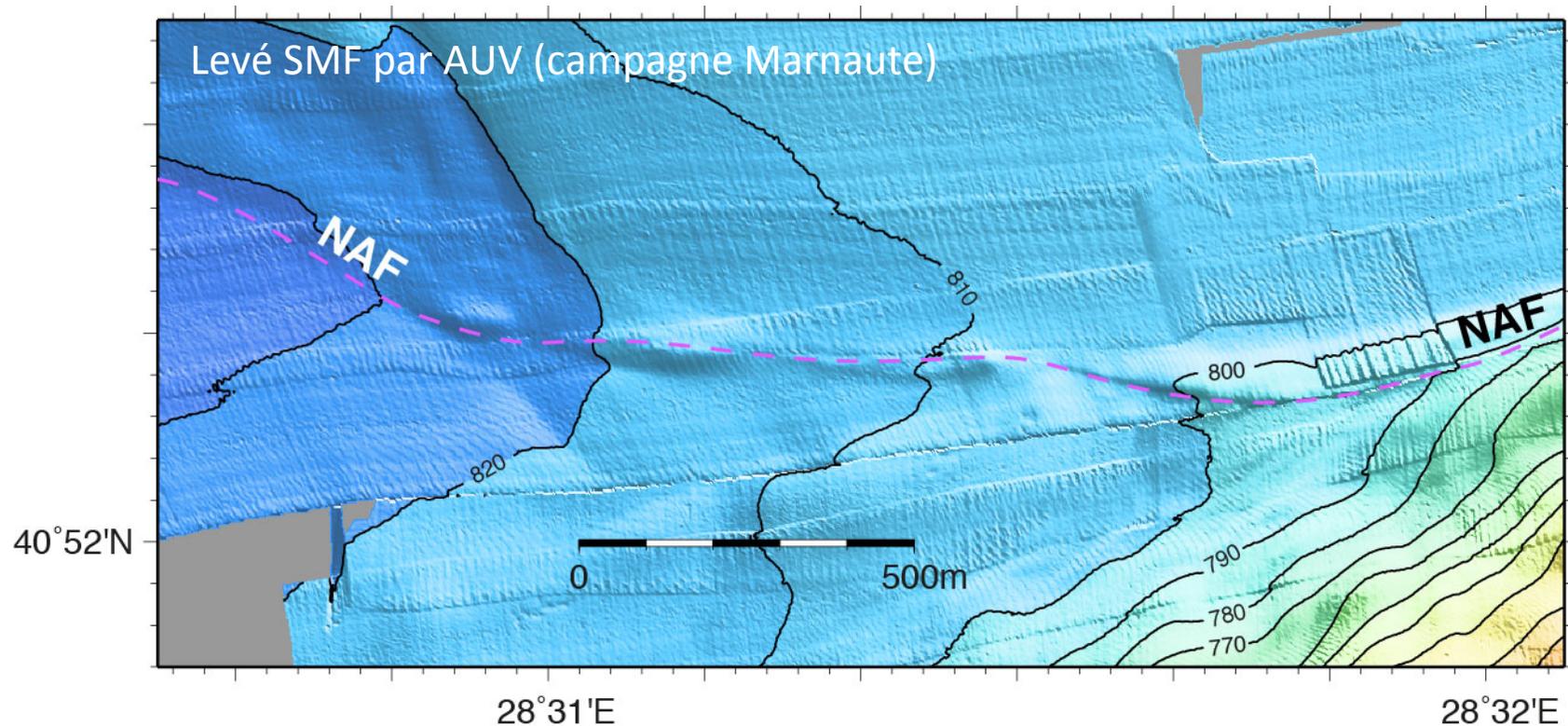
# Expérience Marsite en mer de Marmara

- 2 réseaux imbriqués: 4 LGO + 6 GEOMAR
  - 15 lignes de base de 350 à 1700 m de long



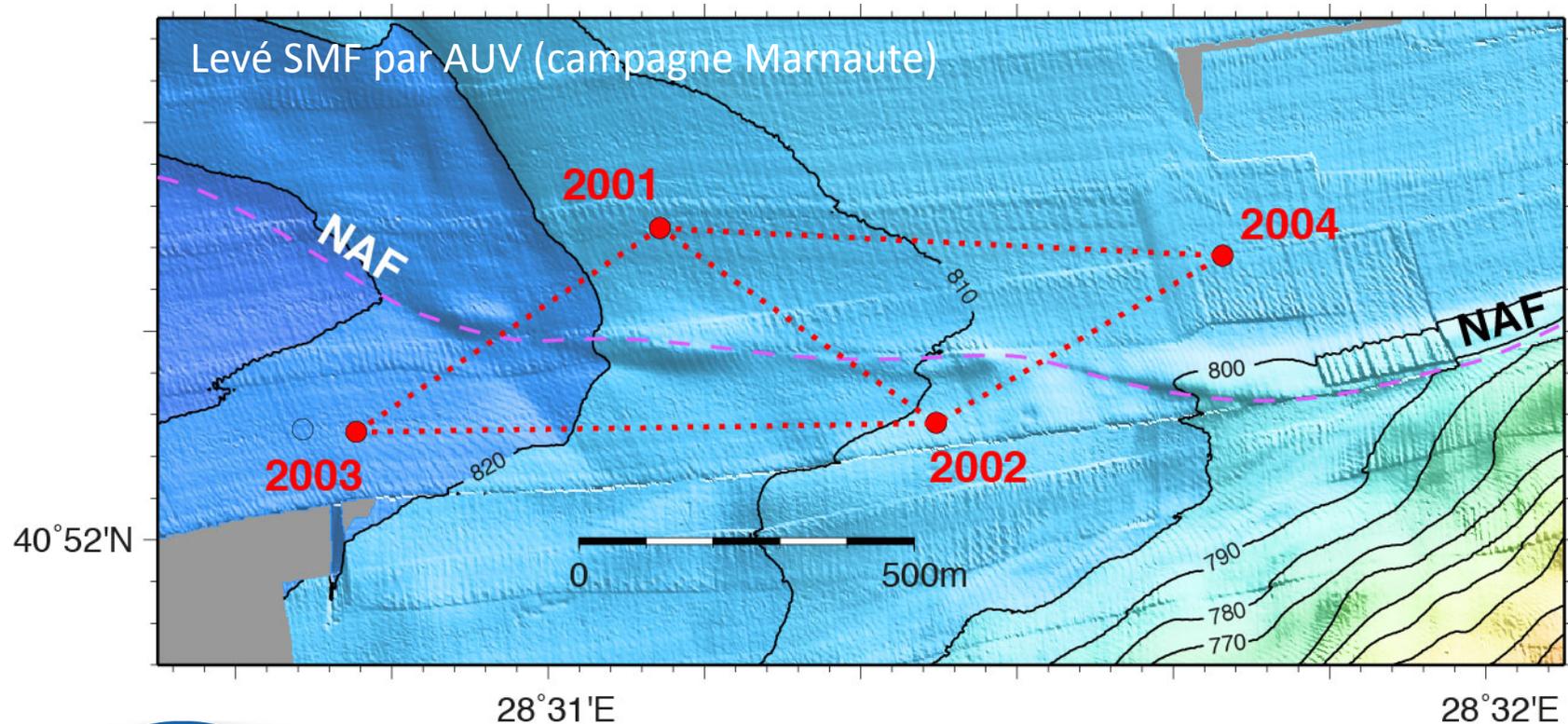
# Expérience Marsite en mer de Marmara

- 2 réseaux imbriqués: 4 LGO + 6 GEOMAR
  - 15 lignes de base de 350 à 1700 m de long



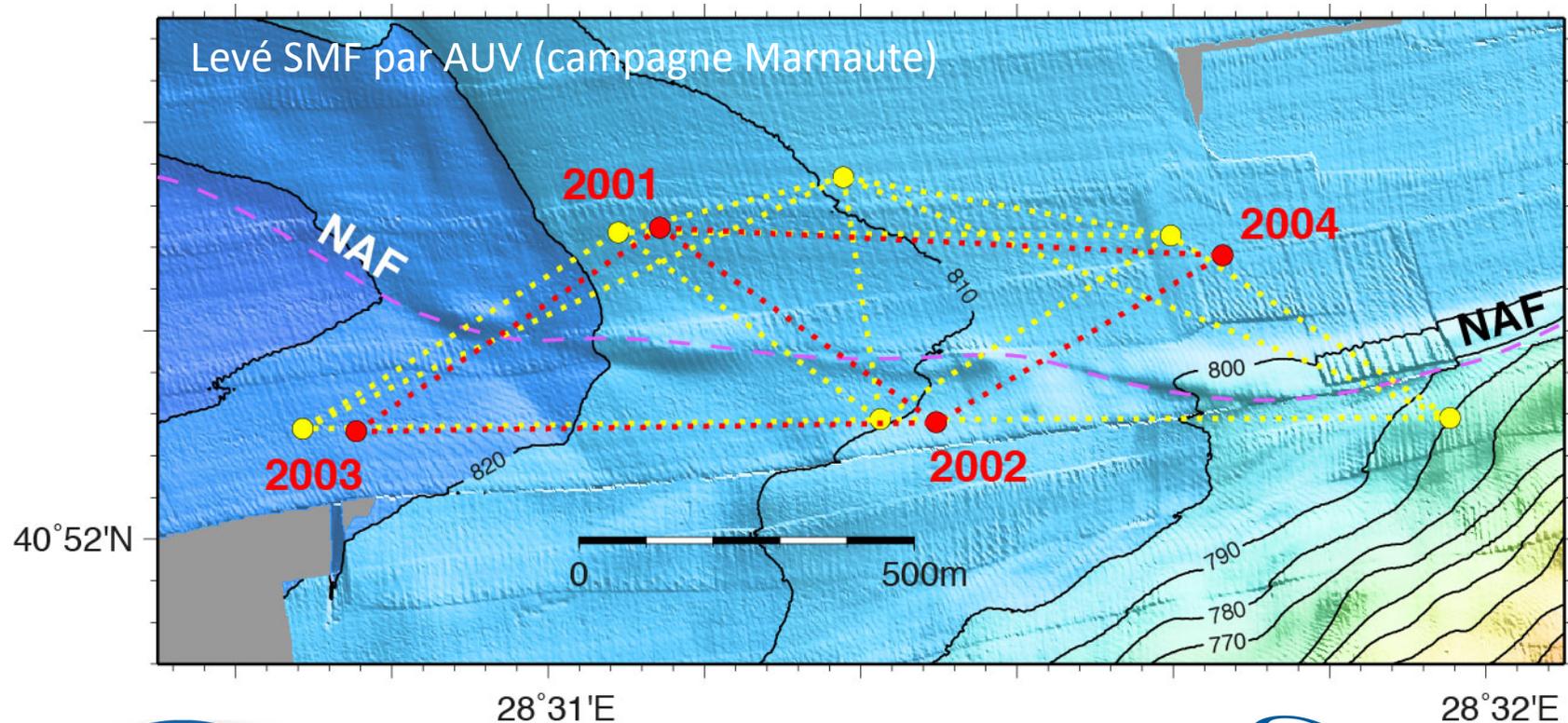
# Expérience Marsite en mer de Marmara

- 2 réseaux imbriqués: 4 LGO + 6 GEOMAR
  - 15 lignes de base de 350 à 1700 m de long



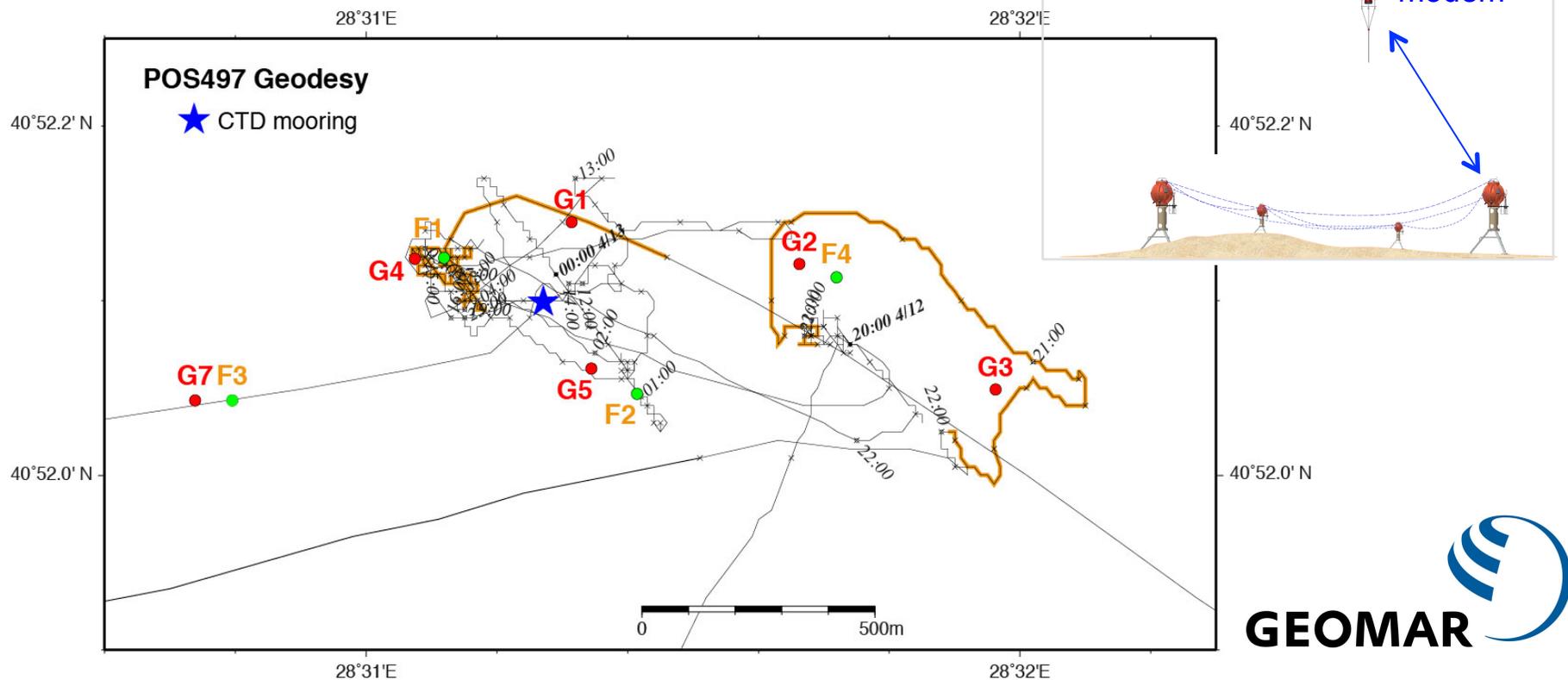
# Expérience Marsite en mer de Marmara

- 2 réseaux imbriqués: 4 LGO + 6 GEOMAR
  - 15 lignes de base de 350 à 1700 m de long



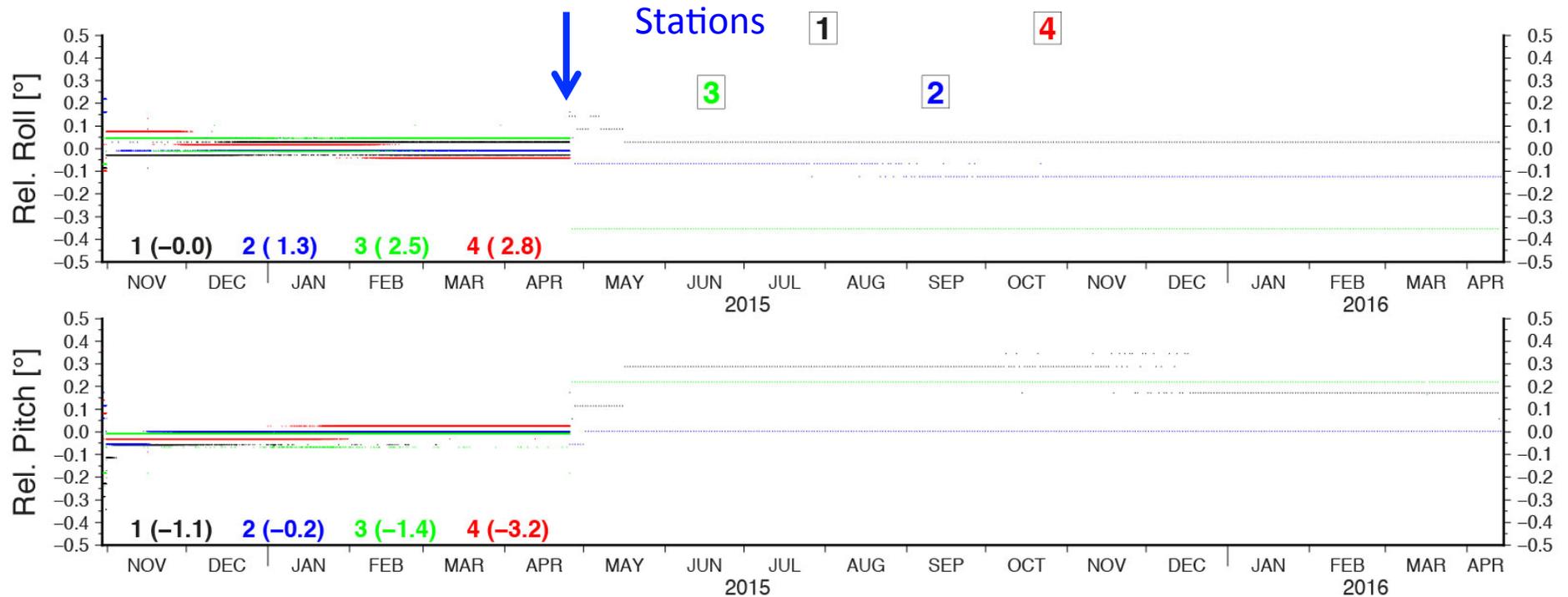
# Expérience Marsite en mer de Marmara

- 2 visites depuis déploiement:
  - Avril 2015 (NO Poseidon)
  - Avril 2016 (NO Poseidon)



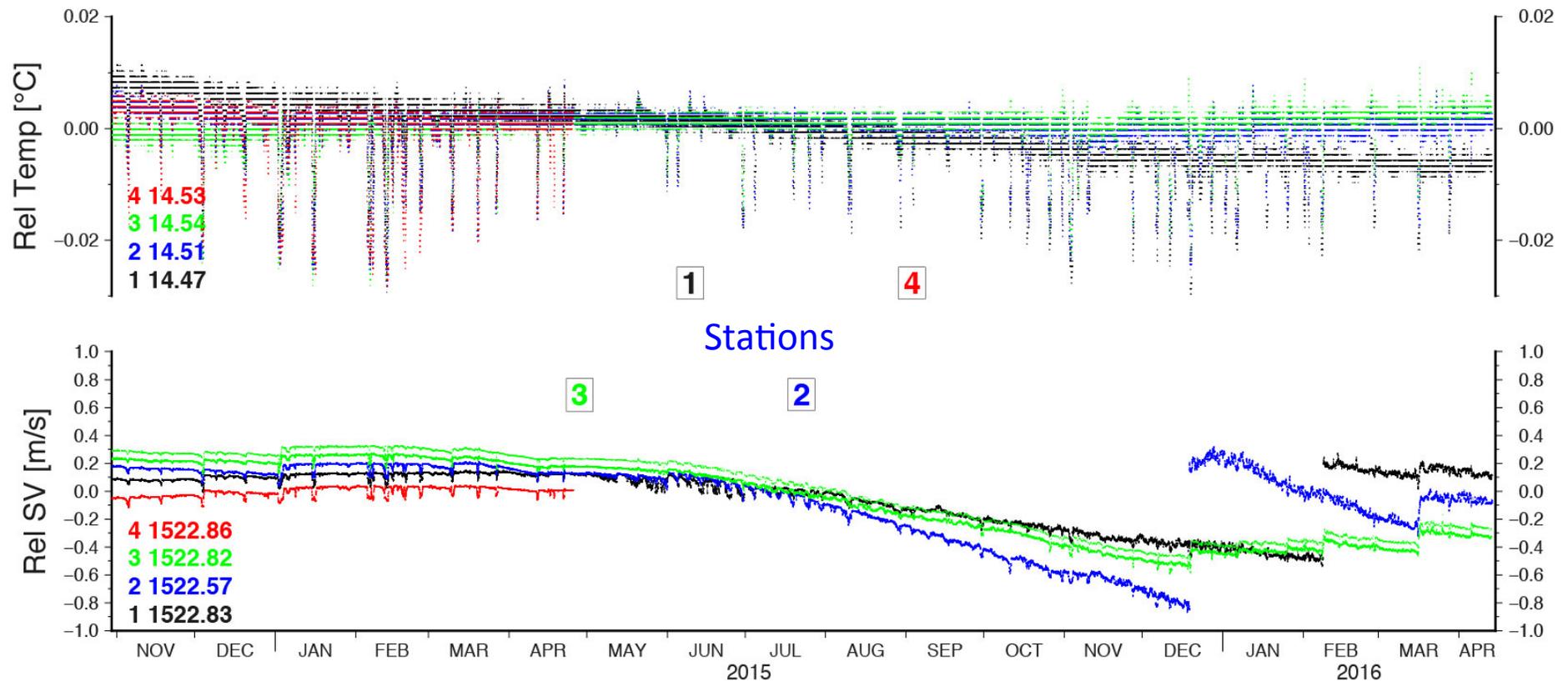
# Expérience Marsite en mer de Marmara

- Données des inclinomètres :
  - Balises stables sur le fond (res. 0.06°)
  - Discontinuité liée à l'interrogation des balises



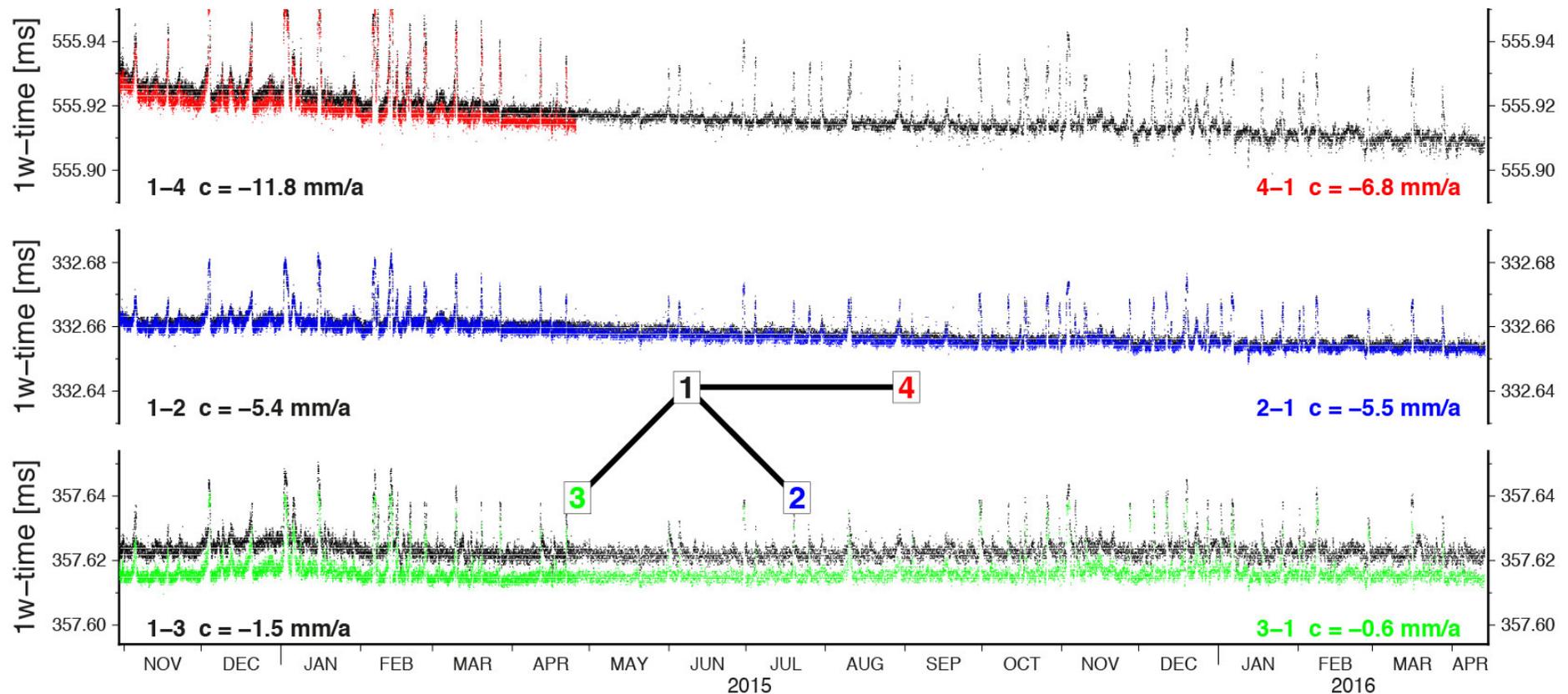
# Expérience Marsite en mer de Marmara

- Mesures de température et de célérité du son :
  - Pulses récurrents d'eau froide de fond (  $-0.02^{\circ}\text{C}$  )
  - Dérive des capteurs ( T &  $C_{\text{son}}$  )
  - Discontinuités dans les mesures de célérité ( $C_{\text{son}}$ )



# Expérience Marsite en mer de Marmara

- Temps de vol (aller simple):
  - Dispersion < 0.005 ms
  - Temps aller & retour cohérents
  - Effet des pulses d'eau froide de fond



# Expérience Marsite en mer de Marmara

- Analyse des données :
  - Recalcul des célérités à partir de T, P et salinité
  - Prise en compte d'une dérive (T, P) inconnue
  - Elimination des pulses

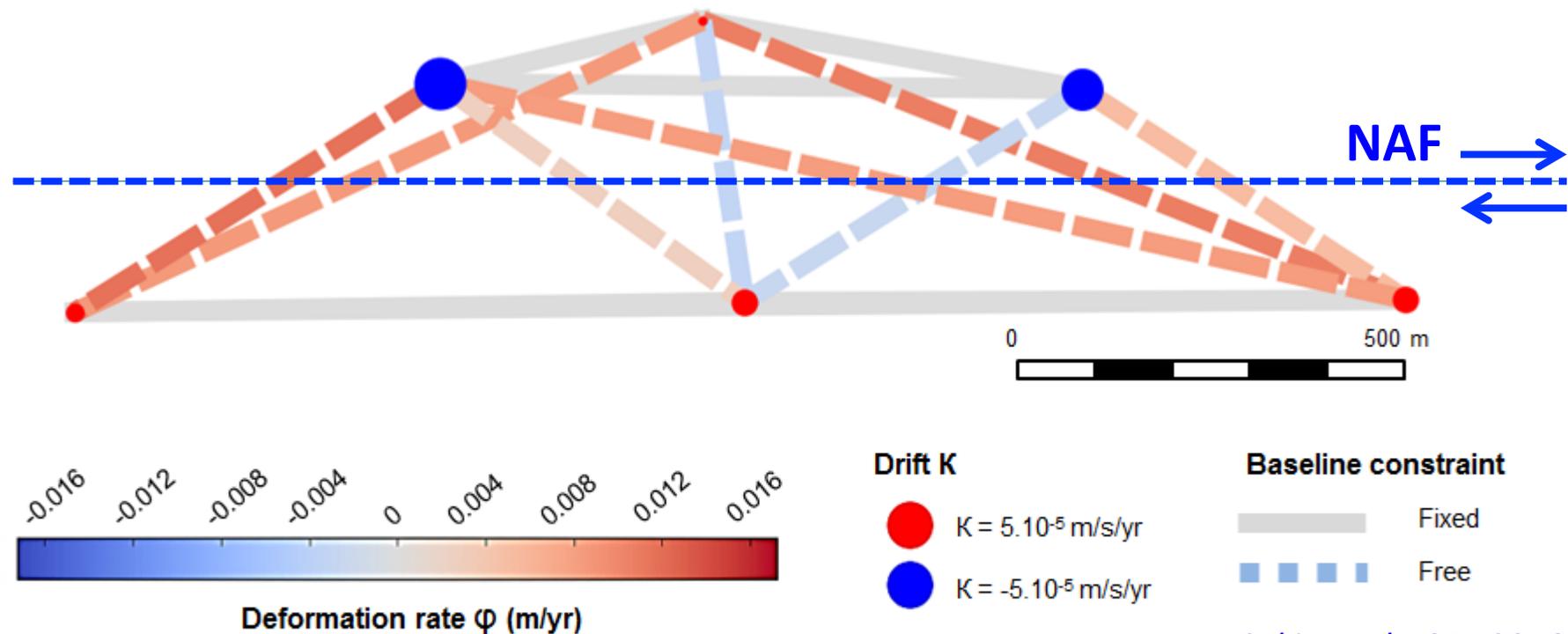
$$\tau = d / c \quad \tau_{\text{theo},i,A \rightarrow B} = \frac{1}{2} (d_{0,A \rightarrow B} + \varphi_{A \leftrightarrow B} t_i) \cdot \left( \frac{1}{c'_{A,i} + k_A \cdot t_i} + \frac{1}{c'_{B,i} + k_B \cdot t_i} \right)$$

with

- $\tau_{\text{theo},i,A \rightarrow B}$  the theoretical one-way traveltime (s) from transponder *A* to transponder *B* at epoch *i*,  
 $d_{0,A \rightarrow B}$  the initial baseline length (m) between transponders *A* and *B* at the reference epoch,  
 $\varphi_{A \leftrightarrow B}$  the (constant) deformation rate (m/yr) of the baseline length between transponders *A* and *B*,  
 $t_i$  the epoch (year) of the ping relative to the reference,  
 $k_A, k_B$  the coefficients of the sound speed linear drift (m/s/yr) for transponders *A* and *B*, respectively,  
and  
 $c'_{A,i}, c'_{B,i}$  the computed sound speed (m/s) at transponders *A* and *B* at epoch *i*.

# Expérience Marsite en mer de Marmara

- Résultats (6 premiers mois) :
  - Variations significatives de longueurs des lignes de base
  - Mais incohérentes (directions et taux incohérents)
  - Même en imposant des conditions : signal < bruit



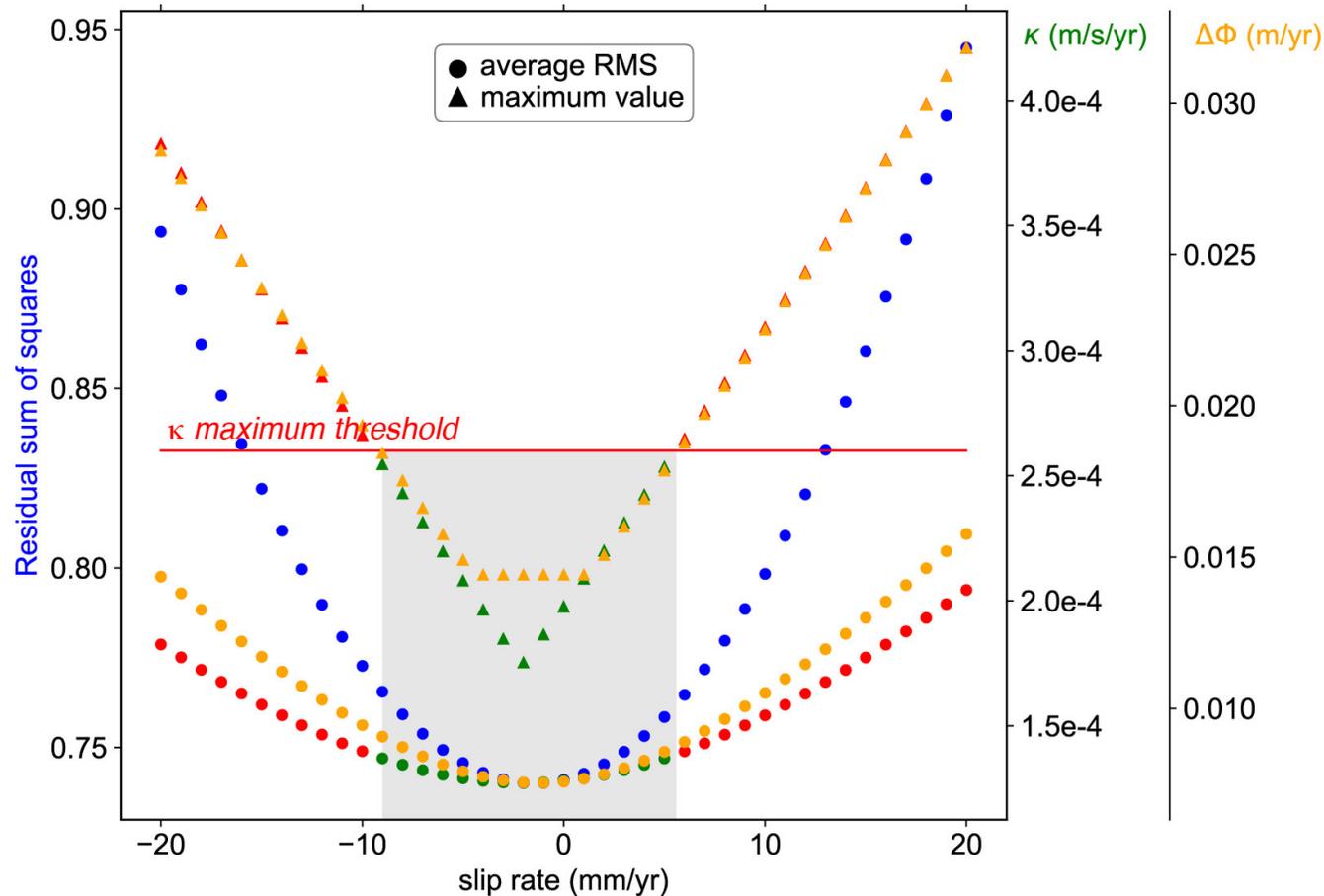
# Expérience Marsite en mer de Marmara

- Résultats (6 premiers mois) :
  - Pas de mouvement significatif de la faille NA
  - Faille bloquée ou quasi bloquée !!
- Modélisation directe :
  - Faille est-ouest passant au milieu du réseau
  - Vitesse imposée entre  $\pm 20$  mm/an  $\Rightarrow \varphi_{AB}$  imposés
  - Dérive maximum permise :  $\kappa_{station} < 2.6 \cdot 10^{-4}$  m/s/an
  - Choix de 3 critères :  $\Sigma(\tau_{theo}^2 - \tau_{obs}^2)$ ,  $\Sigma(\varphi_{theo}^2 - \varphi_{obs}^2)$ ,  $\kappa_{max}$

$$\tau_{theo,i,A \rightarrow B} = \frac{1}{2} (d_{0,A \rightarrow B} + \varphi_{A \leftrightarrow B} t_i) \cdot \left( \frac{1}{c'_{A,i} + k_A \cdot t_i} + \frac{1}{c'_{B,i} + k_B \cdot t_i} \right)$$

# Expérience Marsite en mer de Marmara

- Modélisation directe :
  - Vitesse imposée de  $\pm 20$  mm/an  $\Rightarrow \varphi_{AB}$  imposés
  - Dérive maximum permise :  $\kappa < 2.6 \cdot 10^{-4}$  m/s/an



- V possible:
- Min: -9 mm/an
  - Max: +6 mm/an

# Expérience Marsite en mer de Marmara

- Conclusion (temporaire) :
  - Segment Silivri-Istanbul bloqué ou quasi bloqué
  - Si en mouvement, pas plus de 6 mm/an
    - => déficit de mouvement entre 12 et 19 mm/an
  - Nécessité de séries temporelles plus longues
    - Mais 18 mois semblent donner les mêmes résultats
  - Mise en place d'un capteur indépendant de T, P, S pour mieux contraindre la célérité

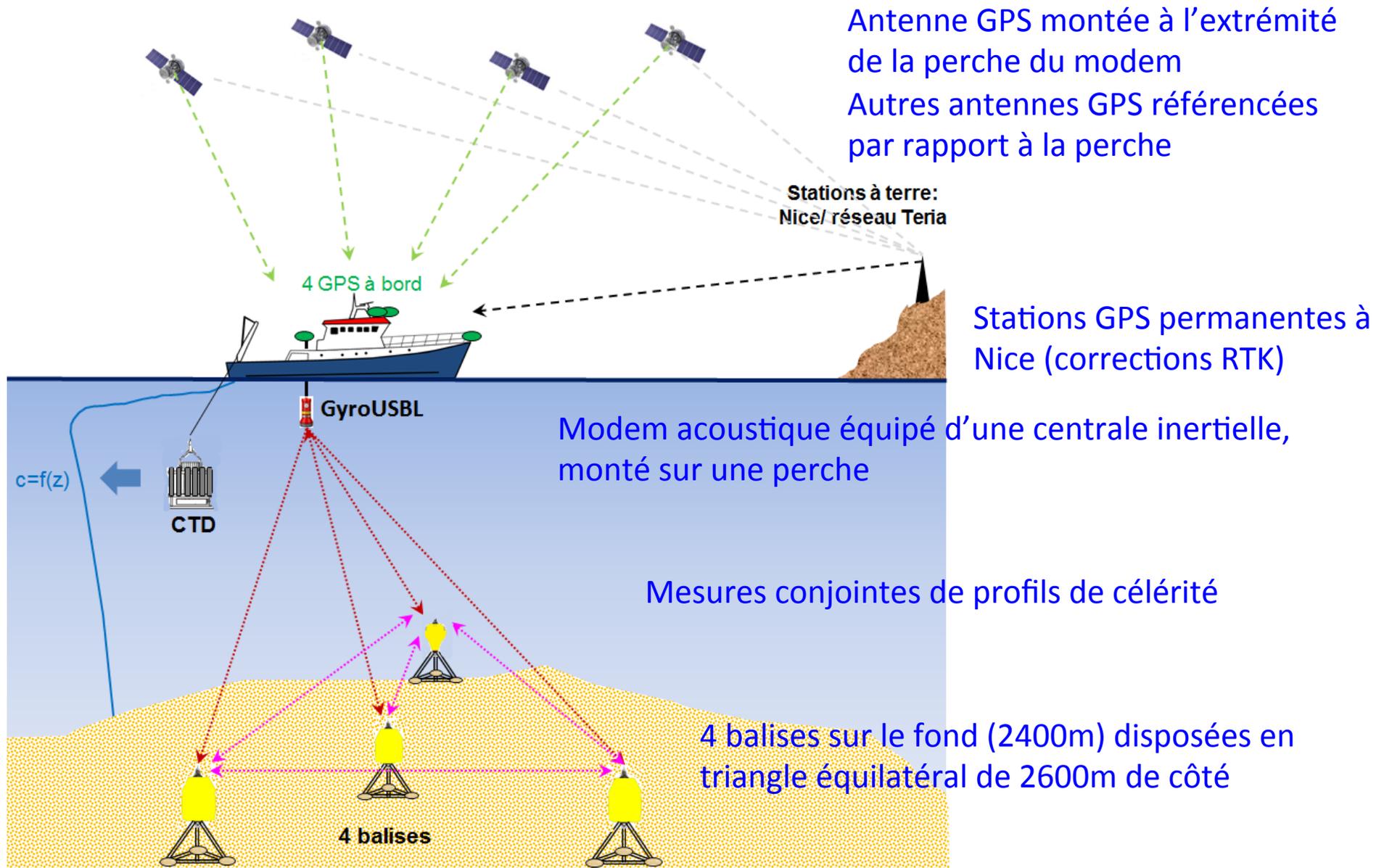
Projet soutenu par :



# Acoustique active: positionnement absolu

- Mesure de la position absolue d'un point sur le fond :
  - Positionnement par acoustique d'un réseau de balises sur le fond
  - Positionnement simultané par GPS du navire
  - Combinaison des mesures pour positionner le barycentre des balises fond de mer dans un référentiel terrestre:  
méthode dite « GPS/A »
- Défis :
  - Balises autonomes et stables sur plusieurs années
  - Correction des mouvements du navire, tant pour le positionnement acoustique que GPS
  - Réunir le même dispositif de mesure d'une année à l'autre

# Expérience GEODESEA au large de Nice

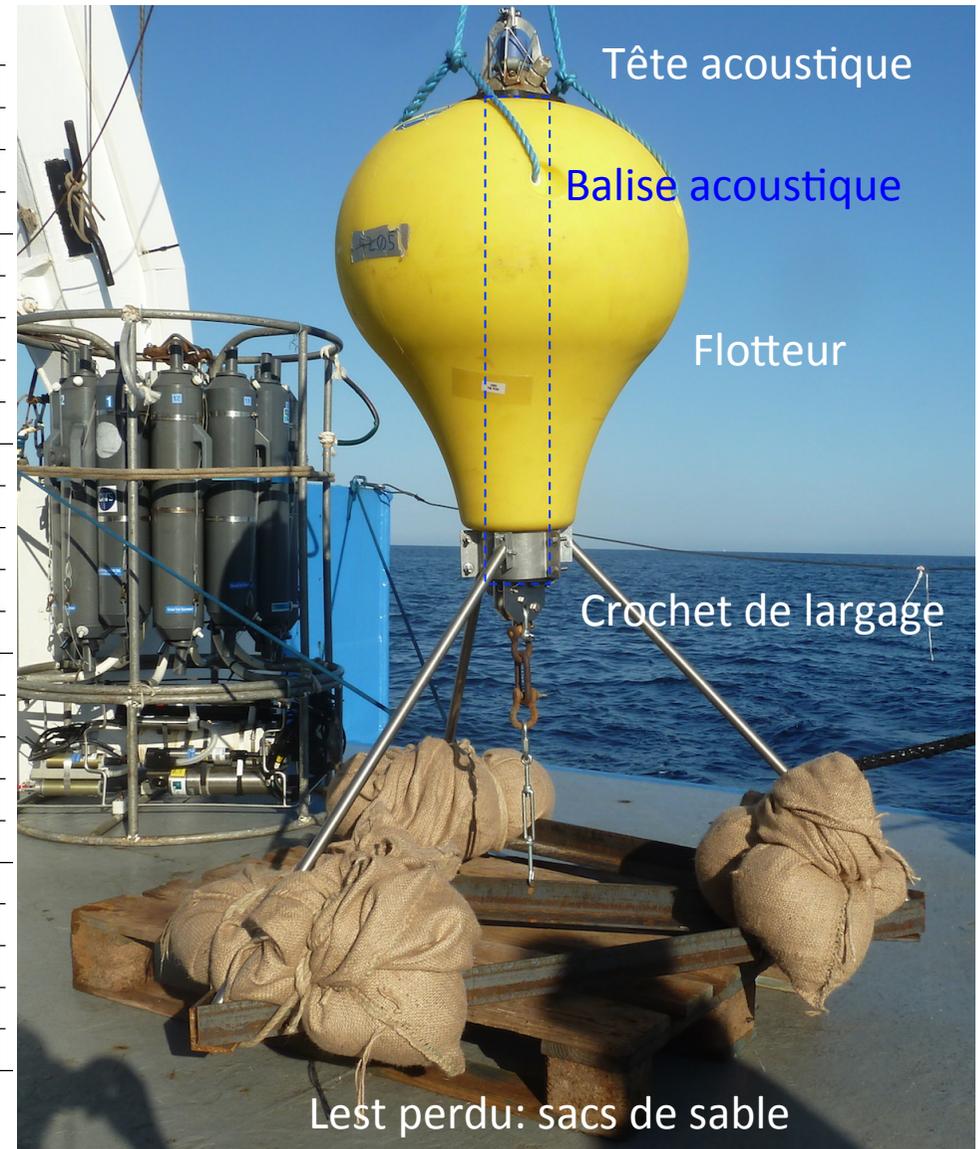
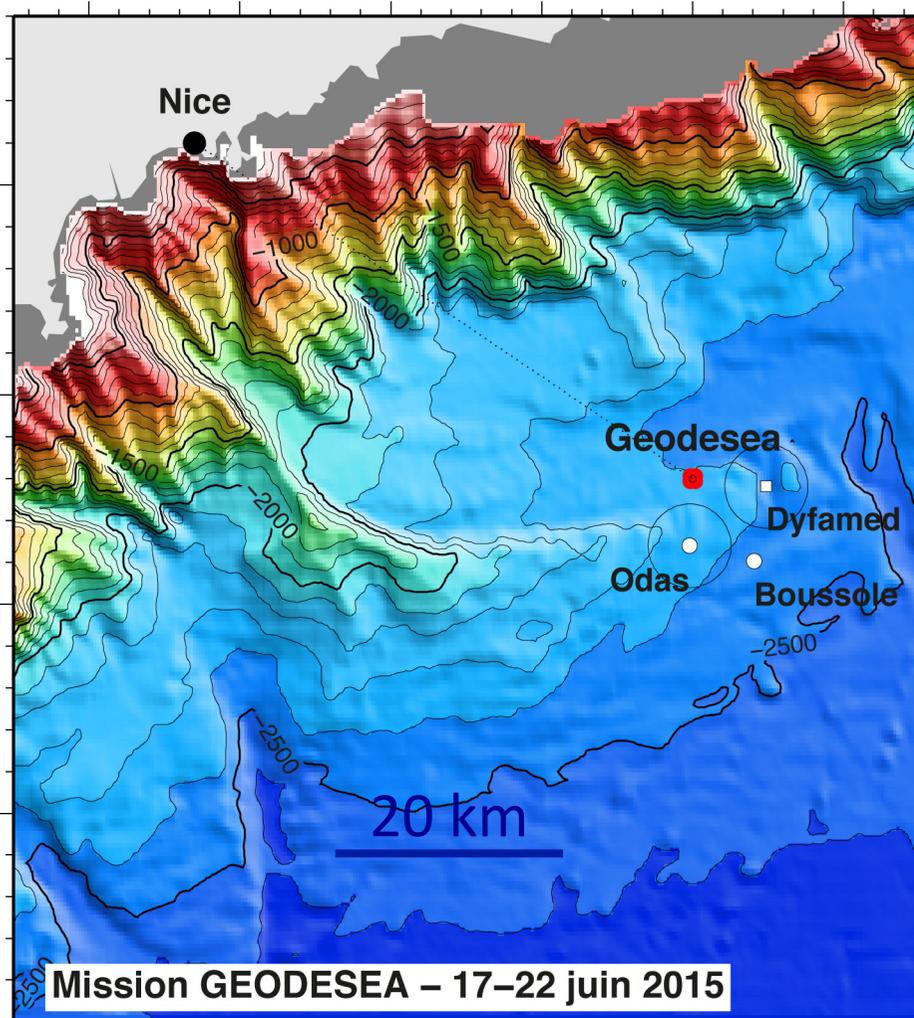


# Expérience GEODESEA au large de Nice



# Expérience GEODESEA au large de Nice

- Site et stations sur le fond

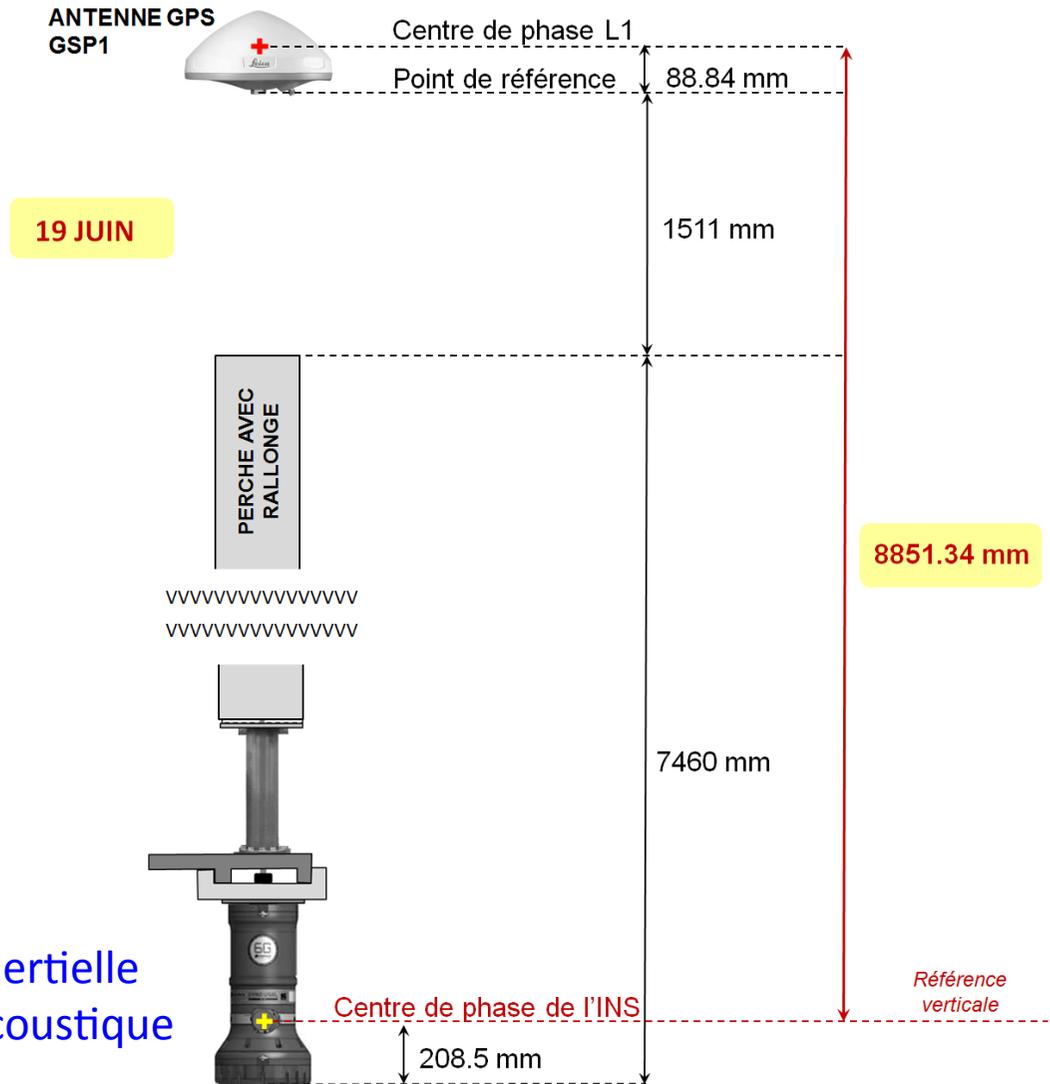


# Expérience GEODESEA au large de Nice

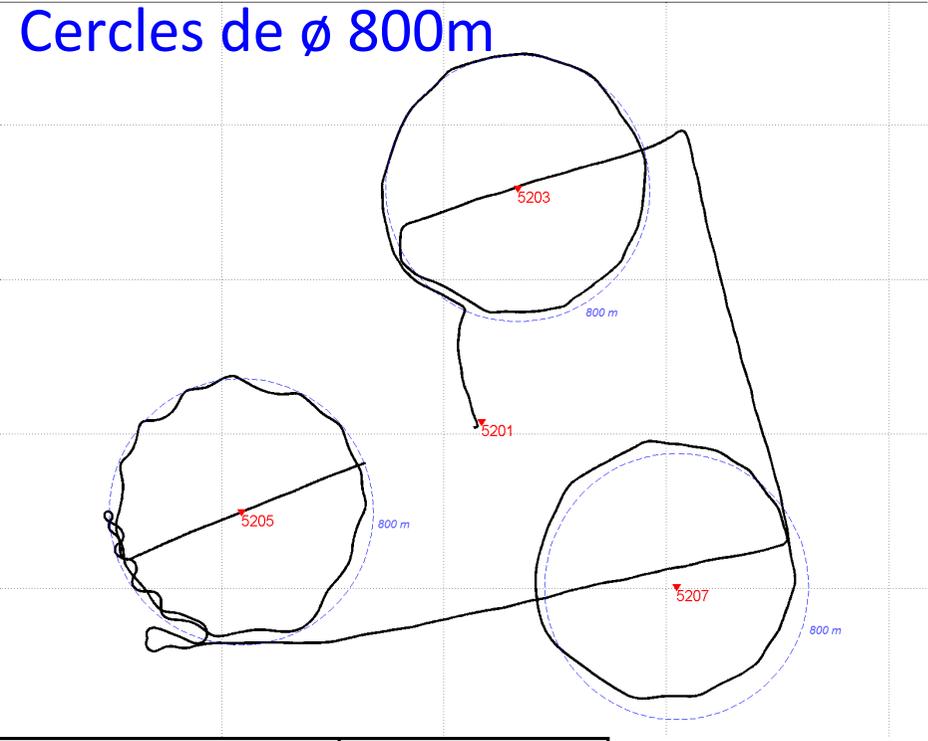
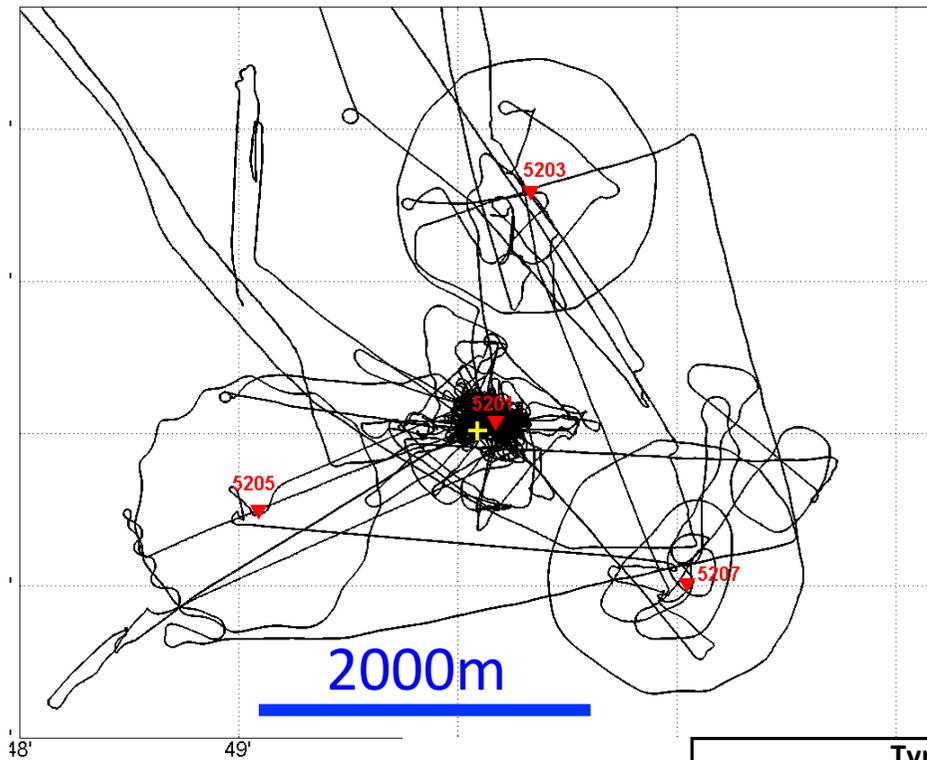
- Dispositif d'acquisition



Centrale inertielle  
& modem acoustique

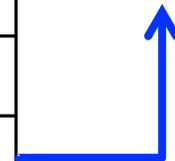


# Expérience GEODESEA au large de Nice



Protocole d'acquisition

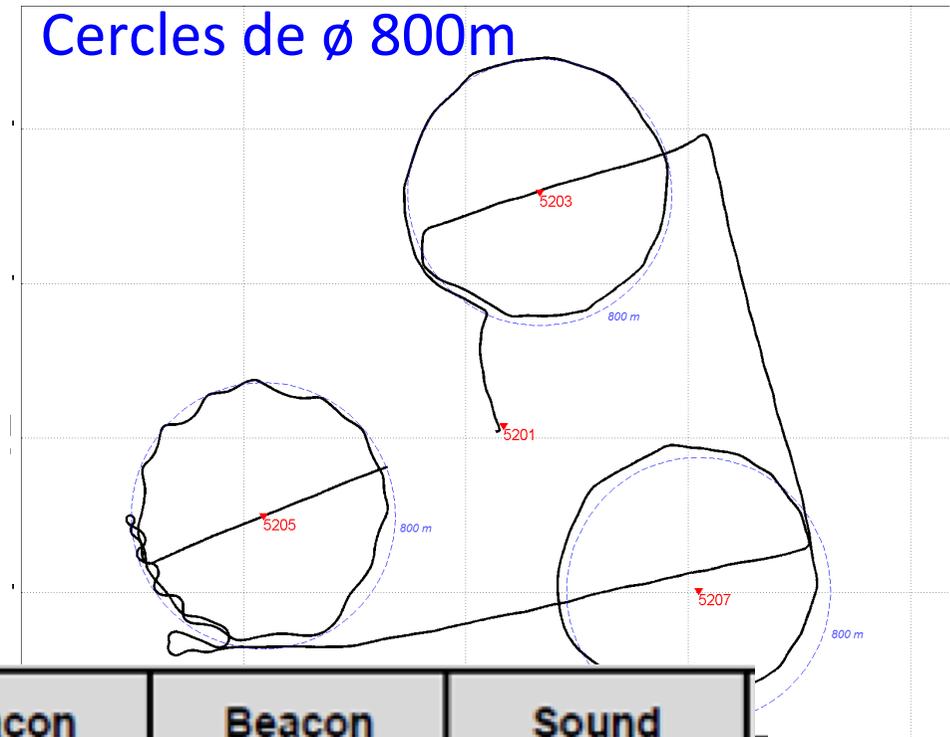
Type d'opération	Durée totale
Acquisition de ranges	37h20
Calibration CASIUS, box-in	17h50
CTD	03h45
Déploiement des balises et du PIES	11h00
Récupération des balises et du PIES	04h15



# Expérience GEODESEA au large de Nice

- Résolution après triangulation individuelle
  - Horizontale: 1-3 cm
  - Verticale: 8-12 cm
- En cours:
  - Recalcul des positions GPS
  - Inversion globale

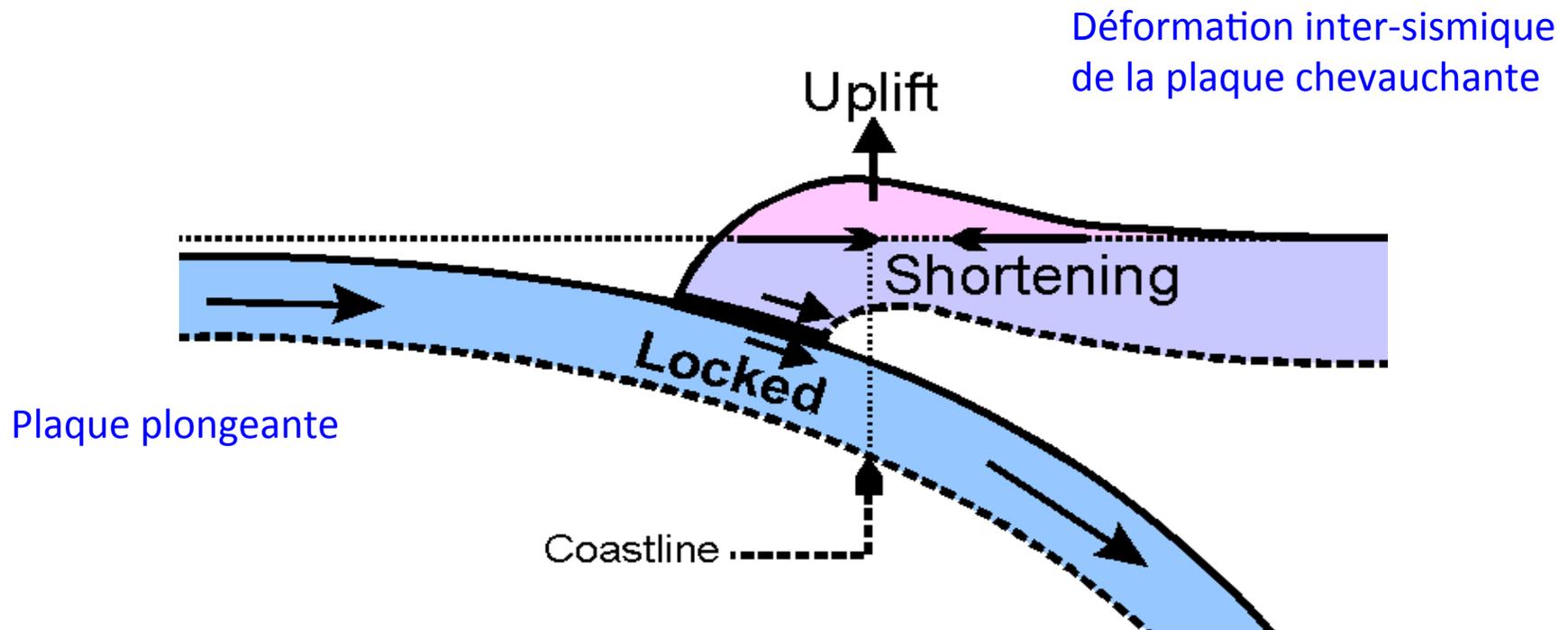
Cercles de  $\varnothing$  800m



Beacon BoxIn	Beacon Eastings	Beacon Northings	Beacon Depth	Sound Velocity
Before	405822.34m	4810596.46m	2386.76m	1525.30m/s
Calculated	405821.25m	4810596.31m	2387.51m	1525.69m/s
Calculated Accuracy	0.03m	0.02m	0.12m	0.05m/s
Calculated Accuracy	0.01m	0.01m	0.09m	0.03m/s
Calculated Accuracy	0.02m	0.02m	0.11m	0.04m/s
Calculated Accuracy	0.01m	0.01m	0.08m	0.03m/s

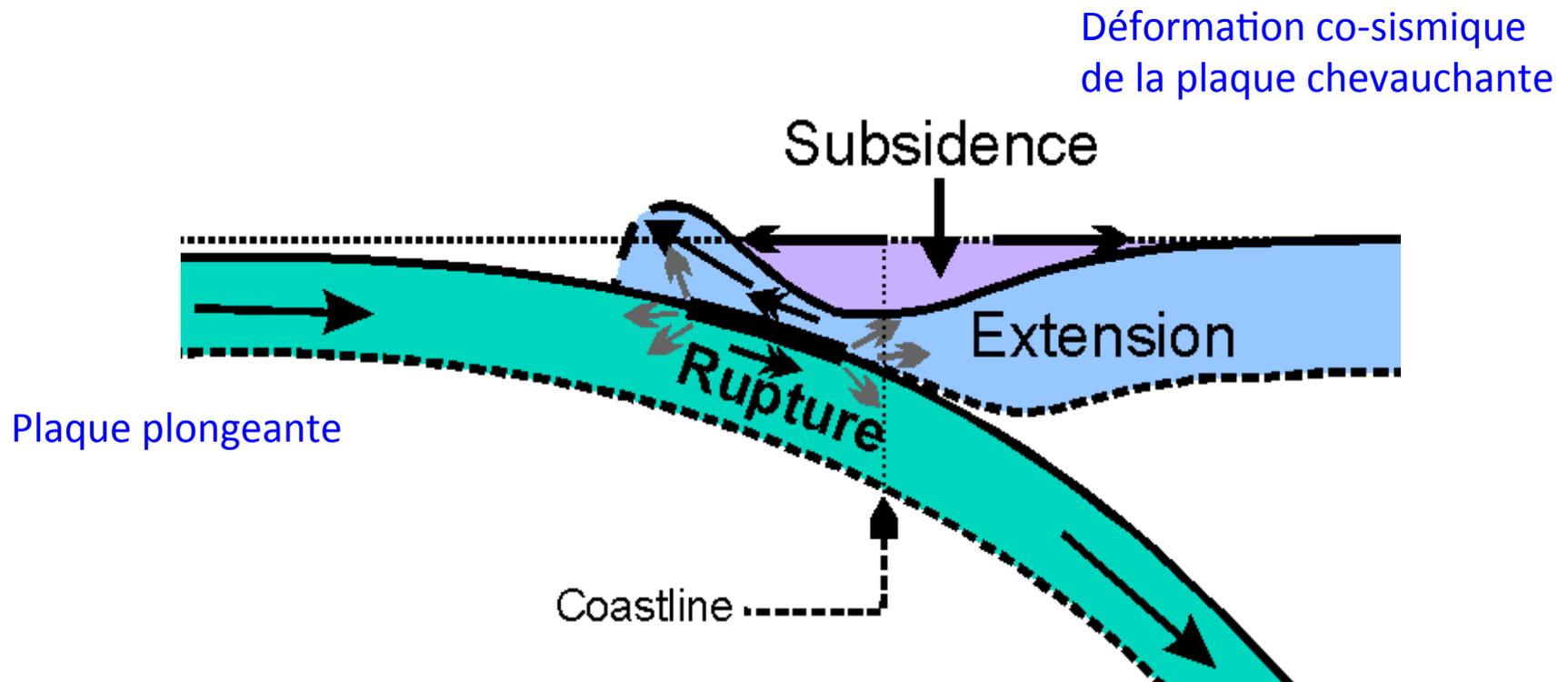
# Application à la mesure des déformations inter- ou co-sismiques en zone de subduction

- Les séismes de subduction se produisent suivant des cycles

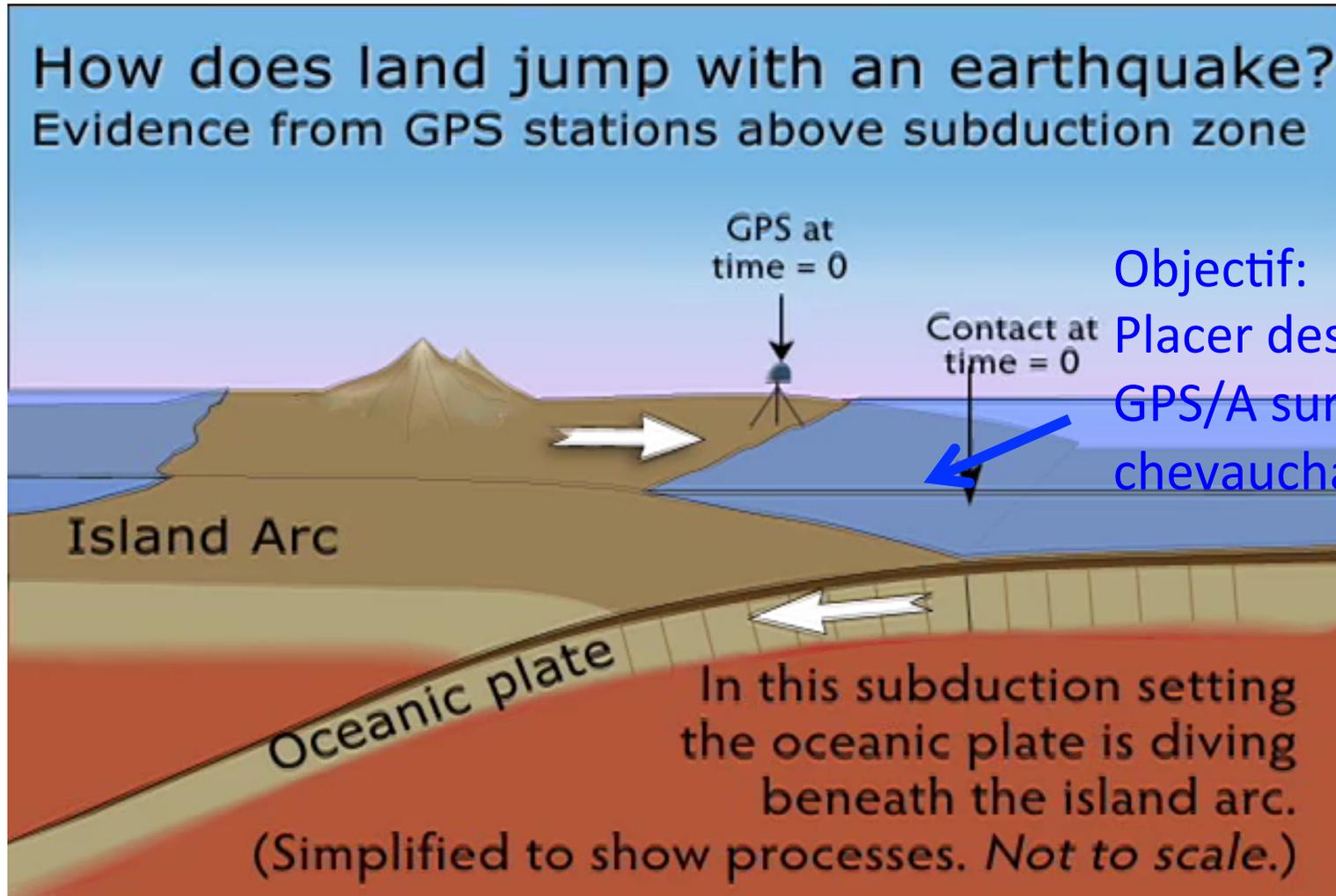


# Application à la mesure des déformations inter- ou co-sismiques en zone de subduction

- Les séismes de subduction se produisent suivant des cycles



# Application à la mesure des déformations inter- ou co-sismiques en zone de subduction

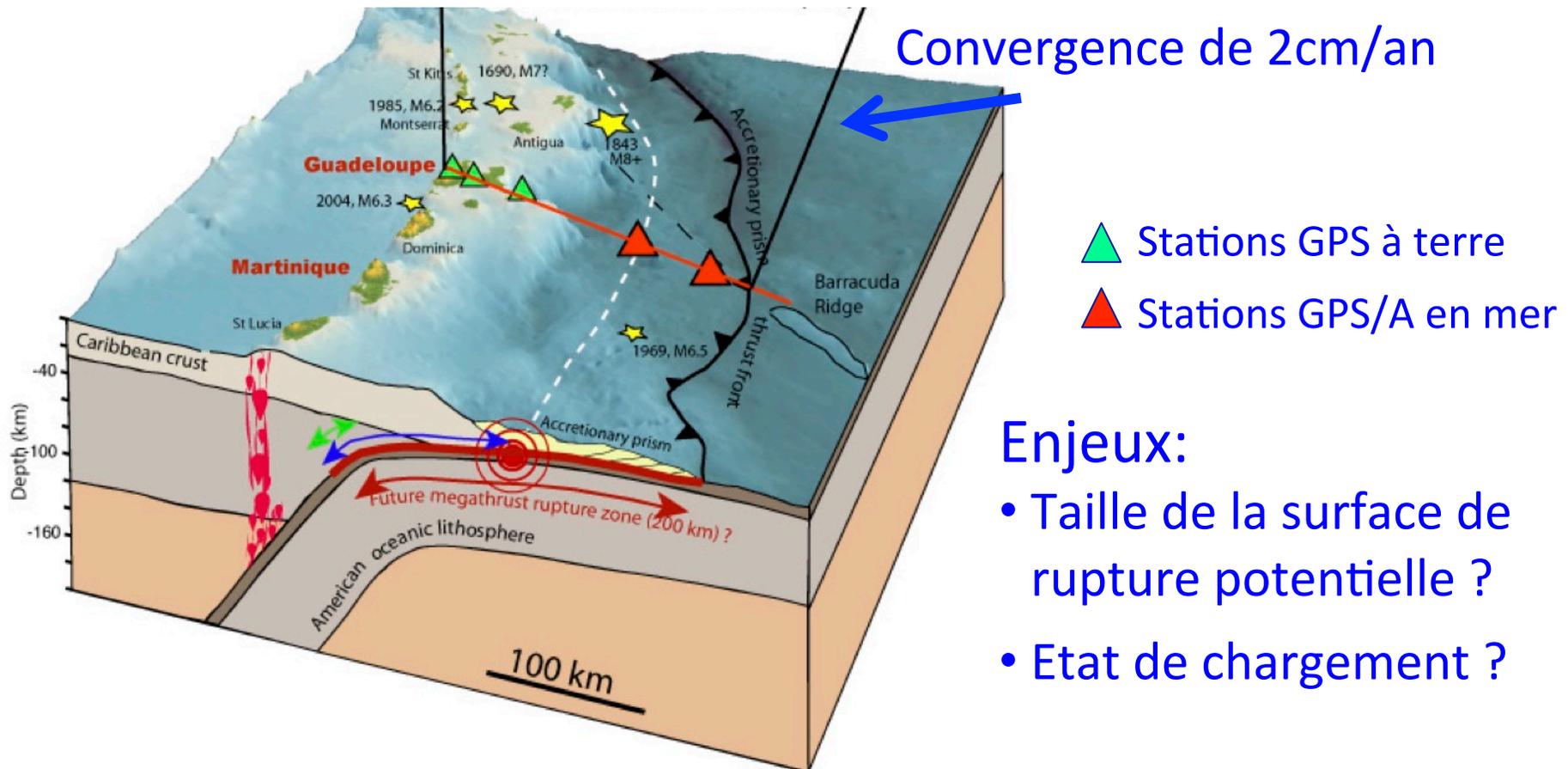


Objectif:

Placer des stations GPS/A sur la plaque chevauchante en mer

# Application à la mesure des déformations inter- ou co-sismiques en zone de subduction

- Application à la subduction des Antilles



# Conclusion

- L'acoustique sous-marine
  - Un outil prometteur pour accéder à la « tectonique active » sous-marine dans un objectif de compréhension des processus et d'évaluation du risque
  - Mais difficile à mettre en œuvre, en raison
    - De la vitesse lente des plaques (cm/an) => mesures pluri-annuelles
    - D'une logistique coûteuse de déploiement & d'accès aux données
    - Des aléas associés à toute opération fond de mer de longue durée
  - Pour un résultat imprévisible ...

