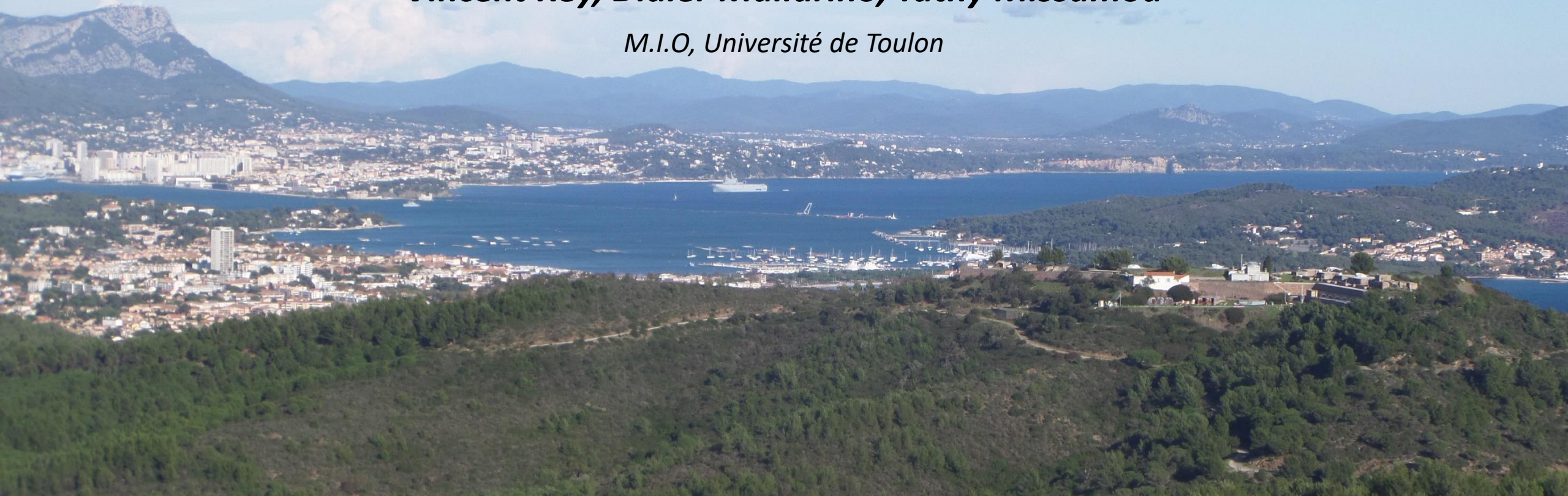


Dynamique des masses d'eau en Méditerranée : Apports du réseau HTM-NET sur le littoral provençal

Vincent Rey, Didier Mallarino, Tathy Missamou

M.I.O, Université de Toulon

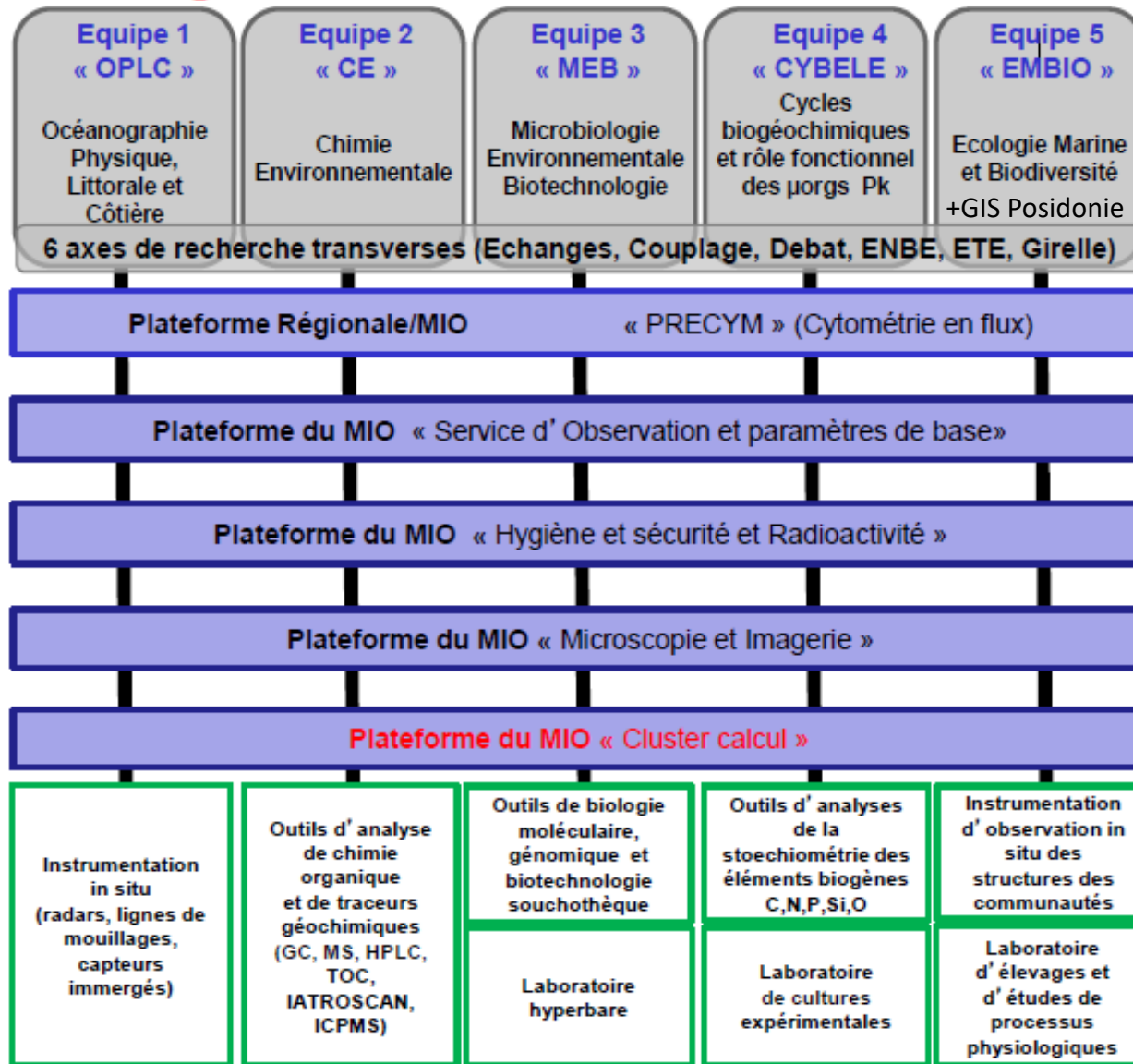




Organisation scientifique du M.I.O (Institut Méditerranéen d'Océanologie)

Le M.I.O dans l'OSU PYTHEAS (Observation des Sciences de l'Univers)

Organisation de la recherche au MIO



Tutelles:
AMU (Univ. Marseille)
UTLN (Univ. Toulon)
CNRS
IRD (Institut de Recherche Pour le développement)

Plateformes mutualisées
Gestion par le comité de direction du MIO

Plateaux techniques
Gestion par les équipes, en lien avec le comité de direction du MIO

Observer et comprendre...
du fond des océans aux confins de l'Univers



<https://www.osupytheas.fr>
<https://www.mio.osupytheas.fr>

Equipe 1 : **OPLC** Océanographie Physique, Littorale et Côtière

35 statutaires

Chercheurs : 7 (3 IRD, 4 CNRS)

Enseignant-Chercheurs : 21

ITA : 7 - Doctorants : 10, CDD : 4

OBJECTIFS

- améliorer la compréhension des processus fondamentaux de la physique du milieu marin
- impact de ces processus sur le transport et les échanges de matière biogènes
- répondre à une demande sociétale croissante pour une meilleure gestion des zones côtières.

AR1 Ondes de surface, physique et télédétection

AR2 Dynamique littorale et des systèmes côtiers tropicaux

AR3 Dynamique du plateau continental, de l'échelle inertielle aux interactions côte/large



METHODOLOGIES ET APPROCHES

- Modélisation numérique
- expérimentations (bassins et soufflerie)
- observations in situ (littoral et en mer)
- télédétection (radars HF)

ACTIVITES de RECHERCHE, V. Rey

Fil conducteur « les ondes marines », 2 axes:

Application à l'Océanographie
physique et au génie océanique et
côtier

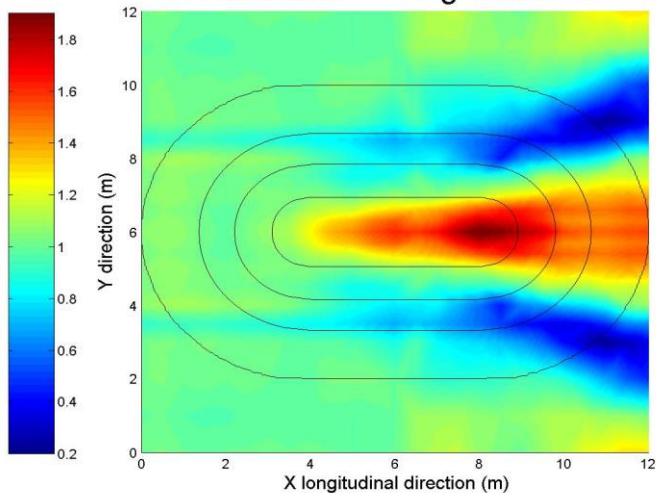
Etats de surface et propagation

- Propagation des ondes (vagues, tsunamis, marées..)
- Interactions vagues - courant – structures - fonds

Dynamique littorale

- Transferts non-linéaires ondes-ondes
- Déferlement bathymétrique
- Dynamique sédimentaire

Modèles analytiques et numériques



Focalisation de la houle
au dessus d'un haut - fond

Etudes en modèle réduit (bassins d'essai)



Interaction houle – courant –structure
BGO First, La Seyne/Mer

Etudes in situ (campagnes et observation)



Dynamique littorale
Plage du Truc Vert, Aquitaine



Réseau d'observation des niveaux
d'eau et de température HTM-NET

Apports du réseau HTM-NET « Hydrodynamique et Transport de MES – Niveaux d’Eau et Température » à la compréhension de la dynamique sur le littoral Provence – Côte d’Azur

MOTIVATIONS:

A l’origine, meilleure compréhension de la dynamique des échanges petite rade – grande rade de Toulon (thèse Christiane Dufresne, Coll. IRSN, 2014).

Plus généralement, dynamique à l’échelle des bassins et des baies, ondes, surcotes, submersions. Etude des seiches et basculements à l’échelle de bassins semi-ouverts (thèse C. Paugam).

OBJECTIF:

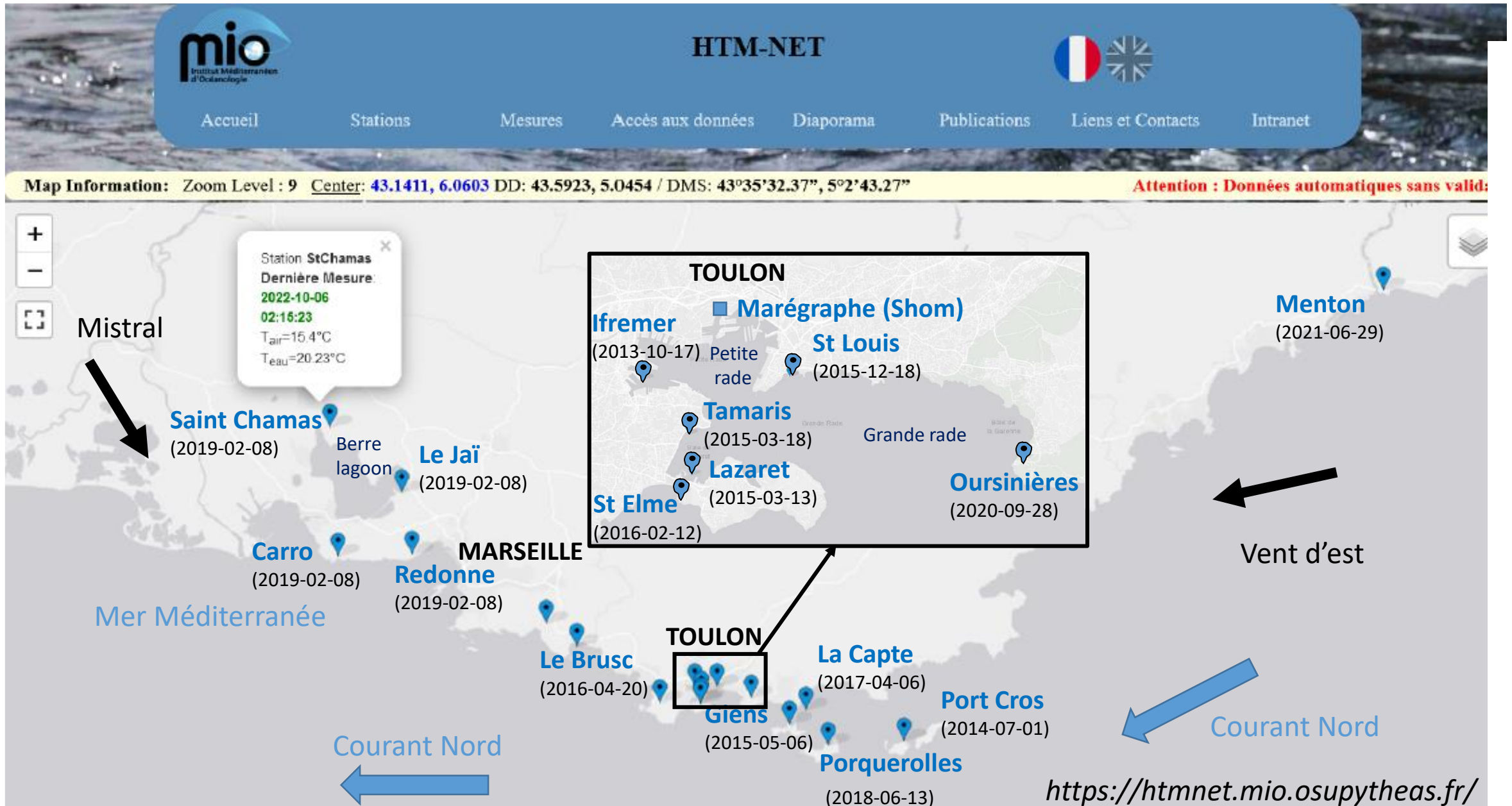
- Apporter des données de mesures originales pour une meilleure compréhension et modélisation des interactions et couplages entre la dynamique côtière et la dynamique littorale à l'échelle des baies

PRESENTATION:

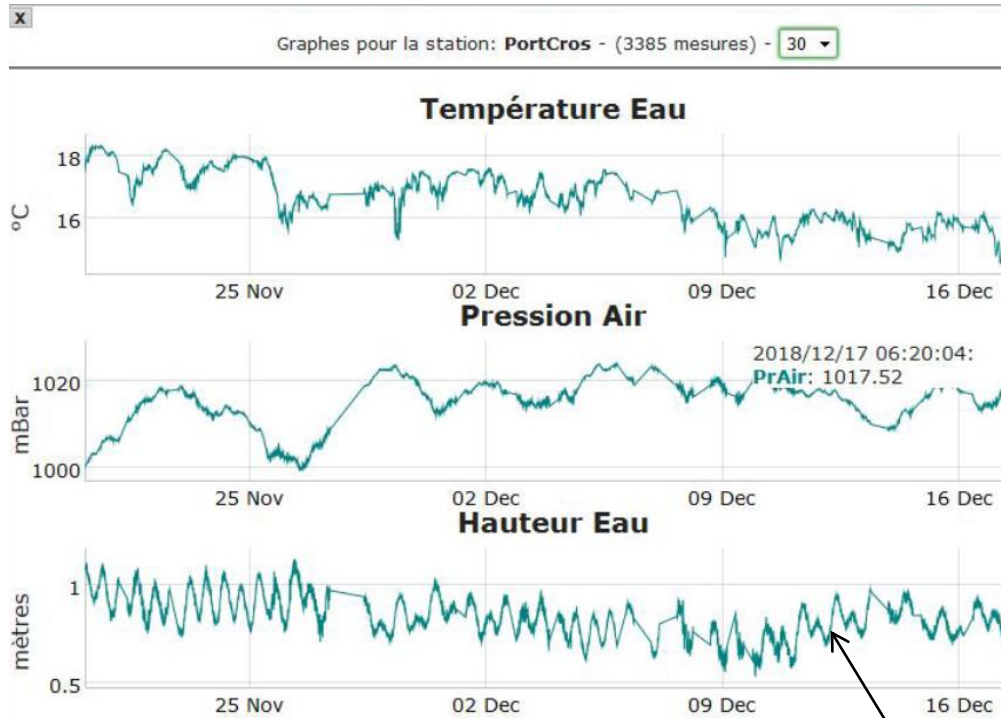
VARIATIONS DES NIVEAUX D’EAU, les différentes causes et leur importance relative

VARIATIONS DES TEMPERATURES SUB-SURFACE, dynamique des masses d’eaux (dont upwellings)

réseau HTM-NET « Niveau d'Eau et Température »



Réseau HTM-NET : Mesure du niveau d'eau et de la température sub-surface de l'eau



Niveau d'eau: $\eta = \Delta p / \rho g$

avec

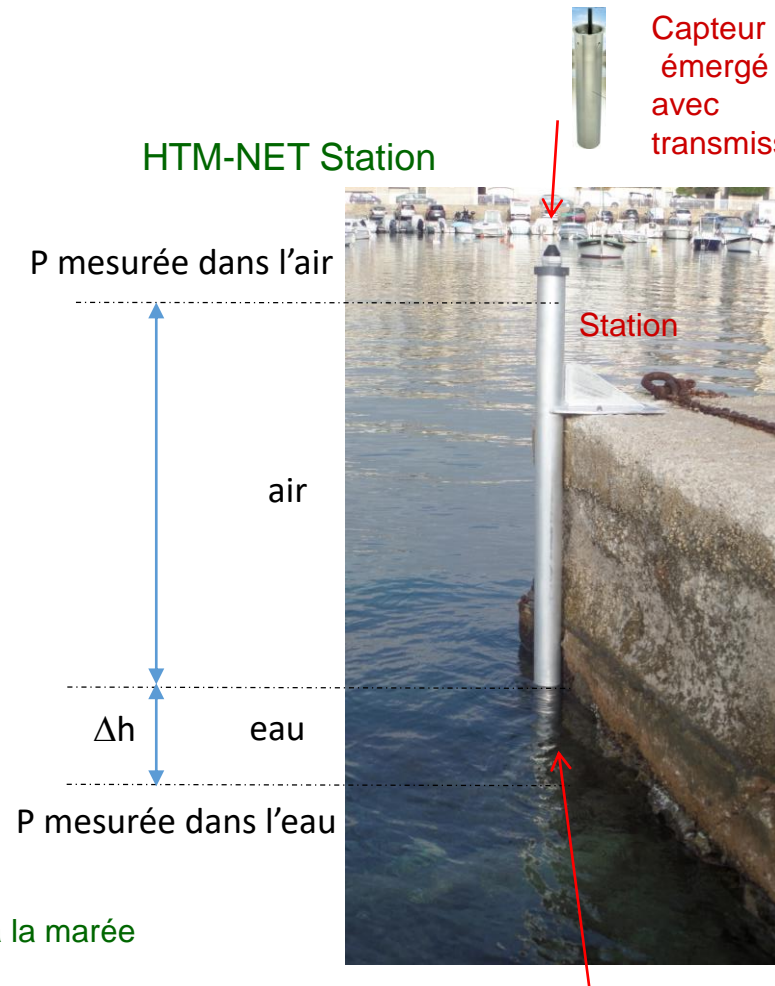
Δp , différence de pression mesurée dans l'eau et dans l'air,

ρ la masse volumique de l'eau fixée à 1025 kg/m^3 (valeur pour une salinité de $S=35\text{psu}$ et une température $T=19^\circ\text{C}$)

$g=9.81 \text{ m/s}^2$ l'accélération due à la gravité

Erreur due aux variations de S et $T < 2\%$ (environ 1mm)

Oscillations dues à la marée



Capteur émergé avec transmission GSM

Mesure de la pression et de la température au niveau de chaque Capteur (toutes les 2 min depuis 2019):

Données :

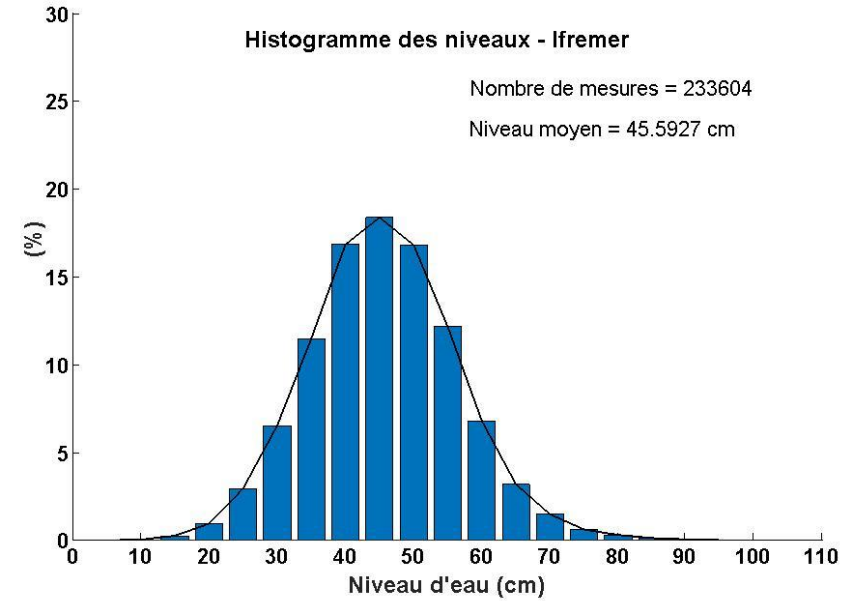
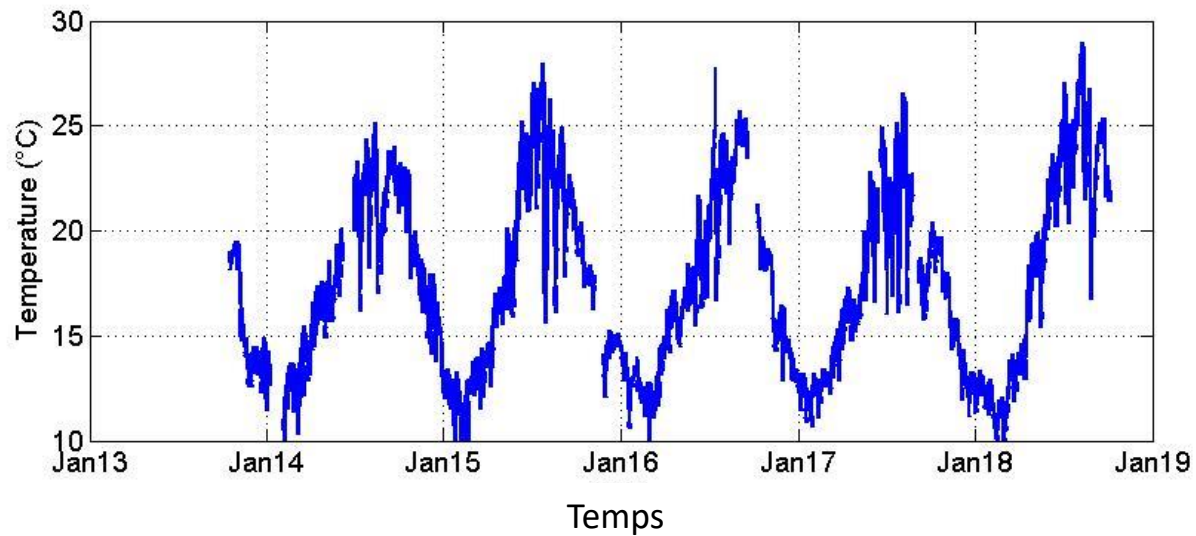
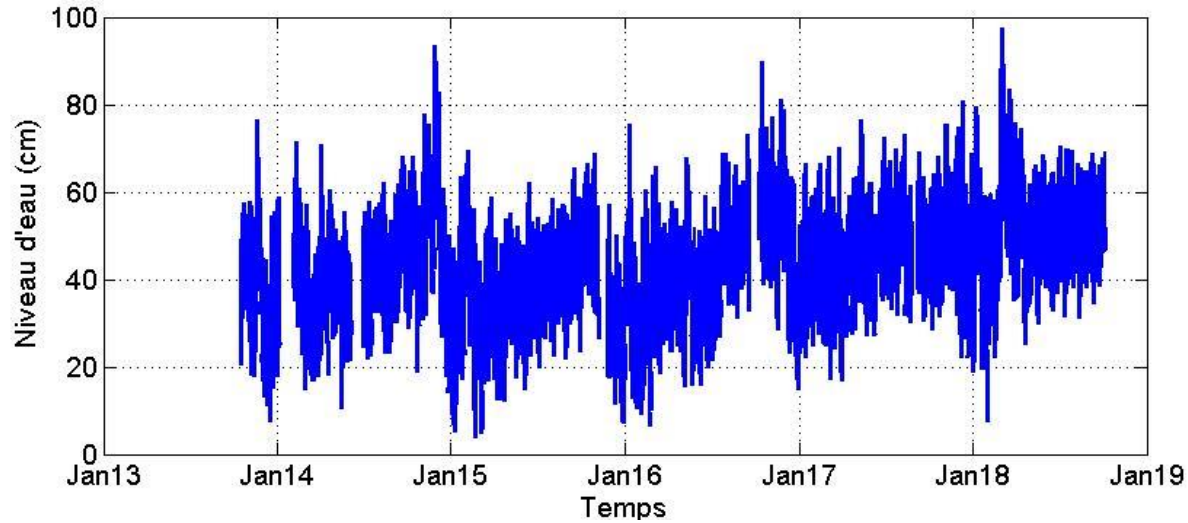
- Pression atmosphérique
- Température de l'eau
- Niveau d'eau

(référencement niveau absolu, collaboration Shom)

Capteur immergé

Réseau HTM-NET : Mesure du niveau d'eau et de la température

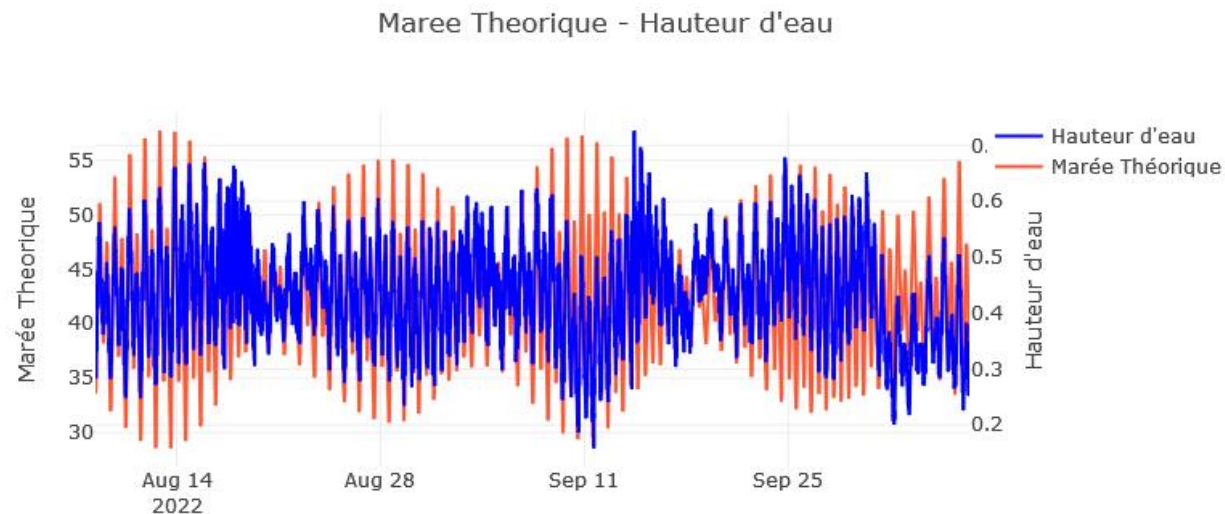
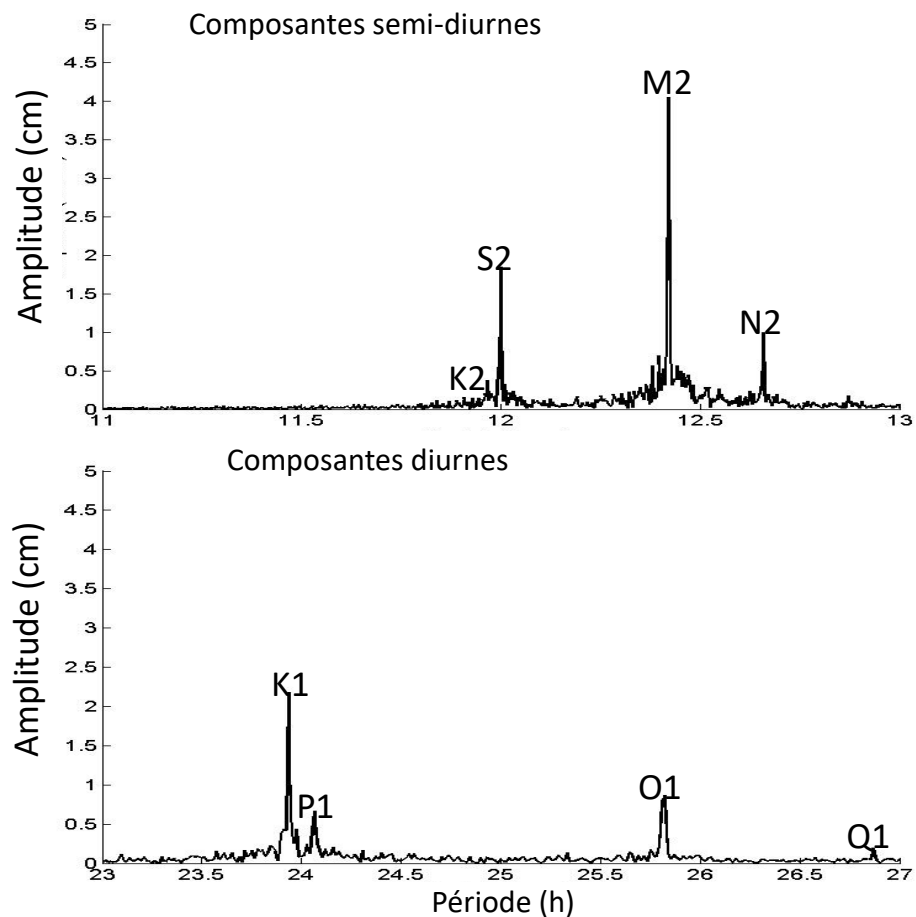
Station Ifremer/Brégaillon



Variation des niveaux d'eau d'environ 1m

CONTRIBUTIONS DE DIFFERENTS FACTEURS agissant sur les VARIATIONS DES NIVEAUX D'EAU

Echelle globale : LA MAREE

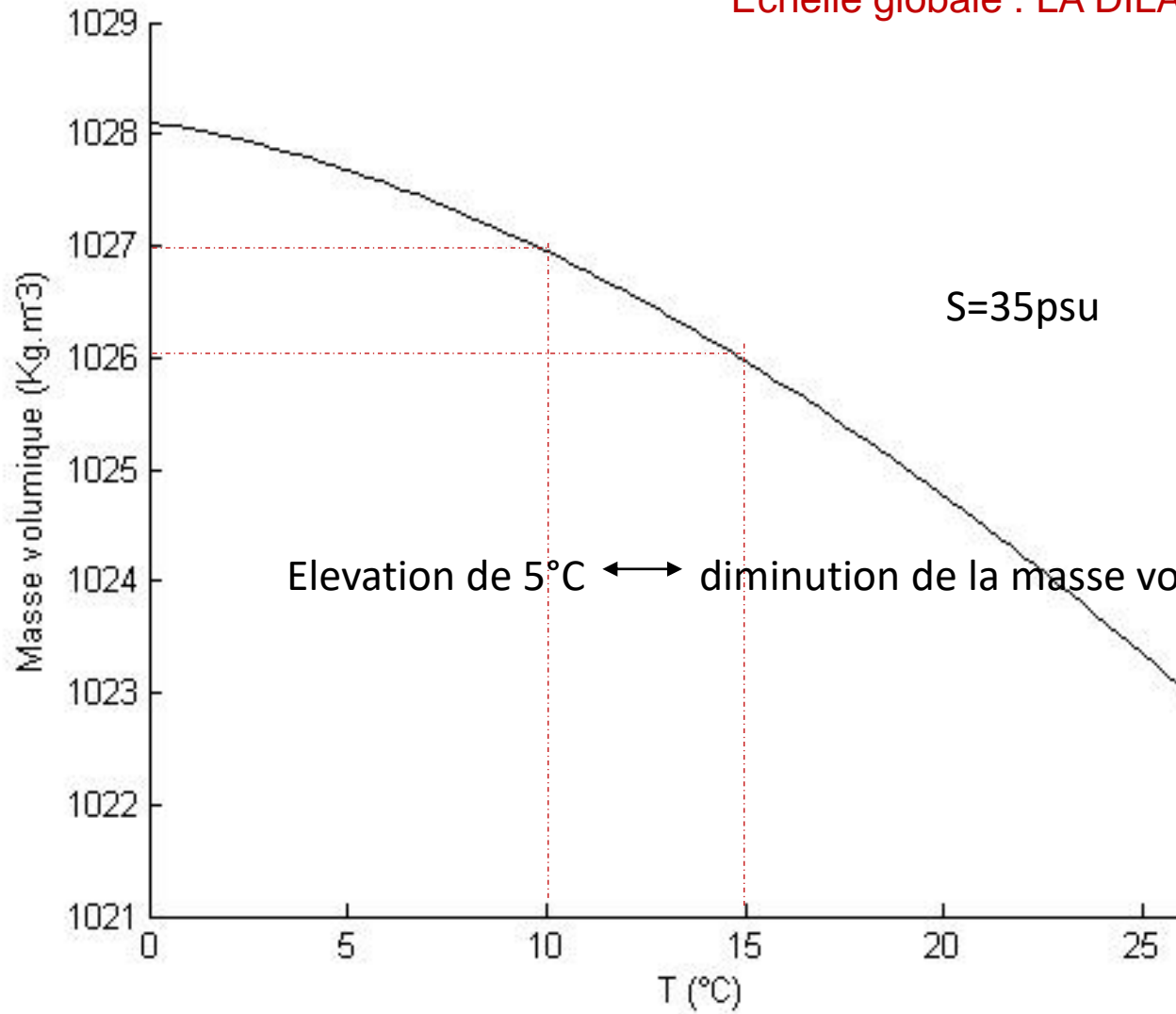


Le signal de marée est la somme des composantes de la marée,
Marées de vives-eaux : marnage d'environ 25-30cm
(bien plus faible qu'à l'océan, de plusieurs mètres)

ORDRE DE GRANDEUR Marnage : 20 à 30 cm

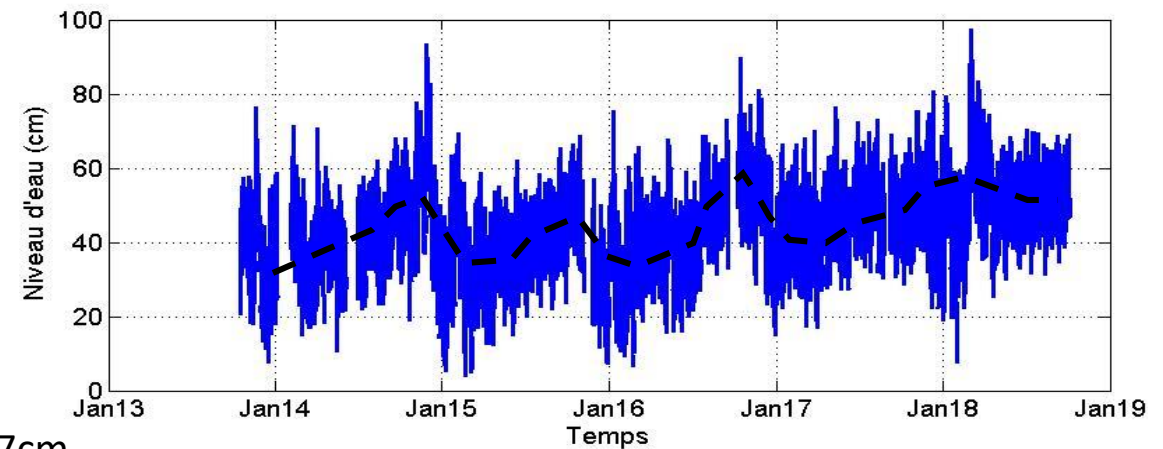
CONTRIBUTIONS DE DIFFERENTS FACTEURS agissant sur les VARIATIONS DES NIVEAUX D'EAU

Echelle globale : LA DILATATION STERIQUE



Une élévation de 1°C sur une colonne d'eau de 1000m se traduit par une élévation du niveau d'environ 20cm

ORDRE DE GRANDEUR
Dilatation stérique : 5 à 10 cm

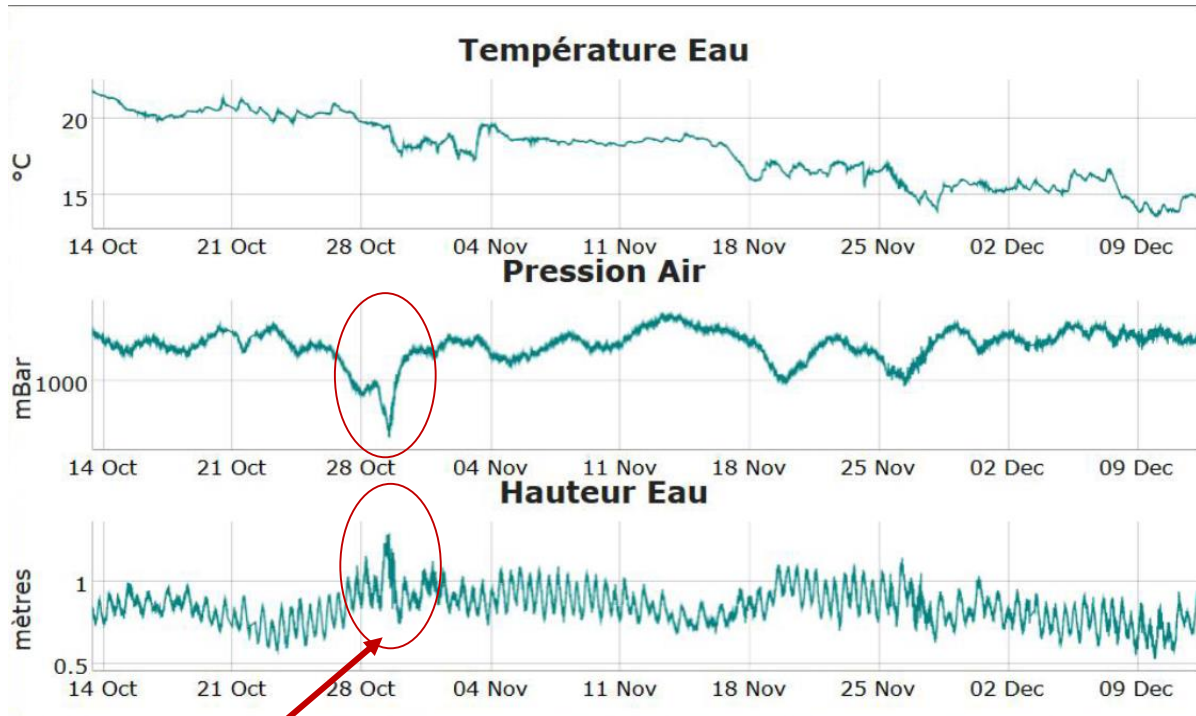


Dilatation stérique : Amplitude semi-annuelle S_{sa} , 1.5cm, annuelle S_a , 5.77cm

Forte variabilité pluri-annuelle

CONTRIBUTIONS DE DIFFERENTS FACTEURS agissant sur les VARIATIONS DES NIVEAUX D'EAU

LA PRESSION ATMOSPHERIQUE



Tempête du 28 octobre 2018 :

Passage rapide d'une dépression avec forte surcote

Inondation des quais et de la route à La Seyne sur Mer

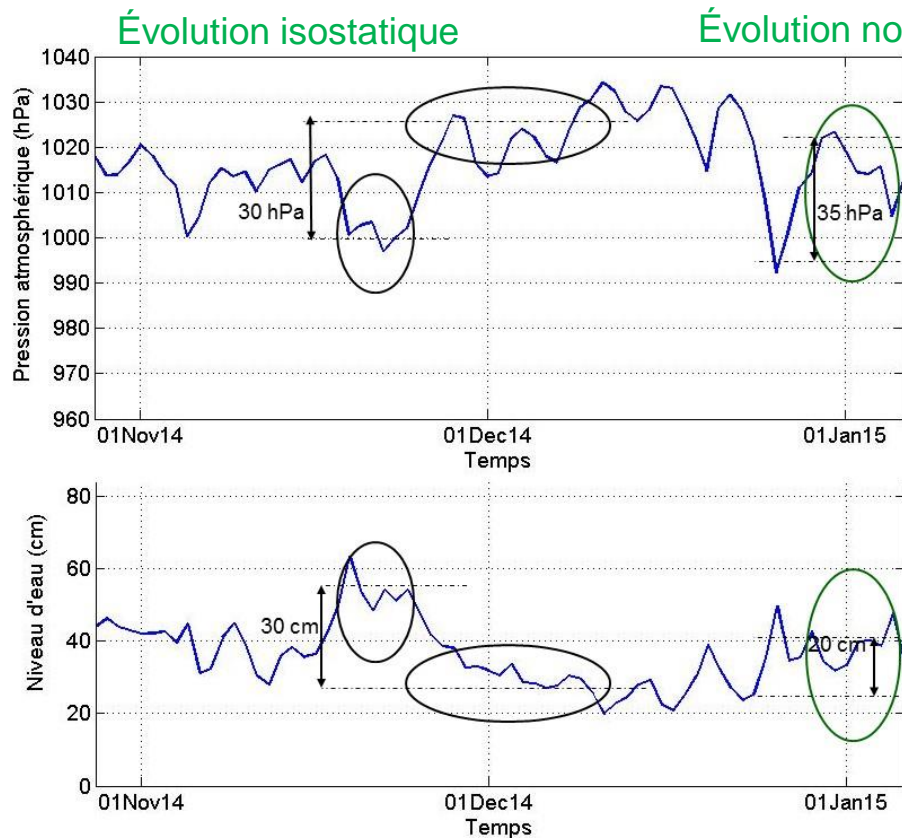


ORDRE DE GRANDEUR EFFET DE LA
PRESSION ATMOSPHERIQUE : 50 cm
dans l'hypothèse ISOSTATIQUE
(si 50 hPa entre anticyclone et dépression)

« effet du baromètre inversé »

CONTRIBUTIONS DE DIFFERENTS FACTEURS agissant sur les VARIATIONS DES NIVEAUX D'EAU

LA PRESSION ATMOSPHERIQUE, effet local et/ou effet global?

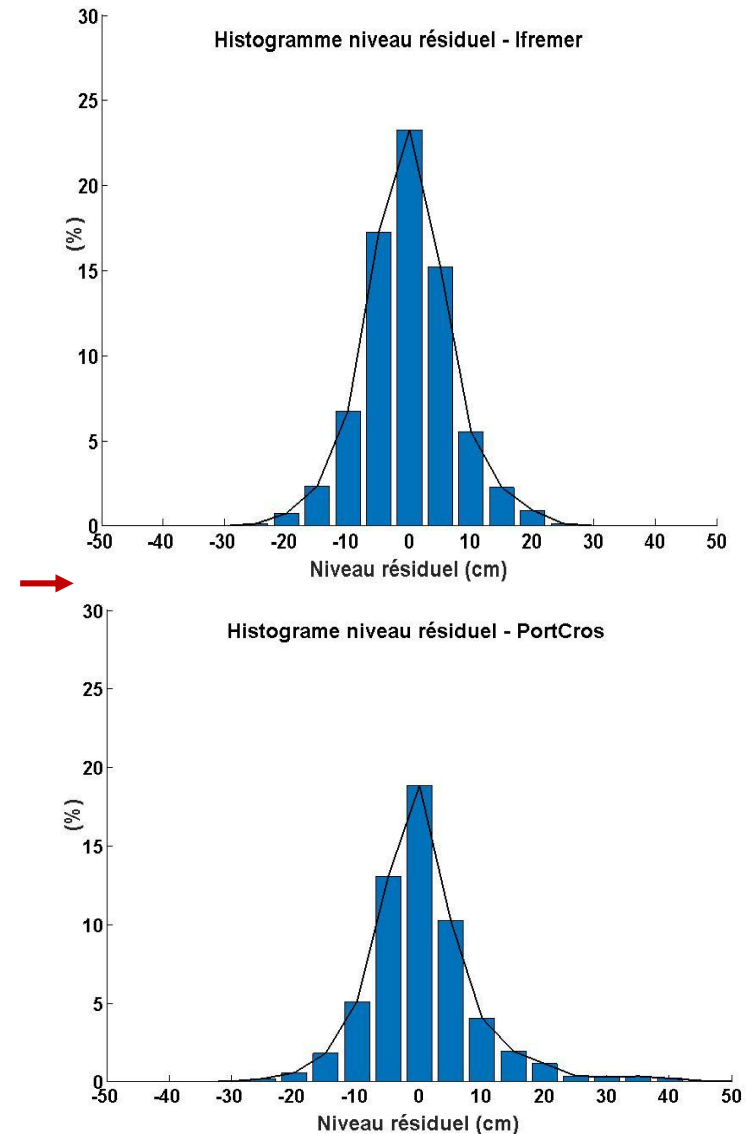


Approximation isostatique:
1 hPa correspond à 1 cm d'eau

Niveau résiduel après avoir filtré la marée, et retranché la hauteur liée à la pression atmosphérique dans l'hypothèse « isostatique »

L'évolution du niveau d'eau ne suit pas toujours l'opposé de l'évolution de la pression atmosphérique.

Variations liées à la dynamique à l'échelle du bassin méditerranéen occidental (et flux au niveau des détroits)

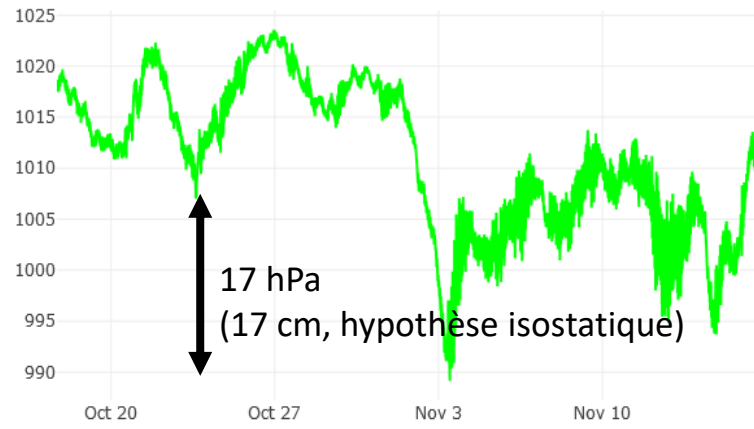


CONTRIBUTIONS DE DIFFERENTS FACTEURS agissant sur les VARIATIONS DES NIVEAUX D'EAU

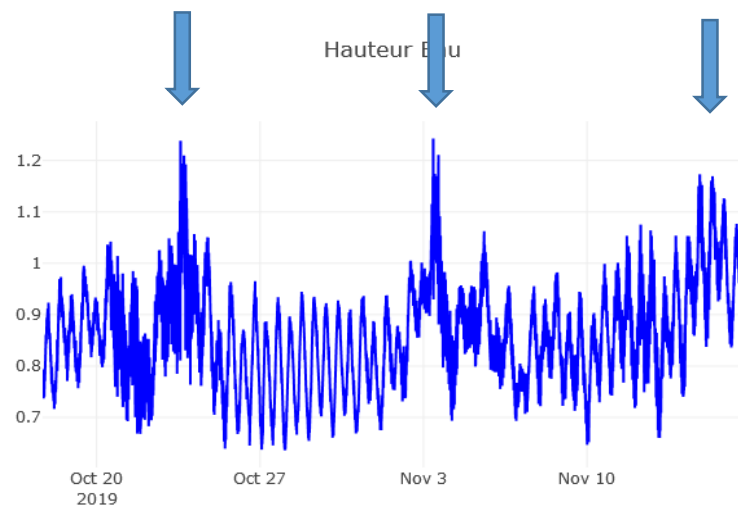
LA PRESSION ATMOSPHERIQUE, effet local et/ou effet global?

Le Brusac

Pression Air



Surcotes de même grandeur

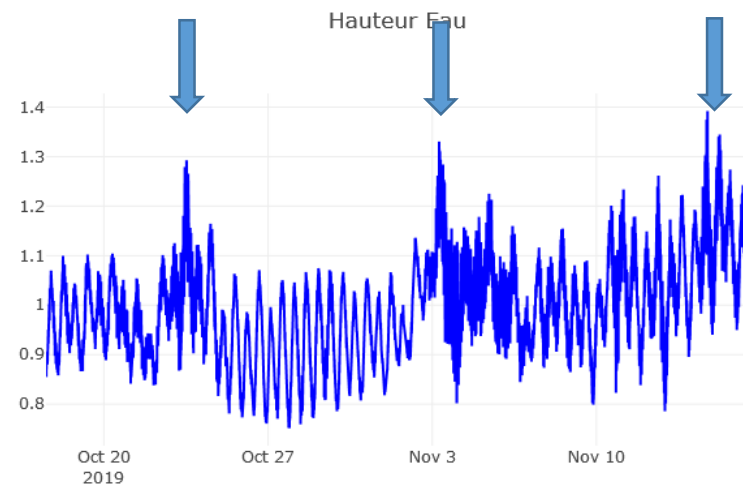


Port Cros

Pression Air



Hauteur Eau

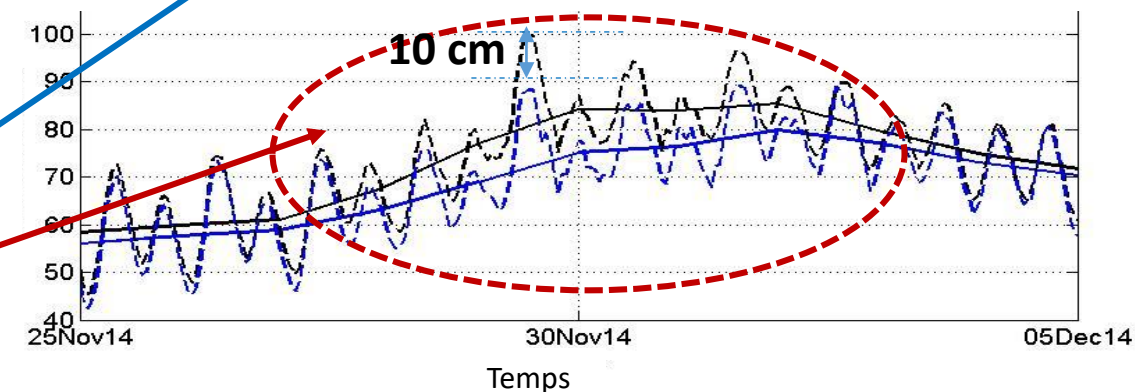
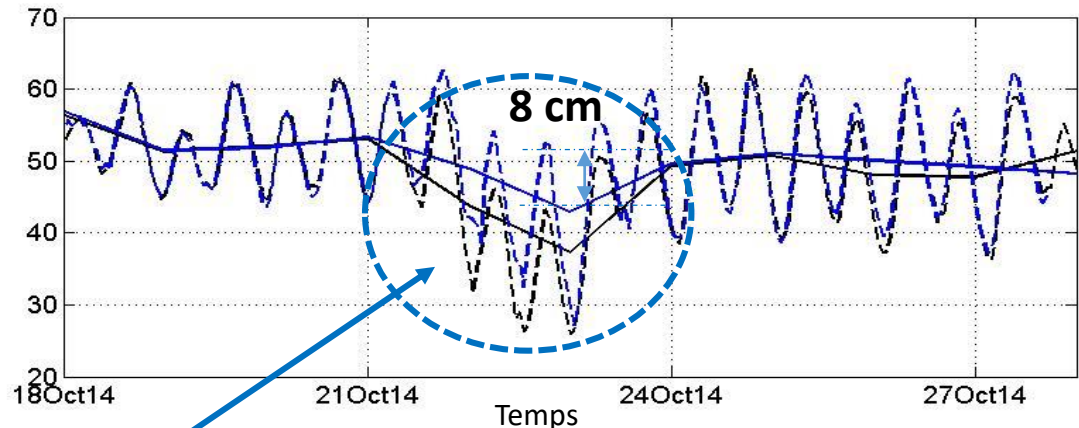
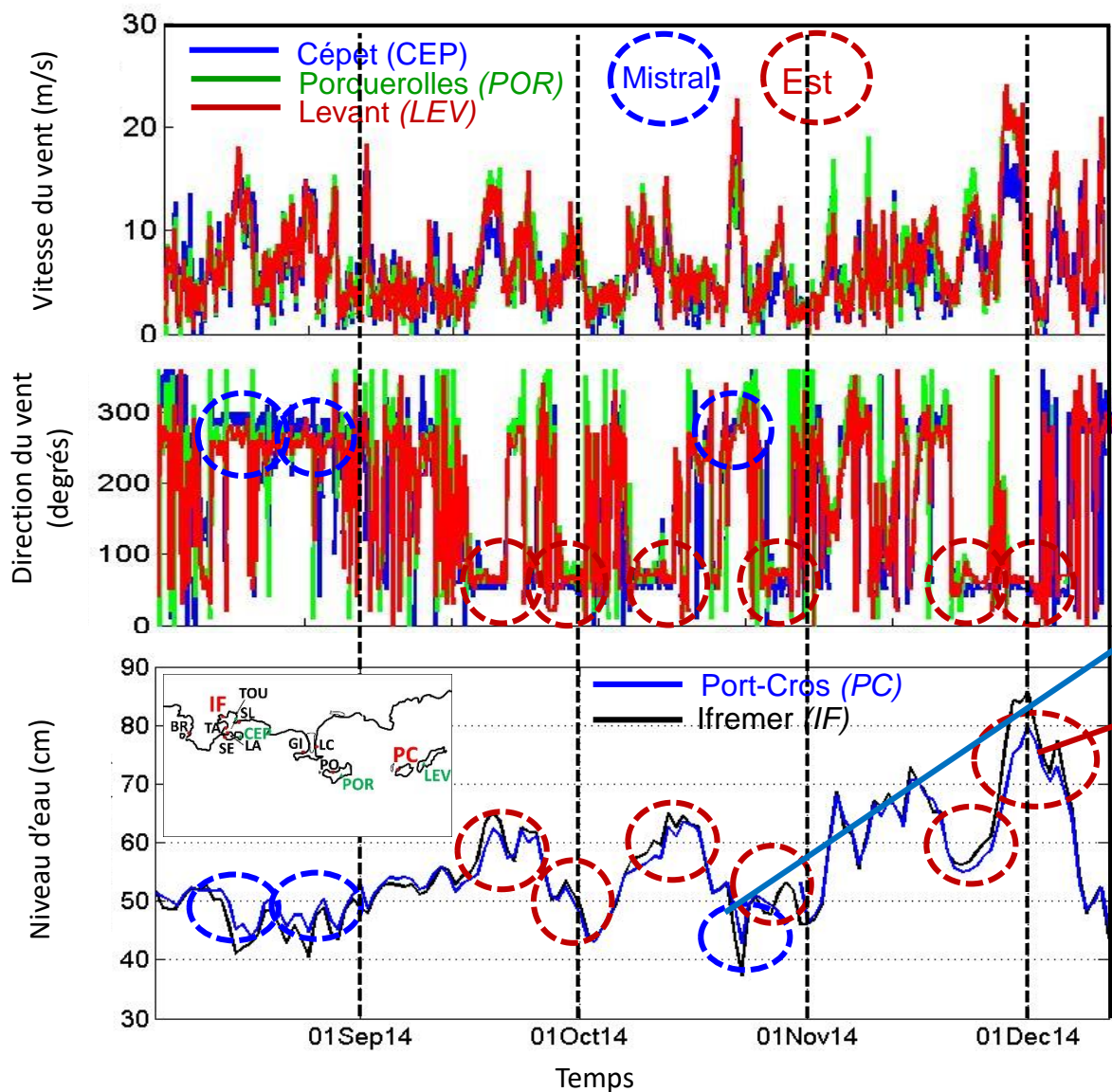


3^{ème} surcote plus marquée à Port Cros

Différences de niveau à l'échelle locale?

CONTRIBUTIONS DE DIFFERENTS FACTEURS agissant sur les VARIATIONS DES NIVEAUX D'EAU

LE VENT



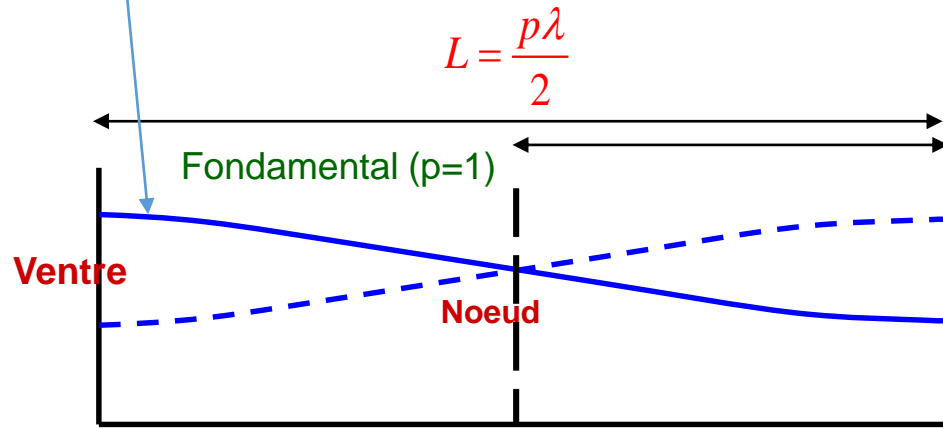
Au 1^{er} ordre, variation du niveau associé à la pression atmosphérique (conditions anticycloniques par Mistral, dépressionnaires par vent d'est)
Faibles écarts entre fond de baie et « large »

ORDRE DE GRANDEUR VENT à l'échelle des baies : 10 cm

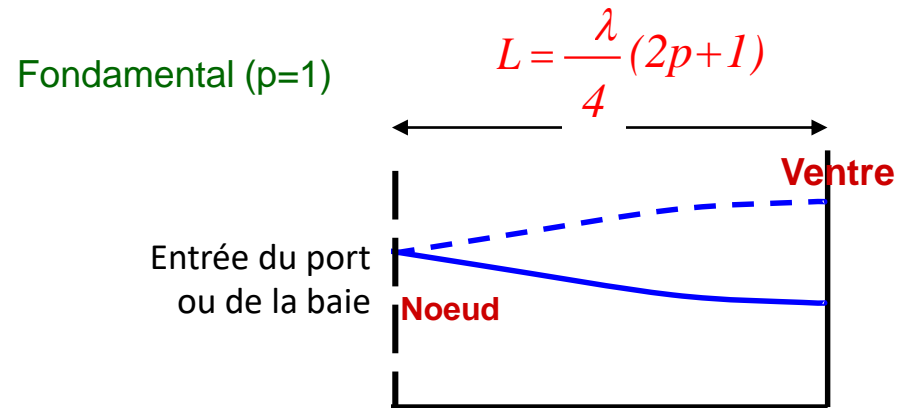
CONTRIBUTIONS DE DIFFERENTS FACTEURS agissant sur les VARIATIONS DES NIVEAUX D'EAU

LES SEICHES (ou oscillations de plans d'eau)

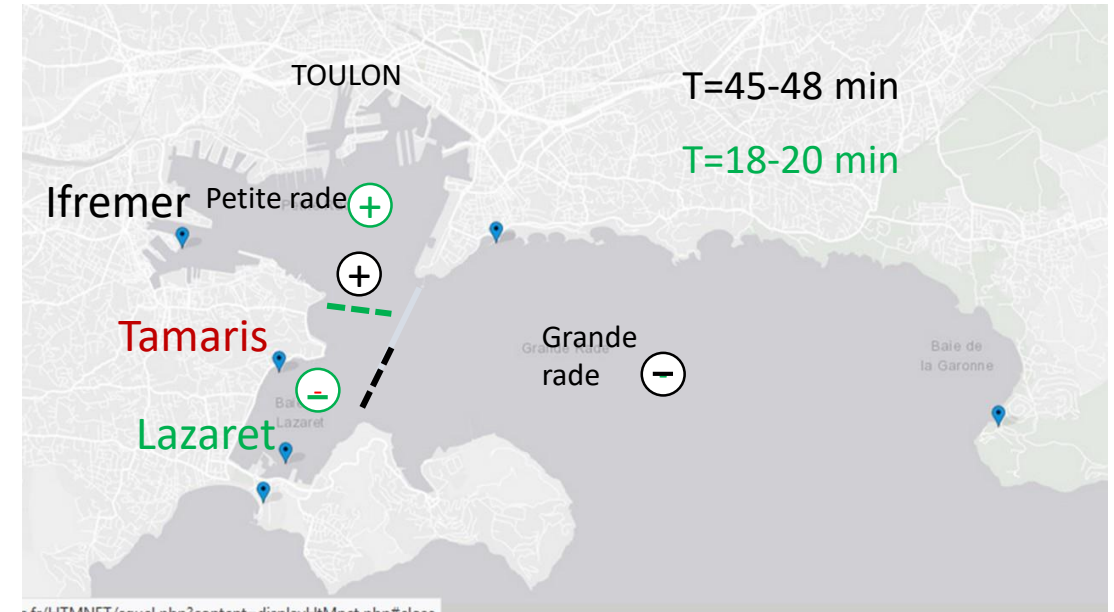
Variation de la surface libre



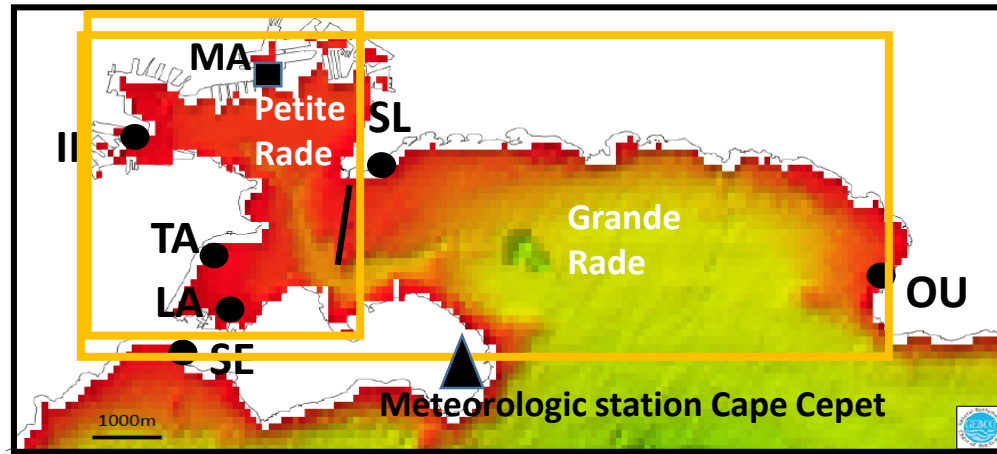
Bassin fermé



Bassin semi-ouvert



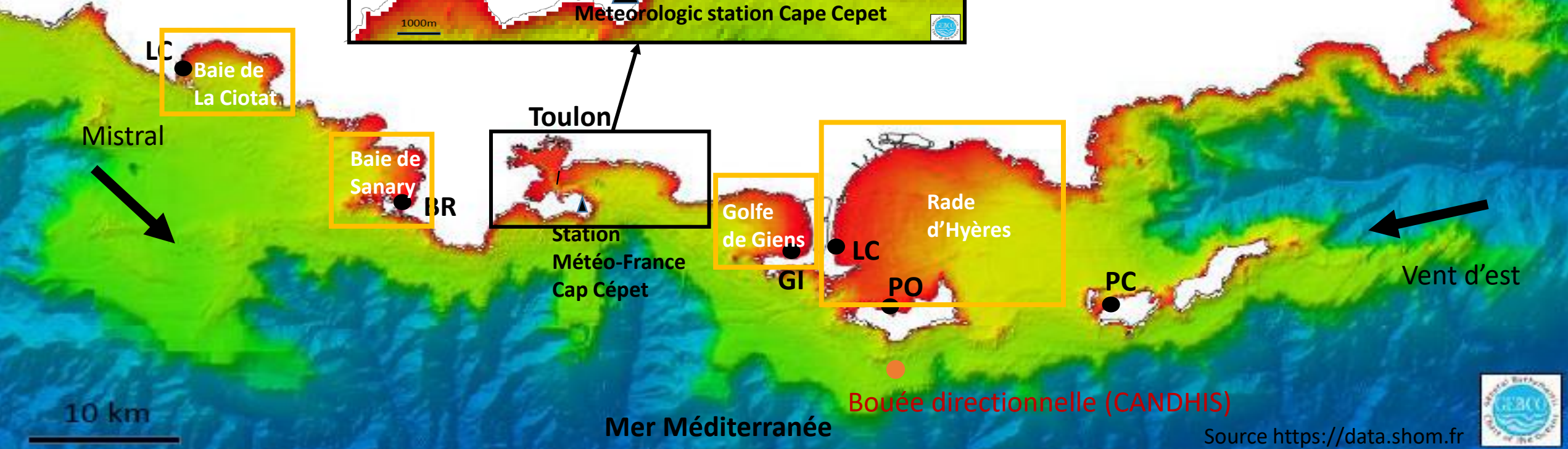
Oscillations résonantes dans les baies, de La Ciotat, à la Rade d'Hyères



Légende:

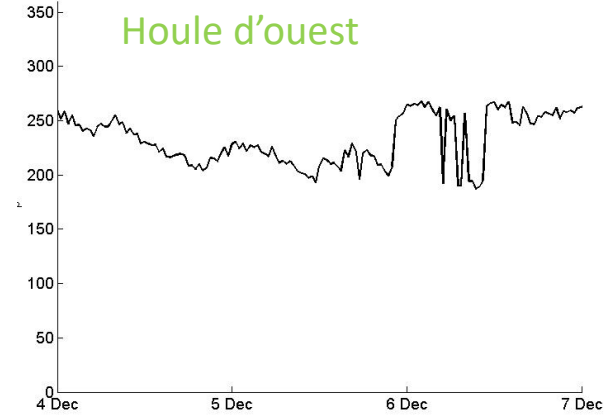
Stations HTM-NET : La Ciotat (**LC**), Brusac (**BR**), Saint Elme (**SE**), Lazaret (**LA**), Tamaris (**TA**), La Seyne/Ifremer (**IF**), Port Saint Louis (**SL**), Oursinières (**OU**), Madrague de Giens (**GI**), La Capte (**LC**), Porquerolles (**PO**), Port Cros (**PC**)

Marégraphe de Toulon (Shom): MA

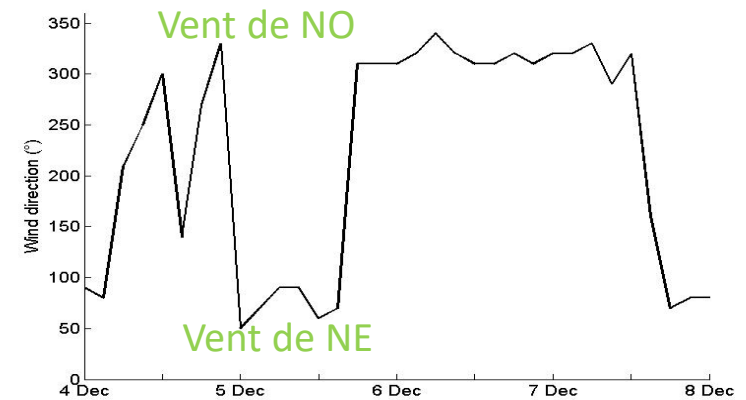
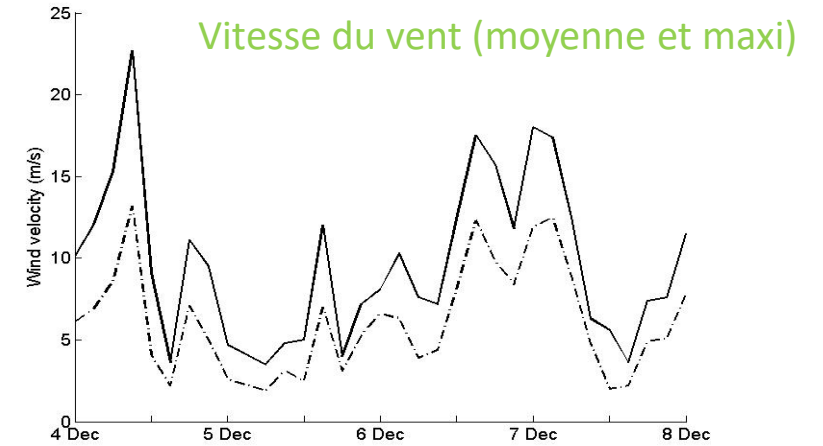


Episode de tempête du 4 au 8 Décembre 2020

Conditions de houles



Conditions de vent

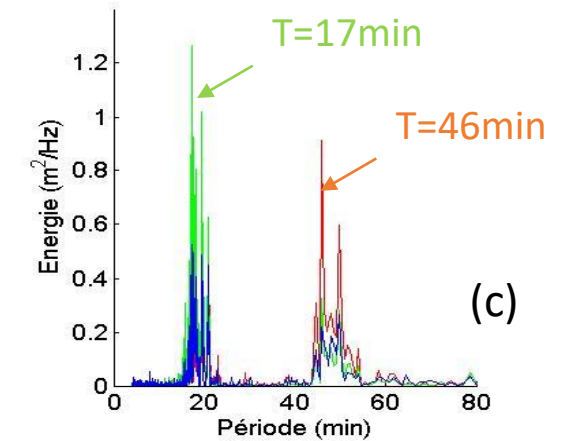
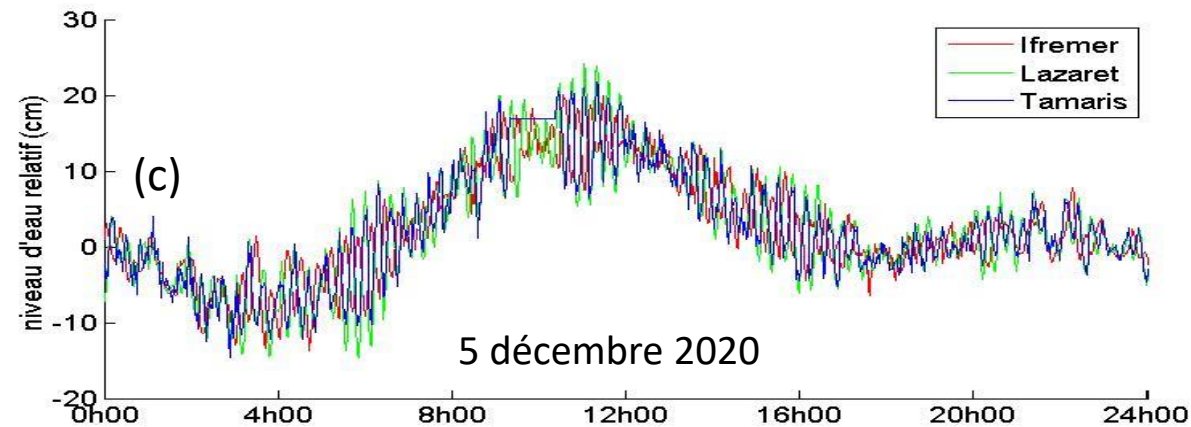
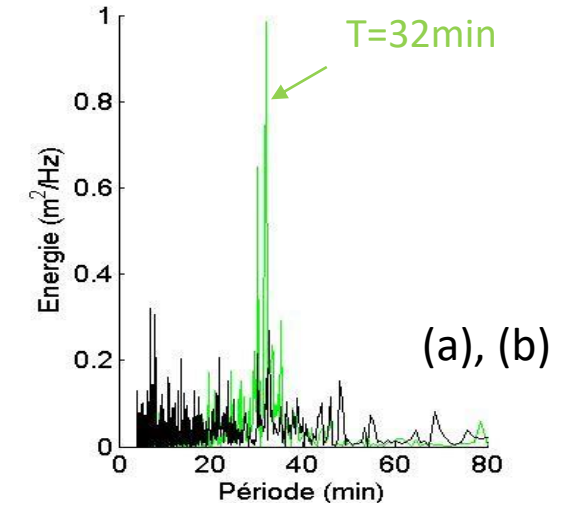
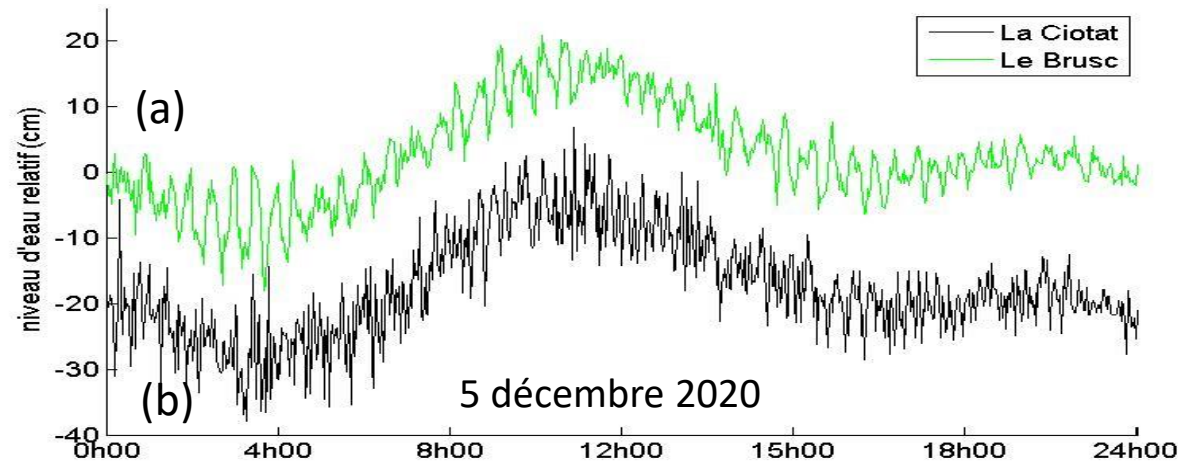
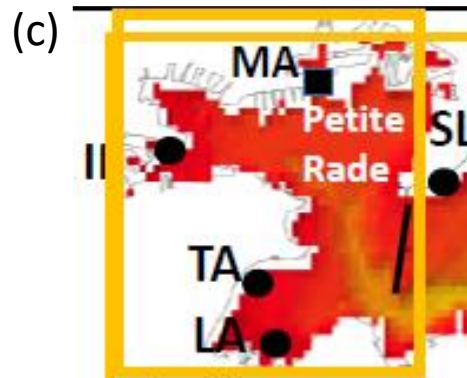


Bouée directionnelle de Porquerolles
(données CANDHIS, <https://candhis.cerema.fr/>)

Station Météo France de Cap Cépet
(<https://meteofrance.com/>)

Oscillations résonantes à l'échelle des baies

Baies de La Ciotat et de Sanary, Petite Rade de Toulon

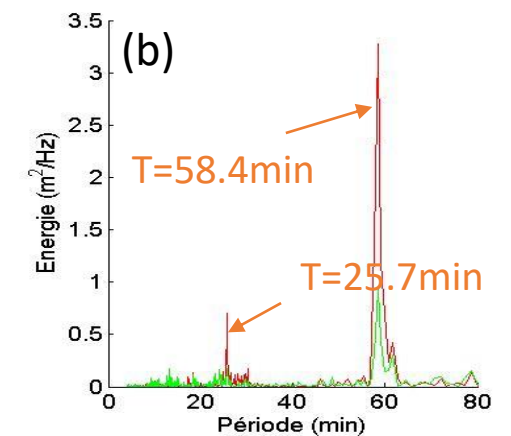
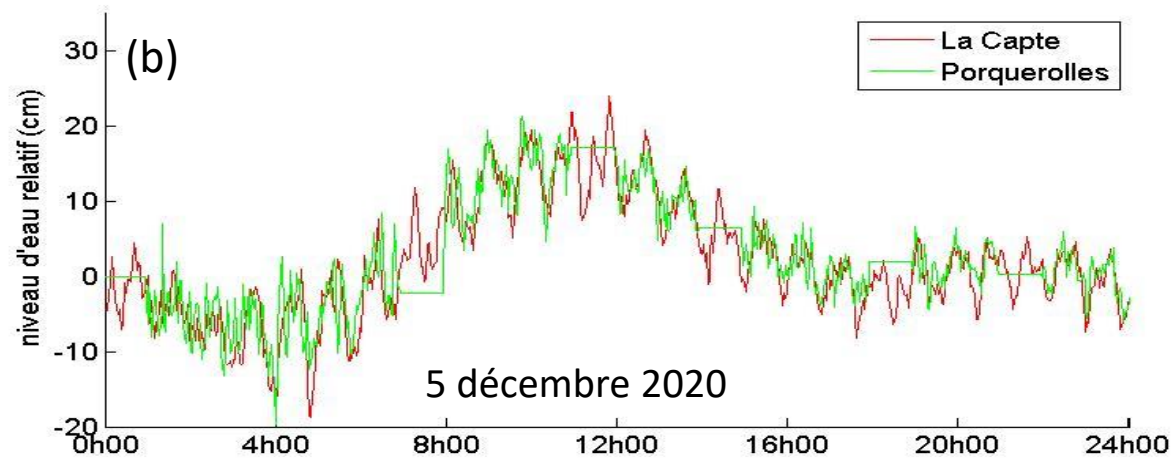
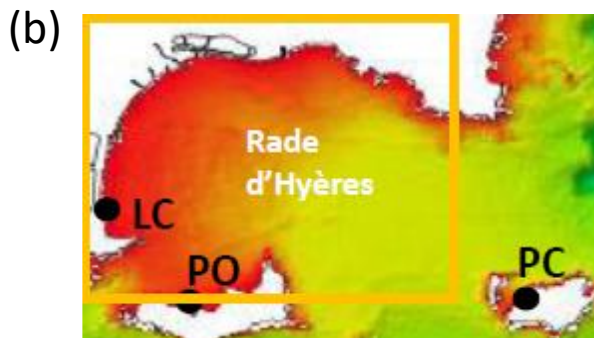
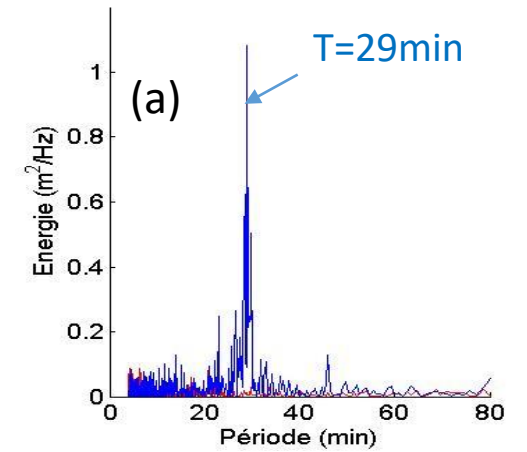
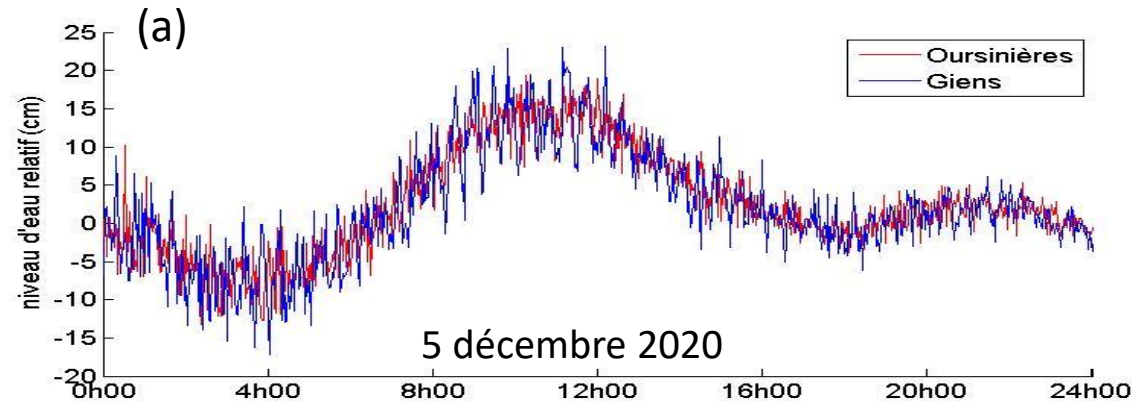


Baie circulaire de forme paraboloidale (Rabinovitch, 2009) : $T_0 = 2.220 \frac{2L}{\sqrt{gh_1}}$

(FFT des séries temporelles du 4 au 7 décembre)

Oscillations résonantes à l'échelle des baies

Golfe de Giens, Rade d'Hyères



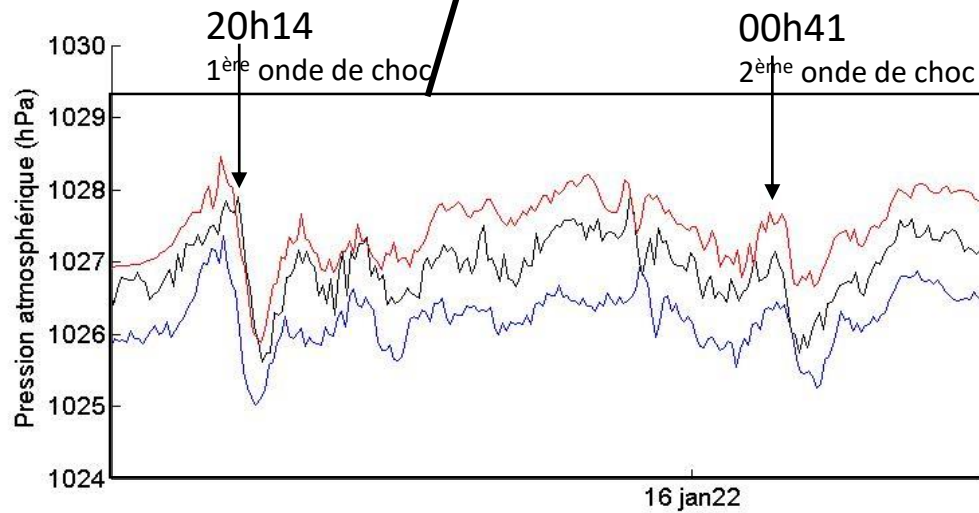
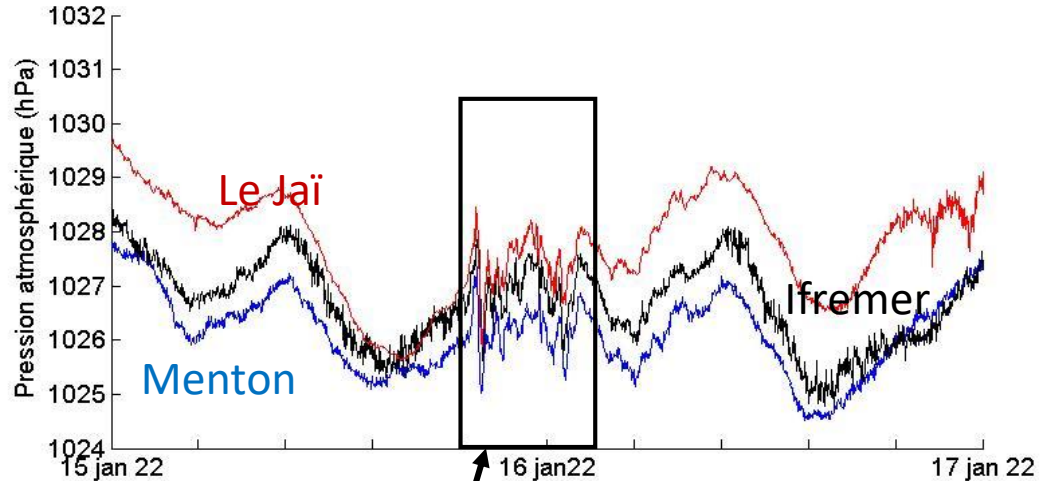
➔ Périodes de résonance propres à chacune des baies

(FFT des séries temporelles du 4 au 7 décembre)

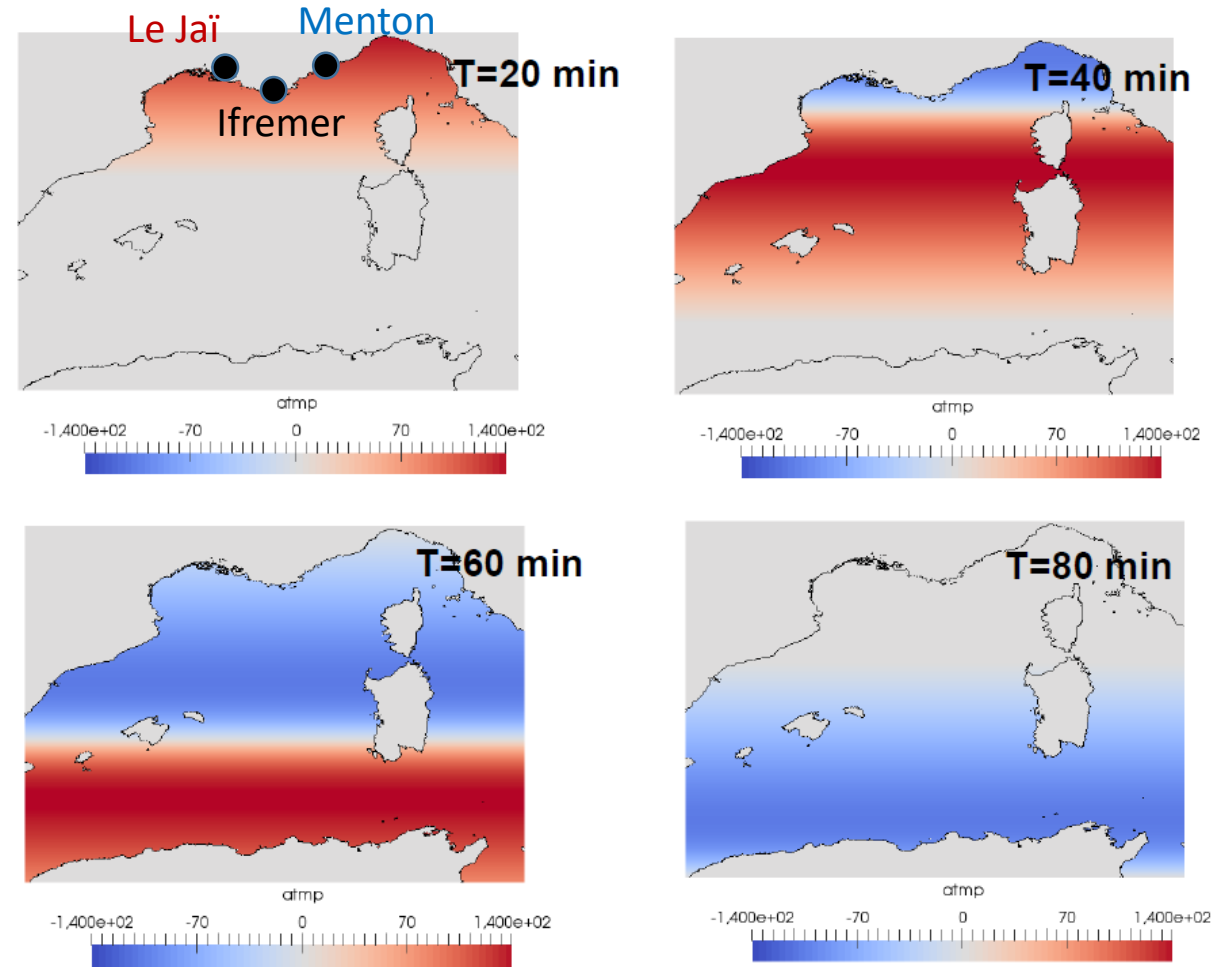
Eruption volcanique, iles Tonga, Océan Pacifique, 15/01/2022 à 4:14 a.m UTC

Onde de choc atmosphérique

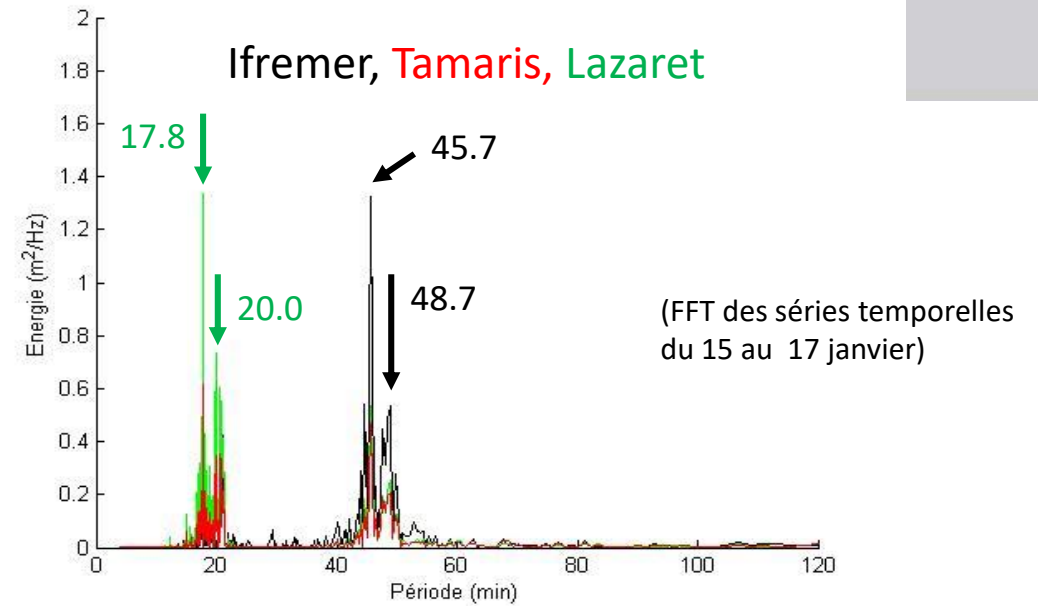
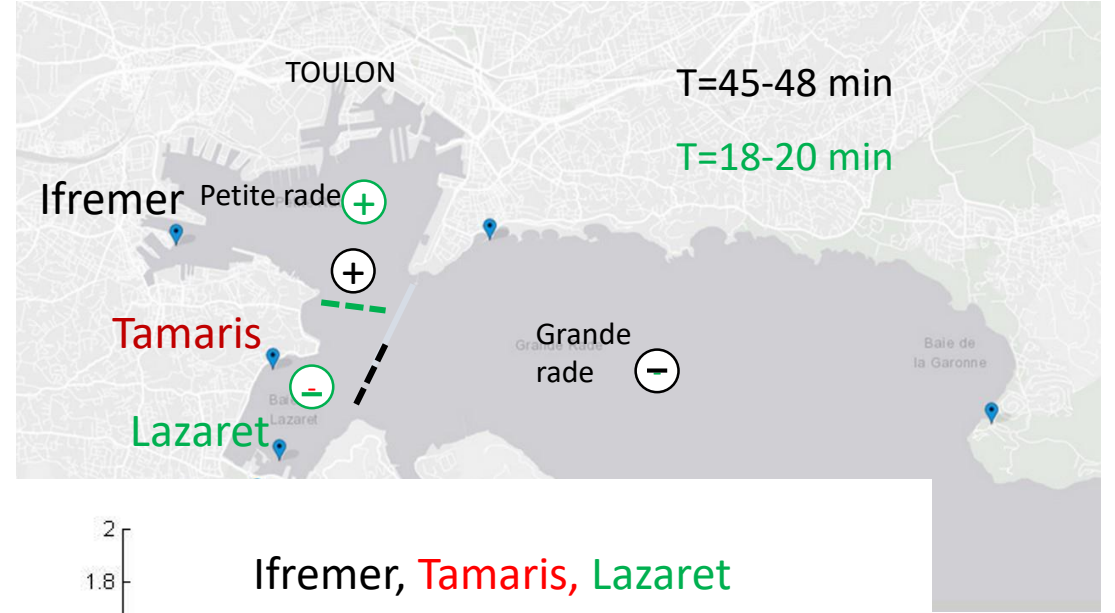
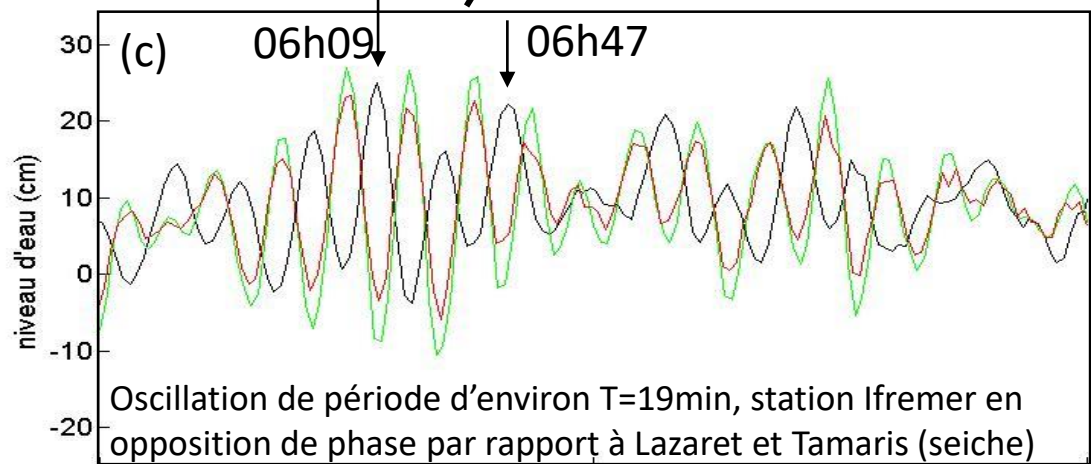
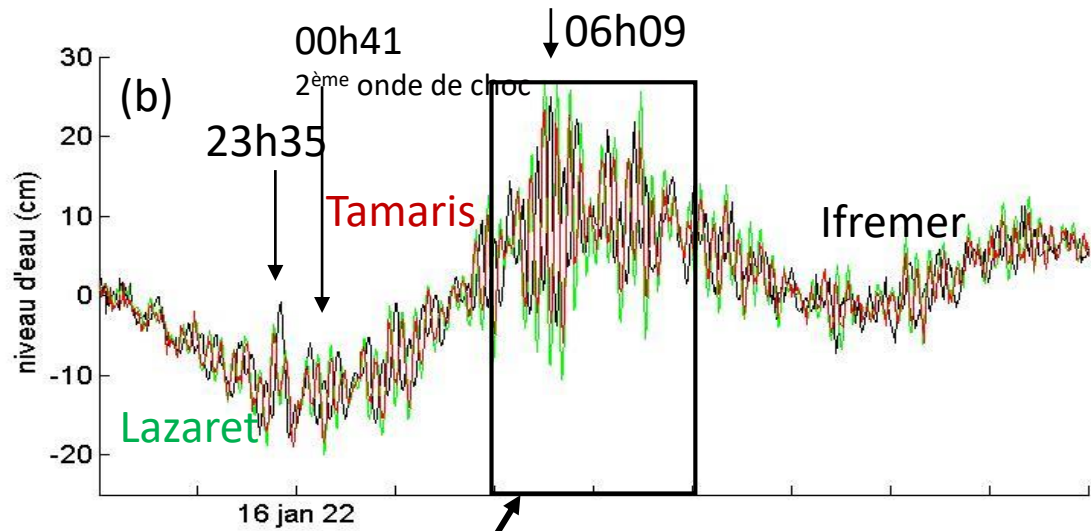
Pressions atmosphériques relevées



Propagation de l'onde atmosphérique (Gailler et al, EGU, 2022)
(forçage modèle opérationnel Taitoko, CEA)

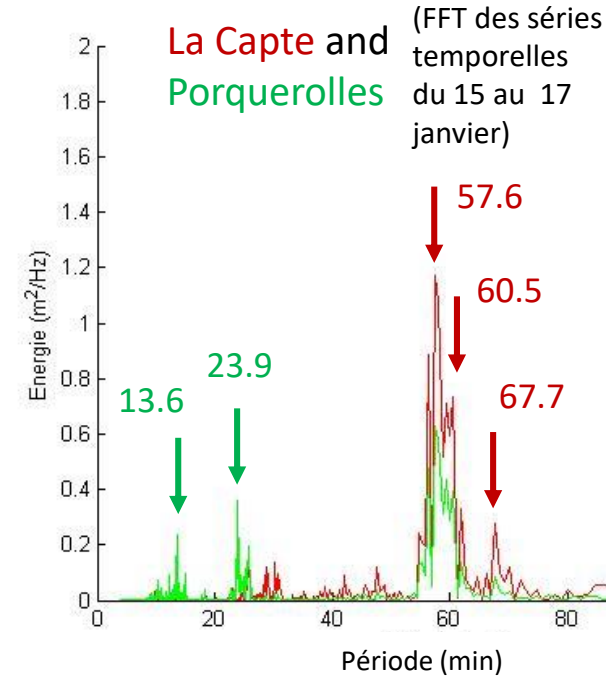
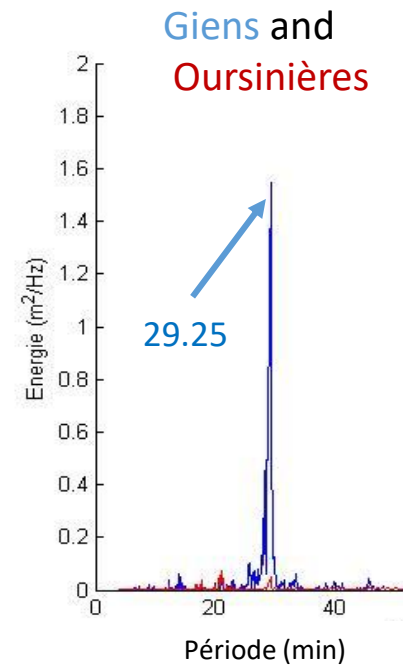
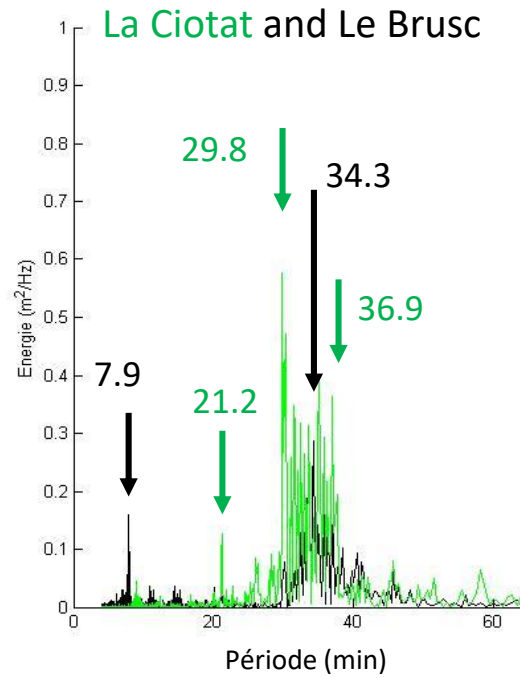
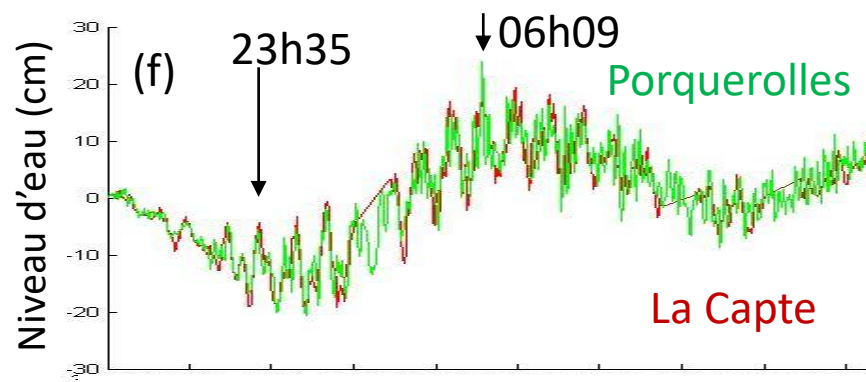
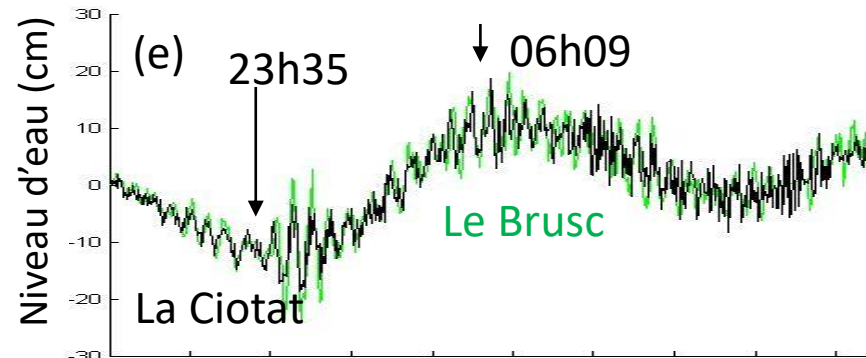
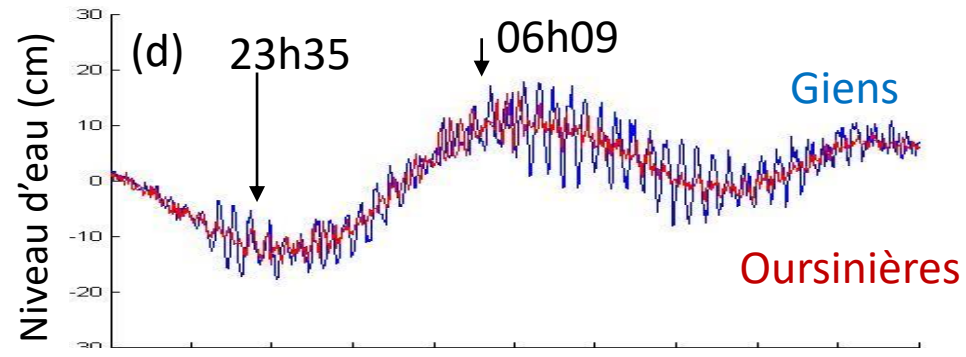


Eruption volcanique, iles Tonga, Océan Pacifique, 15/01/2022 à 4:14 a.m UTC détection d'un météo-tsunami



Eruption volcanique, iles Tonga, Océan Pacifique, 15/01/2022 à 4:14 a.m UTC

détection d'un météo-tsunami



Front d'onde atmosphérique, 19-20 septembre 2020

Courant marins de surface mesurés par Radar (Doms et al, 2020)

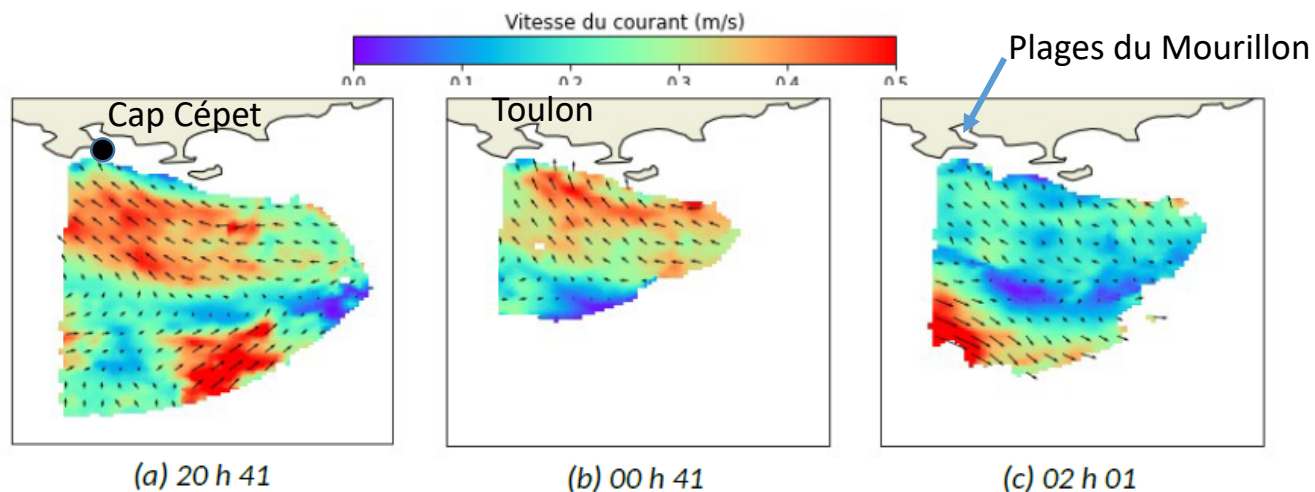
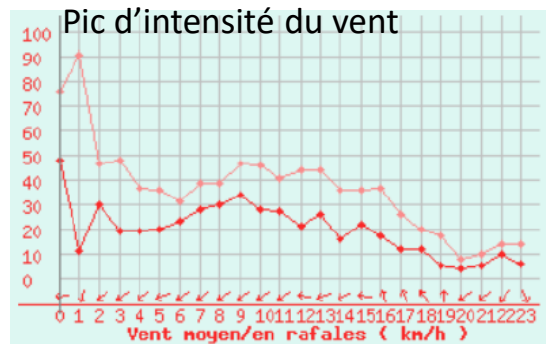
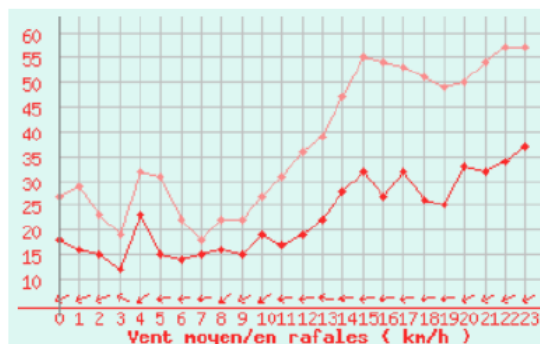


Figure 2 : cartes de courants mesurées les 19 et 20 septembre 2020 par les radars océanographiques du laboratoire MIO (<http://hfradar.univ-tln.fr>). Sur la carte (b) de 00 h 41, des courants forts (environ 50 cm/s) se forment au large et oblique de manière inhabituelle vers le Nord pour atteindre la côte Varoise. Sur la carte (c) de 02 h 01, les courants côtiers diminuent.



Vitesse du vent au Cap Cépet (source : https://www.meteociel.fr/temps-reel/obs_villes.php)

« Une tornade a touché le littoral toulonnais à hauteur de l'Anse des Pins sur les plages du Mourillon.
Vers minuit et demi, des vents à plus de 150 km/h ont été relevés »



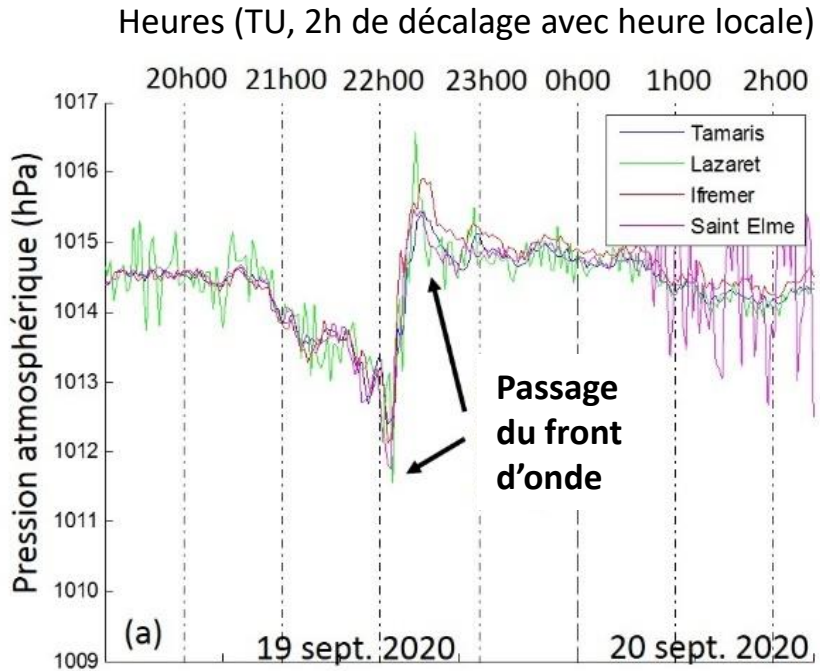
Le mobilier endommagé par la tornade est stocké sur le sable des plages du Mourillon © Radio France - Sophie Glotin



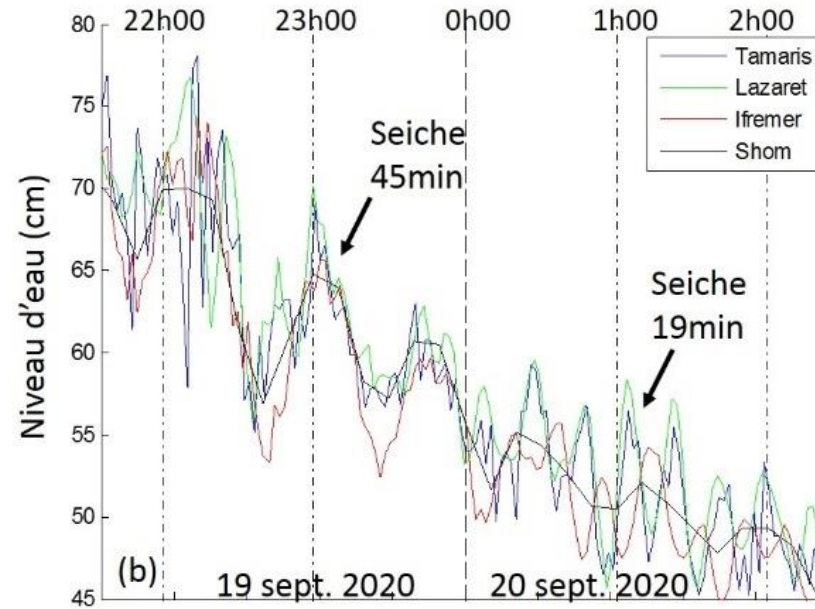
Trombe marine observée à St Cyr/Mer le 20 sept. matin © Sophie Accarias FTV

Front d'onde atmosphérique, 19-20 septembre 2020

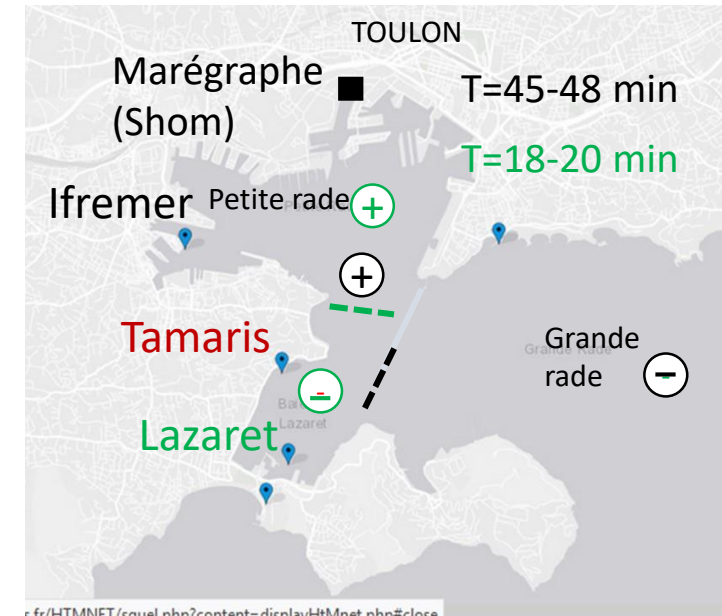
Variation de la pression atmosphérique



Variations de niveaux



Stations et seiches



Excitation de la seiche de période 45 min puis de celle à 19 min

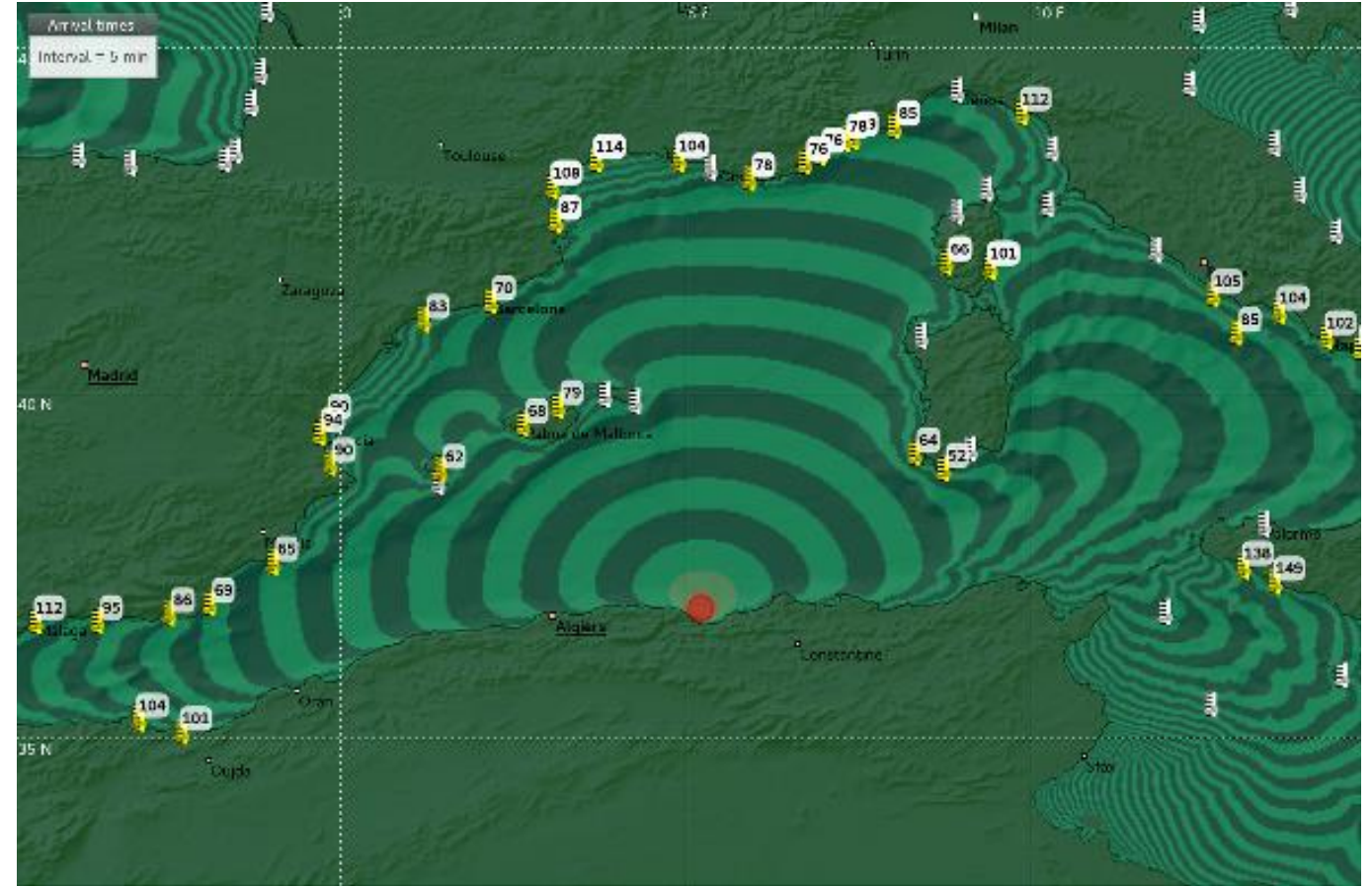
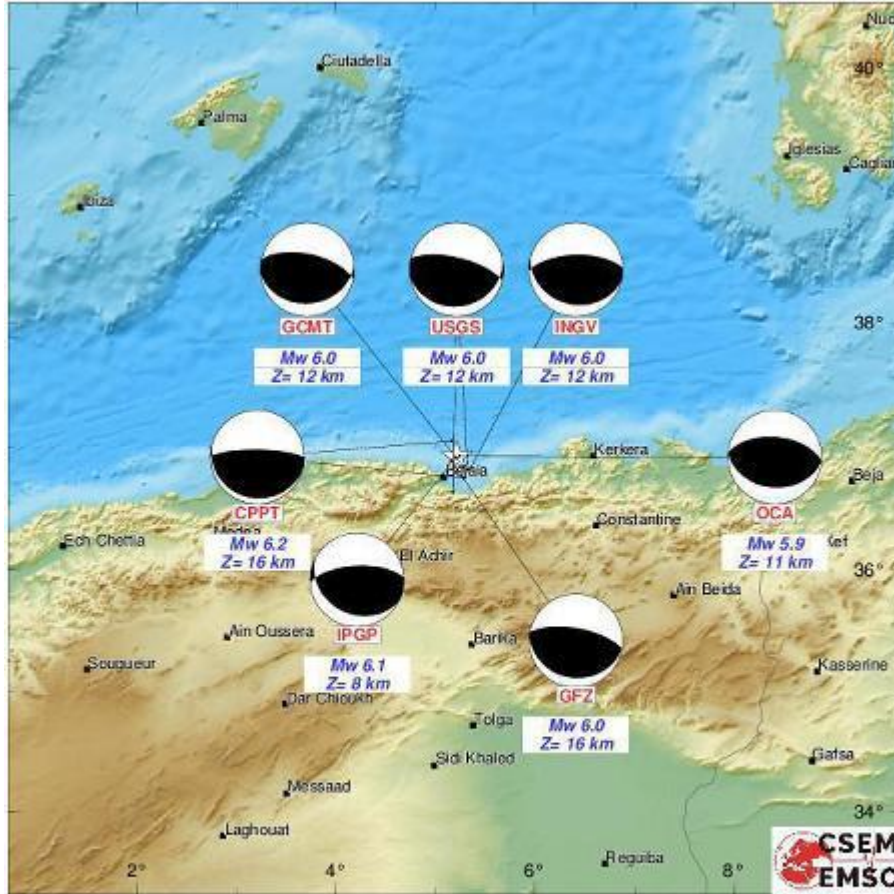
Variations de niveau d'environ 10 cm

Tremblement de terre, Algérie, 18 mars 2021 à 0:04 TU

Génération d'un tsunami

Séisme de magnitude Mw=6,0 dans le nord-est de l'Algérie

Temps de trajet théoriques du tsunami (en minutes) en différents points sur la côte



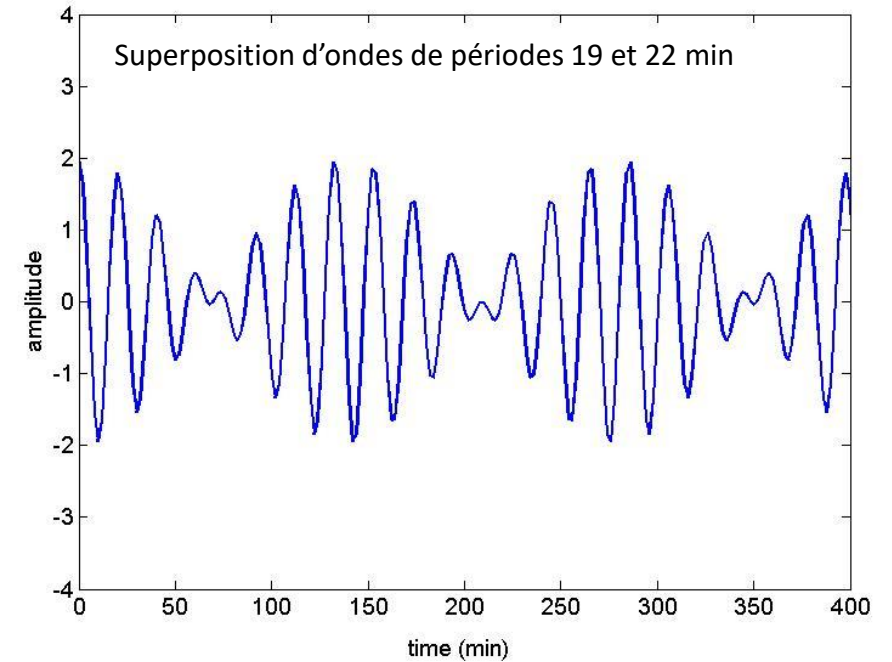
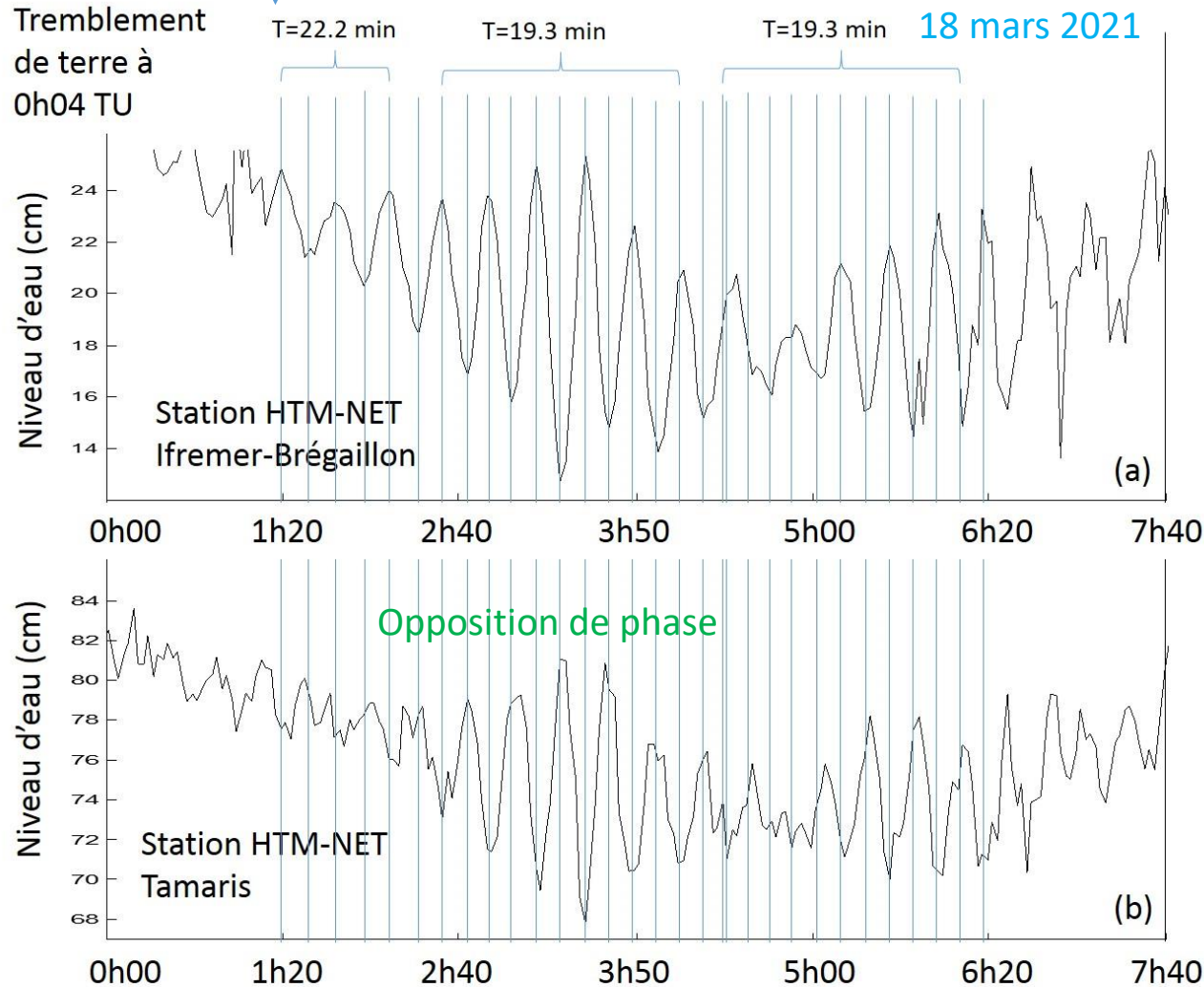
Source : https://www-dase cea.fr/actu/dossiers_scientifiques/2021-03-18/index.html

Tremblement de terre, Algérie, 18 mars 2021 à 0:04 TU

Génération d'un tsunami, détection dans la Rade de Toulon

Début d'oscillation environ
1h15 après le séisme

Seiche dans la Petite Rade de Toulon

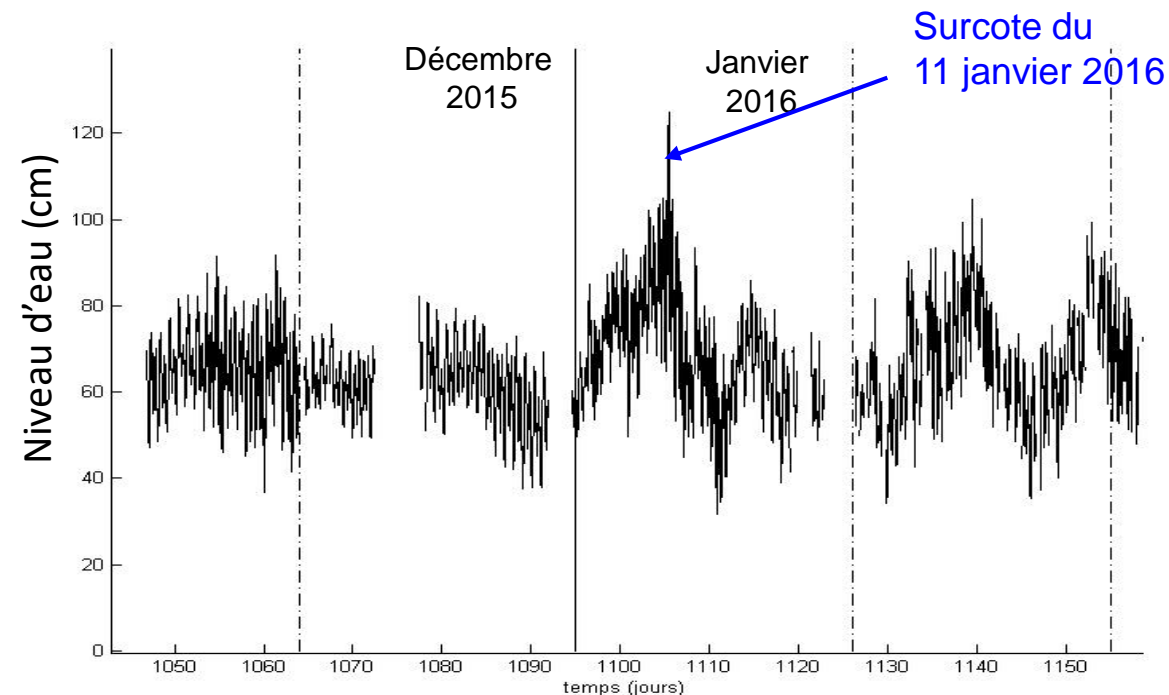


Battement forcé par le tsunami?

CONTRIBUTIONS DE DIFFERENTS FACTEURS agissant sur les VARIATIONS DES NIVEAUX D'EAU

Effets combinés des surcotes et de la houle

Exemple de conséquence : endommagement ou destruction d'ouvrages



Tempête 11 janvier 2016 : (voir site brgm)

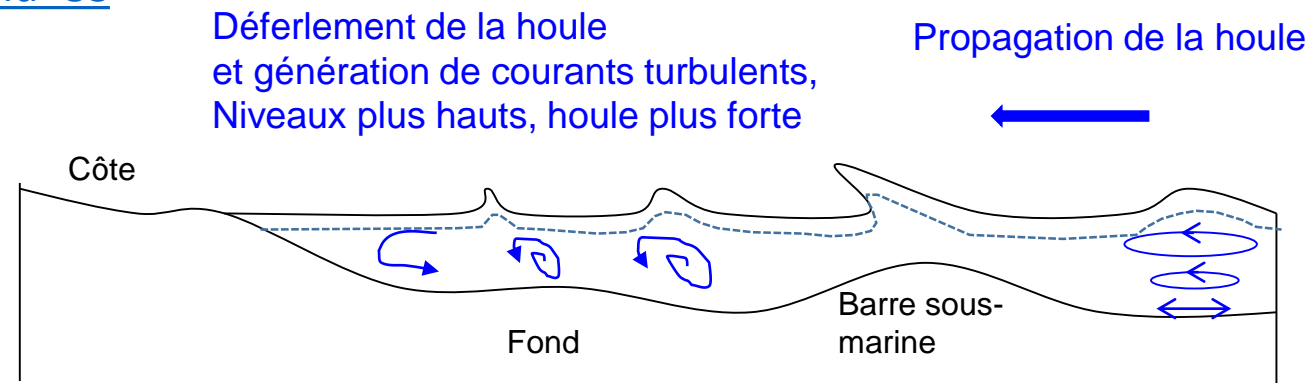
<http://fichetempete.brgm.fr/pages/accueil.jsf?rid=93&depid=83>

Début de tempête : 11/01/2016 à 00:00

Fin de tempête : 11/01/2016 à 23:59

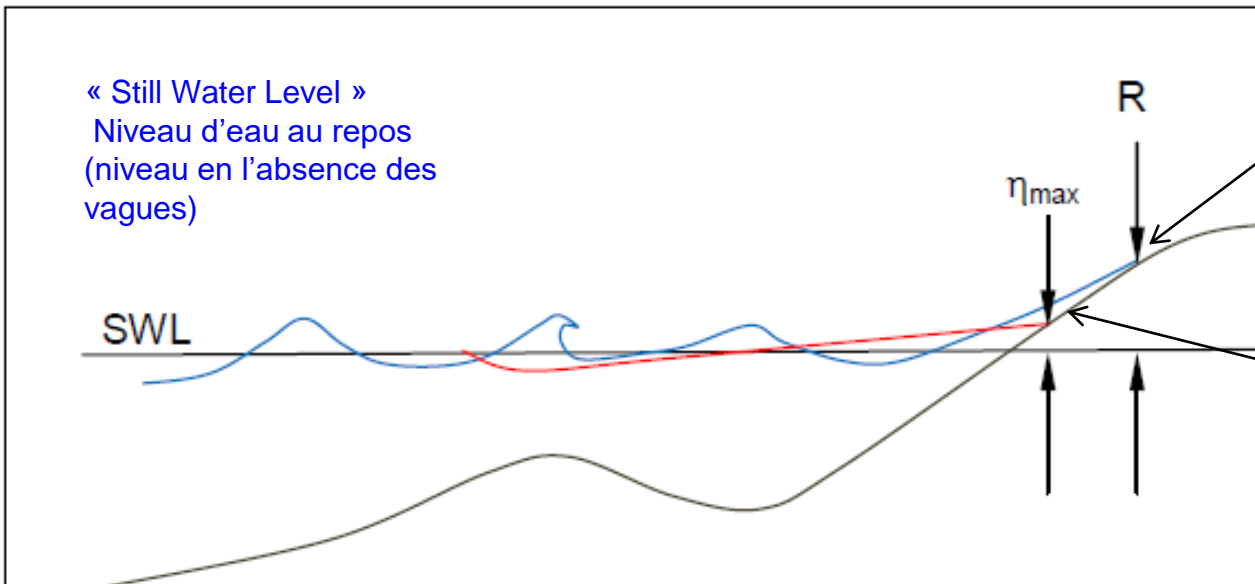
Durée de la tempête : 23h 59m

commentaires divers : Sur la route du sel, le cordon dunaire a été détruit sur 1500 m. Le restaurant le Robinson sur la plage de l'Almanarre a été inondé.



CONTRIBUTIONS DE DIFFERENTS FACTEURS agissant sur les VARIATIONS DES NIVEAUX D'EAU

Elévation maximale du niveau d'eau, effet des vagues



Niveau maximum atteint par les vagues, le « RUN-UP »

Niveau d'élévation moyen dû aux vagues, le « SET-UP »

Pour une houle de période au large $T=8s$,
soit une longueur d'onde 100m,
Pour $H_0=2m$ (houle de 2m de hauteur) et $m=0.1$,
 $R= 1m$ environ

Elévation moyenne à la côte de 20cm environ pour une houle de 2m au niveau des brisants

Surcote + oscillations lentes (par ex. seiches) + vagues

➡ SUBMERSION / FRANCHISSEMENT

Set-up (niveau de surélévation moyen, plage naturelle)

Run-up (niveau maximal atteint, plage naturelle)

$$R_{inc} = 0.6 \frac{m}{\sqrt{H_0/L_0}} H_0$$

avec
m pente de la plage,
 H_0 hauteur de la houle au large
 L_0 longueur d'onde de la houle au large

Surélévation moyenne égale à environ 0.19 fois la hauteur de la houle avant déferlement

Dean&Dalrymple (1992)

franchissement au-dessus de la digue du port de Bormes-les-Mimosas (Jarry, 2009)



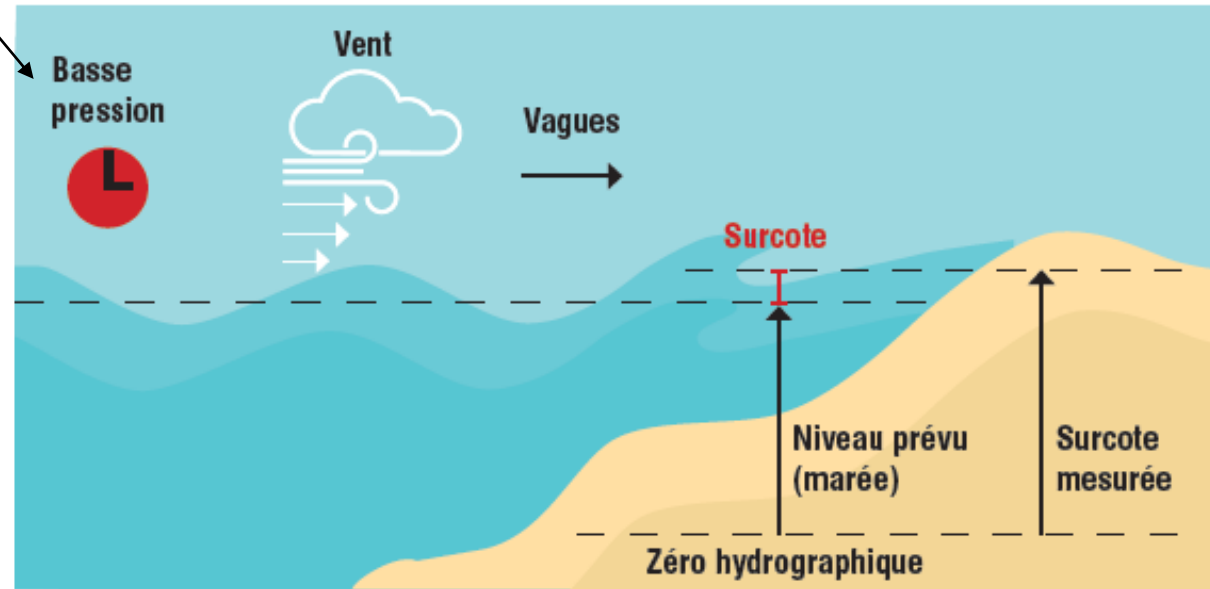
Inondation et submersion : effets combinés des vagues et du niveau d'eau

Dépression, Vent et surcote

Patm : entre 960 et 1040 hPa
Soit 0.80m (hypothèse isostatique)

Le vent « pousse »
l'eau de surface

Les vagues génèrent un « set-up »
à la côte auquel s'ajoute le « run-up »



Les guides du CEPRI

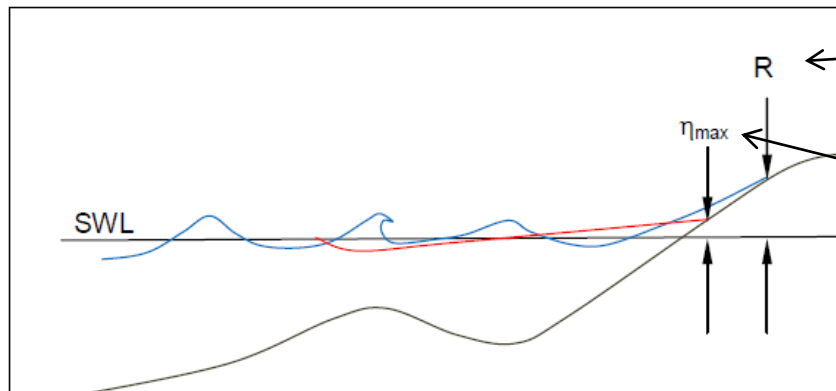
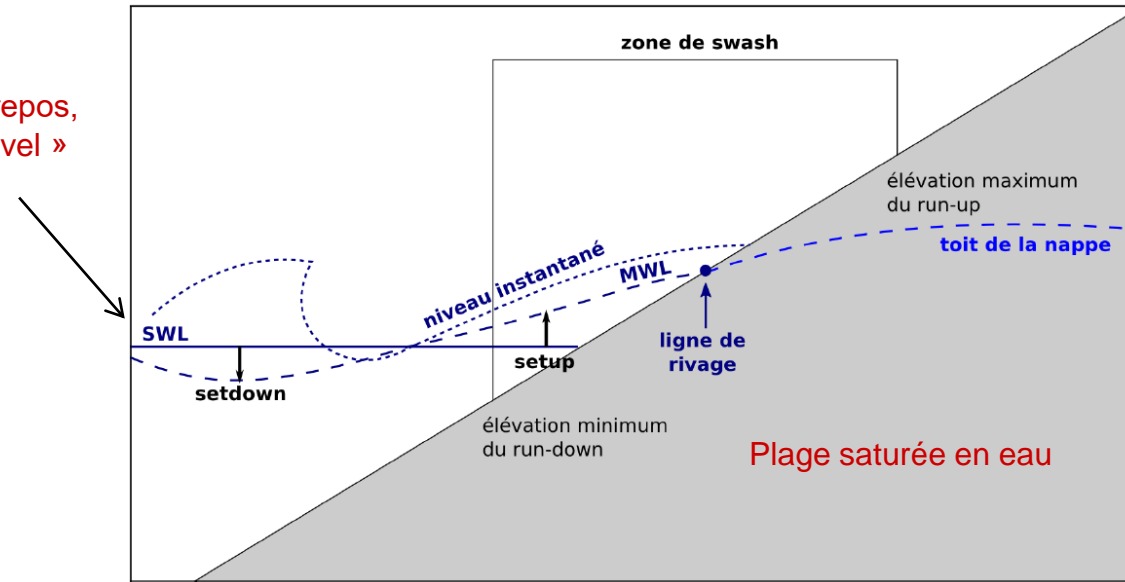
Les collectivités territoriales face aux risques littoraux

Élaborer et mettre en œuvre une stratégie de
réduction du risque de submersion marine

Inondation et submersion : effets combinés des vagues et du niveau d'eau

Surélévations moyenne et instantanée dues au vagues

Niveau d'eau au repos,
le « Still Water Level »

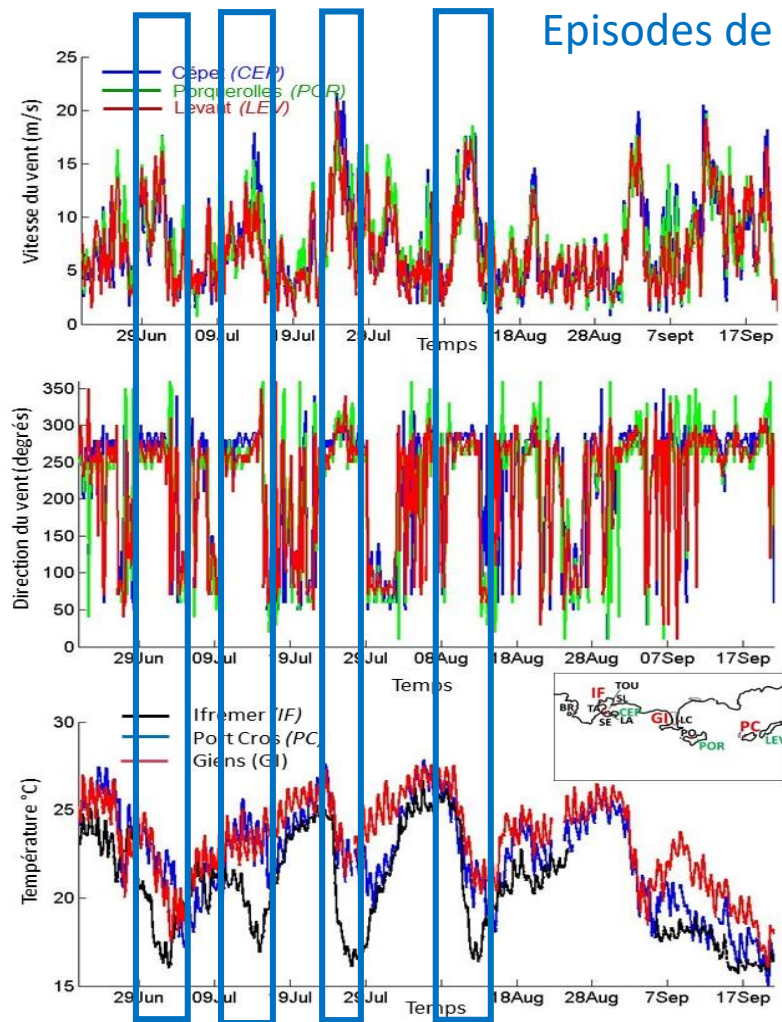


Niveau maximum atteint par les vagues,
le « RUN-UP »

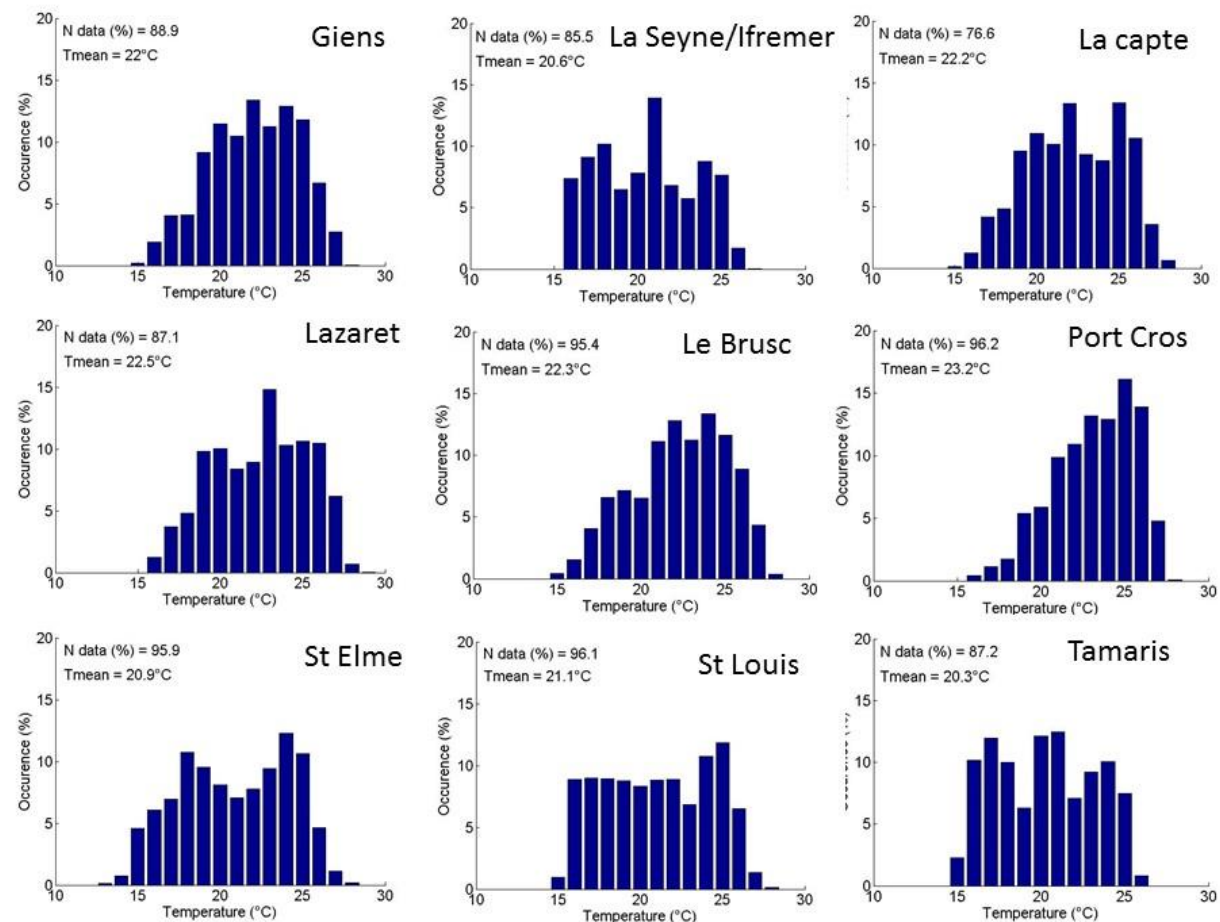
Niveau d'élévation moyen dû aux vagues,
le « SET-UP »

Élévation moyenne à la côte de 20cm
environ pour une houle de 2m au niveau
des brisants

Mouvement des masses d'eau et évolution des températures : période estivale



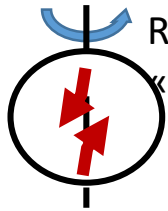
ÉTÉ 2017



La température de l'eau baisse plus fortement dans la rade par épisodes de Mistral, Le Brusac et Port Cros sont les sites les moins affectés
 Phénomènes de remontées d'eaux froides ou upwelling, Dufresne et al, Ocean Dyn, 2014.

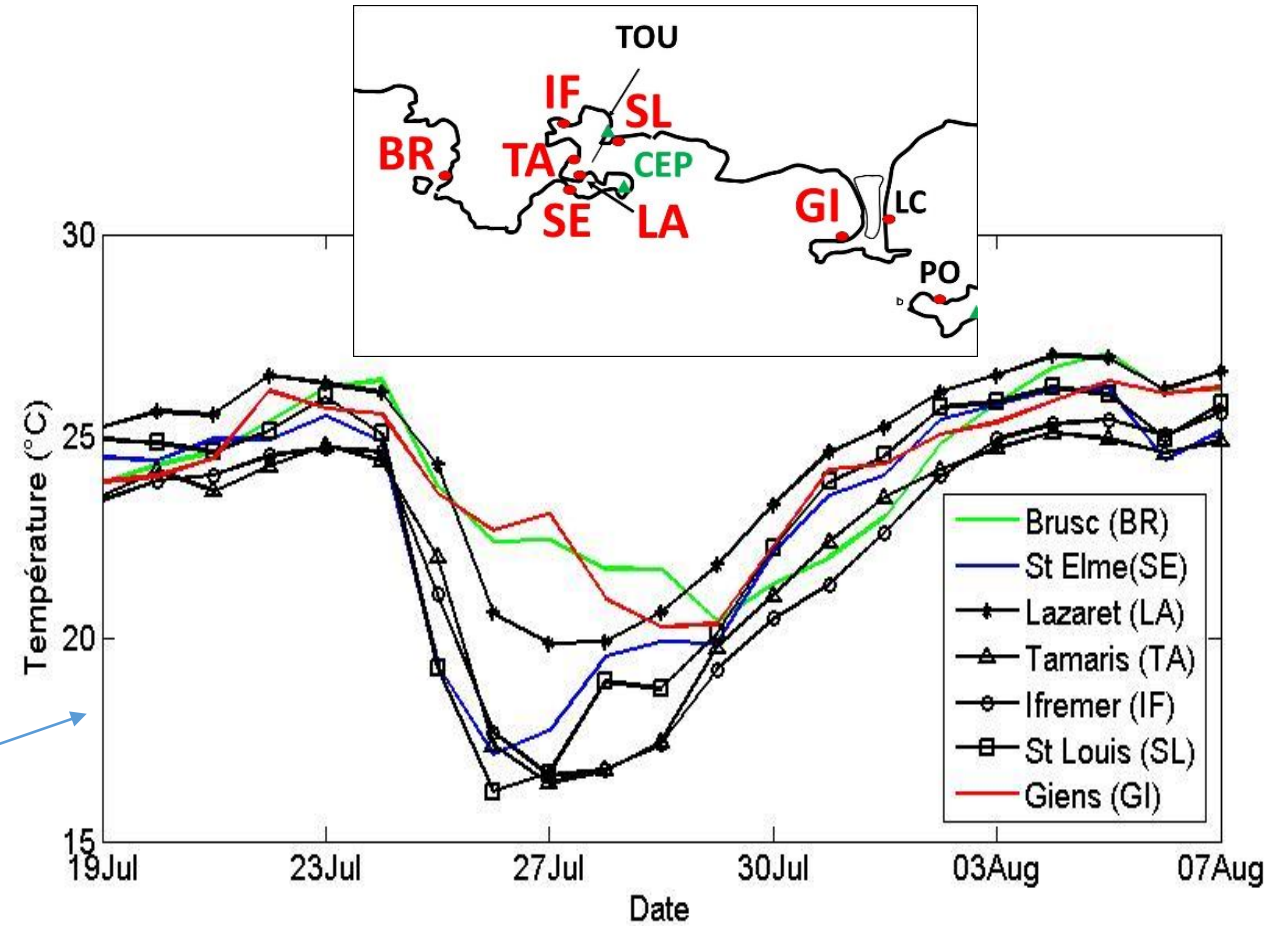
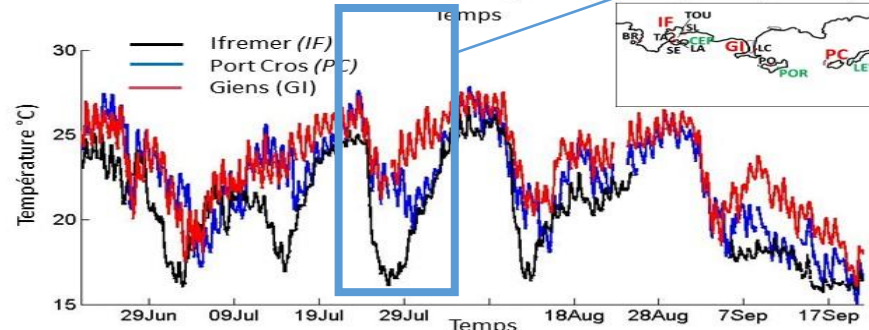
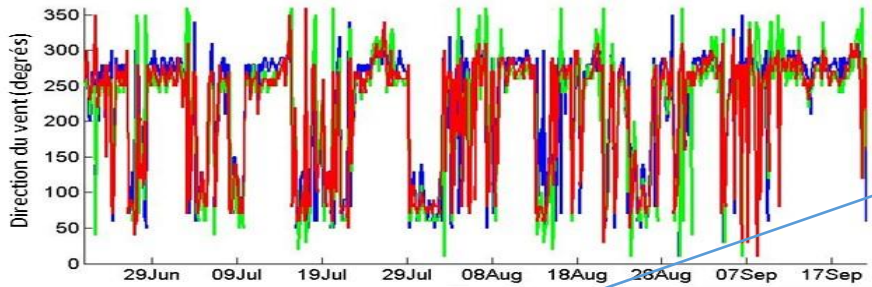
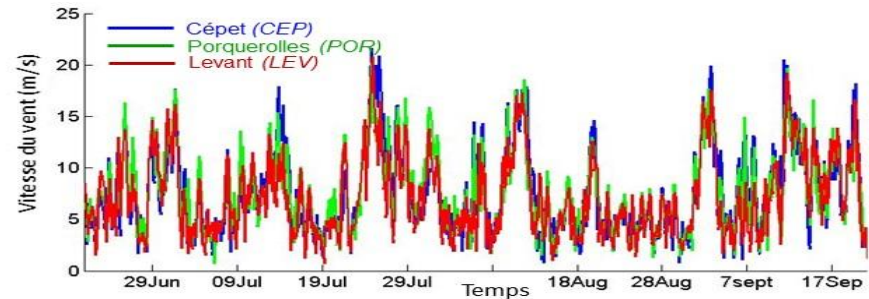
Temps caractéristique de l'établissement des upwellings, 1 à 2 jours, renouvellement des masses d'eau

Mouvement des masses d'eau et évolution des températures : Zoom sur la Rade de Toulon



Rotation de la terre : Trajectoire déviée vers la droite
« force » de Coriolis dans l'hémisphère nord (repère
lié à la surface de la terre)

L'eau de surface part vers le large et est remplacée par l'eau
du fond (plus froide) qui remonte à la surface



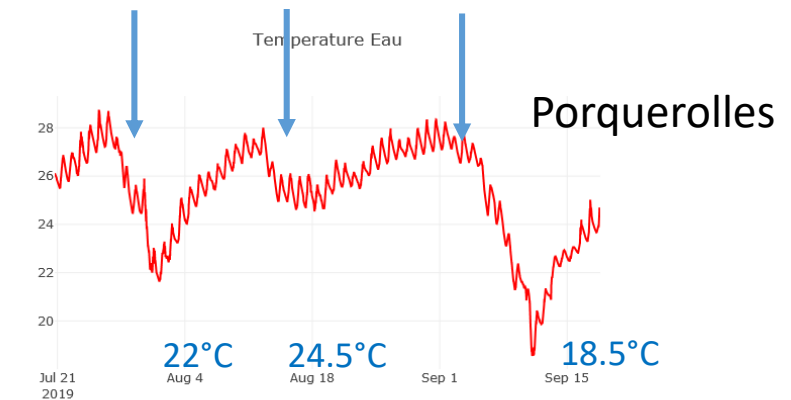
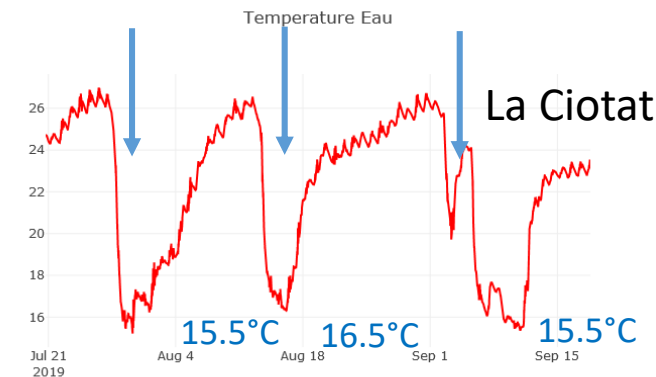
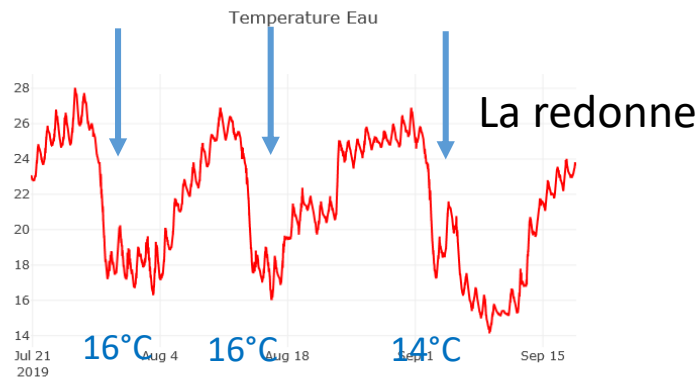
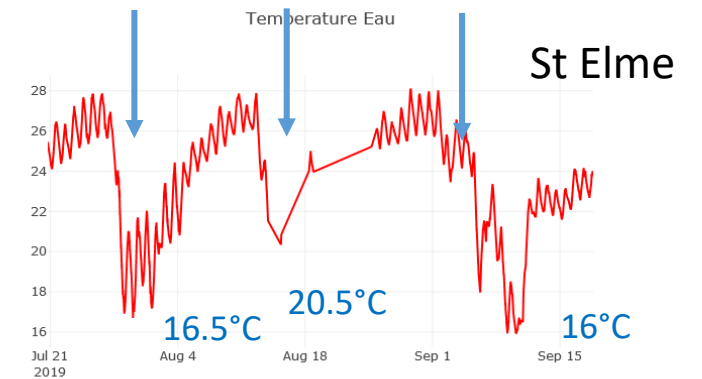
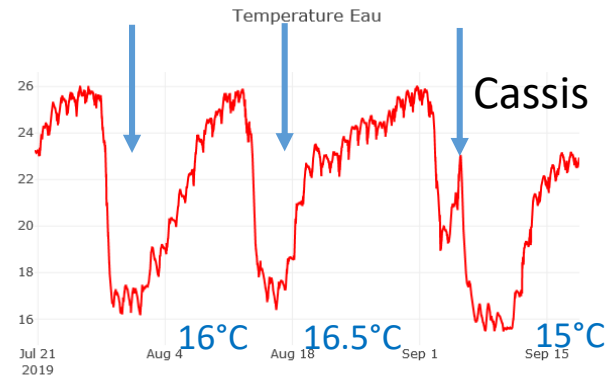
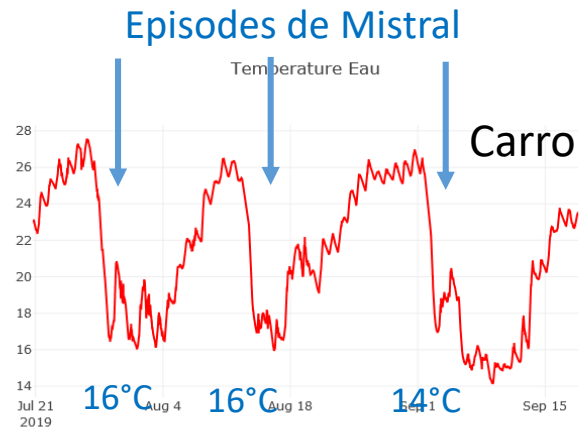
Baisse plus significative et très rapide dans la rade (hors Lazaret) et à St Elme par épisodes de Mistral, Le Brusac et Giens sont les sites les moins affectés (eau de surface poussée par le vent vers le fond de la baie).

Temps caractéristique de la baisse de température: env. 2 jours
(Fort renouvellement des masses d'eau)

Mouvement des masses d'eau et évolution des températures : du Cap Couronne aux îles d'Hyères

Evolution des températures d'Ouest en Est: 21 juillet – 18 septembre 2019

Upwellings plus ou moins marqués selon les sites et les conditions météorologiques



Quand T env. 15°C ... inférieure à T indiquée sur les météo des plages ...

En résumé... dynamique côtière sur la Côte Provence – Côte d'Azur

Mouvement des masses d'eau, variation des températures et évolution des niveaux

Les variations de niveaux

- Origines diverses (marées, dilatation, pression atmosphérique, vent, oscillations)
- Rôle moteur pour la dynamique des masses d'eau
- Risques (submersion, inondation) associés aux surcotes

Tendance de l'élévation du niveau de la mer

- accentue les risques de submersion et inondation
- tendance à considérer sur plusieurs années

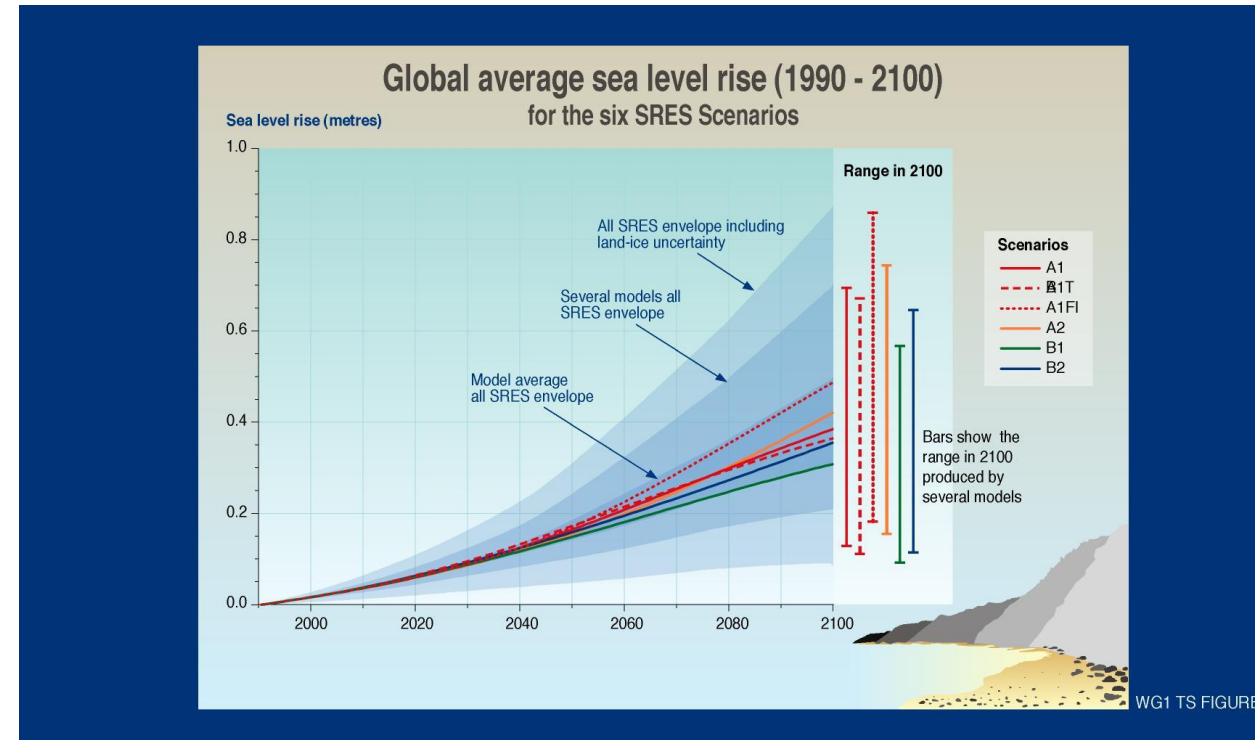
Les variations de températures sub-surface

- Mélange vertical (vent notamment)
- Upwellings et downwellings

Nécessité de maintenir et développer des systèmes d'observation sur le long terme

Constat :

Le niveau de la mer s'est élevé de 18 cm dans le monde entre 1870 et 2000, dont 6 cm les 20 dernières années d'après les derniers travaux de l'Onerc (Observatoire national sur les effets du réchauffement climatique).



HTM-NET

Accueil Stations Mesures Accès aux données Diaporama Publications Liens et Contacts Intranet

Map Information: Zoom Level : 9 Center: 43.1411, 6.0603 DD: 43.5923, 5.0454 / DMS: 43°35'32.37", 5°2'43.27" **Attention : Données automatiques sans validation**

Remerciements :
Programme National d'Observation sur le Long Terme, ILICO DYNALIT
Toulon Métropole TPM, Conseil Départemental 83
(Contrats HTM-NET, OLBIA, CAPTILE, DYNAMER, ONDESUB)
Shom, REFMAR (référencement et diffusion des données)
MétéoFrance pour les données météorologiques

Implantation des stations:
Toulon Métropole TPM
Parc National de Port Cros (PNPC)
Ville de Hyères
Conseil Départemental 13
La Ciotat Shipyards
Port de Menton Garavan

<https://htmnet.mio.osupytheas.fr/>