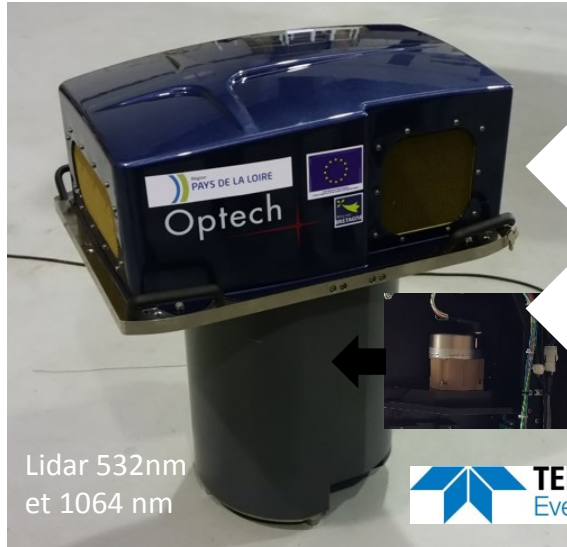


Matériel Nantes Rennes en partage avec Caen



Light  
Detection  
And  
Ranging



Lidar 532nm  
et 1064 nm



**TITAN DW 60** Enregistreur de retours d'ondes complets

100% UN

100% UR1



IWR3



50% OSUNA 50% OSUR

AAP 2011 des Pays de la Loire  
Réseau de Suivi et de Surveillance  
Environnementale (RS2E-OSUNA)  
Axe 1 Protection du littoral, des berges de  
Loire et de leurs ouvrages associés.  
Avec partenariat entre OSU de Nantes et  
Rennes

2014

CPER 2014-2020 R16  
Mer - Environnement - ville et territoires  
Opération: Suivi et Surveillance de  
l'Environnement en Pays de la Loire (S2E-  
PdL)

2019



Enregistreur de retours  
d'ondes complets

100% OSUNA



Caméra hyperspectrale  
Mjolnir VS-620

© P. Launeau 2024

Marché de mise en œuvre  
aéroportée n° 23034PAN  
PIXAIR



1<sup>er</sup> opérateurs:

Patrick Launeau  
Clément Perrin

Laurent Froideval  
Christophe Conessa

À partir de septembre 2023

Laser infrarouge à 1064 nm

### En mode discret

le principe du LiDAR repose sur la mesure du temps d'un aller-retour d'une très courte impulsion laser réfléchiée par une surface. Connaissant la vitesse de la lumière on en déduit la distance télémétrique (range) de ce retour ou de cet écho.

Une surface plane comme une route ne produit qu'un écho.

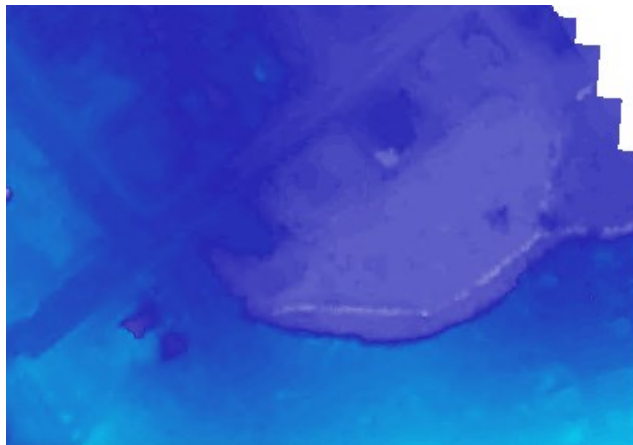
Un arbre plus volumineux va produire plusieurs échos de sa cime au sol lorsque la densité du feuillage permet des retours vers le détecteur.

Ces échos forment ainsi des nuages de points organisés en facettes planes dans le cas de bâtiments ou en volumes irréguliers dans le cas d'arbres isolés ou en forêts.

Une classification utilisant ce critère permet alors de repérer les arbres et bâtiments pour construire par interpolation un modèle numérique de terrain (MNT) à la base de ces objets.

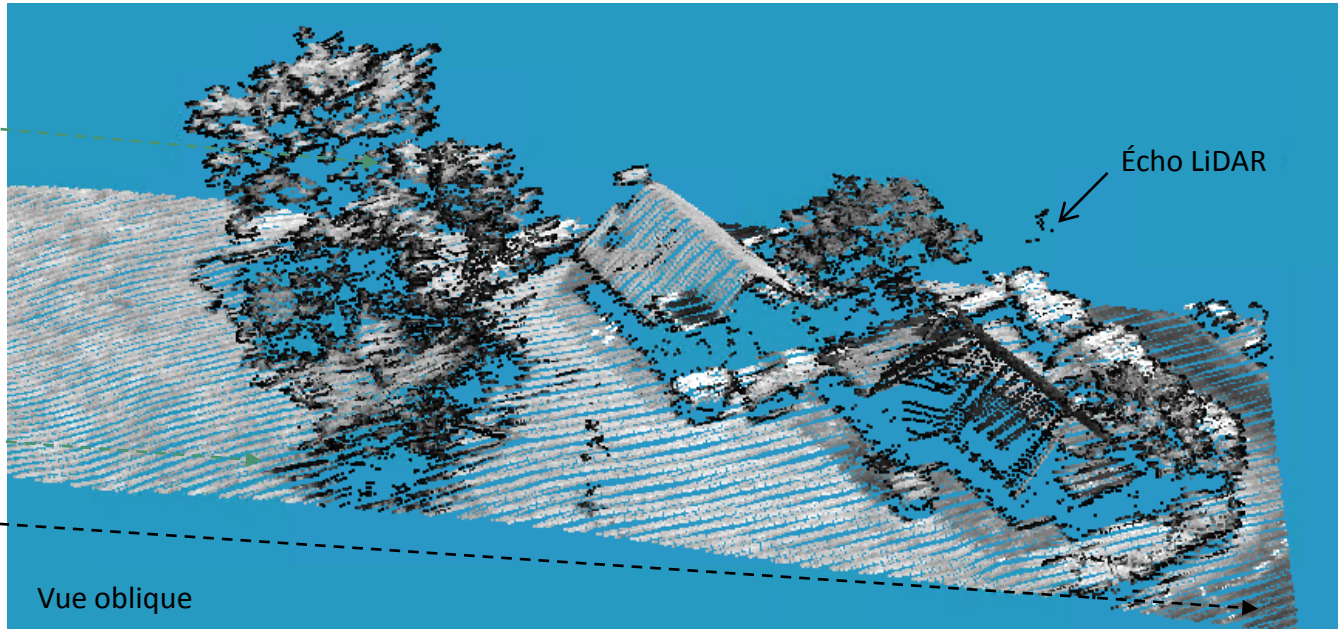
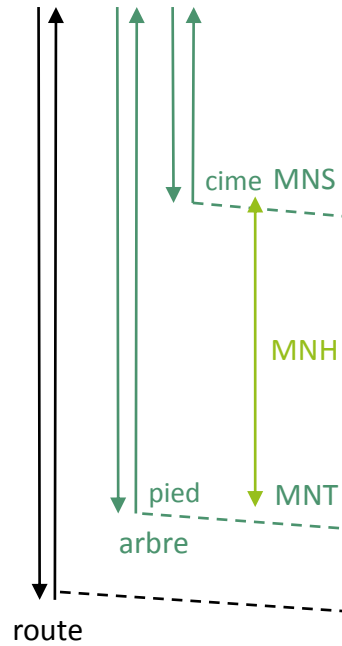
Le modèle numérique de surface (MNS) correspond à l'enveloppe supérieure des échos discrets.

MNT

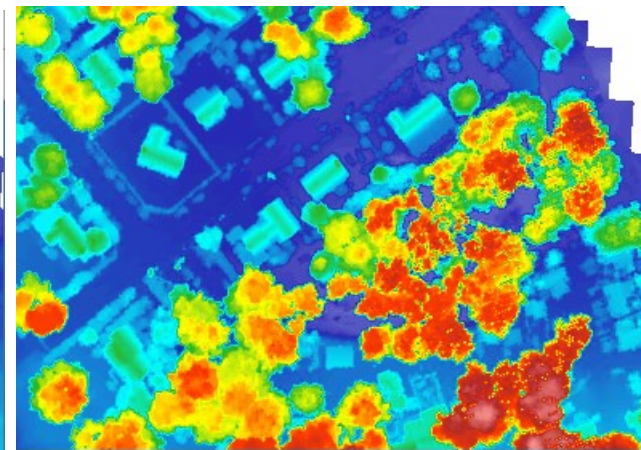


## Principe de fonctionnement du LiDAR

L'intensité du retour est proportionnelle aux propriétés de la surface.



Pont-Mahé



MNS (MNH=MNS-MNT)

## Principe de fonctionnement du LiDAR

**En aéroporté**, la résolution au sol est donnée par l'angle d'ouverture du faisceau laser (iFOV).

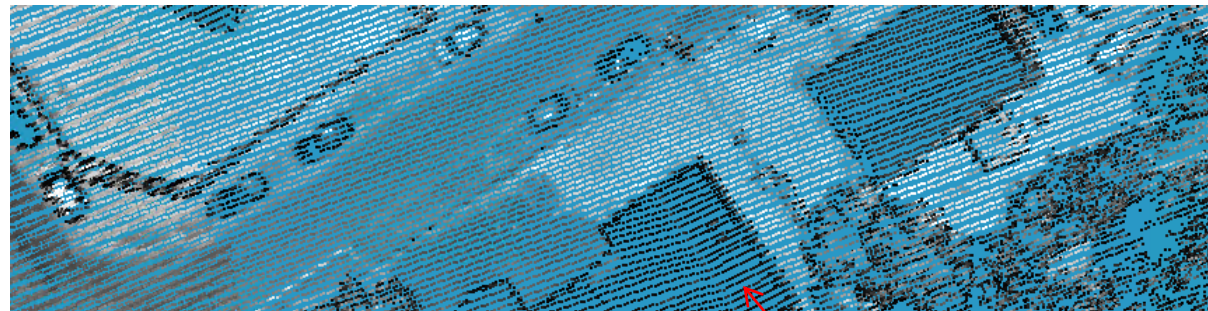
A 600 m le laser vert du Titan forme une empreinte au sol de 42 cm alors que celle du laser infrarouge n'est que de 32 cm

L'espacement entre les lignes de balayage définit la résolution finale au sol.

**En avion à 240 km/h** elle est de 48 cm au nadir mais seulement de 88 cm sur les côtés de la fauchée.

Pour éviter les trous dans les données les produits finis devraient théoriquement avoir une résolution de 88 cm.

Grace au recouvrement des fauchées en bordures une résolution plus fine à 50 cm est envisageable dans cet exemple.



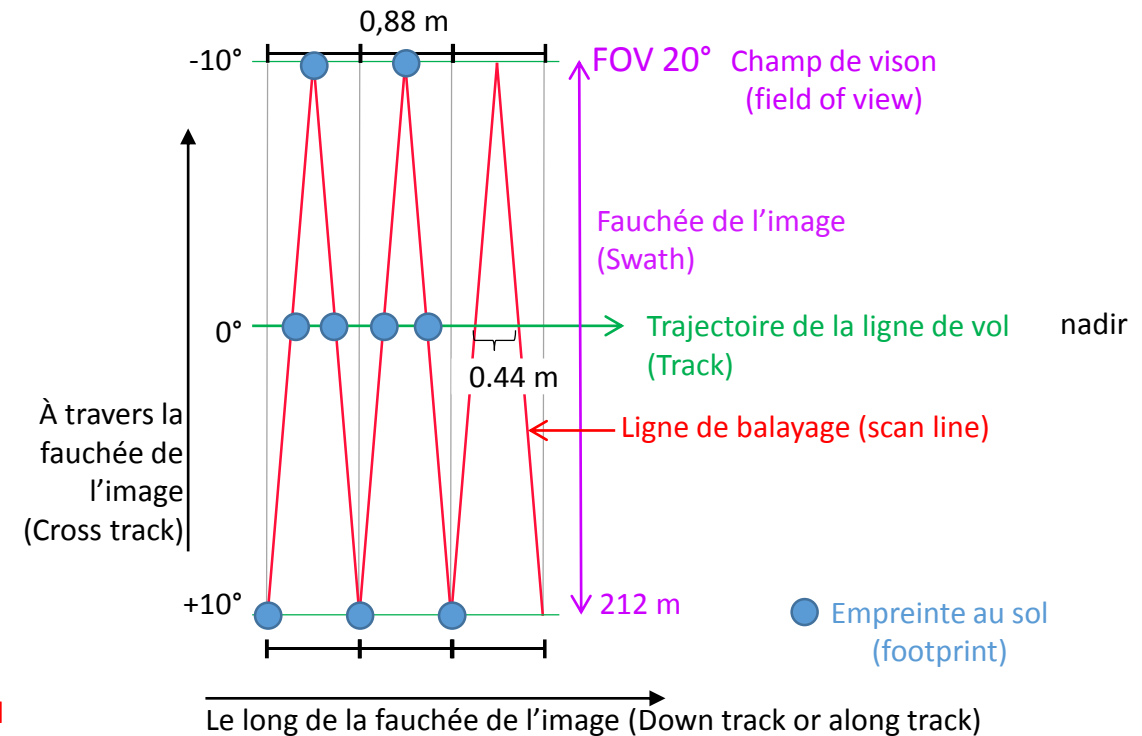
Recouvrement entre deux fauchées

Trace du balayage effectif au sol

Une fréquence d'impulsion laser de 175 kHz dans ce cas de figure permet d'atteindre une résolution de 24 cm mais uniquement le long des lignes de balayage. La densité moyenne annoncée de **12,4 points** au  $m^2$  est trompeuse car non uniforme. Elle est de 9 pt/ $m^2$  au nadir et 4,8 pt/ $m^2$  sur les cotés dans la direction du vol.

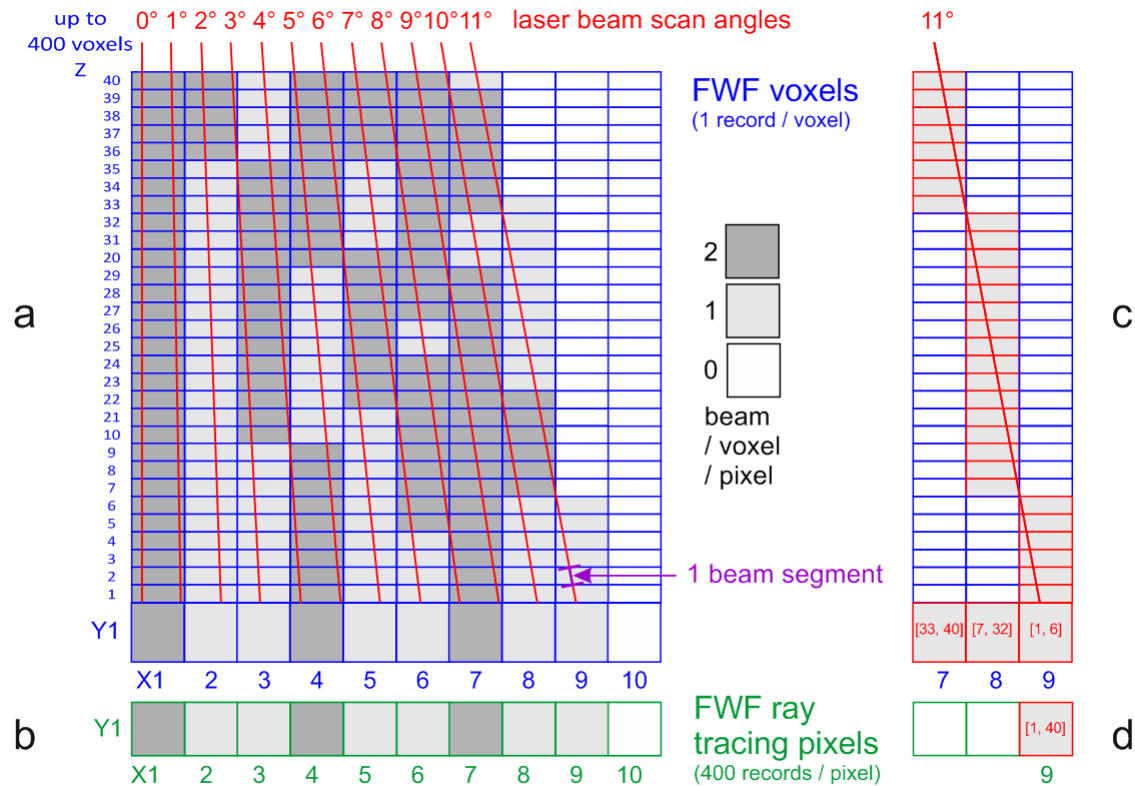
A 300 kHz on pourrait atteindre 14 cm et **21,2 pt/ $m^2$**  mais toujours avec un gap de 88 cm en bordure et 44 cm au nadir et avec perte des retours d'onde. Mais cette fréquence n'est pas adaptée à l'enregistrement des retours d'onde.

Schéma synthétique d'un vol à 600 m au-dessus du sol



- La résolution dans la direction du vol est donnée par la vitesse de l'avion

Un aller-retour laser enregistré en 1 nanoseconde parcourant 0.15 m la résolution le long de la plage d'enregistrement ou **Range (R)** d'un faisceau LiDAR est de 0.15 m sur chaque vecteur d'angle de balayage (scan angle).

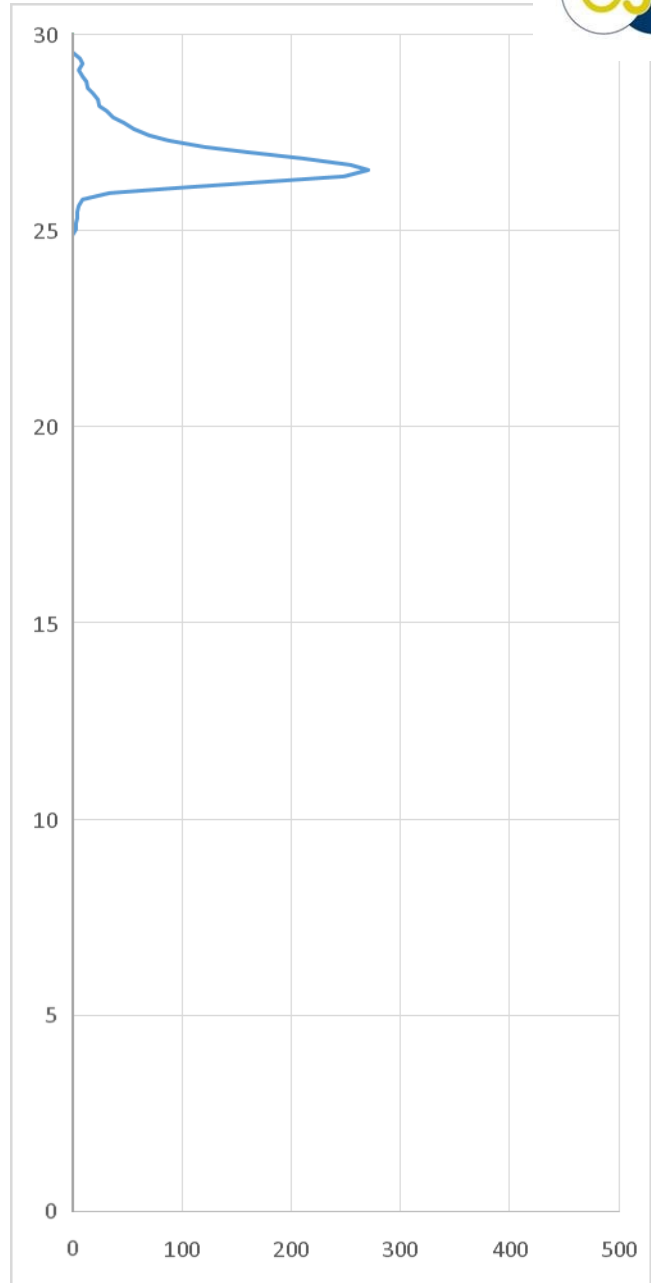


Une voxellisation ( $1\text{m} \times 1\text{m} \times 0.15\text{m}$ ) implique un rééchantillonnage avec une redistribution des enregistrements entre pixels (ou colonnes de voxels).

Une analyse par lancé de rayon préserve la géométrie initiale et chaque **pixel ( $1\text{m} \times 1\text{m}$ )** à **résolution R de 0.15m** doit donc être associé à un **angle d'incidence**.

Une impulsion laser est envoyée vers le sol.  
Elle s'allume très vite en 2 nanosecondes et s'éteint plus lentement en 3 nanosecondes.

➤ Apport de la forme d'onde complète

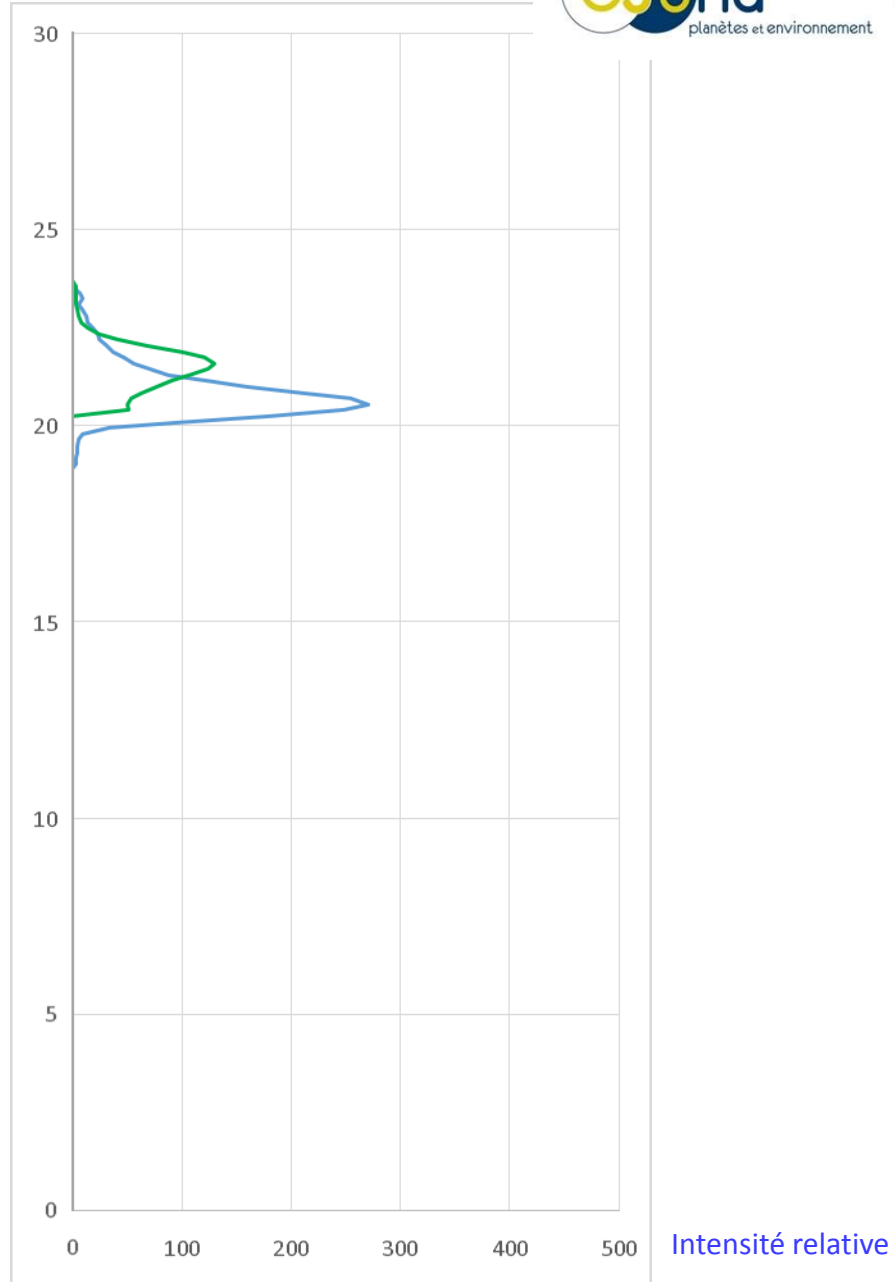


Vitesse de la lumière 300 000 km/s  
300 000 000 m/s  
1 nanoseconde = 0.000000001 seconde  
0.3 m/ns  
30 cm/ns

Un aller-retour fait donc 15 cm/ns

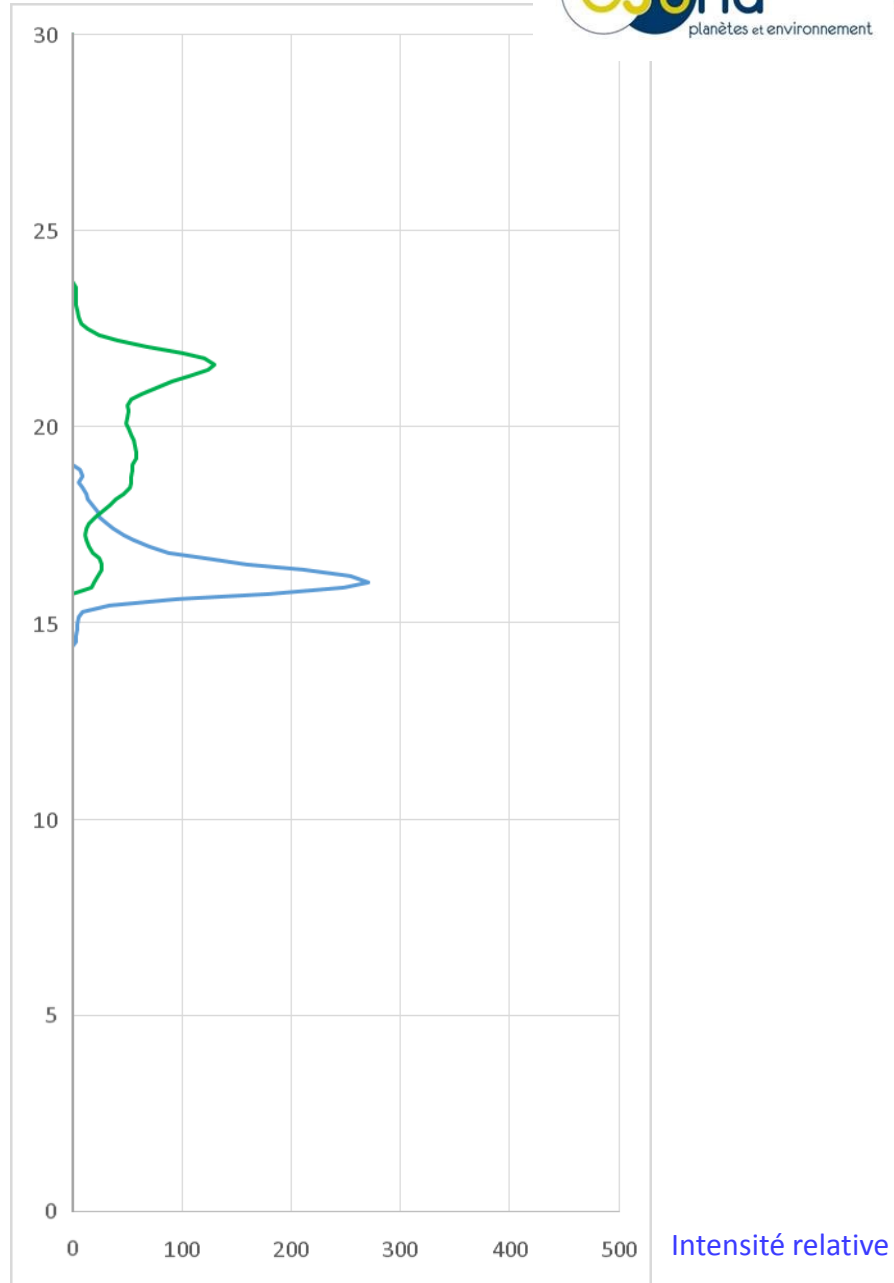
Une impulsion laser est envoyée vers le sol.  
Elle s'allume très vite en 2 nanosecondes et s'éteint plus lentement en 3 nanosecondes.

➤ Apport de la forme d'onde complète



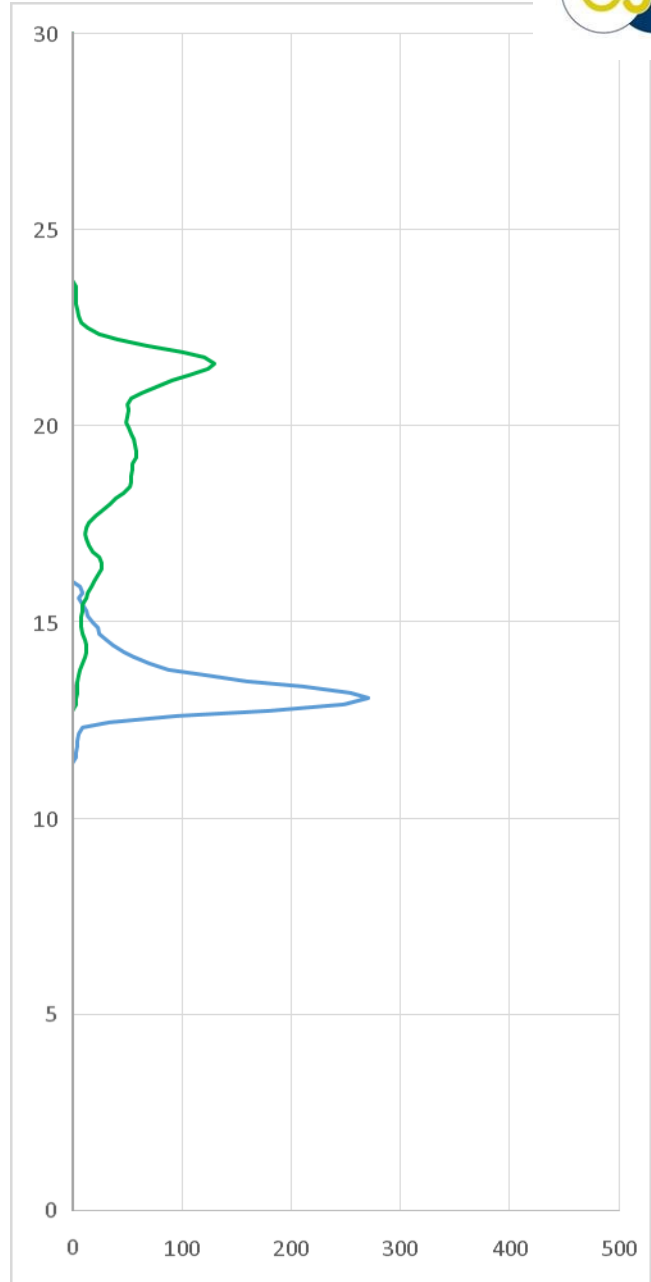
Une impulsion laser est envoyée vers le sol.  
Elle s'allume très vite en 2 nanosecondes et s'éteint plus lentement en 3 nanosecondes.

➤ Apport de la forme d'onde complète



Une impulsion laser est envoyée vers le sol.  
Elle s'allume très vite en 2 nanosecondes et s'éteint plus lentement en 3 nanosecondes.

➤ Apport de la forme d'onde complète

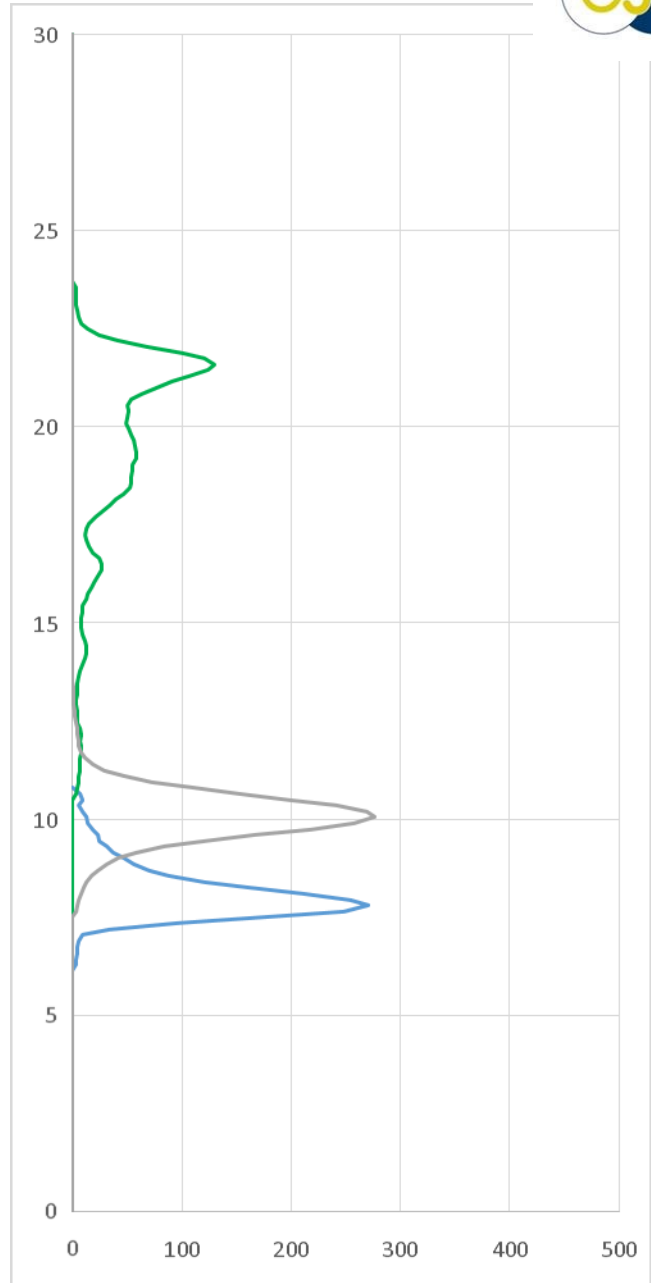


Intensité relative



Une impulsion laser est envoyée vers le sol.  
Elle s'allume très vite en 2 nanosecondes et s'éteint plus lentement en 3 nanosecondes.

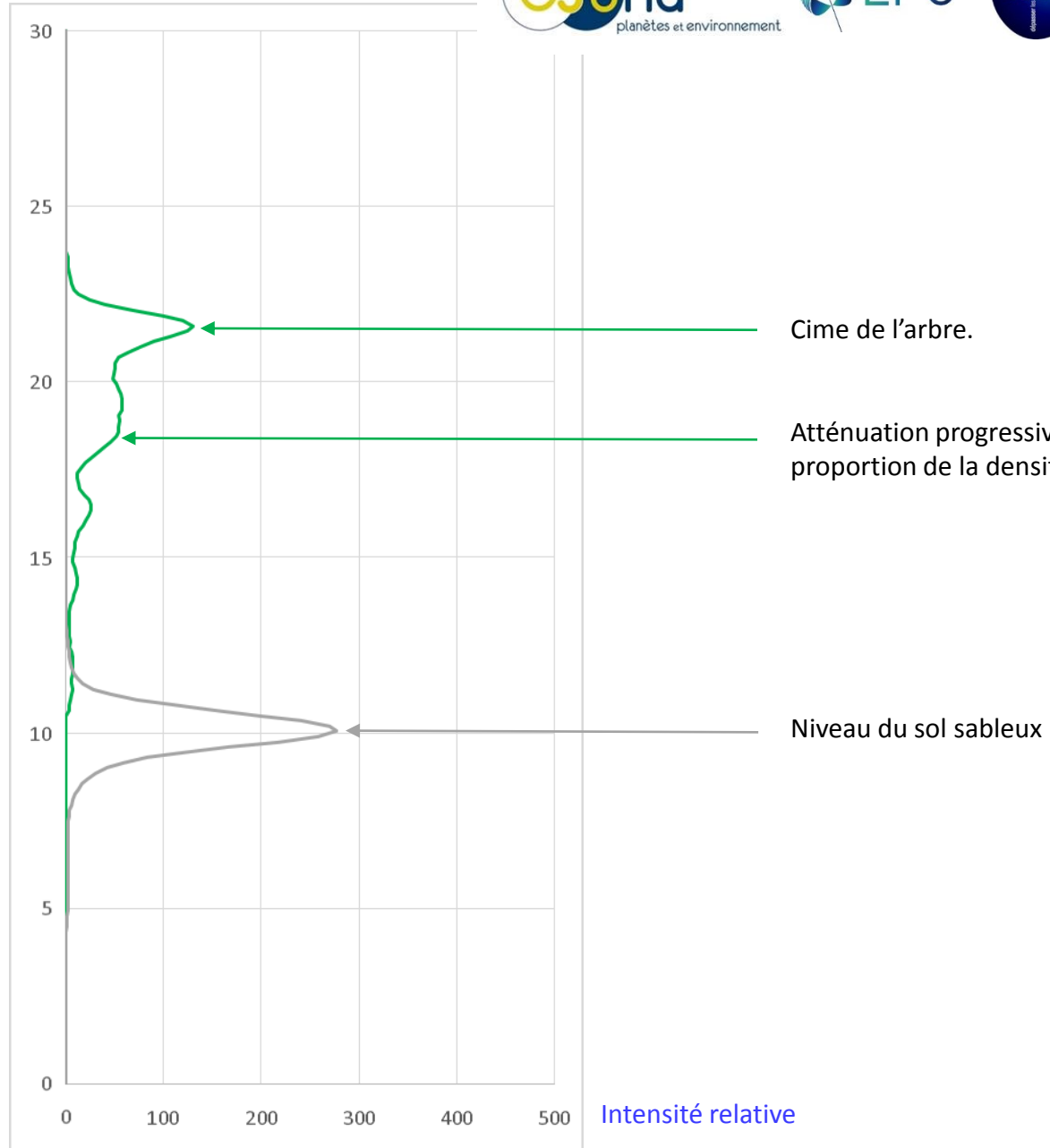
➤ Apport de la forme d'onde complète



Intensité relative

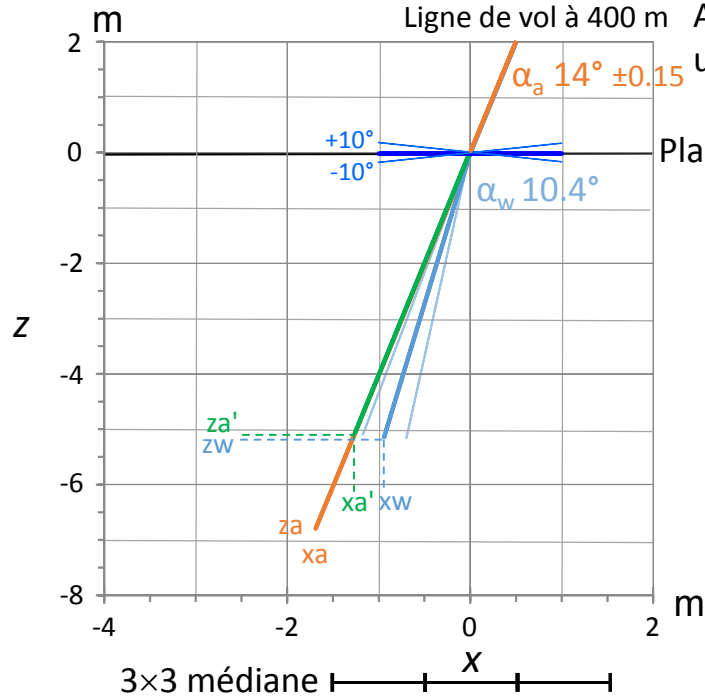
Une impulsion laser est envoyée vers le sol.  
Elle s'allume très vite en 2 nanosecondes et s'éteint plus lentement en 3 nanosecondes.

➤ Apport de la forme d'onde complète



Range air ( $R_a$ ) surface de l'eau  $\pm 10^\circ$  waves

Range eau ( $R_w$ ) avec réfraction dans l'eau ( $R_w$ )



Ligne de vol à 400 m Avion à 400m au dessus du sol et un FOV de  $28^\circ$  donne un FOV de  $0.3^\circ$  par pixel de 1 m

Plan de projection de l'image

( $x_a, z_a$ ) extrémité du faisceau LiDAR ( $R_a$ ) à  $14^\circ$

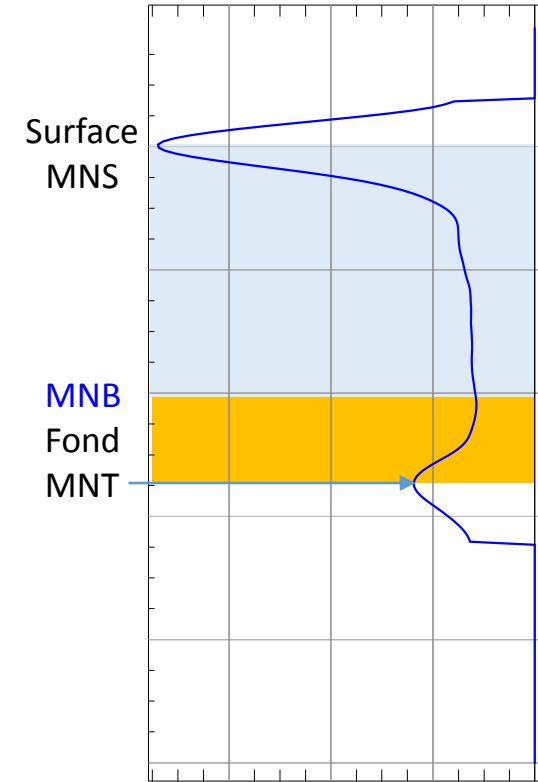
( $x_a', z_a'$ ) idem avec ralentissement en  $1/n_w$

( $x_w, z_w$ ) idem avec réfraction  $\alpha_w = \arcsin(\sin \alpha_a / n_w)$

De  $0^\circ$  à  $14^\circ$  les coordonnées restent dans un même pixel de 1 m la correction bathymétrique se simplifie selon  $R$  en:

$$R_{w_{536nm}} = R_{a_{1064nm}} + \frac{(R_{a_{536nm}} - R_{a_{1064nm}})}{n_w} \times \frac{\cos(\alpha_w)}{\cos(\alpha_a)}$$

Le but de cette simplification est de garder la cohérence des plages d'enregistrement ( $R_a$ ) en évitant leur redistribution d'un pixel à l'autre pour analyser toutes les longueurs d'interaction entre laser et interface pouvant aller de 3 m à 5 m !

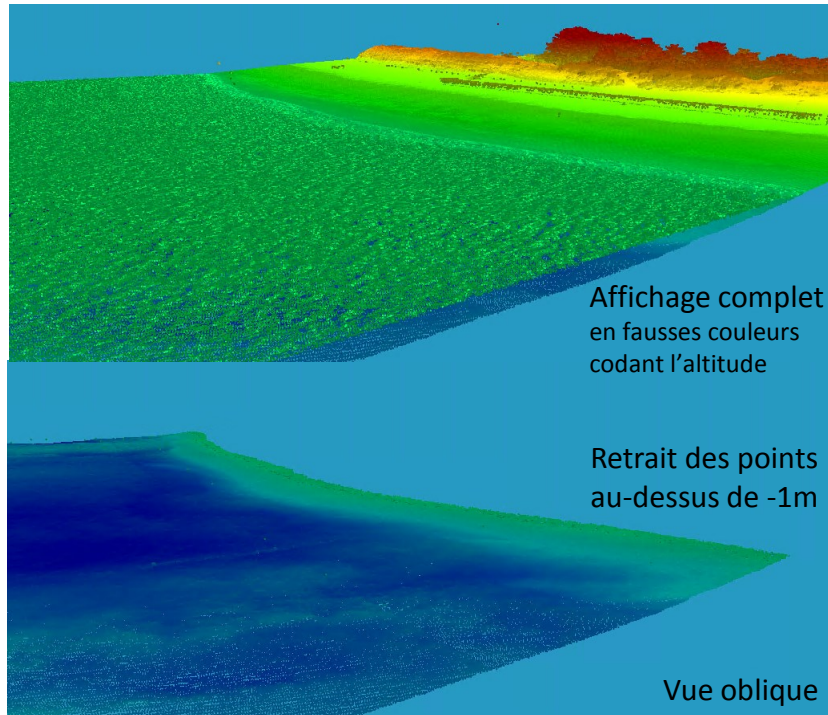


La résolution  $R$  de 0.15 m passe à 0.11 m dans l'eau salée (indice 1.34) ( $1/1.34 = 0.75$ )

## Bathymétrie

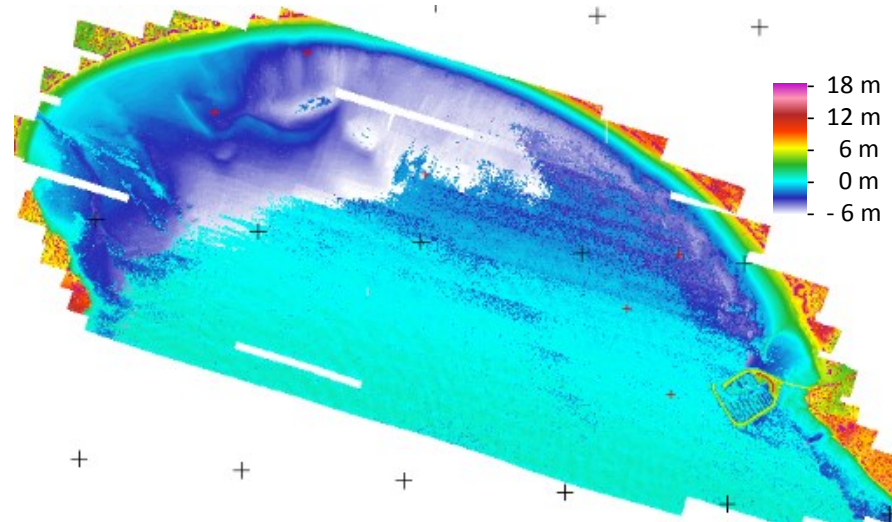
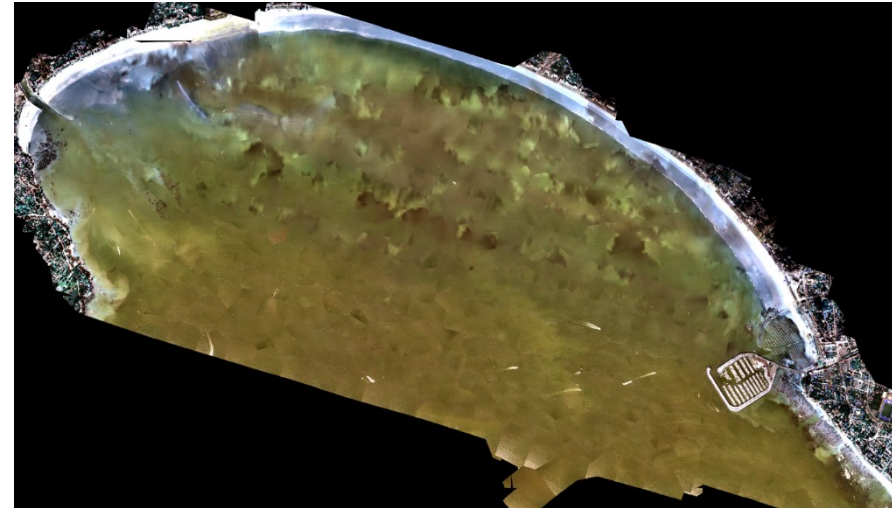
### En mode discret

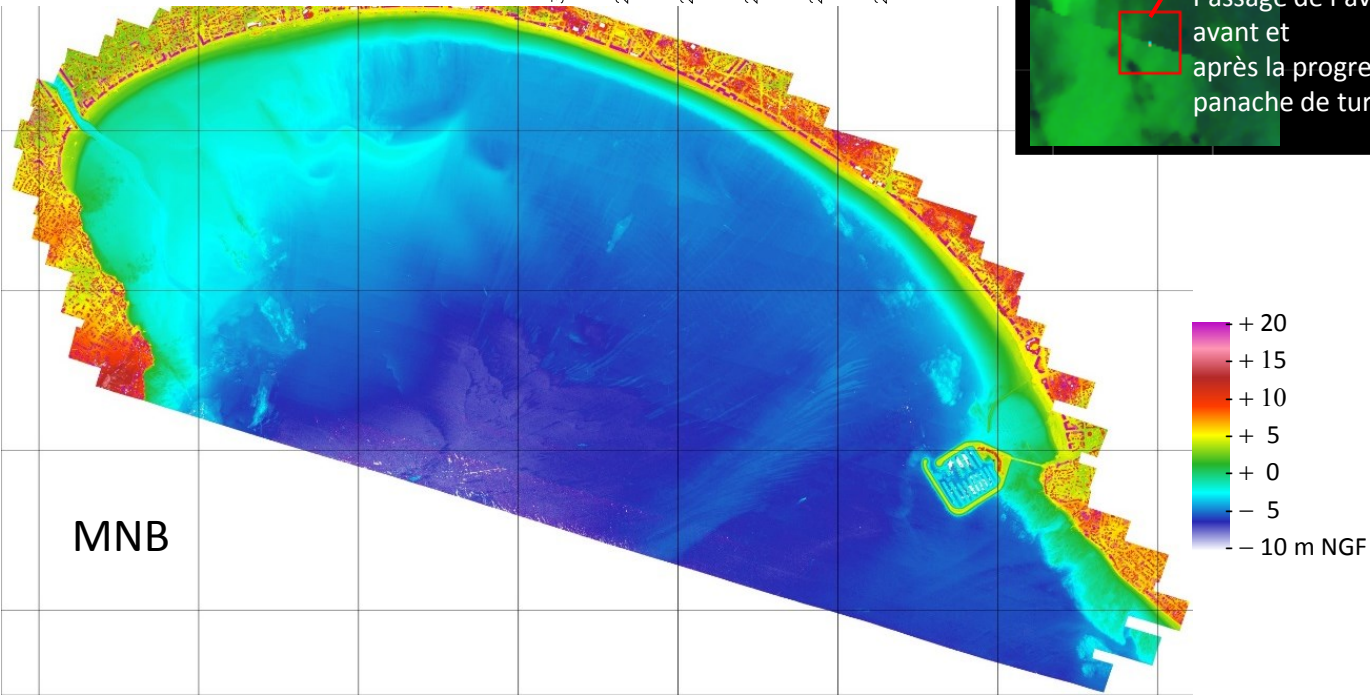
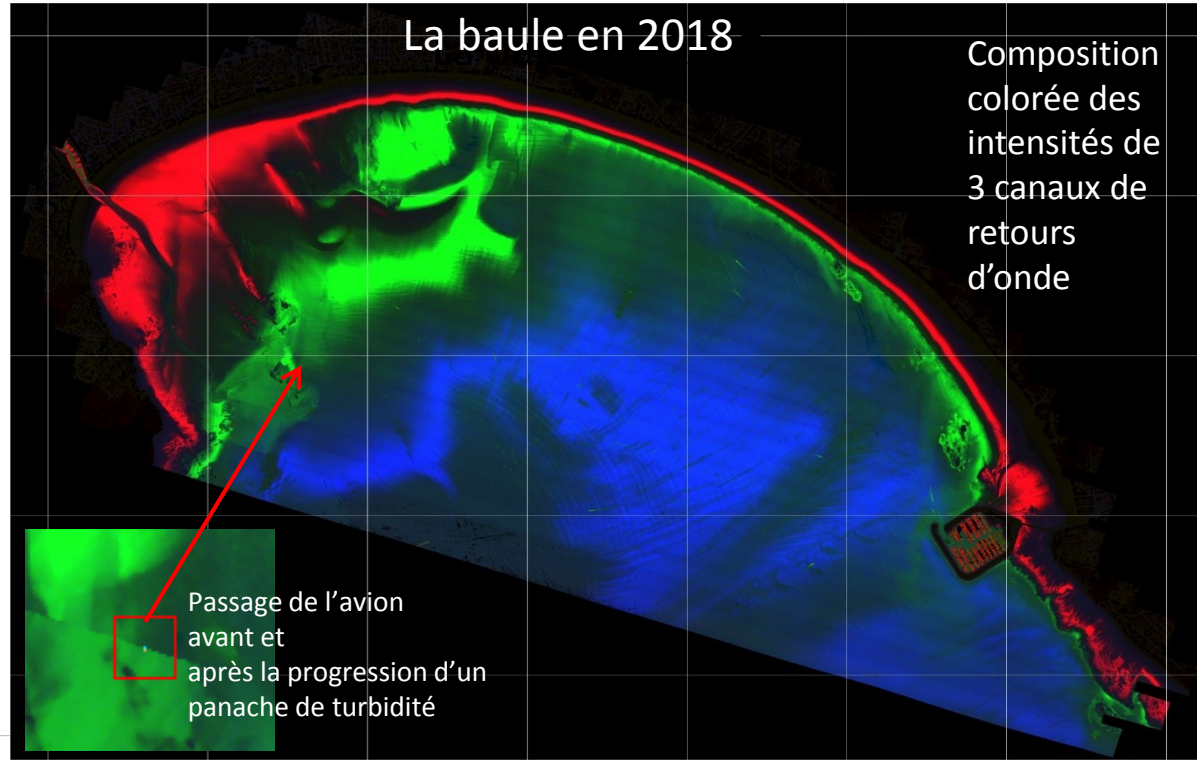
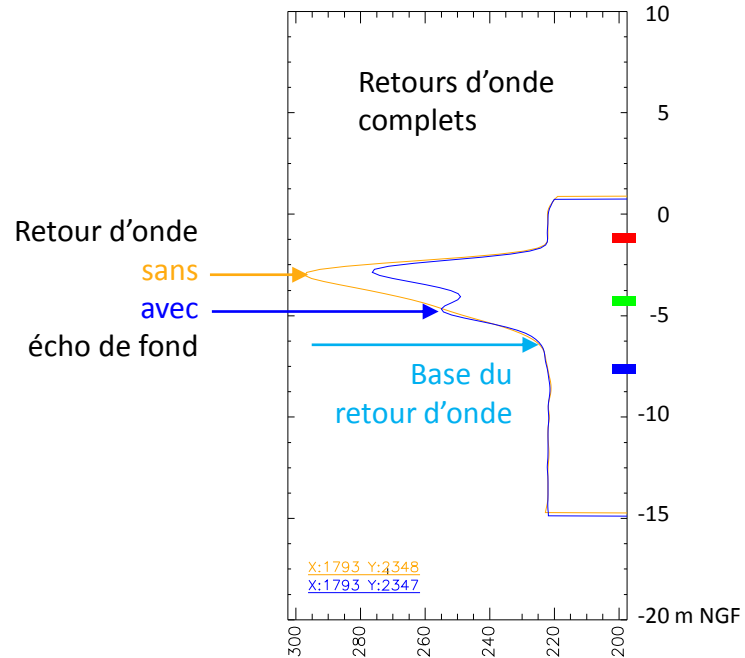
Il faut une eau parfaitement claire pour atteindre le fond



Plage de Luzeronde

## La baule en 2017





### En mode retour d'onde complet

Lorsqu'une turbidité masque l'écho du fond celui-ci peut quand même être détecté indirectement par la recherche de la limite d'atténuation à la base du retour d'onde du laser vert.

La combinaison d'échos et de bases de retours d'onde permet de réaliser un modèle numérique de bathymétrie (MNB) continue qui doit être ensuite corrigé en chaque pixel en proportion de l'indice de l'eau de mer.

La combinaison des retours d'ondes complets verts et infrarouges en une seule fonction permet d'optimiser le calcul de la bathymétrie en atténuant les rebonds de signaux forts et en accentuant le contraste entre air et eau

Mais l'analyse de propriétés dans le vert, l'infrarouge et leur combinaison donne accès à des informations sur la composition des surfaces

Herbaudière

Image 100% LiDAR

Composition colorée **moyenne** et **maximum** des intensités de retours d'ondes (laser vert et infrarouge) et **moyenne** des intensités d'échos discrets (laser vert)

➤ Visualisation rapide de la nature des matériaux rencontrés

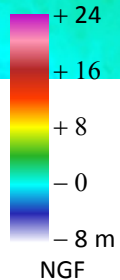
La combinaison des retours d'ondes complets verts et infrarouges en une seule fonction permet d'optimiser le calcul de la bathymétrie en atténuant les rebonds de signaux forts et en accentuant le contraste entre air et eau

profil

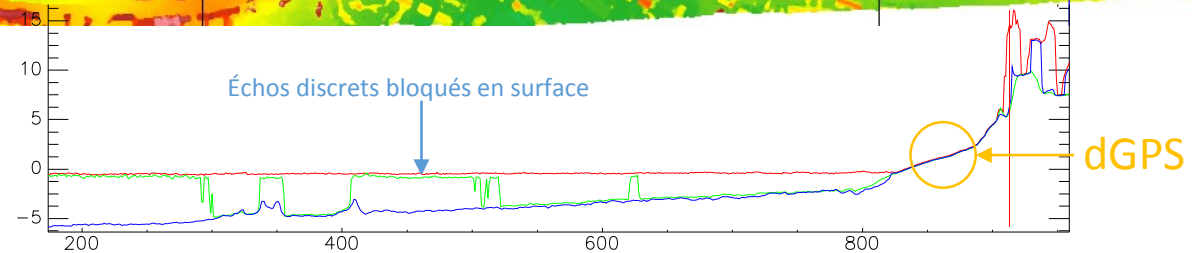
## Modèle Numérique de bathymétrie MNB

Herbaudière

La précision contrôlée par dGPS au sol de M. Juigner est de 5 cm au sol et ~15 cm en eau modérément turbide



MNS laser infrarouge  
MNT laser vert  
MNB des fonds marins et forestiers

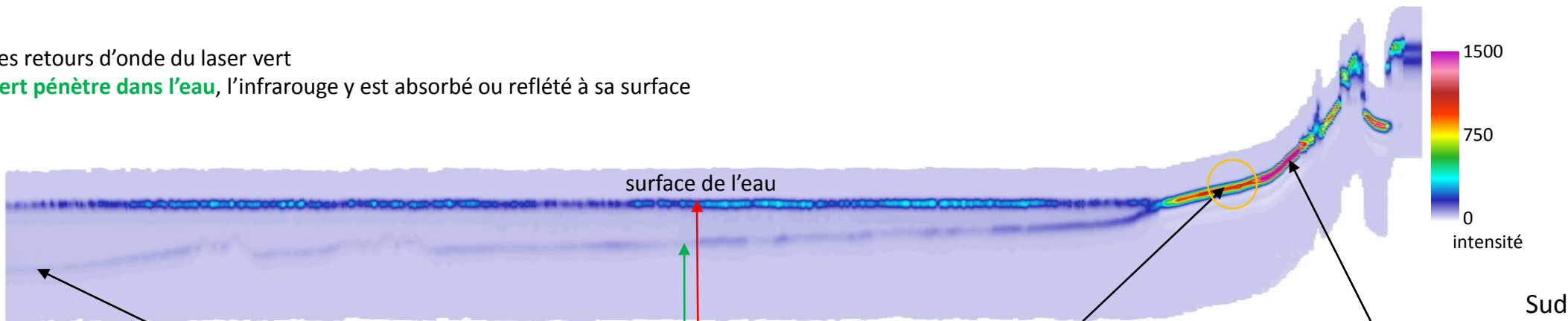


Coupe des retours d'onde du laser vert

Seul le vert pénètre dans l'eau, l'infrarouge y est absorbé ou reflété à sa surface

(profondeurs brutes avant correction bathymétrique)

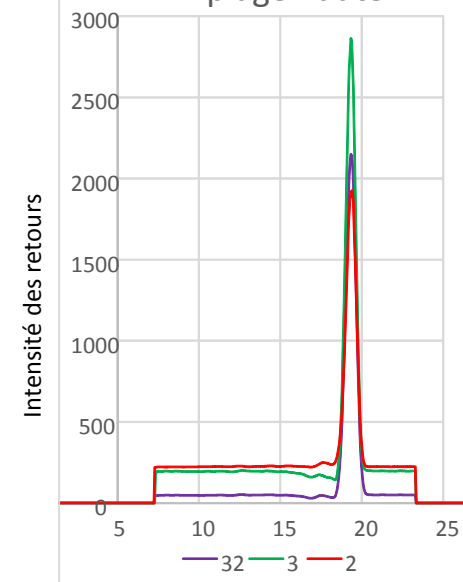
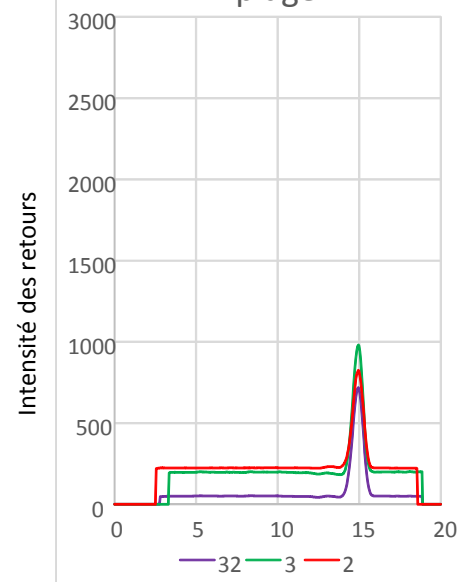
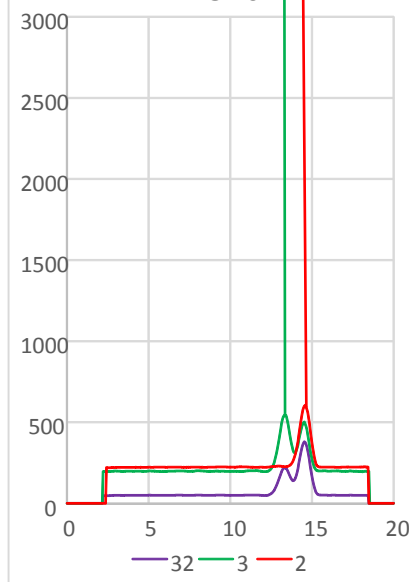
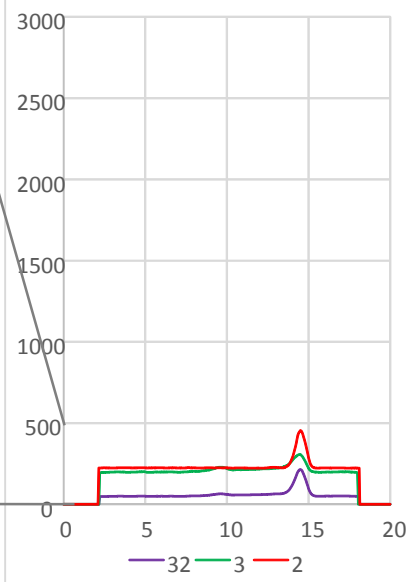
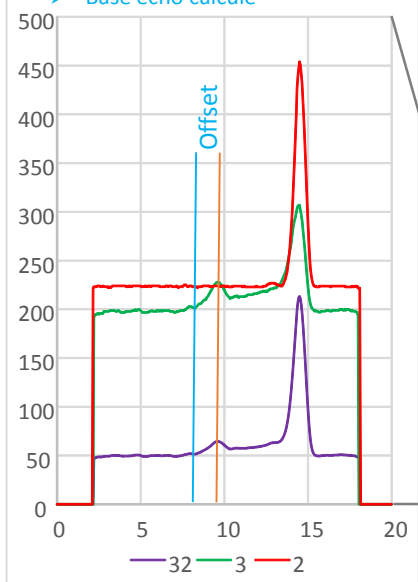
Nord



Pas d'écho discret au fond de l'eau

- Pic écho faible sur retour d'onde
- Base écho calculé

Intensité des retours



Altitude NGF + 15m

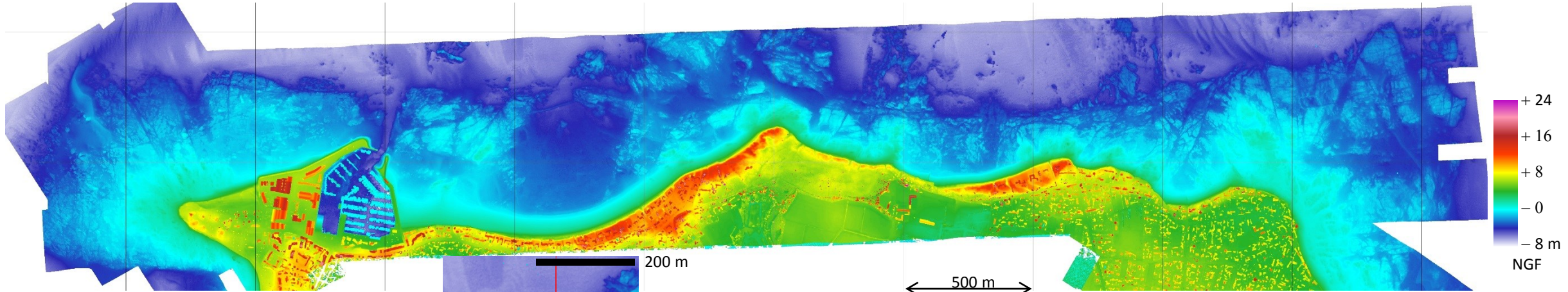
Recherche d'échos faibles non détectables par un LiDAR classique

Echos de fond détectables par LiDAR classique

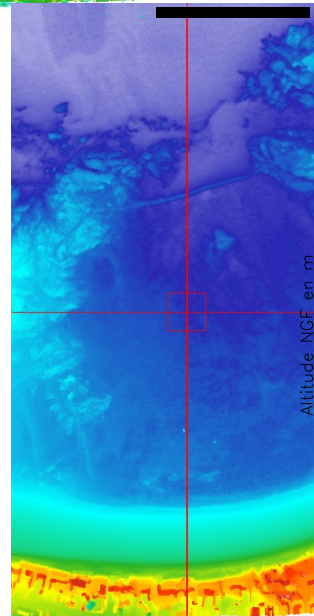
C32 combinaison du laser vert 532 nm C3 et du laser infrarouge 1064 nm C2



## MNB des fonds marins et forestiers

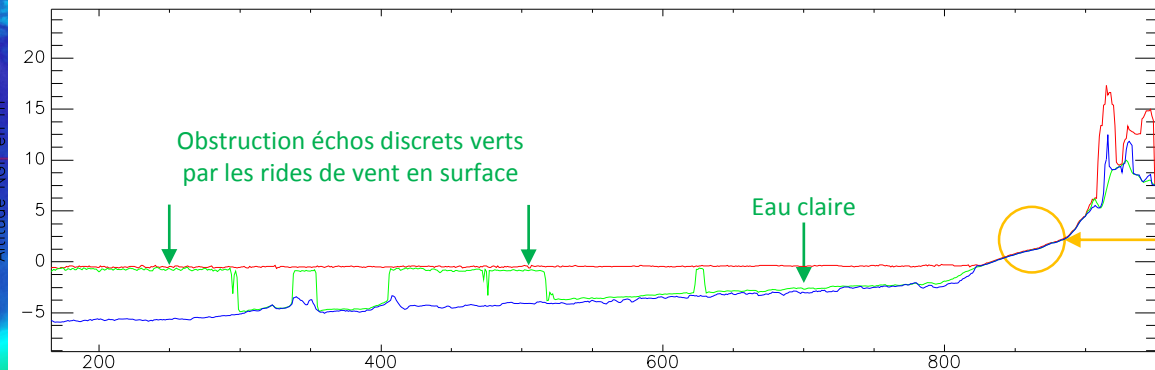


- **Modèle Numérique de Bathymétrie (vert)** sans interpolation ni classification étendu aux sols forestiers à terre
- **Modèle Numérique de Terrain (vert)** avec interpolation du sol sous les bâtiments et les arbres identifiés par classification
- **Modèle Numérique de Surface (infrarouge)** sans classification



Coupe

Coupe des MNS IR, MNT V et MNB V



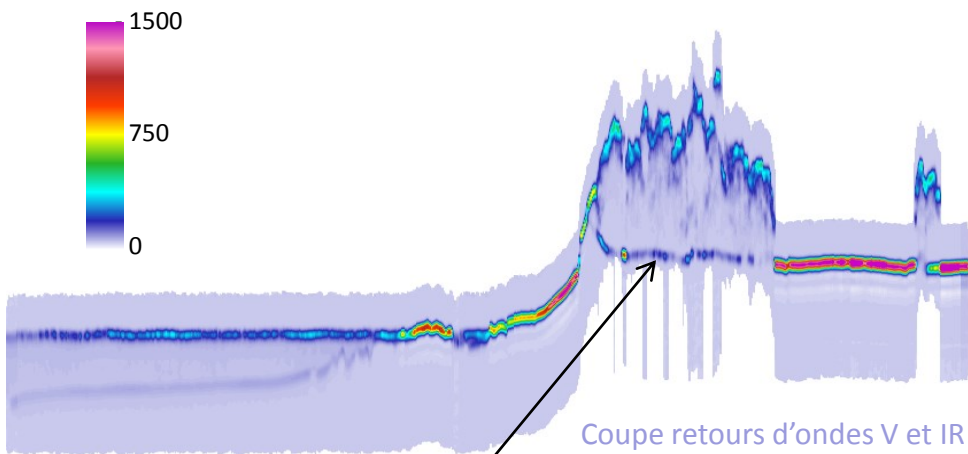
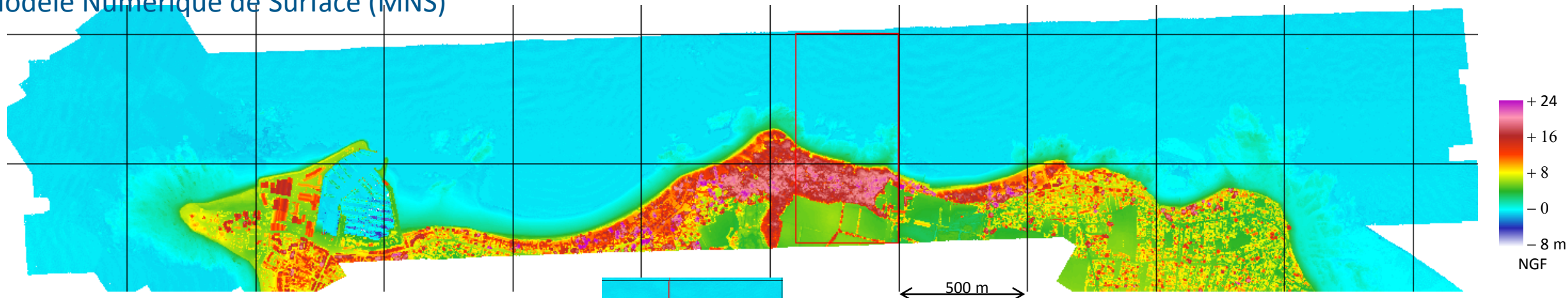
MNT et MNB avec profondeurs bathymétriques corrigées

Compensation du décalage entre base et pic de la bathymétrie avec contrôle dGPS par son extension topographique

➤ Calage sur les mêmes dGPS de contrôle

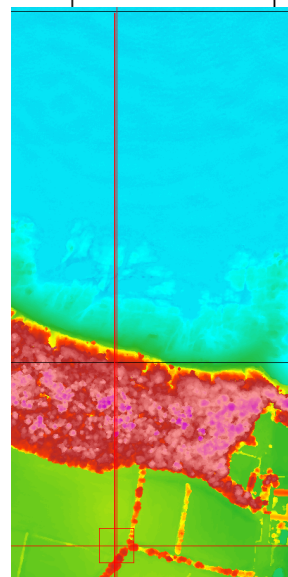
La continuité terre-mer des terrains est suivie quelle que soit la marée par MNB vert complété par l'infrarouge à la surface de l'eau et sous les arbres.

## Modèle Numérique de Surface (MNS)



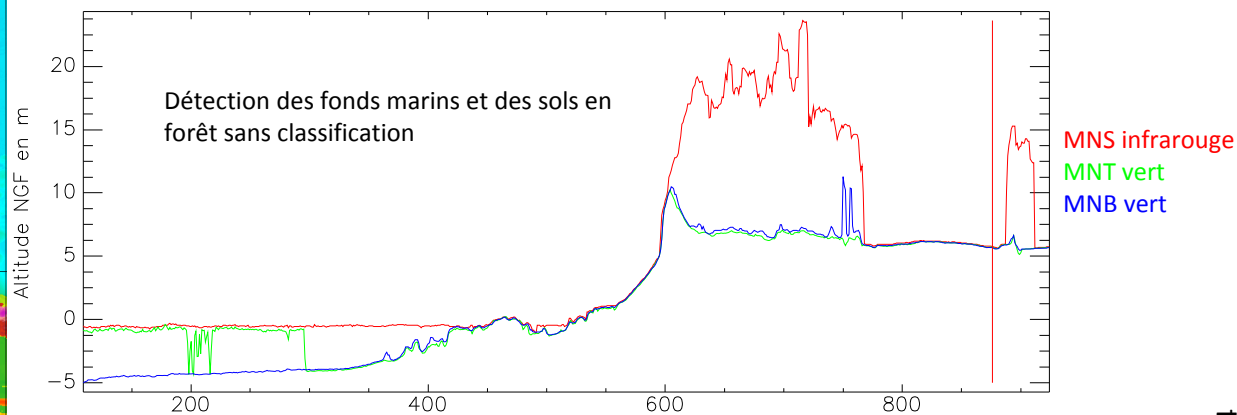
Coupe retours d'ondes V et IR

Détection des échos faibles des sols forestiers sans interpolation pour la préservation de la géométrie fine de la topographie y compris des ouvrages cachés en limite de végétation.



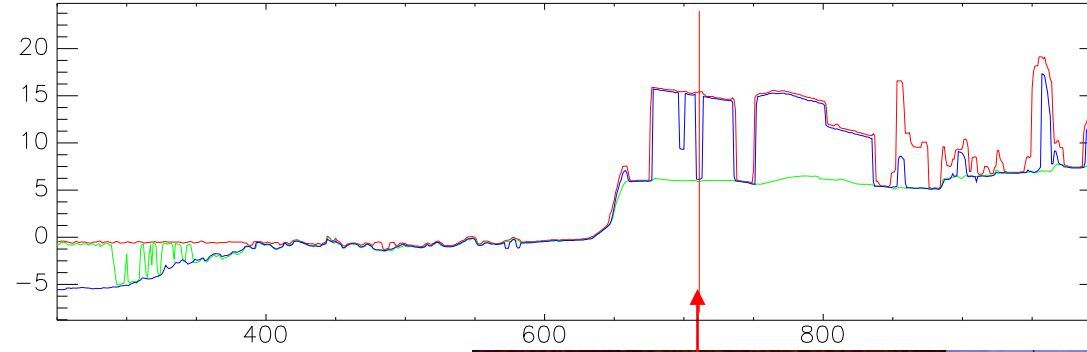
Coupe

Coupe des MNS IR, MNT V et MNB V



MNT et MNB avec profondeurs bathymétriques corrigées

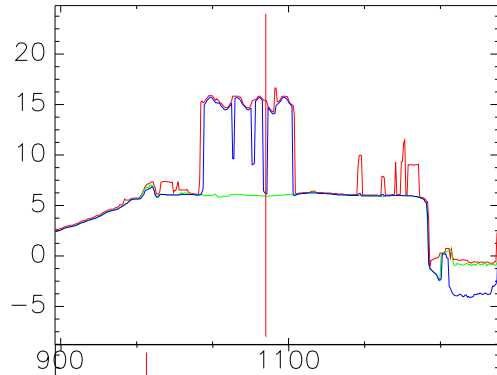
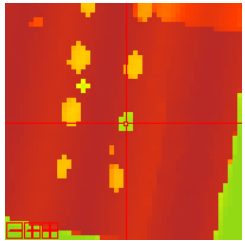
Avantages d'une analyse pixel par pixel:  
bénéficier du plus petit interstice de clarté de l'eau ou d'une canopée pour atteindre le fond de l'eau ou d'une forêt



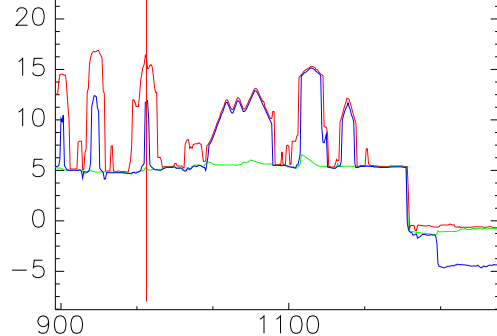
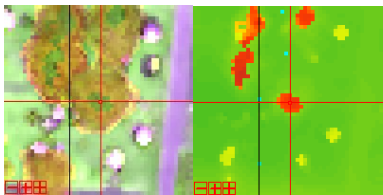
MNS infrarouge Rayon à  $\pm 10^\circ$  de la verticale (nadir)  
MNT vert Avec décalage de  $5^\circ$  entre vert et infrarouge  
MNB vert

MNT et MNB avec profondeurs bathymétriques corrigées

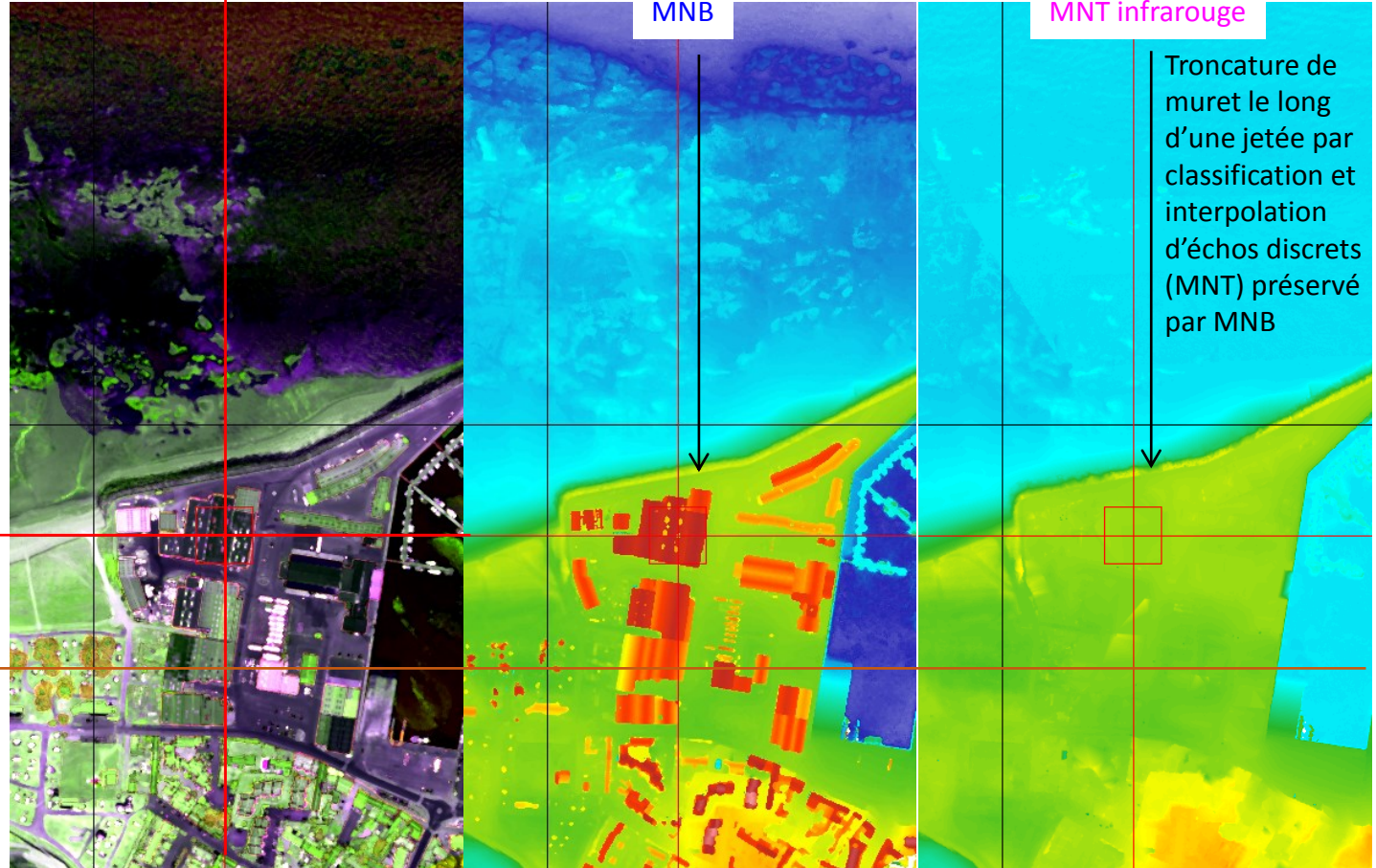
Détection du sol à travers une vitre de toiture par recherche d'échos faibles du laser vert (MNB) alors que le signal infrarouge est bloqué (MNS) ou par MNT



Détection de troncs d'arbres



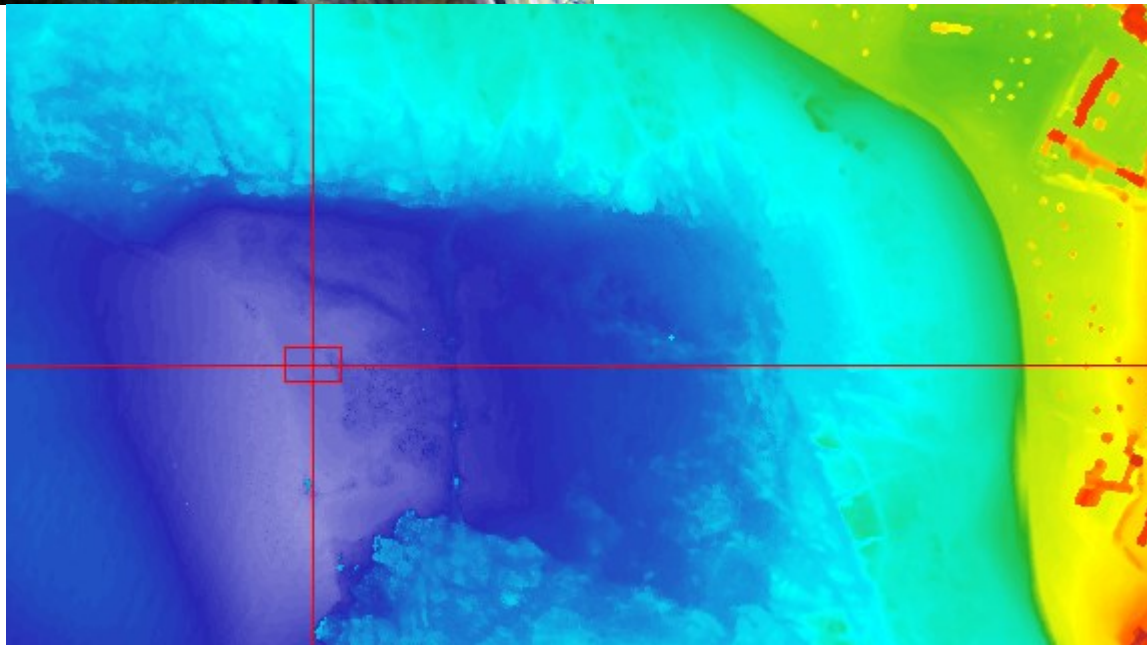
Somme V+IR  
Somme IR  
Somme V



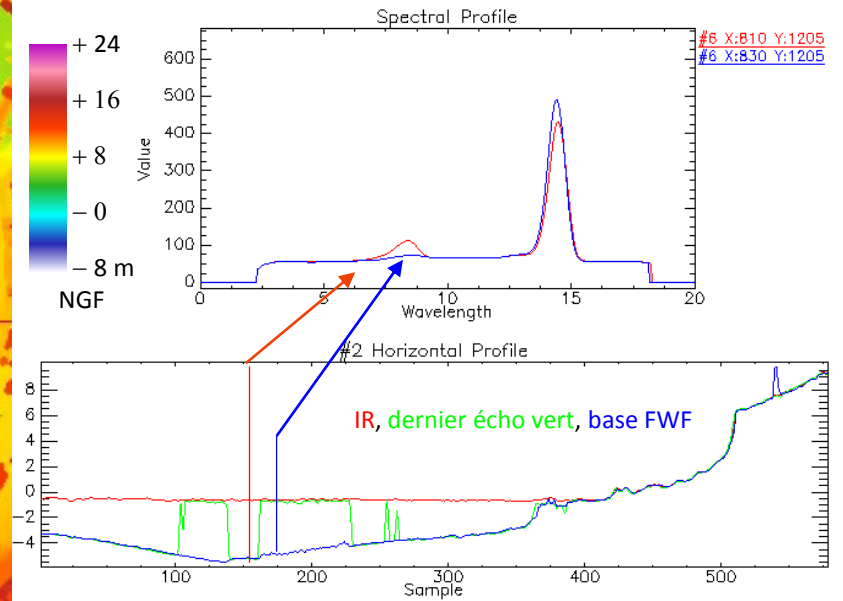
Troncature de muret le long d'une jetée par classification et interpolation d'échos discrets (MNT) préservé par MNB



Herbaudière

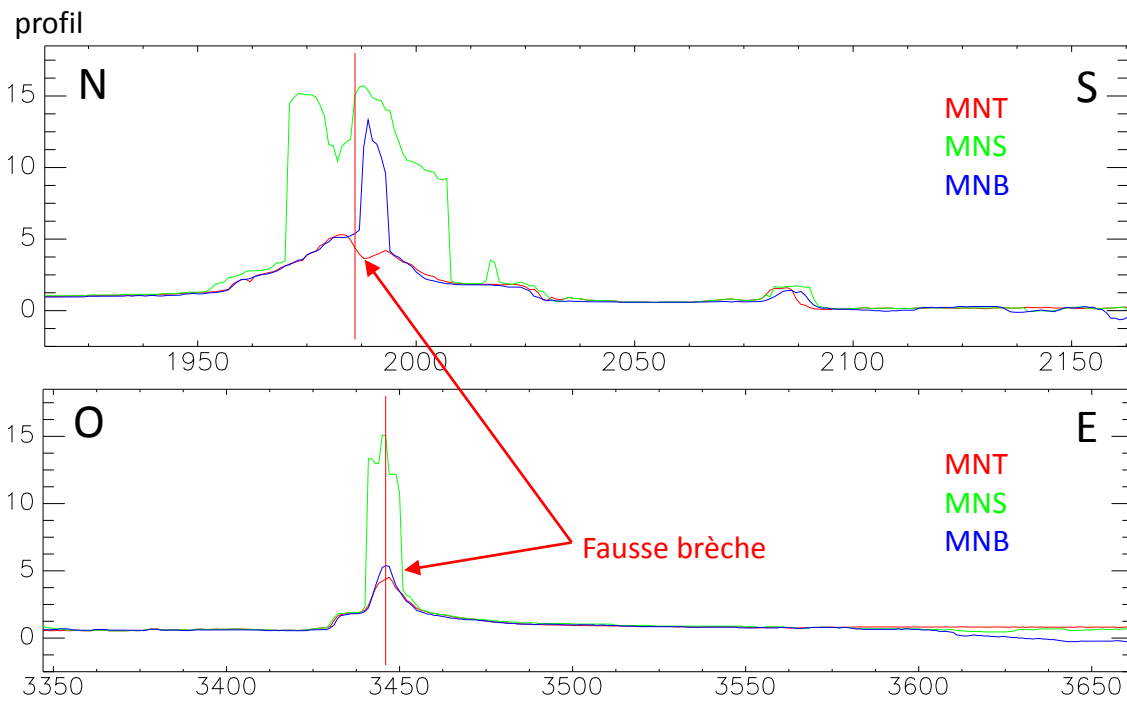
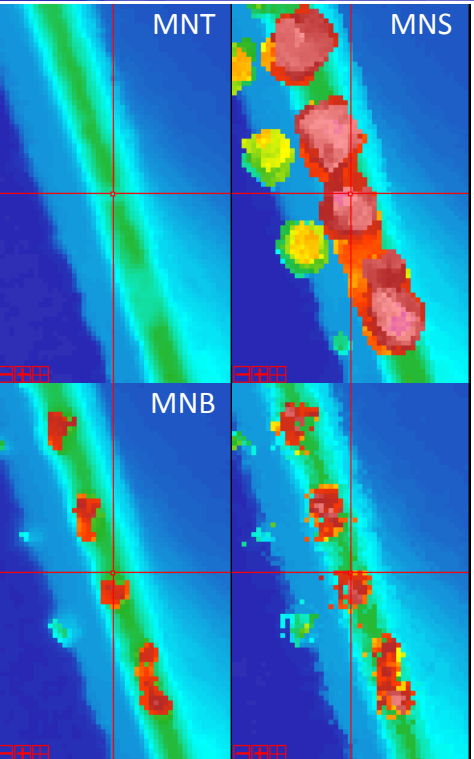
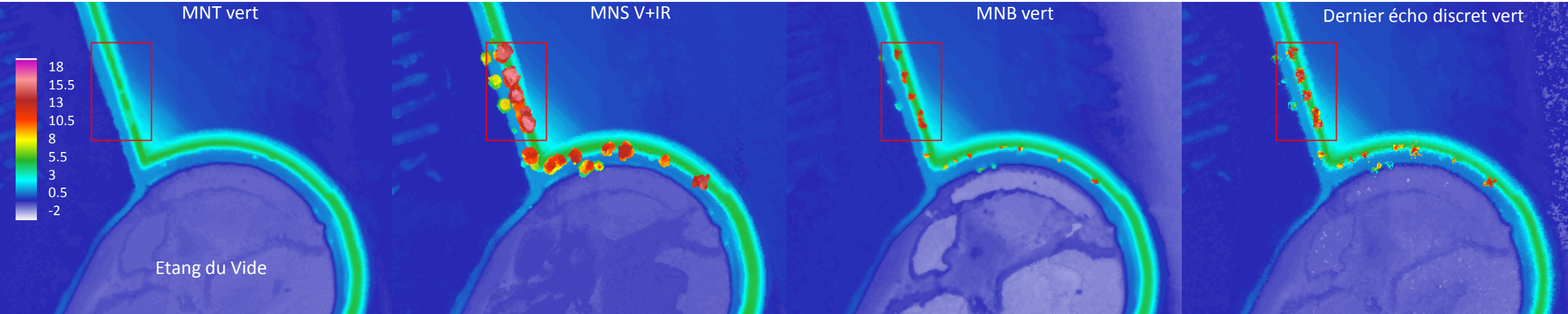


Perte d'écho sur fond  
sombre compensée  
par recherche de la  
base du signal de  
retour d'onde



# Principe de fonctionnement du LiDAR

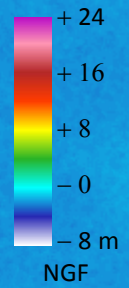
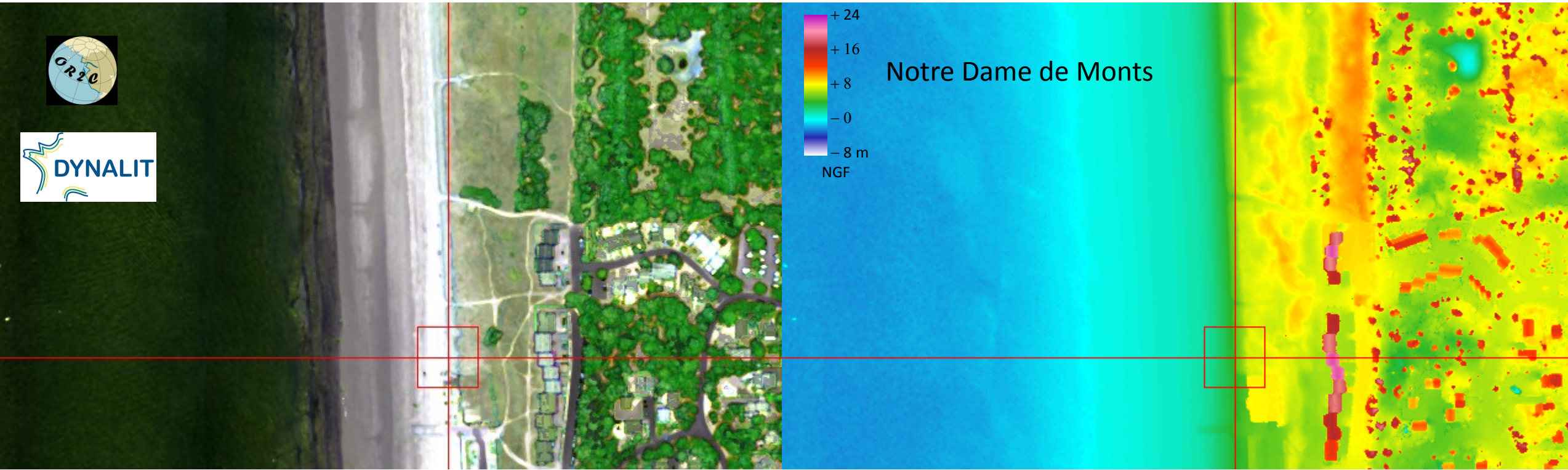
Exemple du Polder de Sébastopol à Barbâtre



**En mode discret**, les MNT ont tendance à tronquer les digues sous les arbres dont la base est confondue avec leurs troncs et un MNS est toujours fourni en même temps pour mettre en garde les utilisateurs.

**En mode retour d'onde complet** les troncs des arbres peuvent être différenciés du feuillage ce qui permet de mieux respecter les profils de digues. Mais les troncs sont intégrés aux profils.

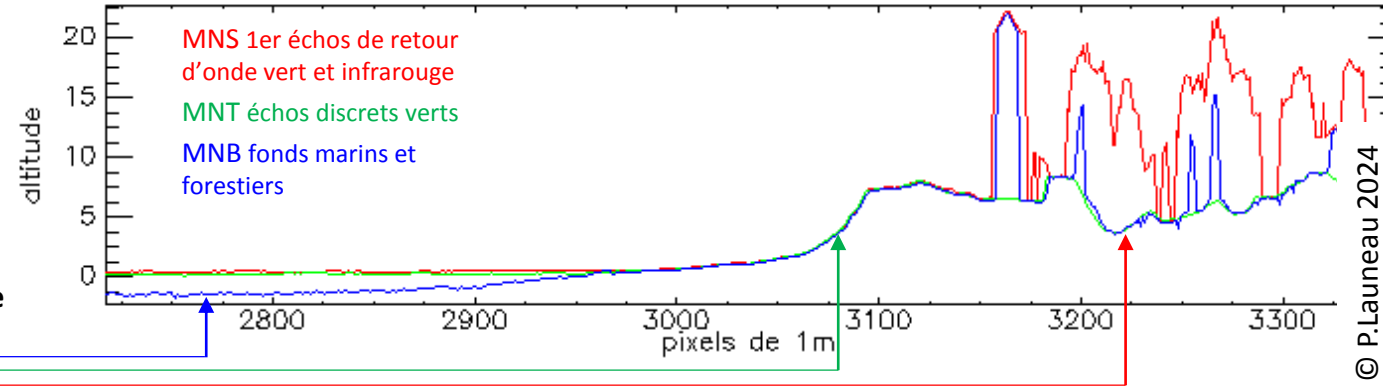
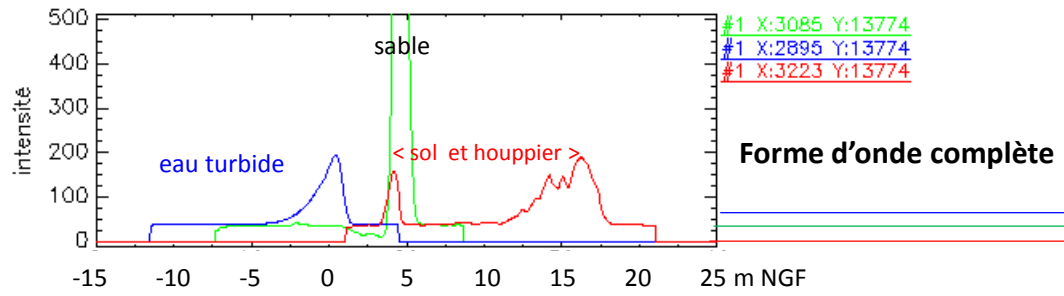
< en mode discret il est aussi possible d'aller chercher de dernier écho sans interpolation de surface.



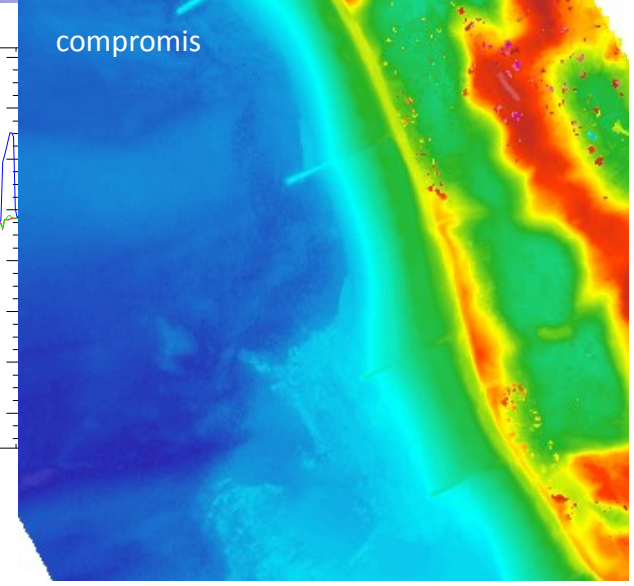
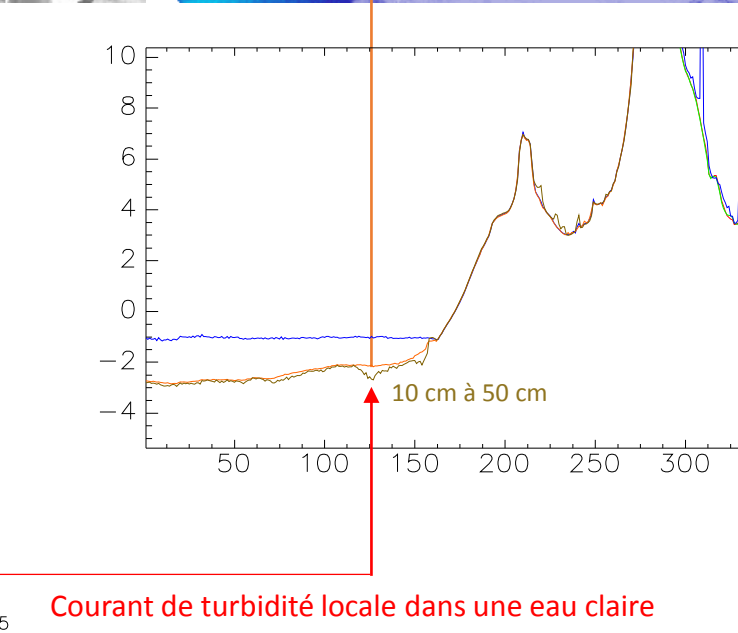
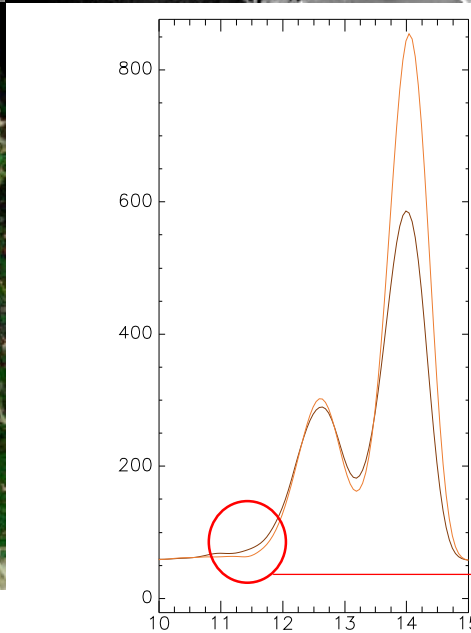
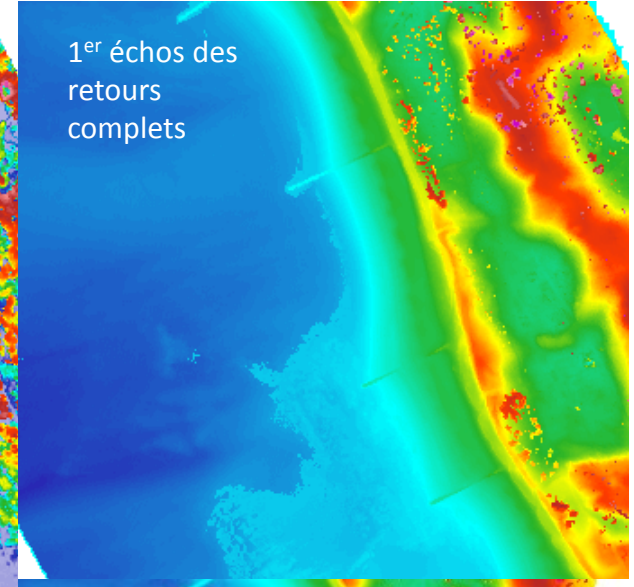
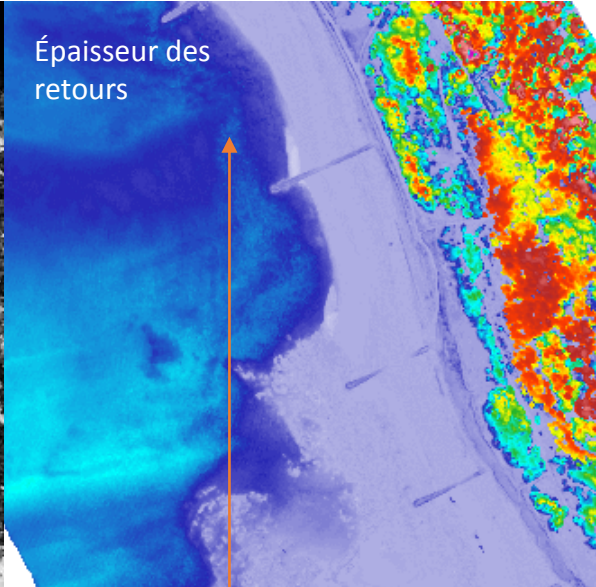
Notre Dame de Monts

Composition colorée: **moyenne et maximum** des **intensités de retours d'ondes** (laser vert et infrarouge) et **moyenne** des **intensités d'échos discrets** (laser vert)

➤ Visualisation rapide de la nature des matériaux rencontrés



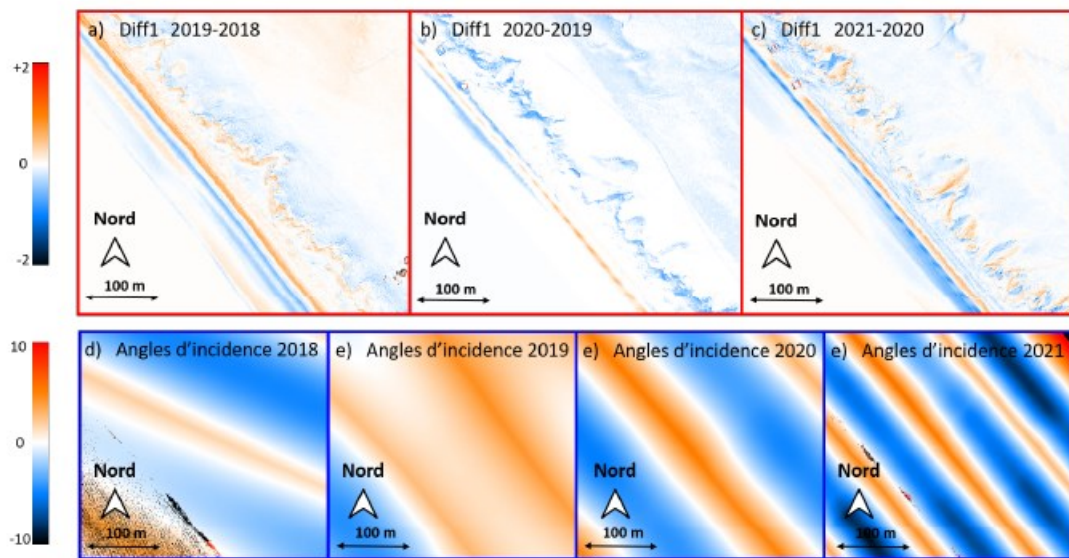
## Quelques nécessités de compromis de traitements



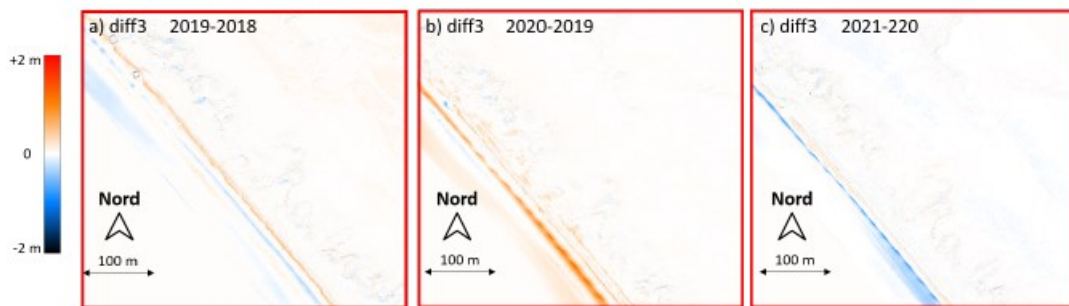
Courant de turbidité locale dans une eau claire

## Pixellisation des données

Exemple de la Tresson à la Guérinière

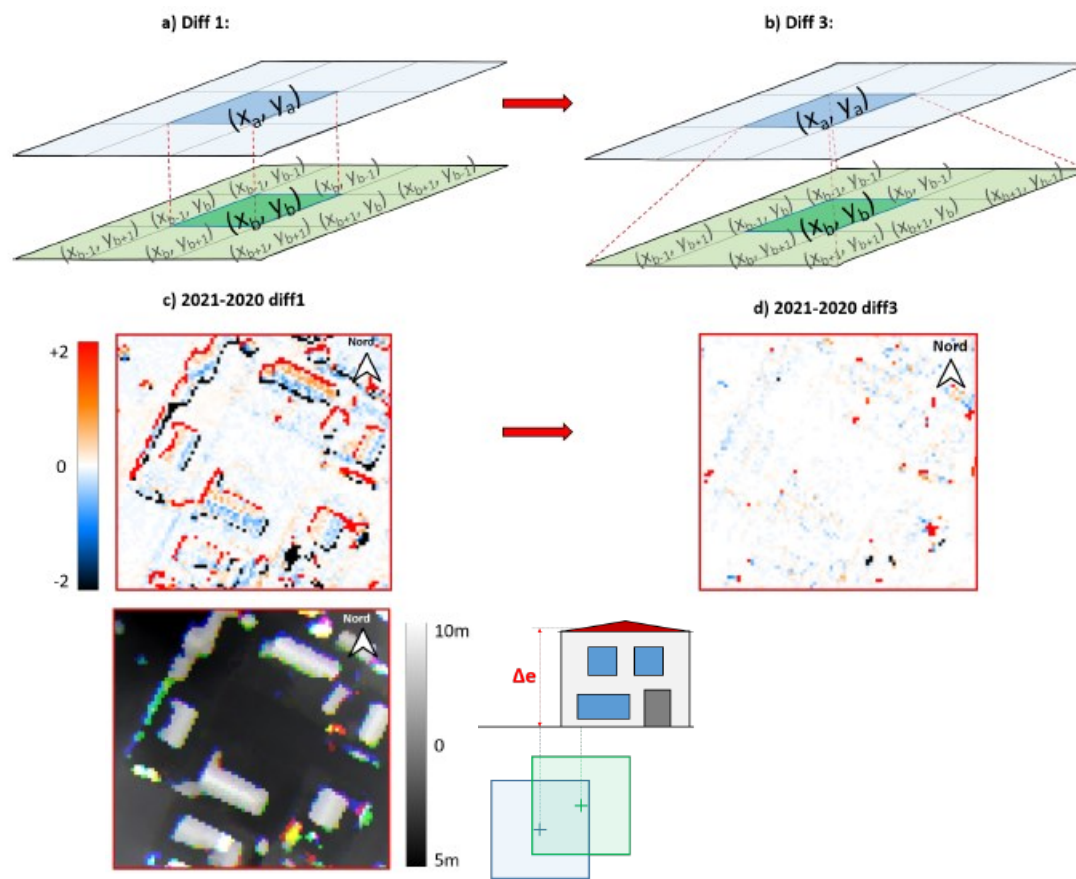


La détection des changements doit se faire dans un voisinage de 3x3 pixels



## Superposition des pixels

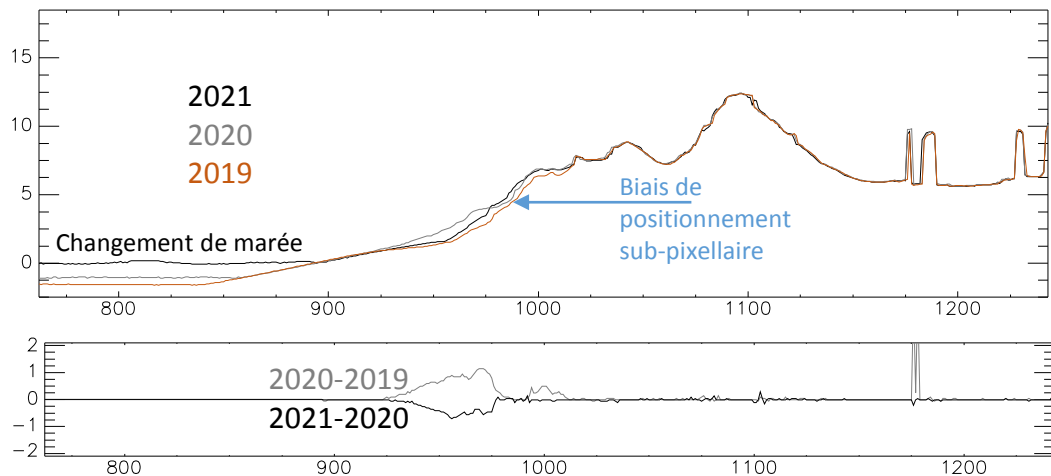
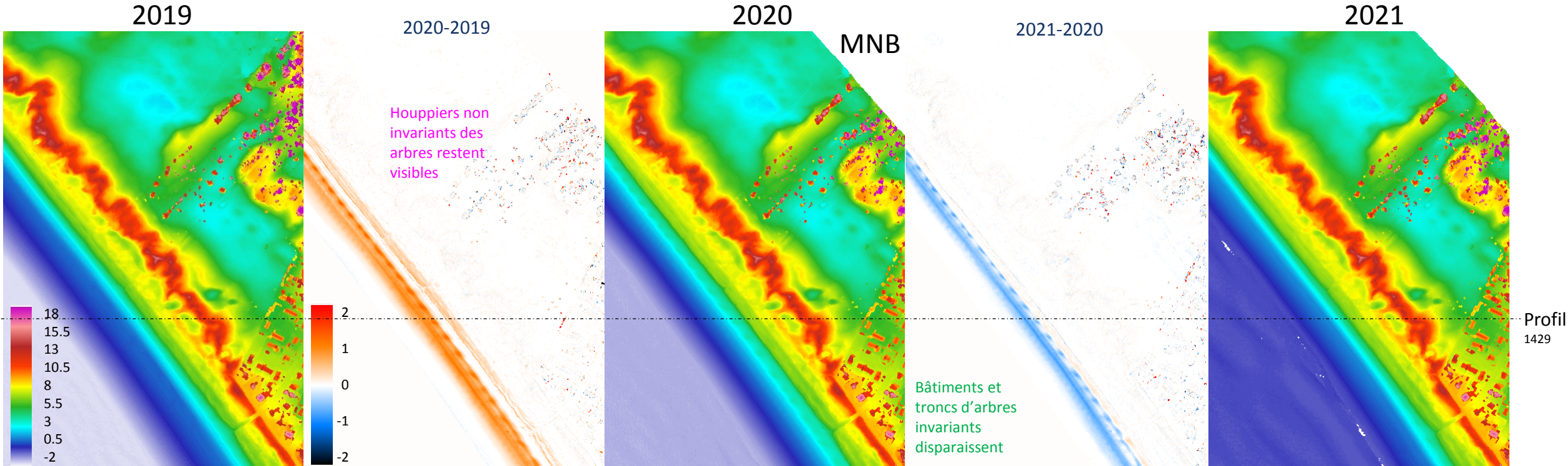
La localisation des quatre coins des pixels au centimètre près n'est pas possible à partir d'avions volant à 240 km/h (15 millisecondes par pixel de 1 m).  
 A 600 m d'altitude l'espacement entre les lignes de balayage du laser va de 48 à 88 cm et seule une taille de 1 m par pixel permet de s'affranchir du bruit.





Suivie topographique depuis 2017

Exemple de la Tresson à la Guérinière



## Détection, de changement par MNS ou MNB infrarouge

Le changement d'une date à l'autre fait disparaître les bâtiments mais n'efface pas tous les arbres dont la géométrie change avec leur croissance.

En dehors de cet effet naturel la détection de l'évolution des profils de plages est très précise. Dans cet exemple la croissance de la plage entre 2019 et 2020 est perdue en bas de plage par érosion entre 2020 et 2021.

Saint Marc sur Mer

L'analyse de propriétés dans le vert, l'infrarouge et leur combinaison donne accès à des informations sur la composition des surfaces



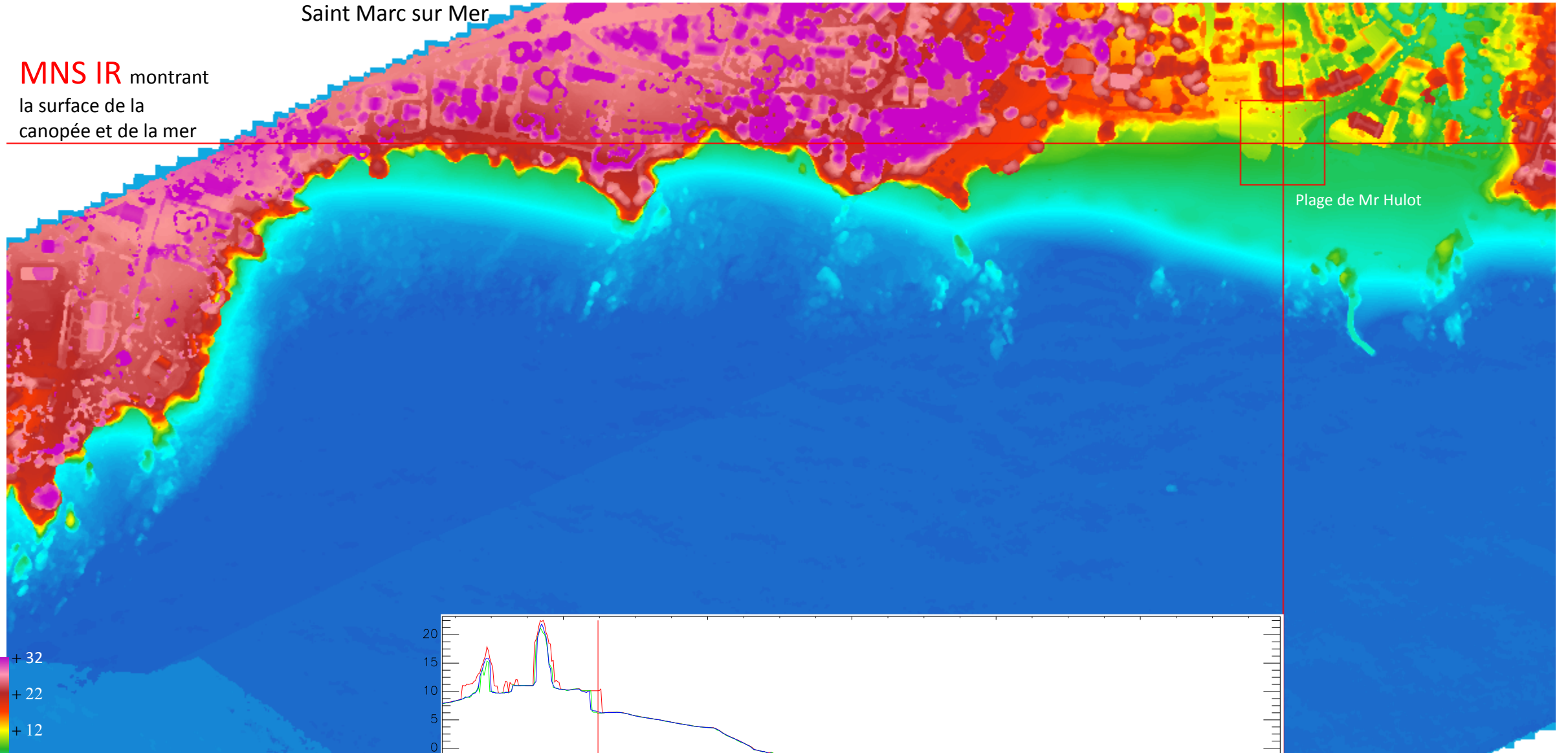
Turbidité variable de 30 à 100 g /m3

Composition colorée: **moyenne** et **maximum** des intensités de retours d'ondes (laser vert et infrarouge) et **moyenne** des intensités d'échos discrets (laser vert)

➤ Visualisation rapide de la nature des matériaux rencontrés

Saint Marc sur Mer

**MNS IR** montrant  
la surface de la  
canopée et de la mer

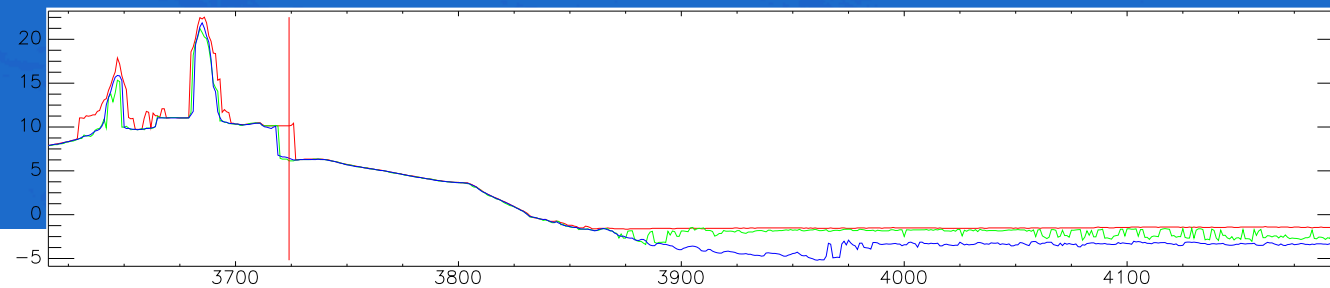


+ 32  
+ 22  
+ 12  
- 2  
- 8 m  
NGF

**MNS laser infrarouge**

**MNT laser vert**

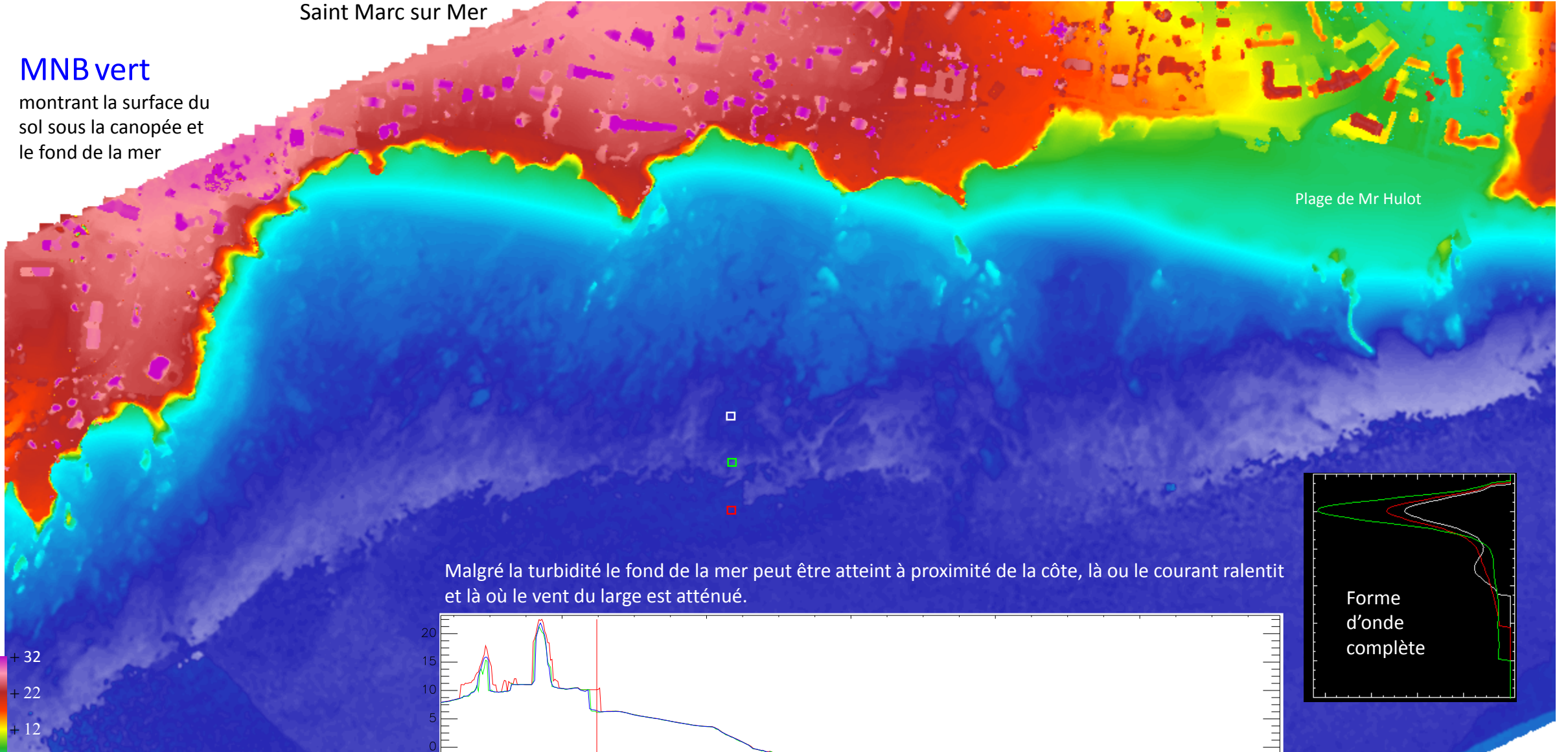
**MNB des fonds marins et forestiers**



Saint Marc sur Mer

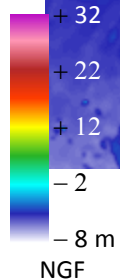
## MNB vert

montrant la surface du sol sous la canopée et le fond de la mer



Plage de Mr Hulot

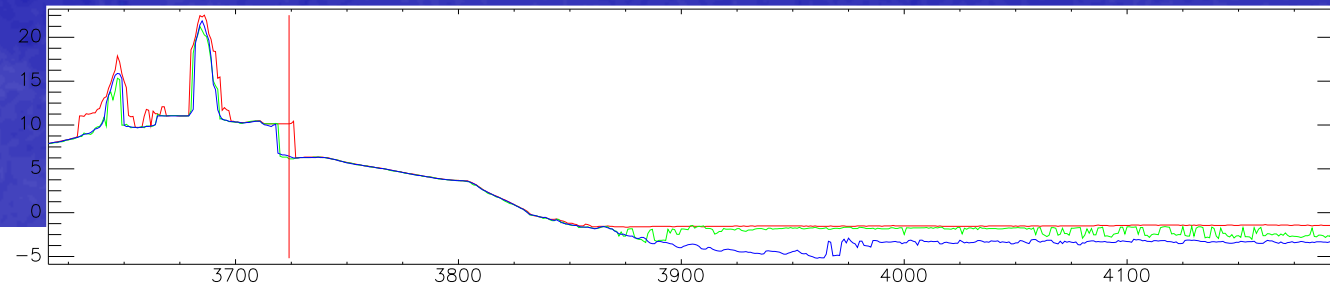
Malgré la turbidité le fond de la mer peut être atteint à proximité de la côte, là où le courant ralentit et là où le vent du large est atténué.



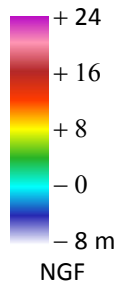
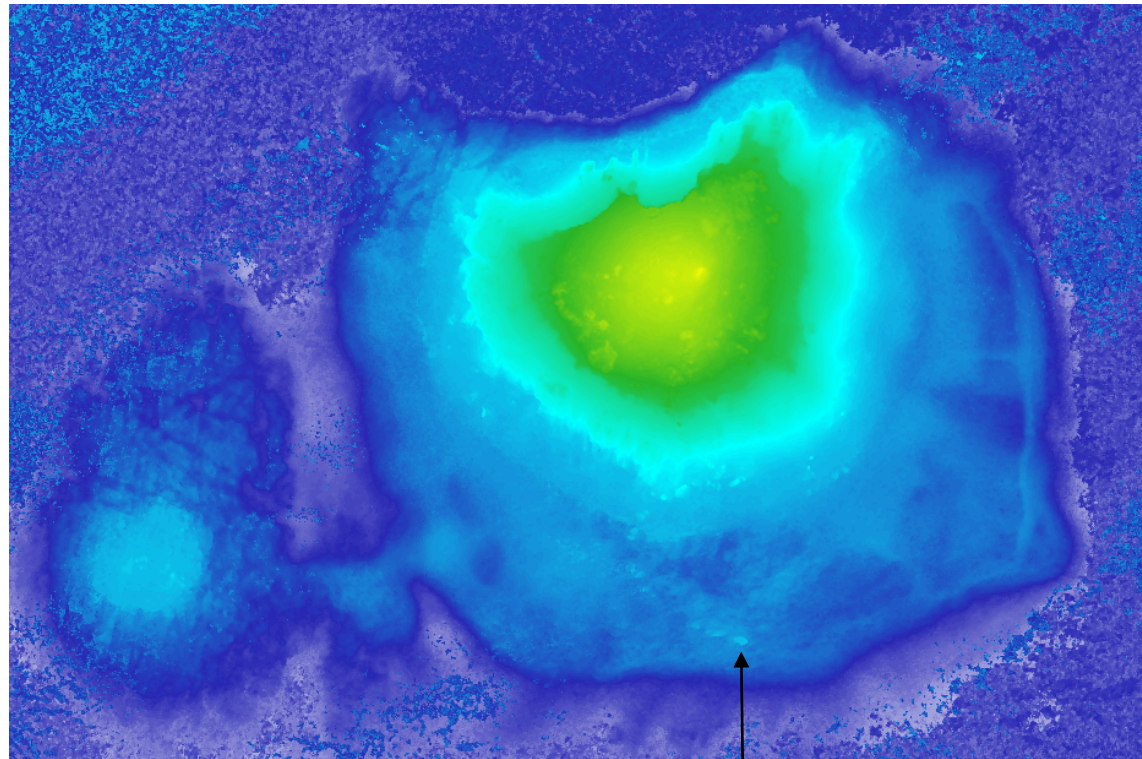
MNS laser infrarouge

MNT laser vert

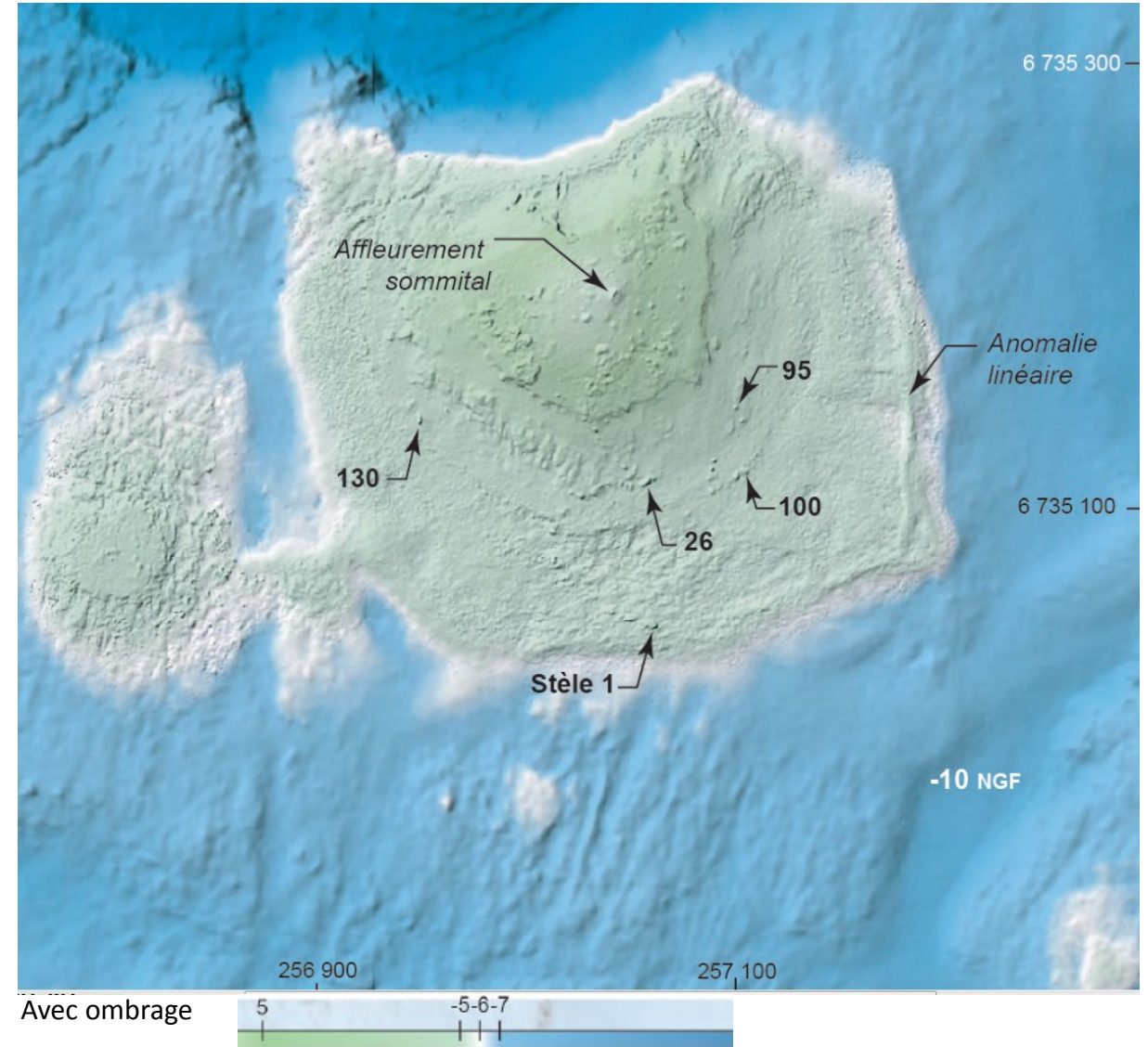
MNB des fonds marins et forestiers



## Exemple d'application archéologique à Er Lannic par Serge Cassen



Stèle n° 1 détectée par LiDAR Titan le 11/04/2020



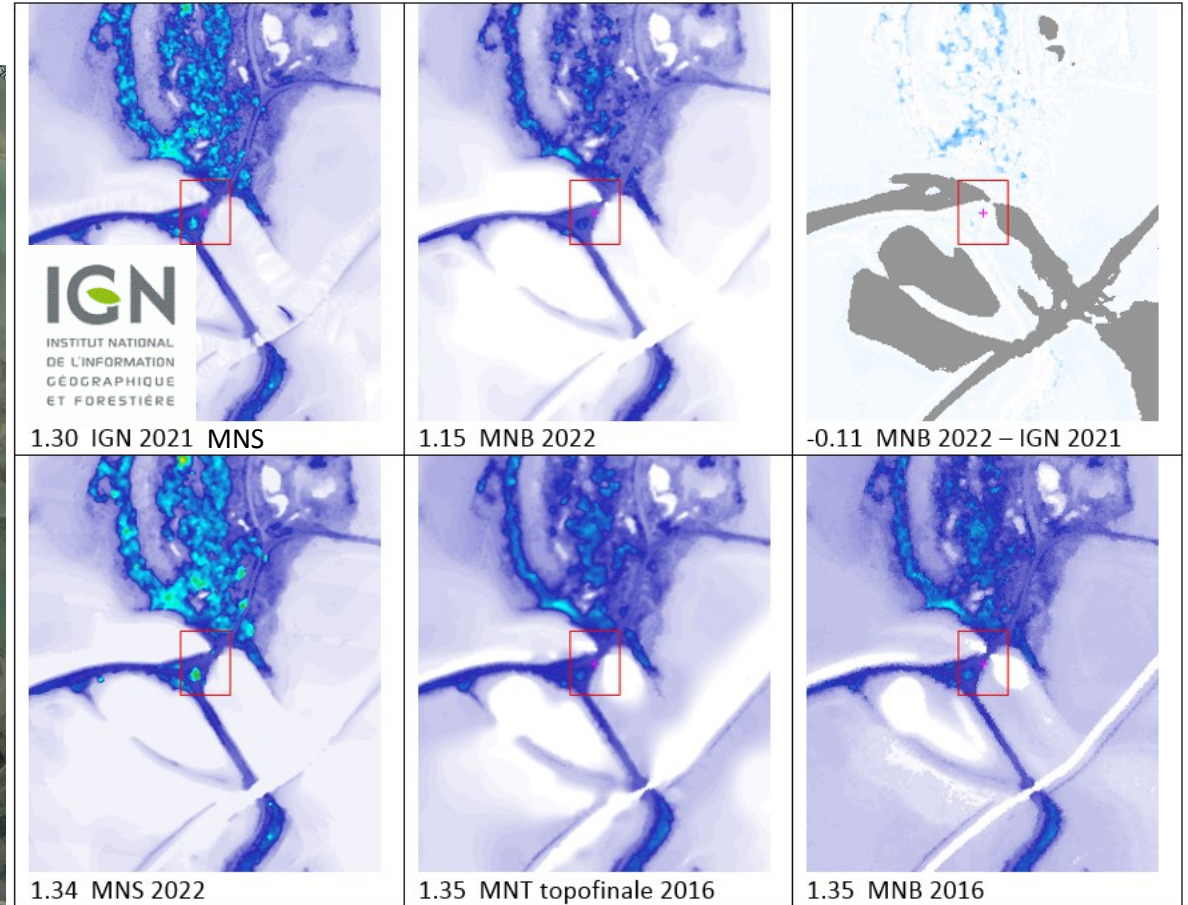
Cas d'une lagune en Camargue



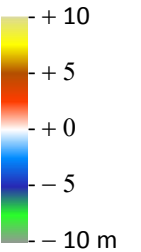
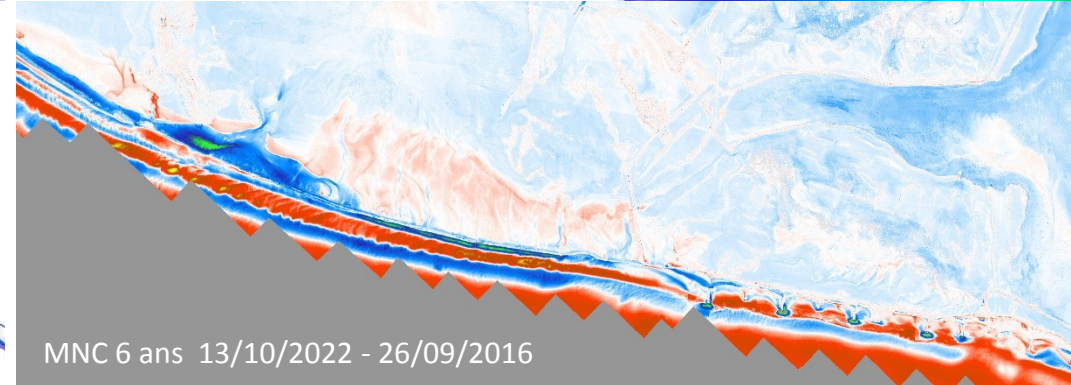
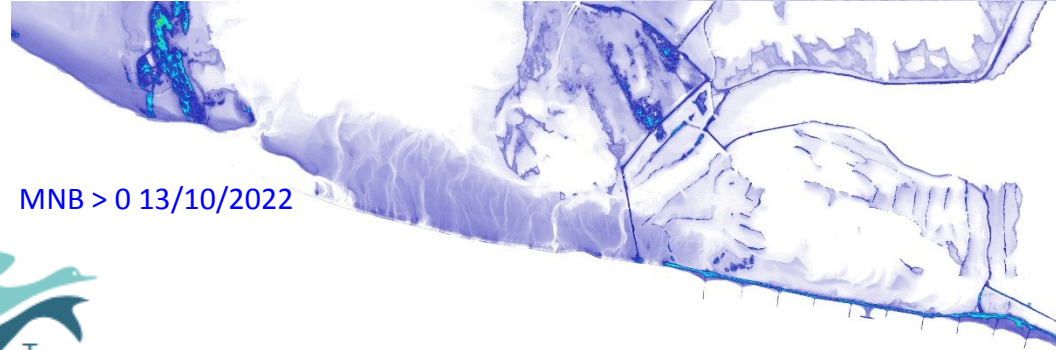
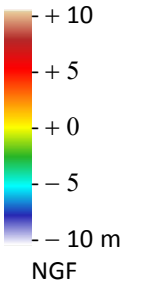
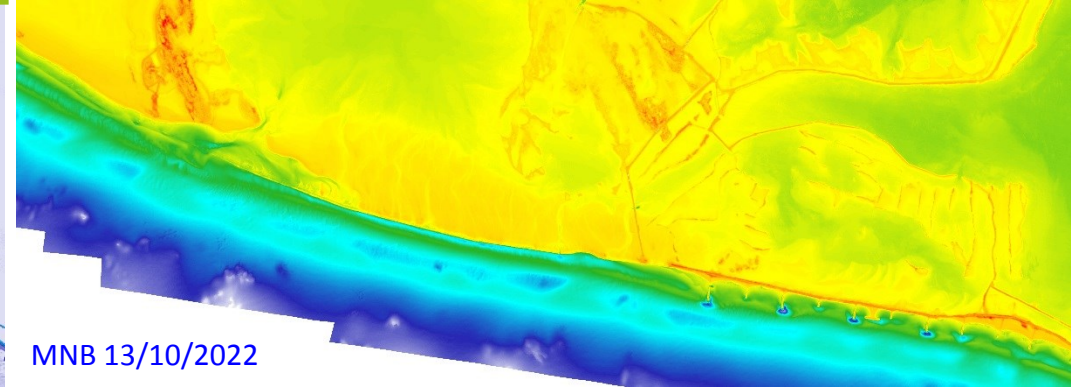
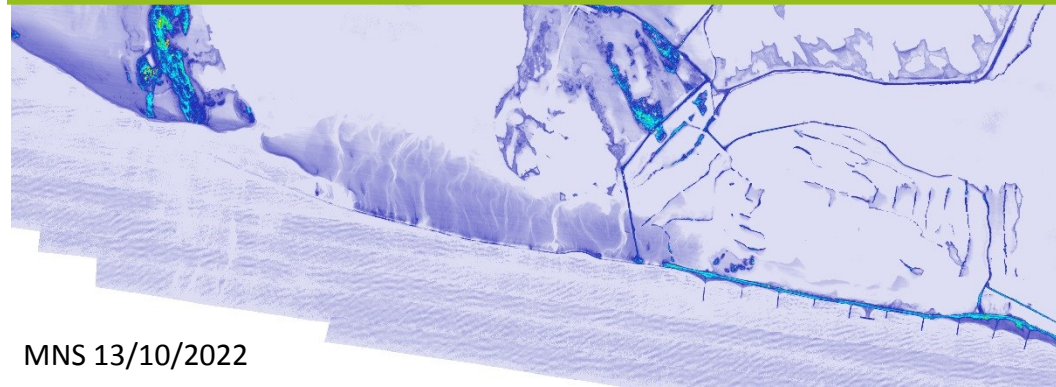
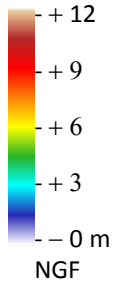
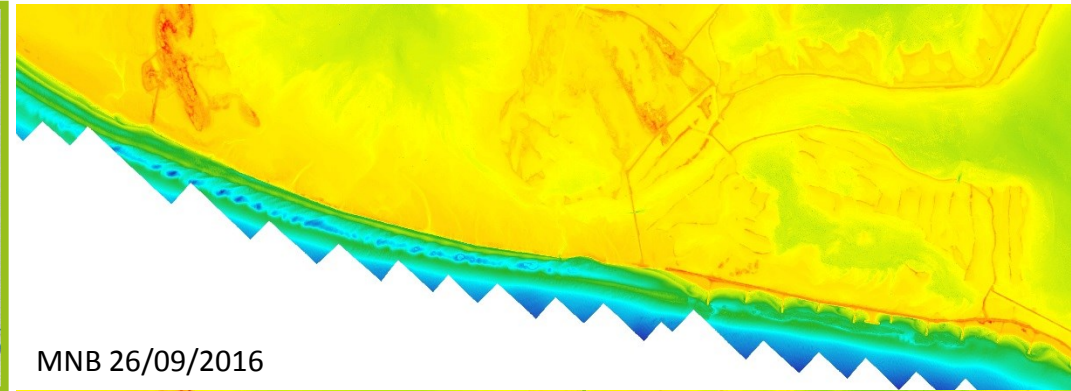
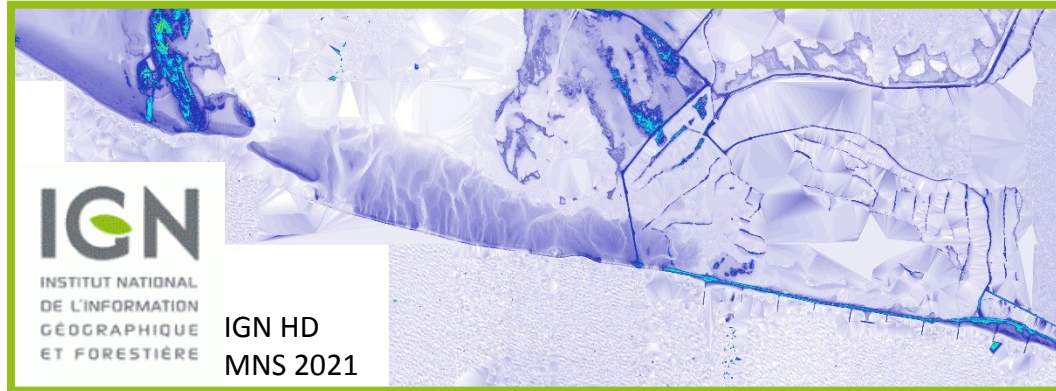
Olivier Boutron



Point de contrôle 6



## Cas d'une lagune en Camargue



## Plateforme LiDAR Nantes-Rennes-Caen

Les MNB favorisent  
le suivi d'une morphologie de  
littoral très dynamique comme à la  
Faute sur Mer

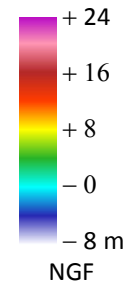
08 08 2020 acquisition faite juste  
avant une panne

2021 et 2022 en attente de  
traitement

2020 utilisé par

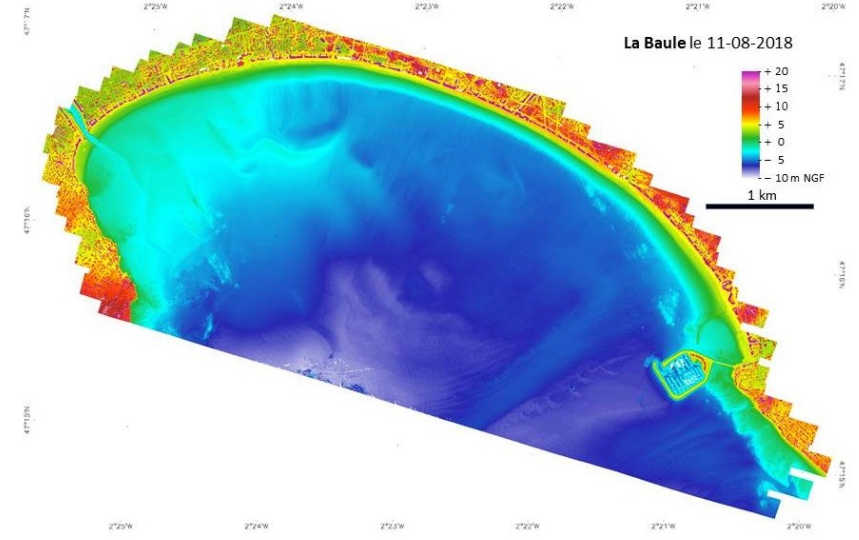
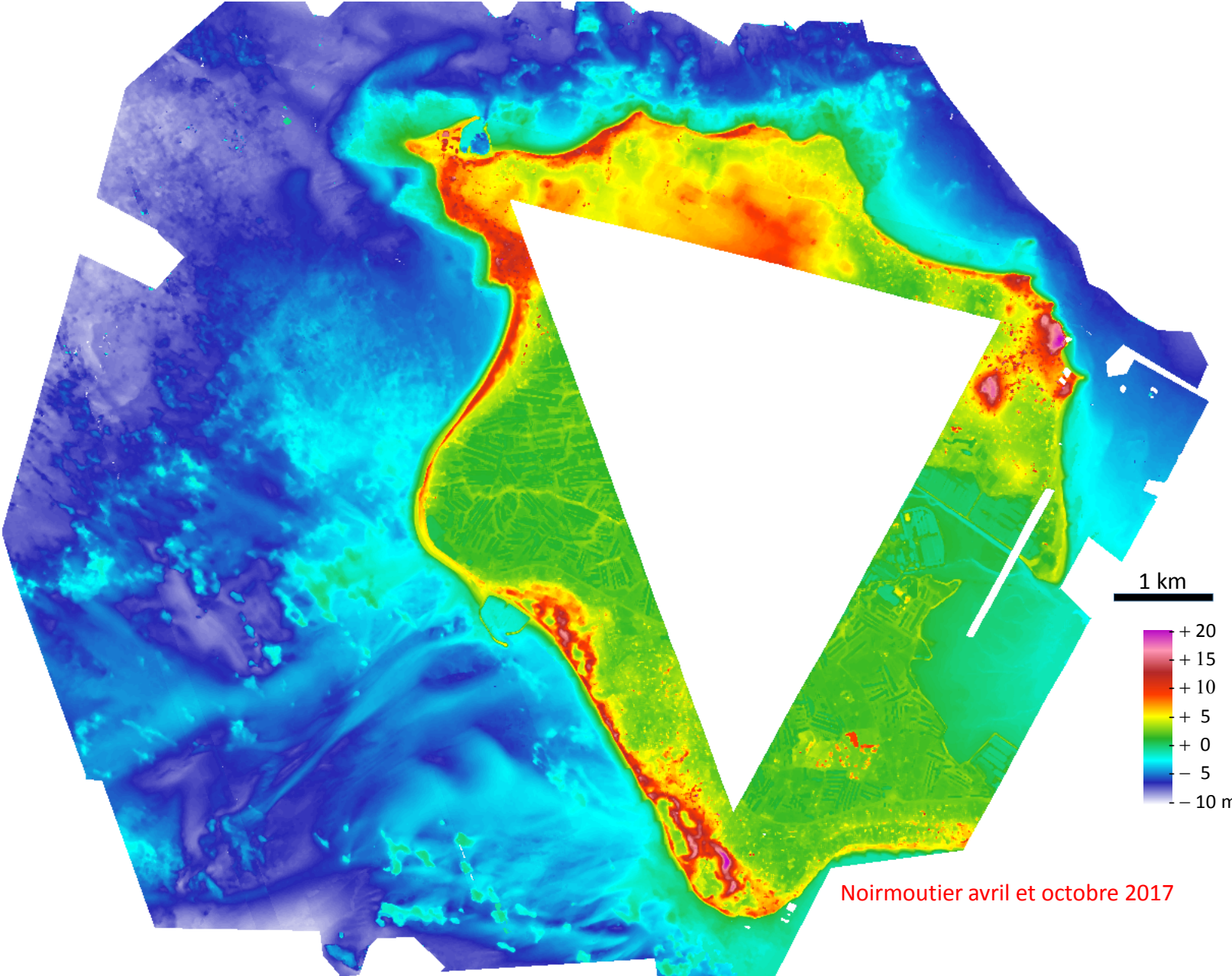


pour la modélisation des risques de submersion



La Grand-Plage





La Baule août 2018



Bathymétrie étendue