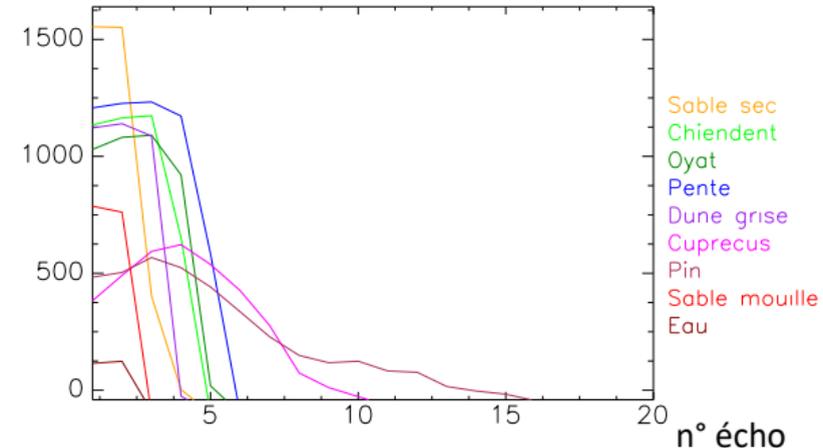
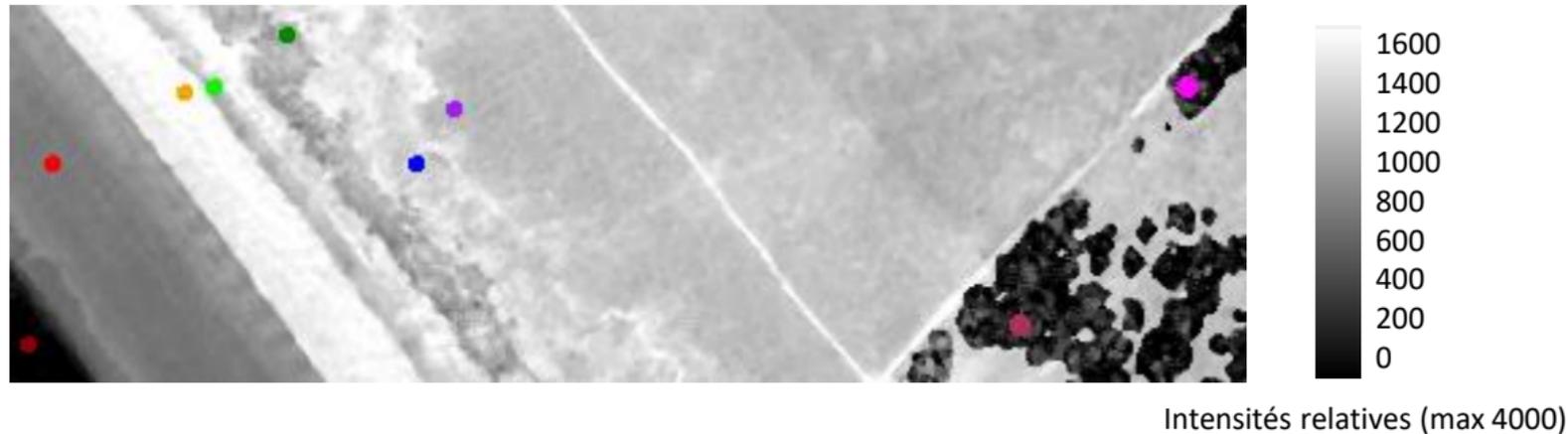
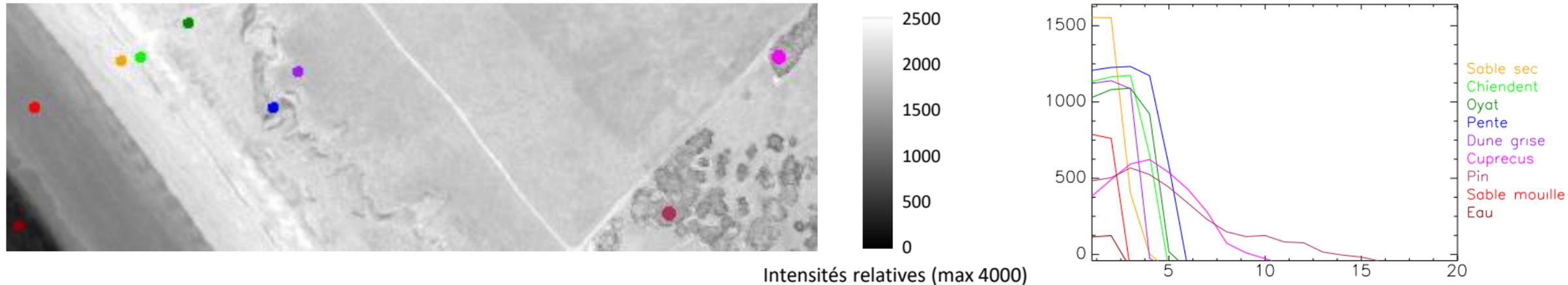


Intensité 1^{er} écho discret infrarouge



Plus le feuillage d'un arbre s'étale en hauteur plus l'impulsion laser est dispersée et plus l'intensité d'un écho est faible. Une même impulsion laser se répartie sur tous les étages de la canopée alors que sur le sable elle est renvoyée en une seule fois. Les conifères y apparaissent ainsi aussi sombres que l'eau de mer.

Somme des intensités d'échos discrets infrarouges

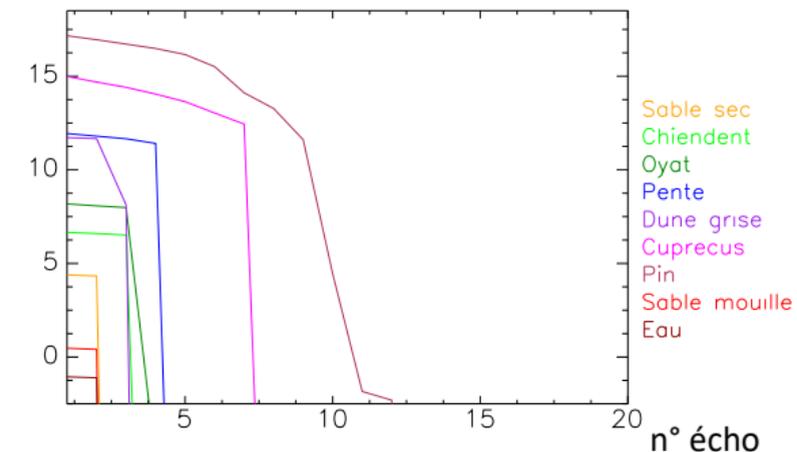
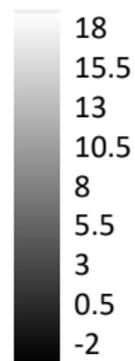
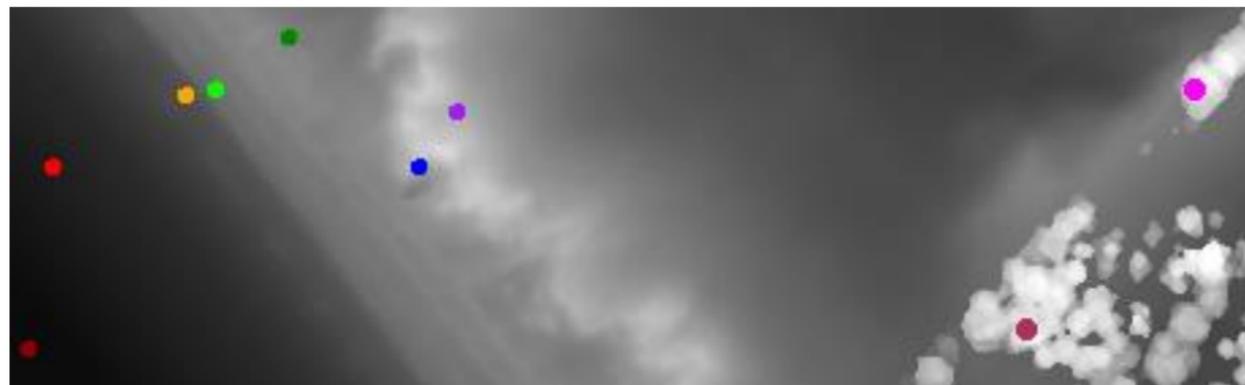


La somme des intensités permet de retrouver une cohérence avec la composition des surfaces.

La végétation est toujours très réfléchissante dans le proche infrarouge et même aussi réfléchissante que le sable sec.

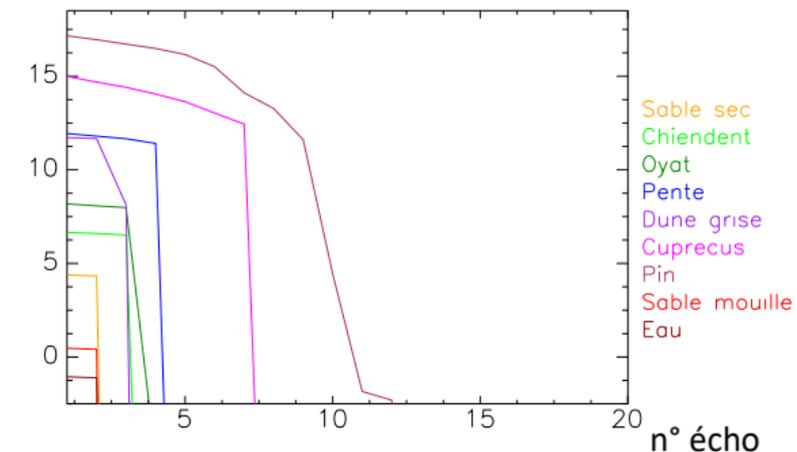
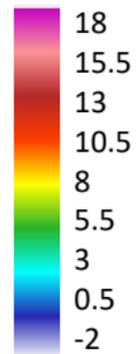
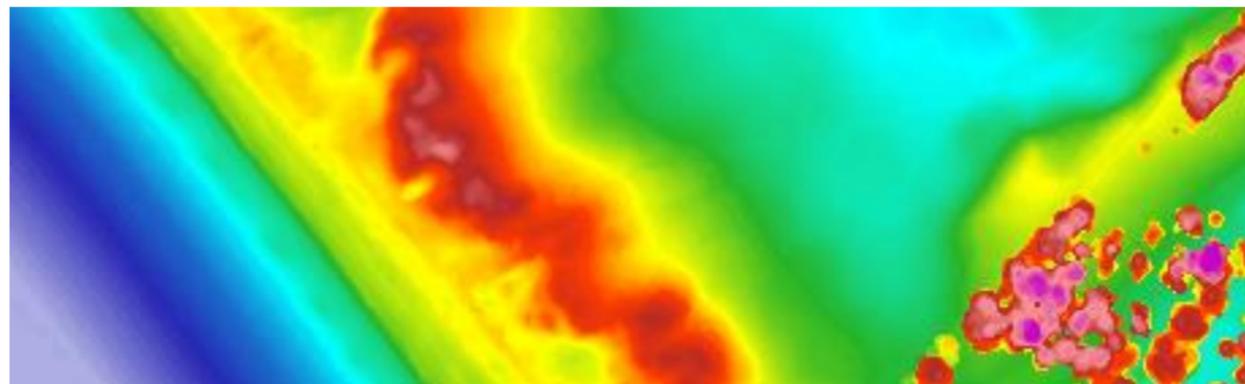
Les conifères le sont un peu moins mais bien plus réfléchissant que l'eau qui absorbe les infrarouges.

Élévation du 1^{er} écho discret infrarouge



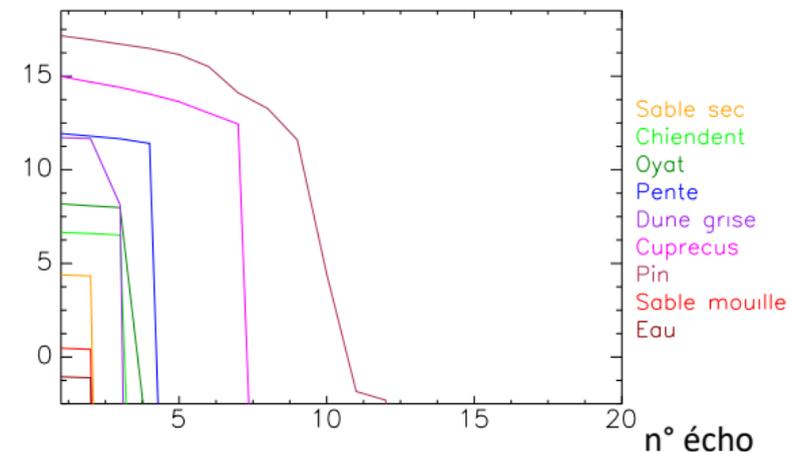
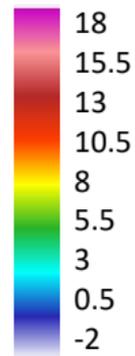
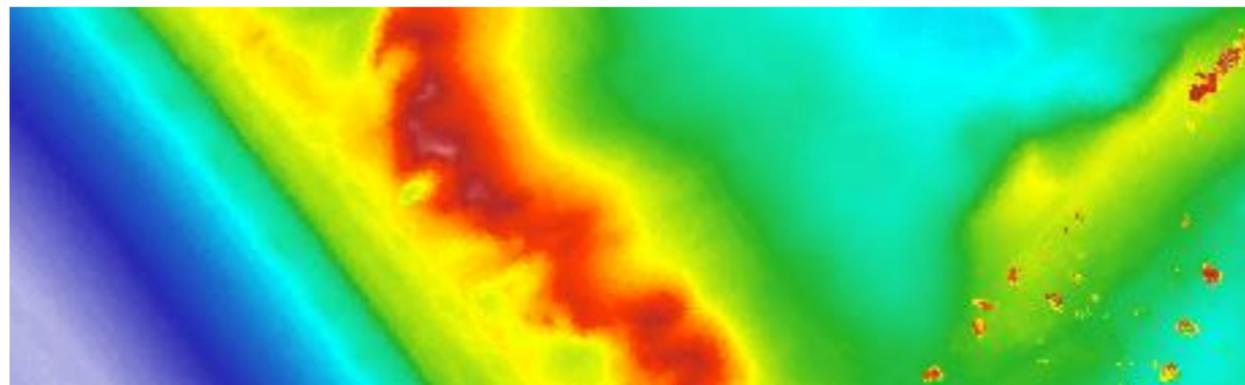
La hauteur du 1^{er} écho du laser infrarouge vers le LiDAR donne l'altitude de l'enveloppe supérieure des arbres, de la végétation dunaire du sable et de la surface de l'eau.

Élévation du 1^{er} écho discret infrarouge



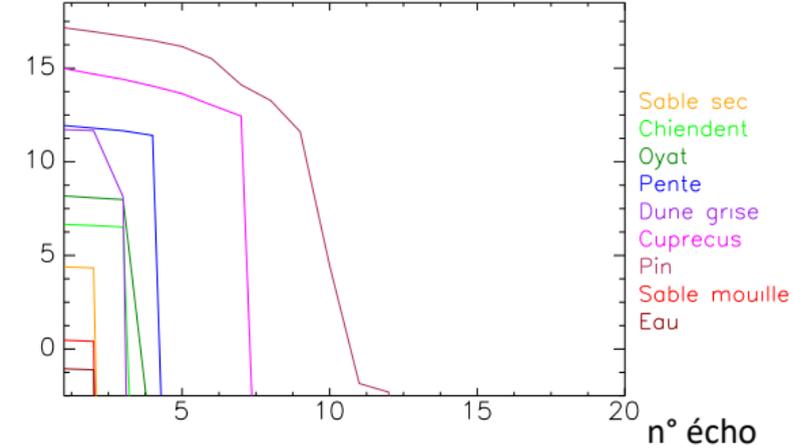
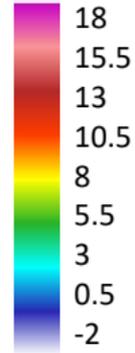
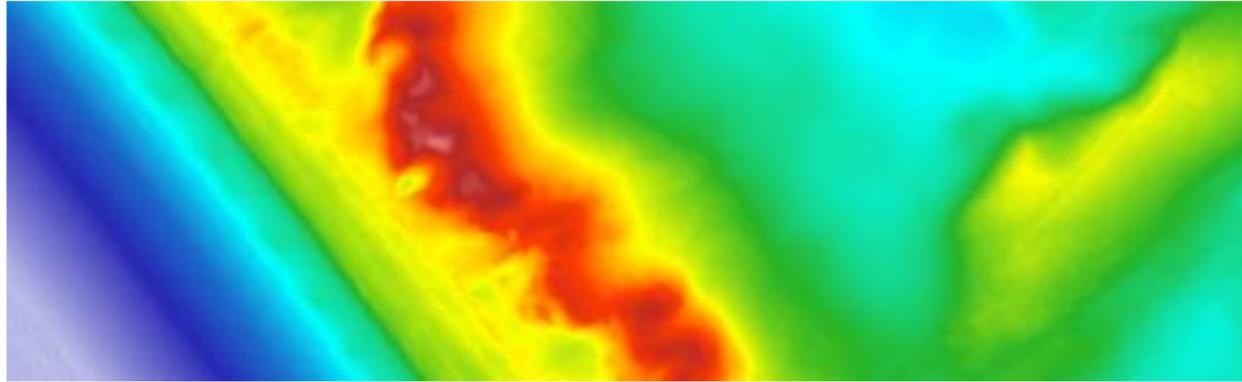
Cette altitude constitue un Modèle Numérique de Surface (MNS) qui peut être affiché avec une échelle de couleur.

Élévation du dernier écho discret infrarouge



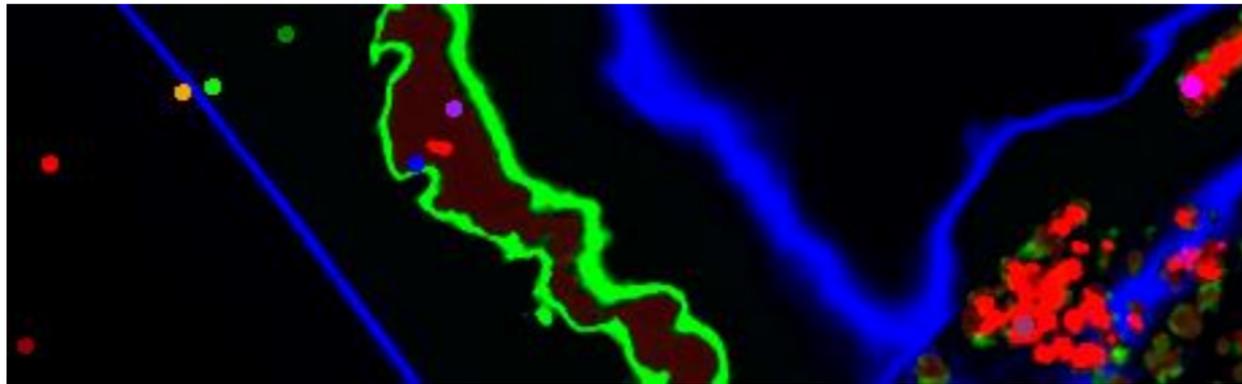
La hauteur du dernier écho du laser infrarouge vers le LiDAR donne l'altitude de l'enveloppe inférieure des arbres, de la végétation dunaire du sable et de la surface de l'eau puisque l'infrarouge ne peut y pénétrer que sur quelques centimètres. Ceci constitue un Modèle Numérique d'Élévation (MNE) du sol.

MNT discret infrarouge

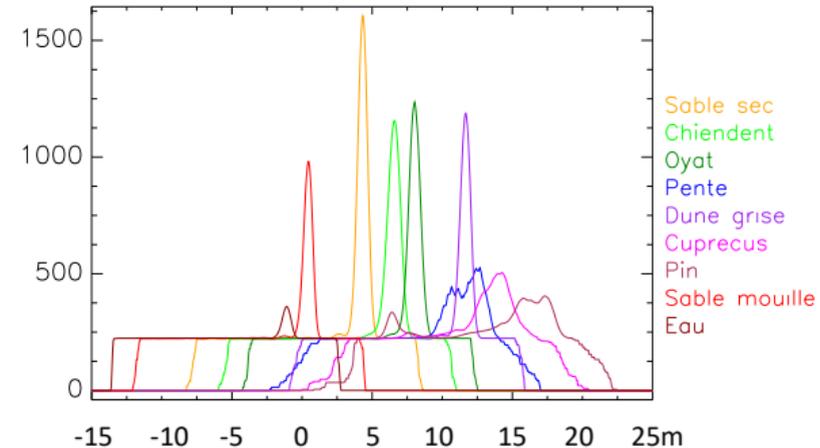


En calculant la position du sol à la base des troncs d'arbres on peut fabriquer un Modèle Numérique de Terrain (MNT) sans sursol généralement identifié par classification du nuage de points formés par tous les échos (également applicable aux bâtiments).

Forme d'onde complète infrarouge avec offset

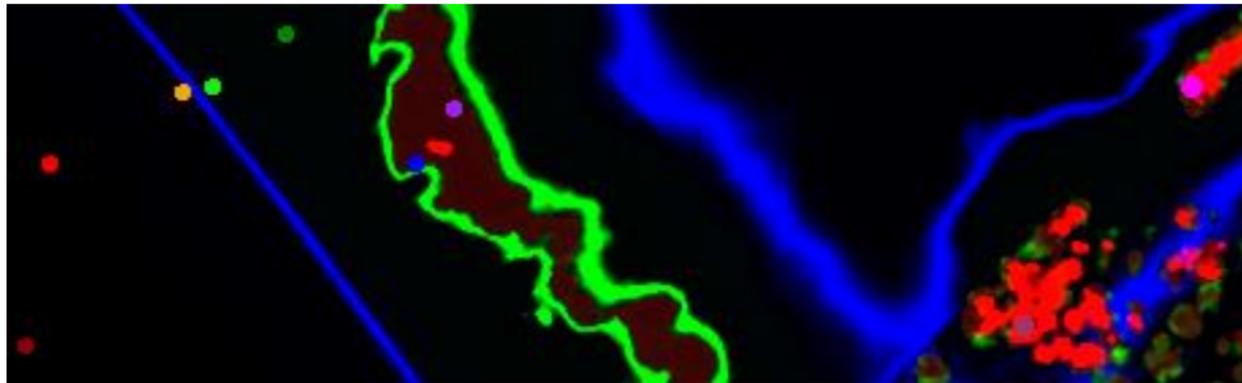


5 m 10 m 15 m

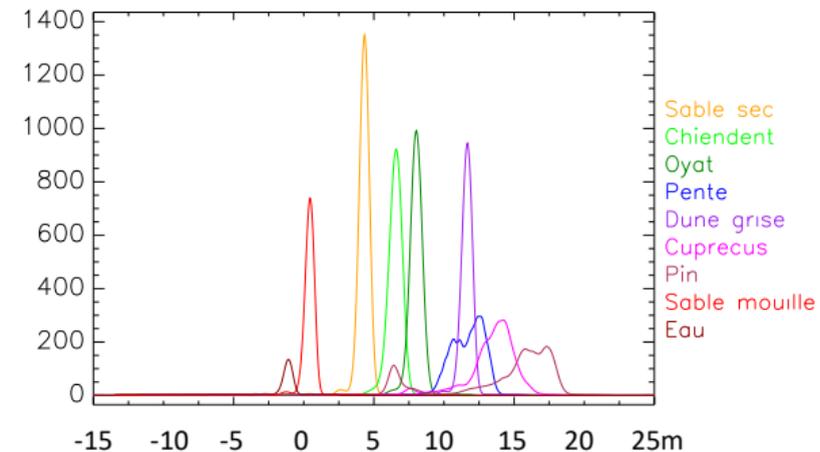


Au lieu d'attendre un écho, un LiDAR peut enregistrer toutes les nanosecondes l'intensité du laser infrarouge qui est renvoyée vers lui pour constituer une forme d'onde complète pour chaque écho de impulsion laser émise. L'enregistrement à été ici prolongé sur 15 m. Un bilan entre la forme d'onde de l'émission laser et la forme d'onde de son retour est ainsi réalisable.

Forme d'onde complète infrarouge sans offset

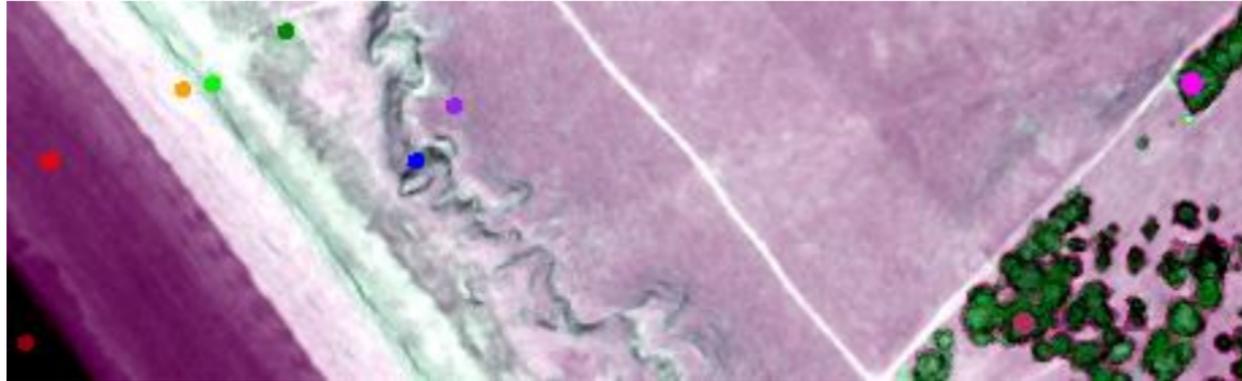


5 m 10 m 15 m



Enregistré sur une ligne de base à 200 cette constante peut être soustraite pour ne garder que le signal utile. Le sable sec est très réfléchissant mais en une seule fois selon une forme la plus proche de celle de l'impulsion émise. A l'inverse celle du pin s'étale du toit de la frondaison des aiguilles de pin à la base du tronc et au sol.

Statistique forme d'onde complète infrarouge



Intensité maximum

Intensité moyenne

Intensité écart-type

Sable sec
Chiendent
Oyat
Pente
Dune grise
Cuprecus
Pin
Sable mouille
Eau

La composition colorée de l'intensité maximum, sa moyenne et son écart-type permet de visualiser rapidement les différences de formes d'ondes retournées vers le LiDAR en proportion des propriétés de surfaces plus ou moins réfléchissantes mais aussi de l'étalement du signal sur toute la hauteur d'interaction de l'impulsion laser avec le volume de la végétation .

Statistique forme d'onde complète et intensité 1^{er} écho discret infrarouge



Intensité maximum

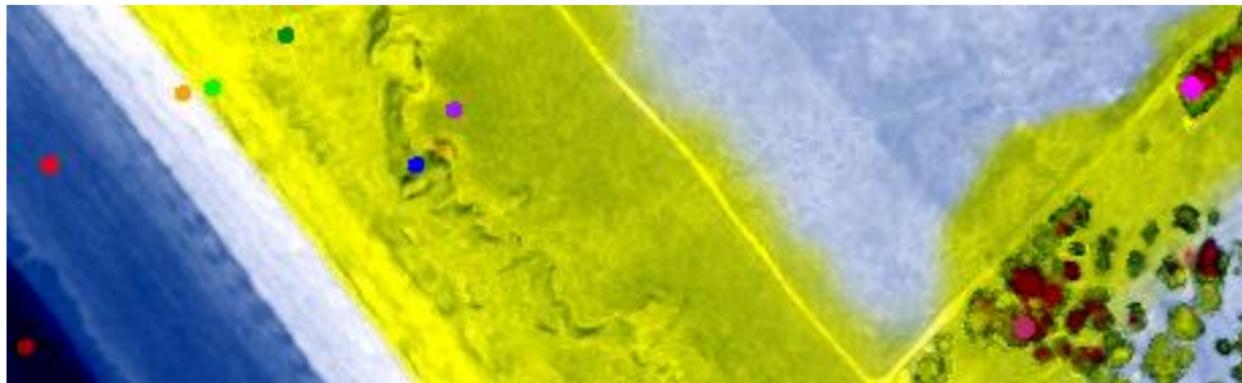
Intensité moyenne

Intensité 1^{er} écho discret

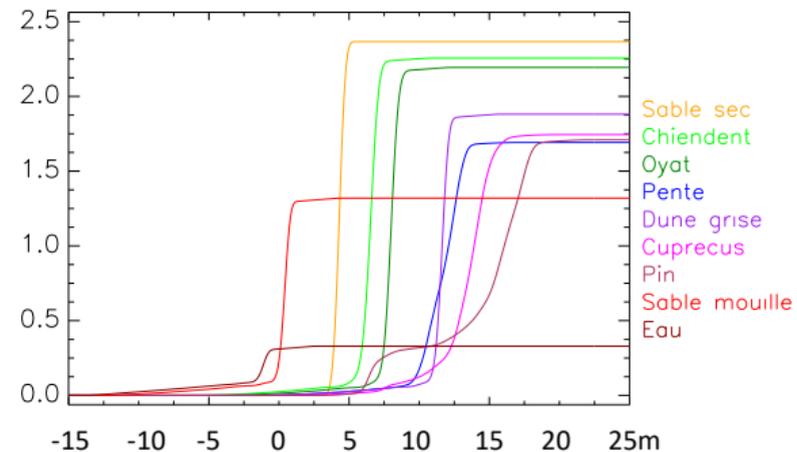
Sable sec
Chiendent
Oyat
Pente
Dune grise
Cuprecus
Pin
Sable mouille
Eau

La composition colorée de l'intensité maximum et de la moyenne de la forme d'onde avec l'intensité du 1^{er} écho discret fait apparaître en bleu les zones à fortes pentes sur la dune.

Histogramme cumulé de forme d'onde complète infrarouge

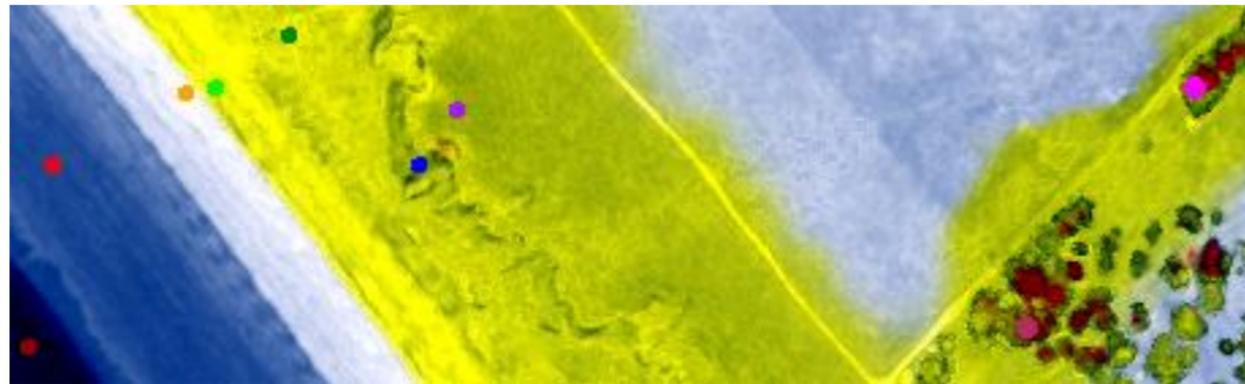


5 m 15 m 25 m



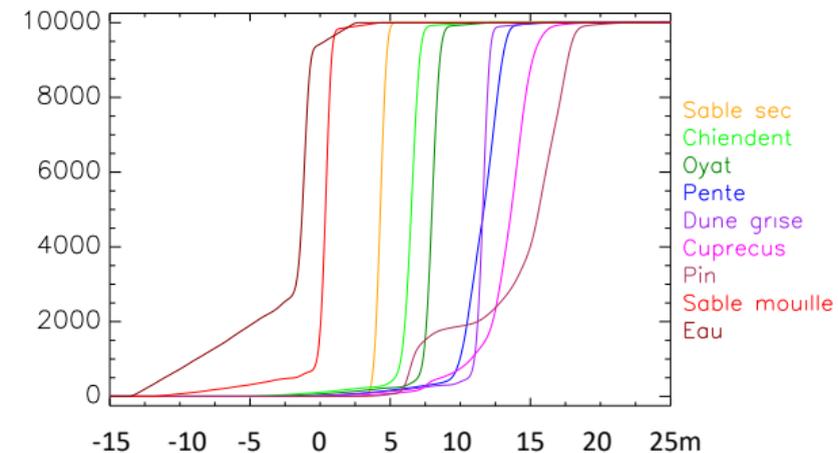
L'histogramme cumulé permet d'analyser la répartition des intensités sur toute la forme d'onde.

Histogramme cumulé de forme d'onde complète infrarouge



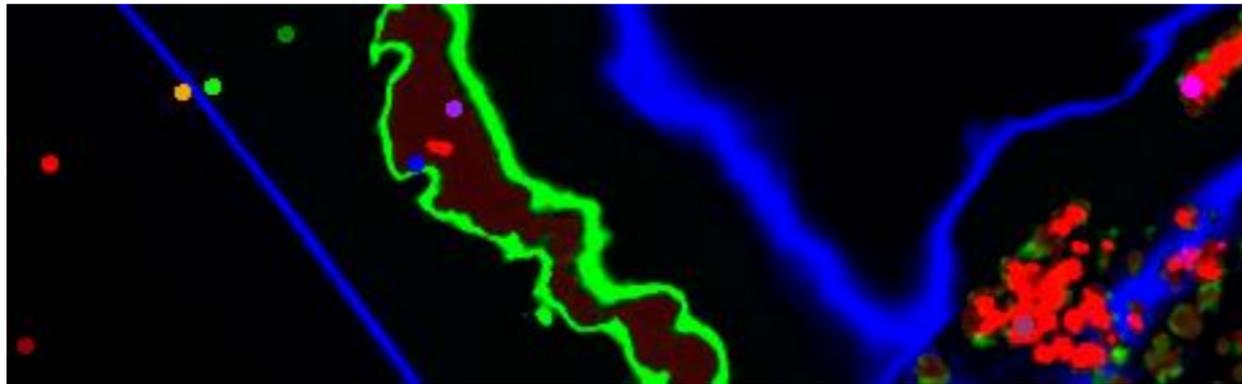
5 m 15 m 25 m

normée

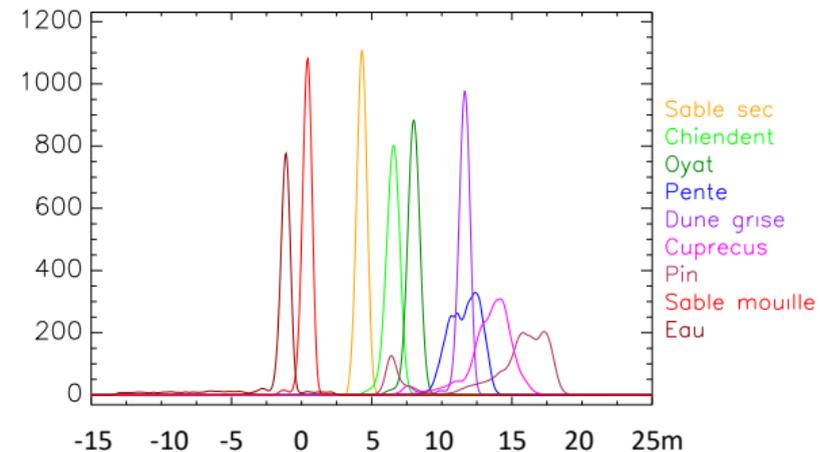


Normée au maximum sur le graphique à droite il est possible de ne considérer que l'étalement du signal indépendamment des propriétés de réflexion des surfaces.

Forme d'onde complète normée infrarouge (dérivée de l'histogramme cumulé normé)

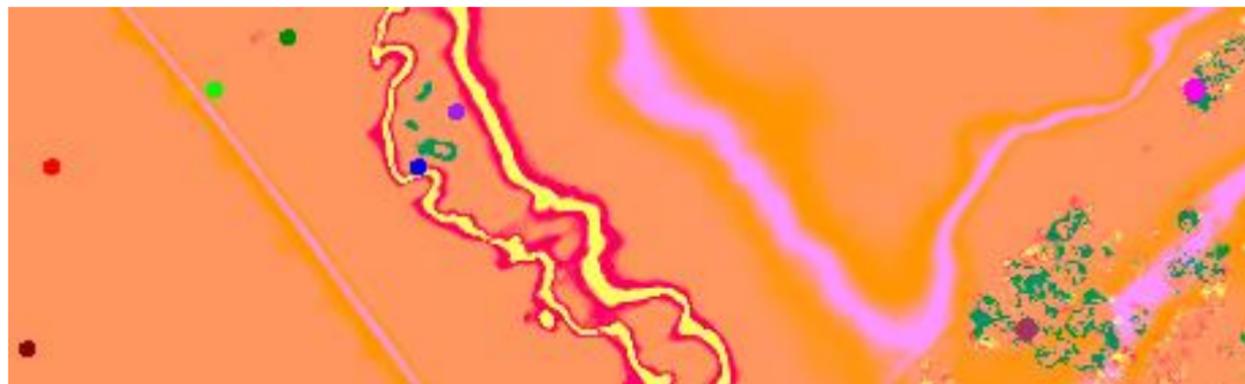


5 m 10 m 15 m

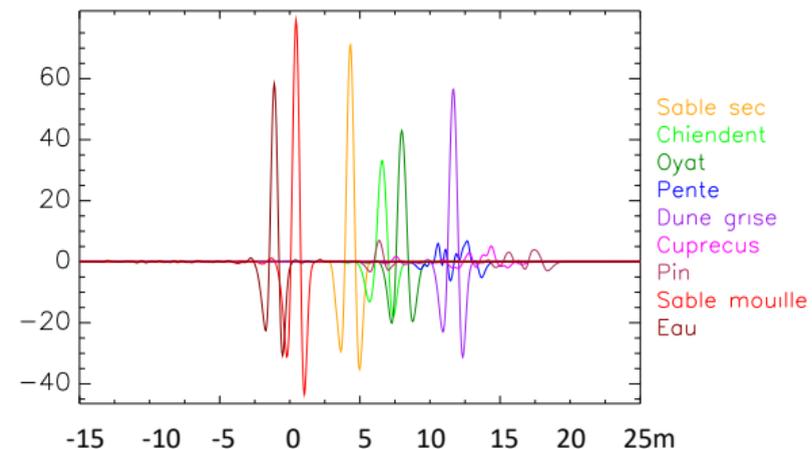


Les formes d'ondes ont ici toutes la même surface et leur étalement ne caractérise plus que la géométrie de l'interaction du laser infrarouge avec le volume de matières rencontrées que celles-ci soient claires ou sombres.

Dérivée 2nd de la dérivée 1^{ère} de l'histogramme cumulé de forme d'onde complète infrarouge



5 m 10 m 15 m

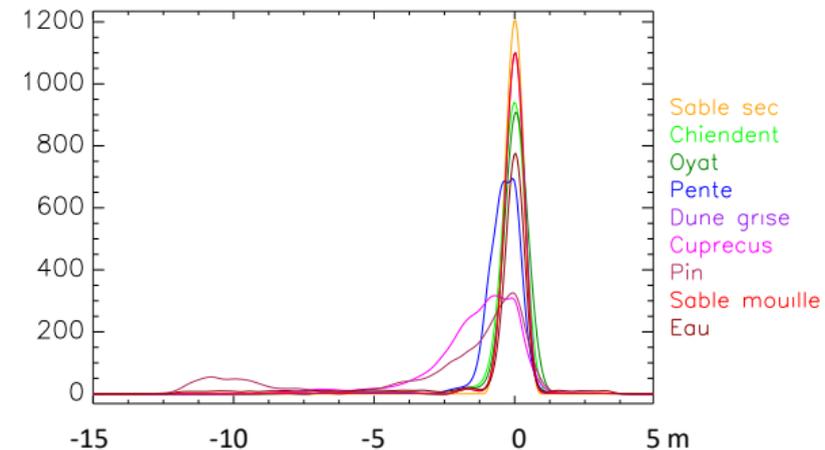


La dérivée troisième de l'histogramme cumulé donne accès à la détection d'échos calculés à partir de chaque forme d'onde.

Forme d'onde complète normée infrarouge centrée sur 1^{er} écho



-1.0 +0.75 +1.0



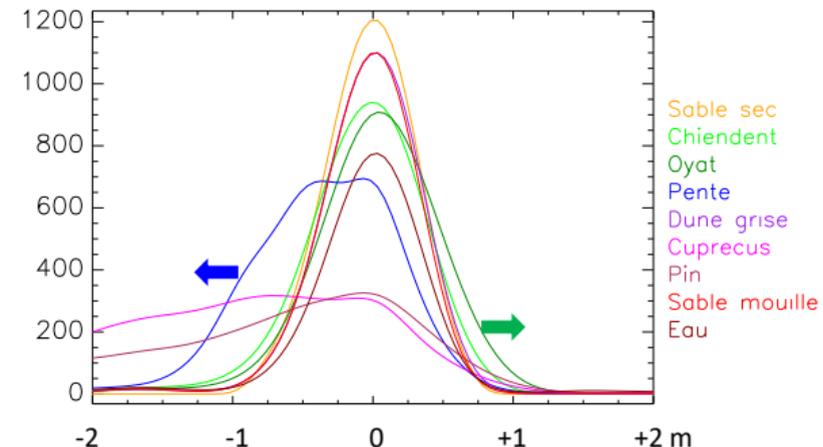
Pour focaliser l'analyse sur la forme d'onde elle-même, indépendamment de l'altitude, il est possible de centrer toutes les formes d'ondes sur leur 1^{er} pic ou écho dont l'altitude peut être retrouvée avec le MNS.

Forme d'onde complète normée infrarouge centrée sur 1^{er} écho



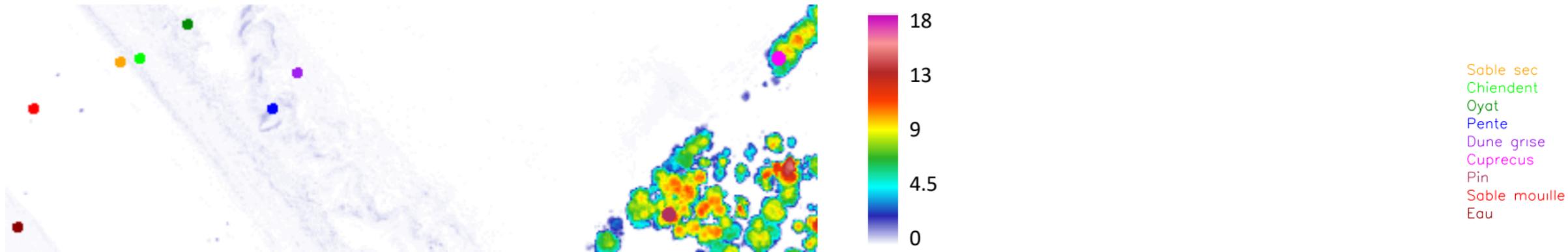
-1.0 +0.75 +1.0

Les pointes des feuilles de graminées dressées proches de la verticale déformant → vers le haut les formes d'ondes au dessus du 1^{er} écho elles peuvent être facilement détectées. Pas de confusion possible avec les arbres à fort étalement du signal vers le bas.



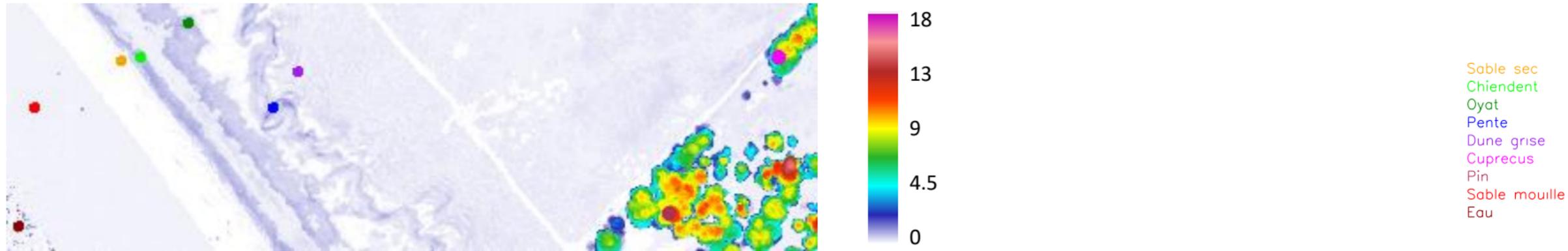
L'empreinte au sol du laser infrarouge étant assez fine l'effet de pente est facile à identifier ← par une déformation caractéristique vers le bas.

MNS-MNT infrarouge



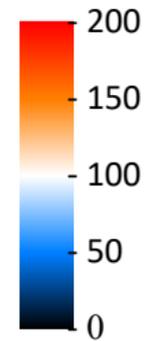
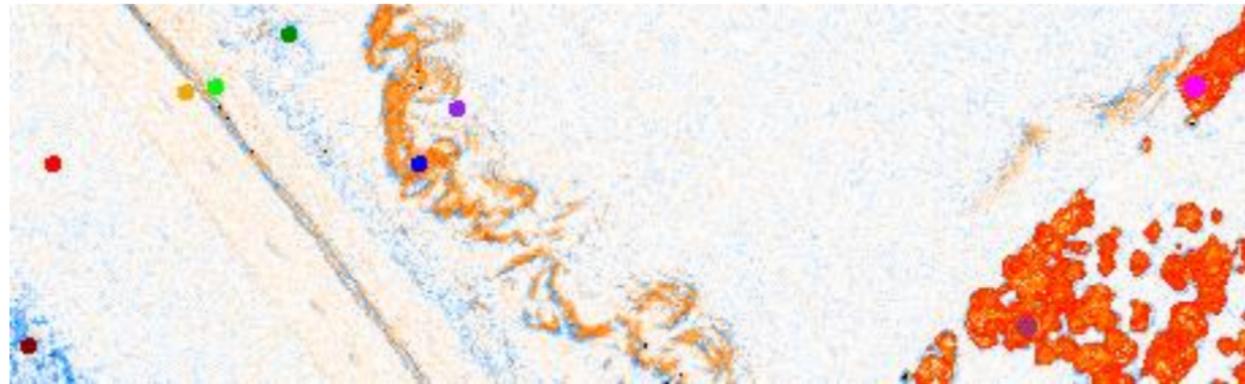
Un Modèle Numérique de Hauteur (MNH) est classiquement calculé entre MNS et MNT. Ce dernier étant lui même calculé par interpolation à la base des arbres il ne prend pas en compte les végétations basses.

MNS-MNT et largeur de forme d'onde complète infrarouge



Un Modèle Numérique de Hauteur (MNH) peut être complété par la mesure de l'élargissement de la forme d'onde provoquée par une distribution de feuilles dressées pour atteindre au moins en partie l'épaisseur des oyats et du chiendent de cette dune.

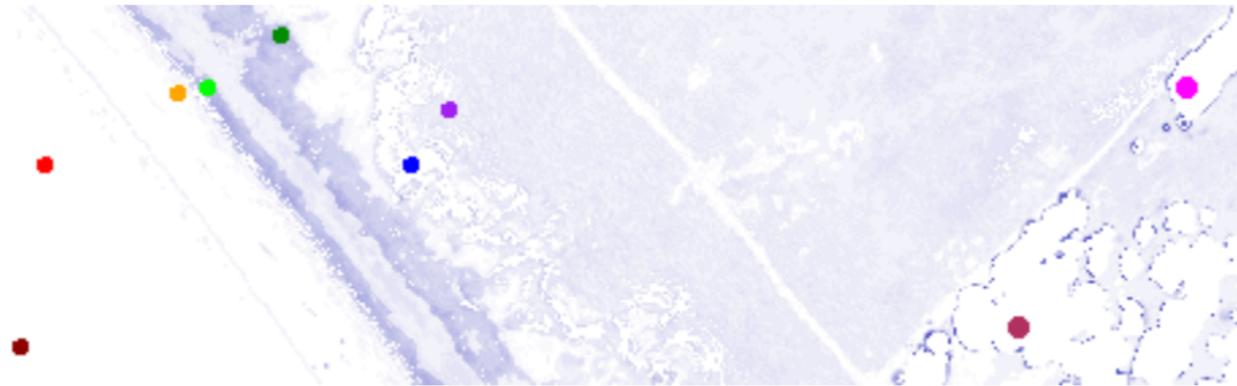
Somme forme d'onde complète infrarouge sous 1^{er} écho



Sable sec
Chiendent
Oyat
Pente
Dune grise
Cuprecus
Pin
Sable mouille
Eau

Les pentes élargissant les formes d'ondes différemment des graminées il est possible de les identifier pour les retirer des MNH.

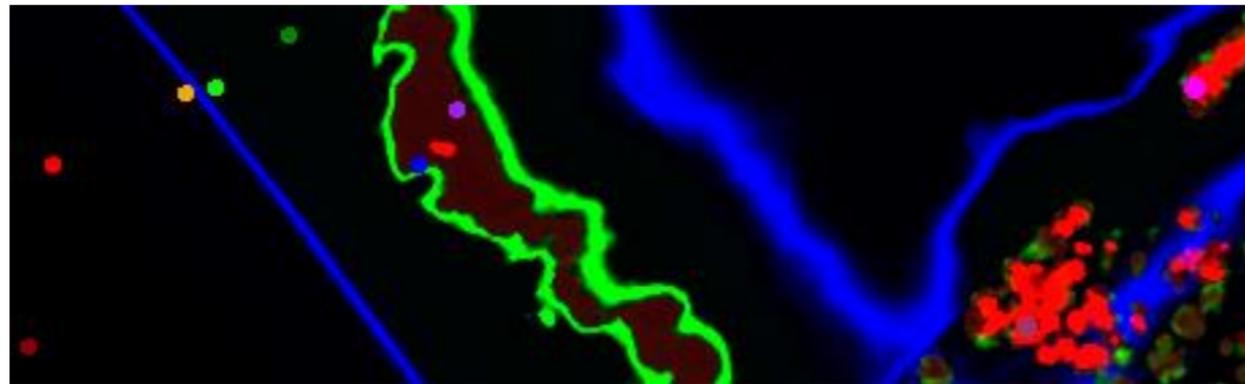
MNS-MNT et largeur de forme d'onde complète infrarouge avec coupure d'une longue forme d'onde sous 1^{er} écho



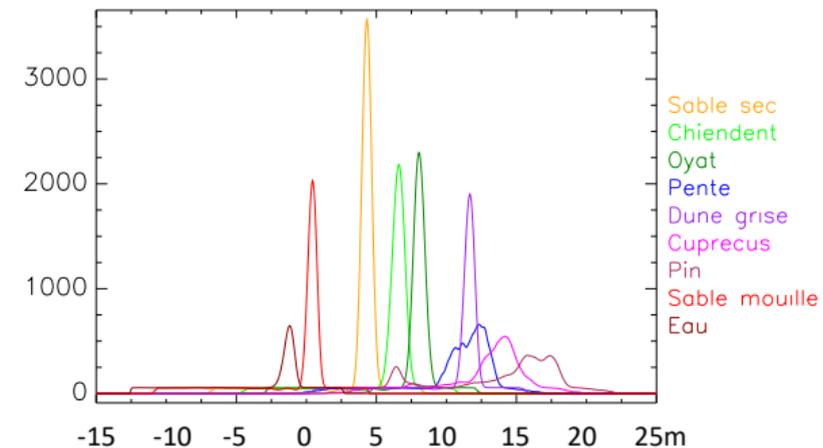
Sable sec
Chiendent
Oyat
Pente
Dune grise
Cuprecus
Pin
Sable mouille
Eau

Ce MNH infrarouge ne prend en compte que la végétation basse de la dune grise, des oyats et du chiendent de la dune blanche. Une bande de végétation basse sépare la zone à oyat de celle à chiendent.

Forme d'onde complète cumulée verte et infrarouge

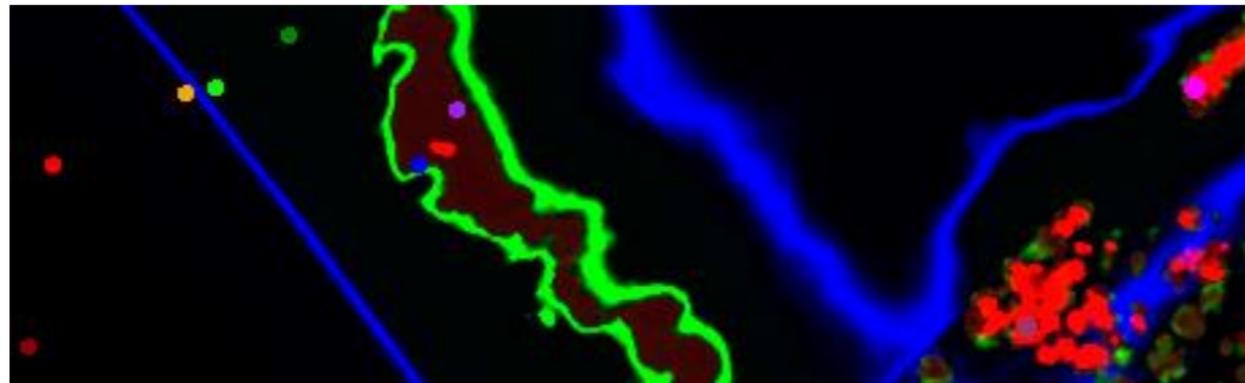


5 m 10 m 15 m

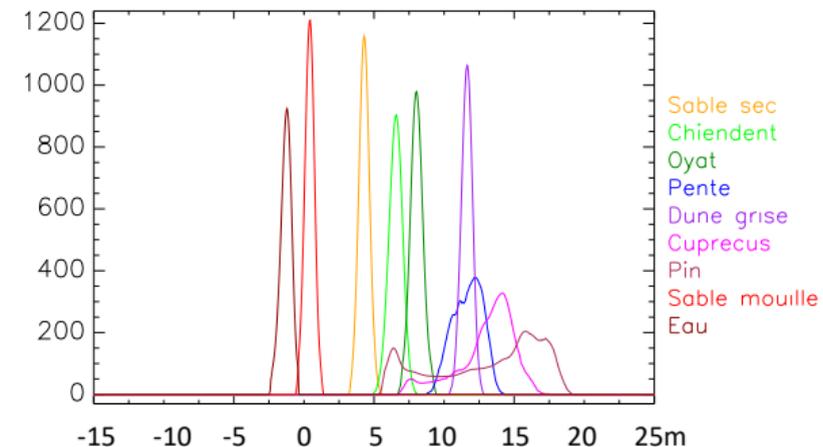


Il est également possible de cumuler les formes d'ondes du laser infrarouge à 1064 nm avec celles du laser vert à 532 nm pour enrichir l'information. Ce cumule est effectué sur une ligne de base commune de 50.

Forme d'onde complète cumulée normée verte et infrarouge

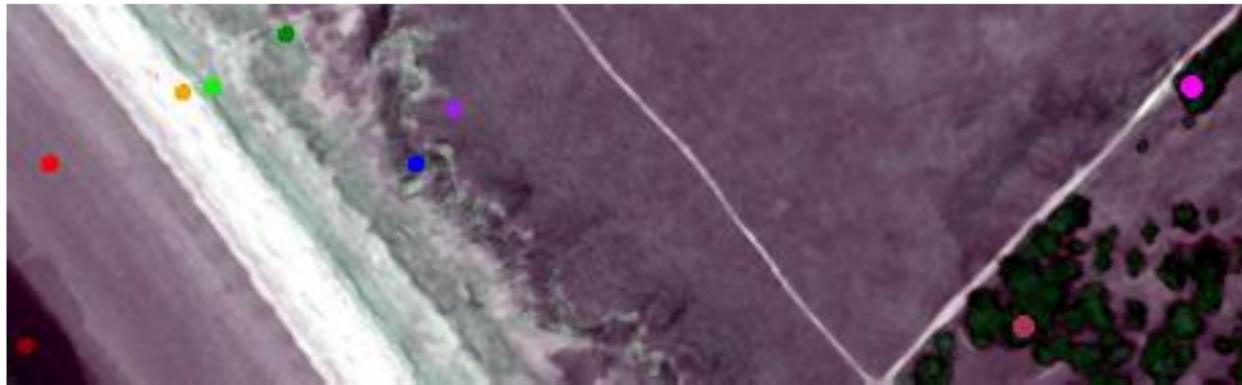


5 m 10 m 15 m



Une normalisation permet à nouveau de focaliser l'analyse sur la géométrie des interactions entre ces lasers et la matière rencontrée quelle que soit ses propriétés de réflexion.

Statistique forme d'onde complète verte

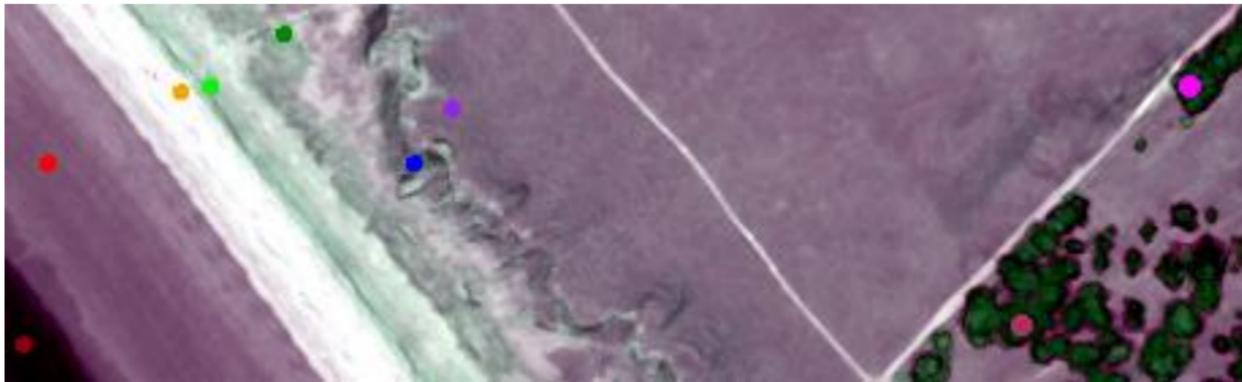


maximum
moyenne
écart-type

Sable sec
Chiendent
Oyat
Pente
Dune grise
Cuprecus
Pin
Sable mouille
Eau

La composition colorée de l'intensité maximum, sa moyenne et son écart-type permet de visualiser rapidement les différences de formes d'ondes retournées vers le LiDAR. La végétation étant moins réfléchissante dans le vert que dans l'infrarouge elle apparait ici plus sombre.

Statistique forme d'onde complète verte et infrarouge

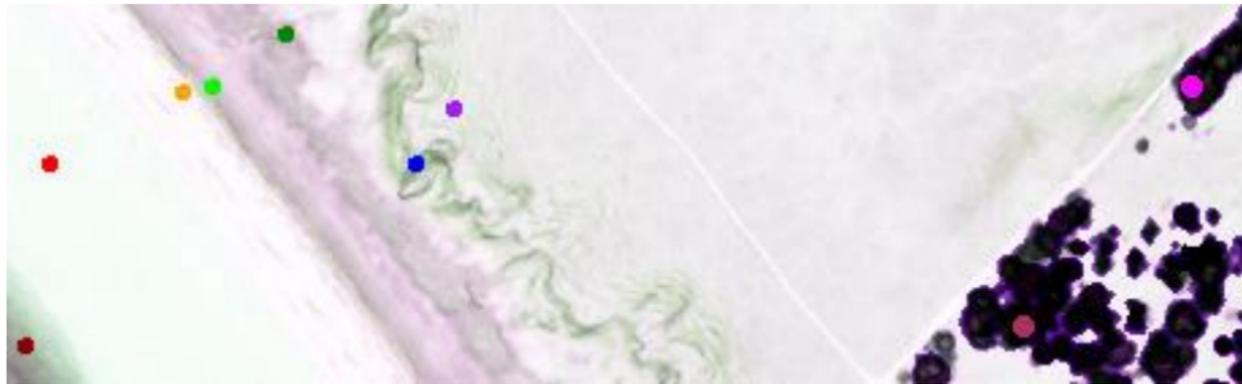


maximum
moyenne
écart-type

Sable sec
Chiendent
Oyat
Pente
Dune grise
Cuprecus
Pin
Sable mouille
Eau

La composition colorée de l'intensité maximum, sa moyenne et son écart-type permet de visualiser rapidement les différences de formes d'ondes retournées vers le LiDAR. La combinaison des retours verts et infrarouges augmente la variation des couleurs produites.

Statistique forme d'onde complète verte et infrarouge normée

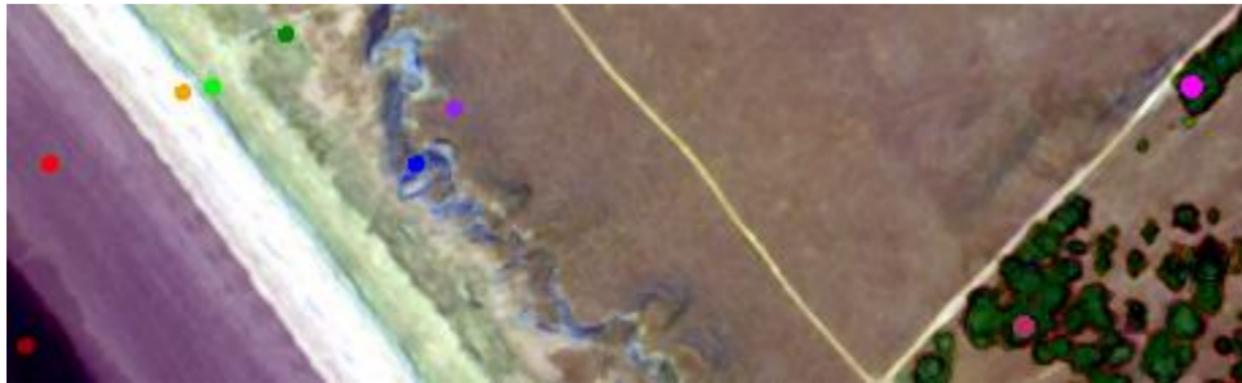


maximum
moyenne
écart-type

Sable sec
Chiendent
Oyat
Pente
Dune grise
Cuprecus
Pin
Sable mouille
Eau

Ces variations de couleurs produites par combinaison des deux lasers fait ressortir la dune blanche à oyat et chiendent en magenta sur cette composition colorée. Les deux zones n'en forment plus qu'une du chiendent à l'oyat.

Statistique forme d'onde complète vert infrarouge et intensité 1^{er} écho discret vert



Maximum FOC vert infrarouge

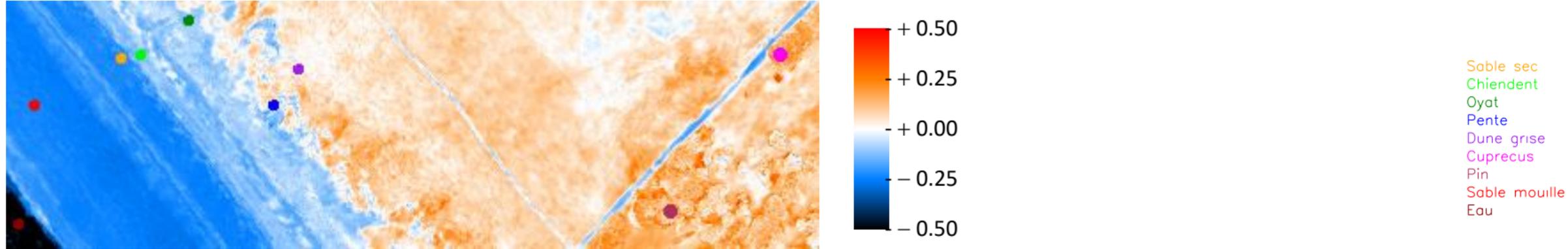
Moyenne FOC vert infrarouge

Moyenne écho discret vert

Sable sec
Chiendent
Oyat
Pente
Dune grise
Cuprecus
Pin
Sable mouille
Eau

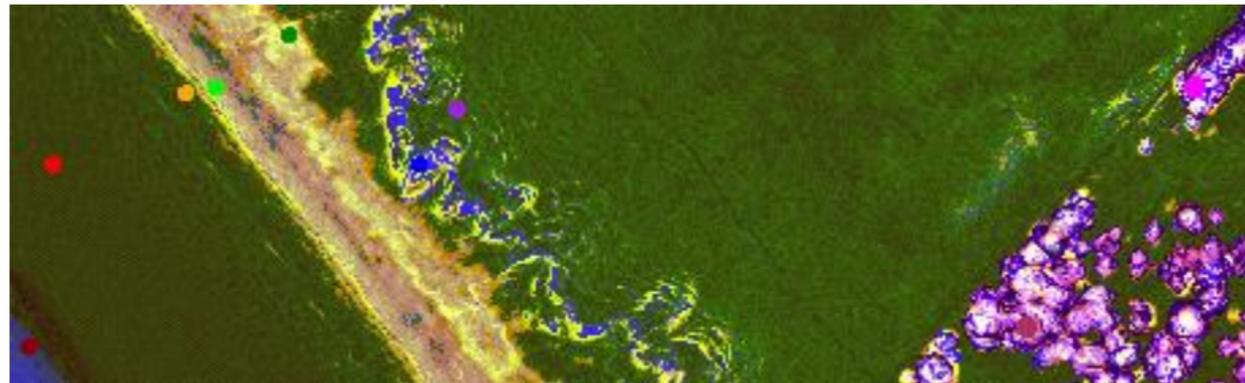
Cette composition colorée de l'intensité maximum et de la moyenne de la forme d'onde de combinaison vert infrarouge avec l'intensité du 1^{er} écho discret vert donne un rendu visuel facilitant l'interprétation des matériaux constituant l'image. Les effets de pentes y sont toujours bleutés.

« Green NDVI » de forme d'onde verte et infrarouge

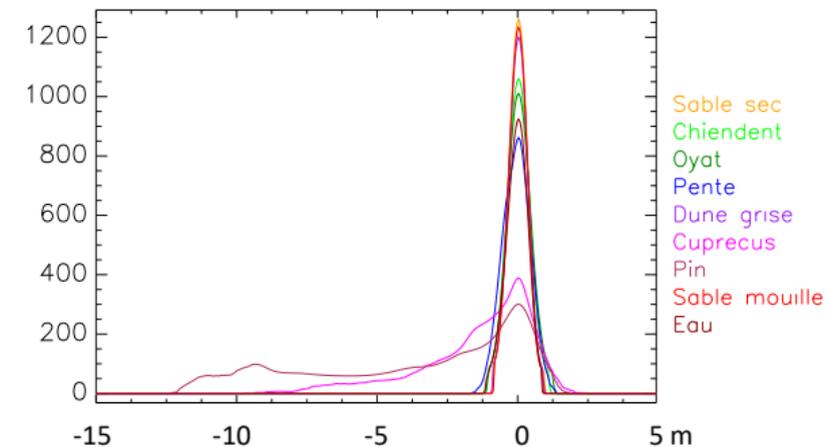


Cet indice de végétation basé sur les sommes de formes d'ondes (infrarouge – vert)/(infrarouge + vert) fait ressortir la végétation de la dune grise et des arbres en positif. En raison du mélange avec le sable sec la végétation de la dune blanche ressort avec des valeurs faiblement négatives alors de l'eau est fortement négative.

Forme d'onde complète verte et infrarouge normée centrée sur 1^{er} écho



-1.0 +0.75 +1.0

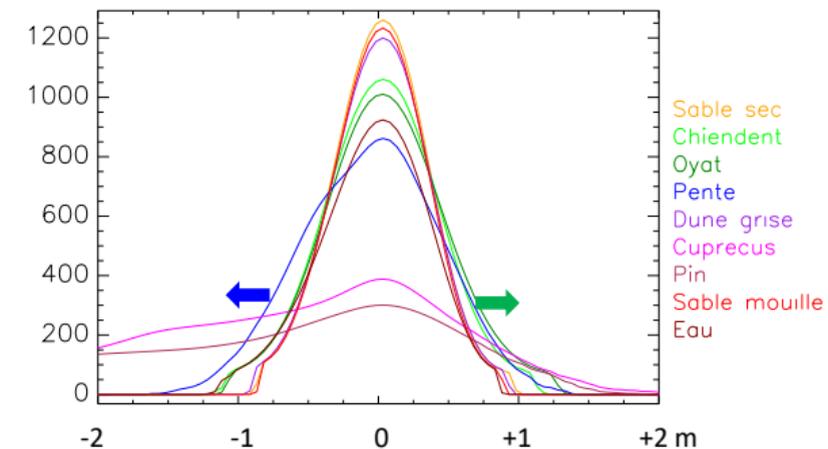


Pour focaliser l'analyse sur la forme d'onde elle-même, indépendamment de l'altitude, il est possible de centrer toutes les formes d'ondes sur leur 1^{er} pic ou écho.

Forme d'onde complète verte et infrarouge normée centrée sur 1^{er} écho



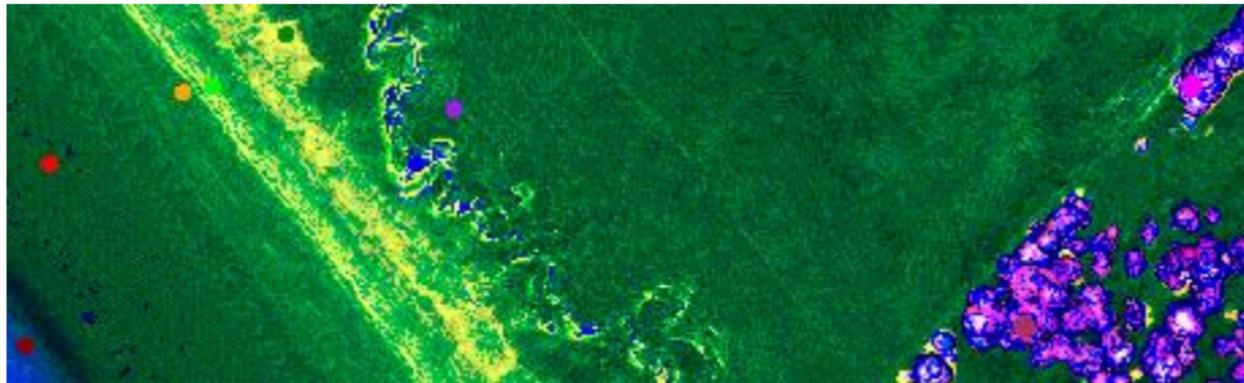
-1.0 +0.75 +1.0



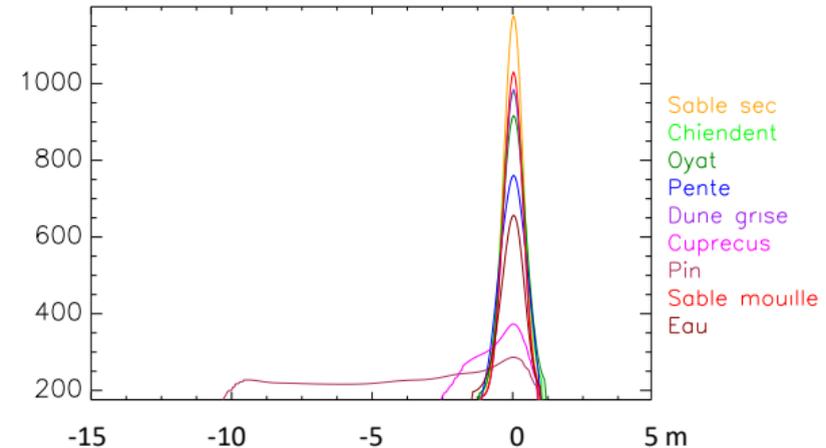
Les graminées restent bien détectables avec cette combinaison de forme d'onde verte infrarouge.

L'effet de pente est moins marqué dans cette combinaison verte-infrarouge.

Forme d'onde complète verte normée centrée sur 1^{er} écho

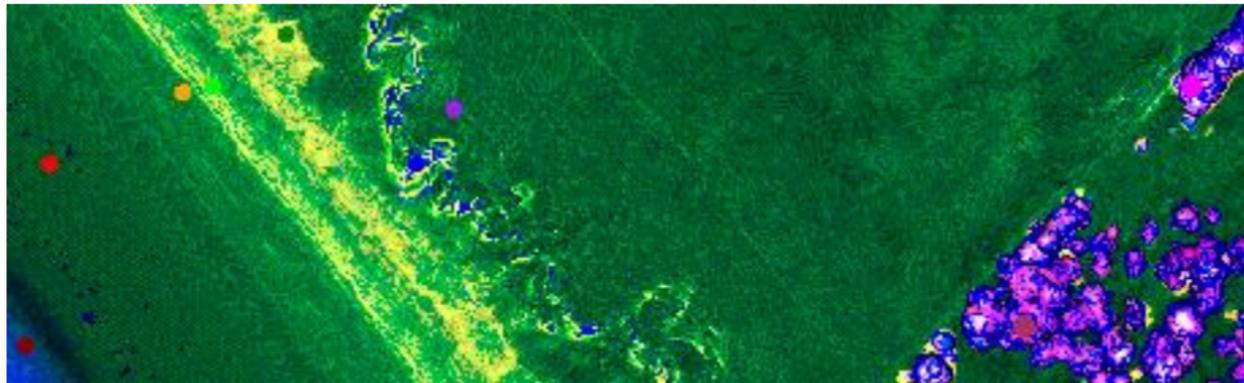


-1.0 +0.75 +1.0



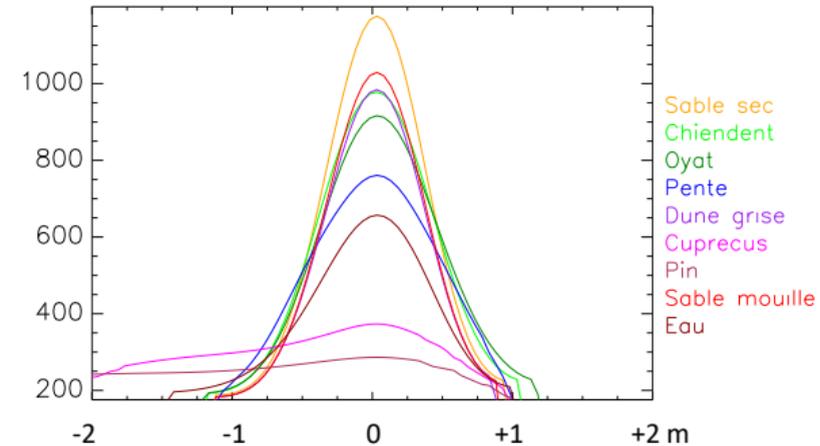
La forme d'onde du vert peut elle aussi être analysée seule.

Forme d'onde complète verte normée centrée sur 1^{er} écho



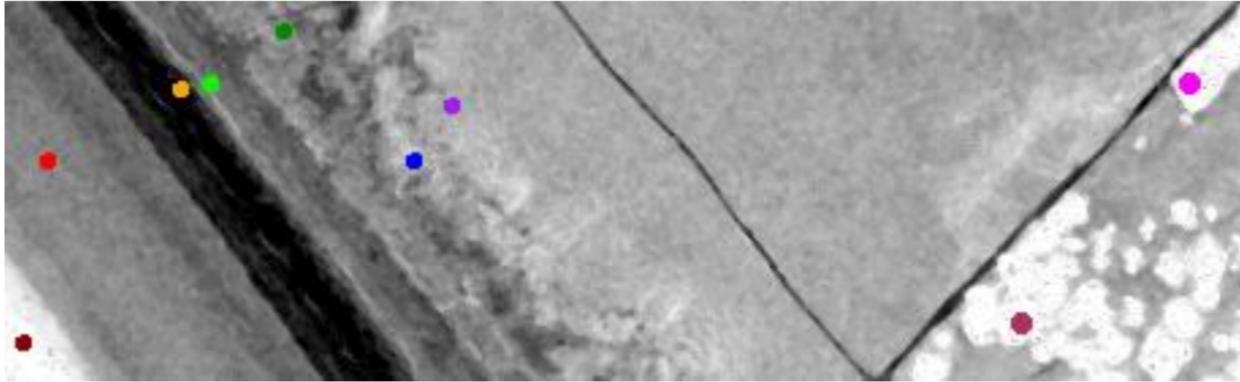
-1.0 +0.75 +1.0

Les graminées restent bien détectables avec la forme d'onde verte



L'empreinte au sol du laser vert étant plus large l'effet de pente est plus difficile à isoler

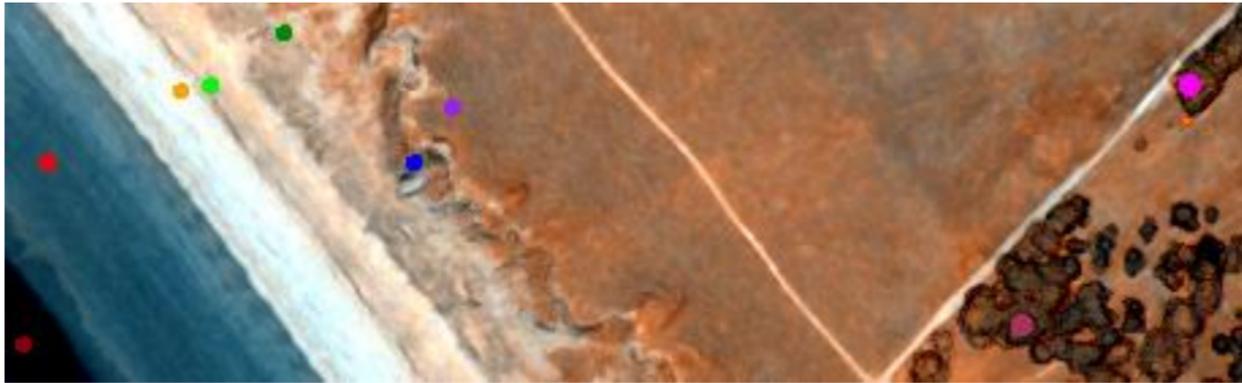
Détection du sable sec par déformation de la forme d'onde verte



Sable sec
Chiendent
Oyat
Pente
Dune grise
Cuprecus
Pin
Sable mouille
Eau

Intensité minimum de la forme d'onde verte et de la forme d'onde cumulée vert-infrarouge fait ressortir le sable sec en noir. Cet effet justifie les enregistrements des formes d'ondes sur une ligne de base à 200 sans laquelle il ne pourrait être détecté.

Composition colorée des formes d'ondes complètes



Forme d'onde infrarouge moyenne

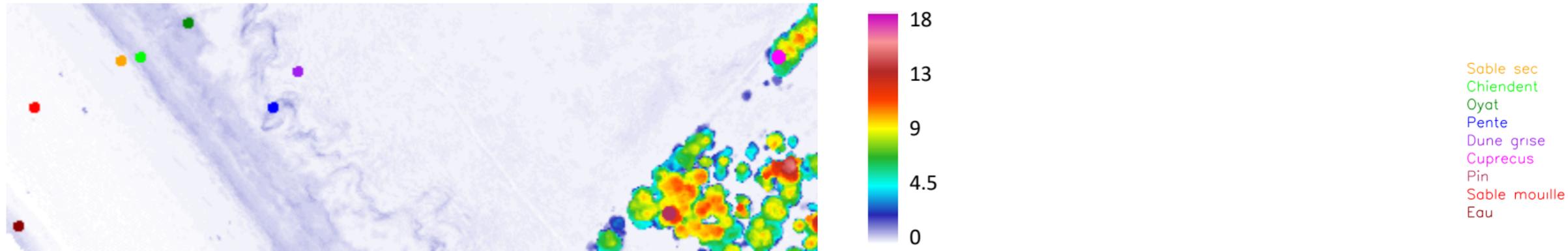
Forme d'onde verte infrarouge moyenne

Forme d'onde verte moyenne

Sable sec
Chiendent
Oyat
Pente
Dune grise
Cuprecus
Pin
Sable mouille
Eau

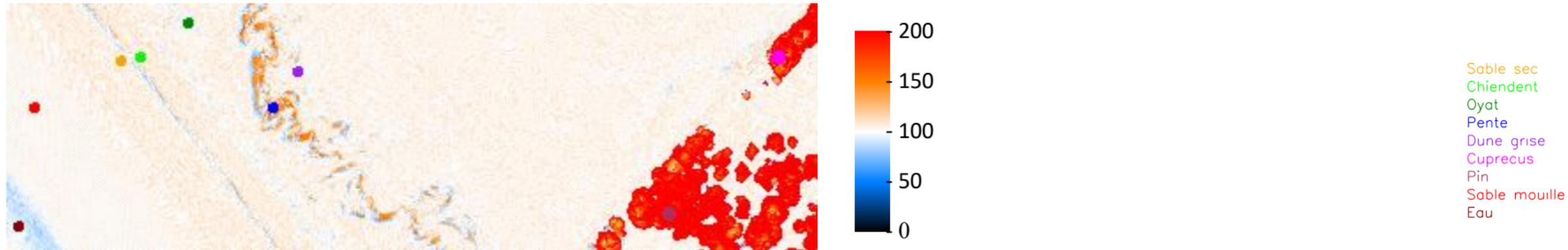
Comparaison des moyennes de formes d'ondes simples et combinées

MNS-MNT et largeur de forme d'onde complète verte infrarouge



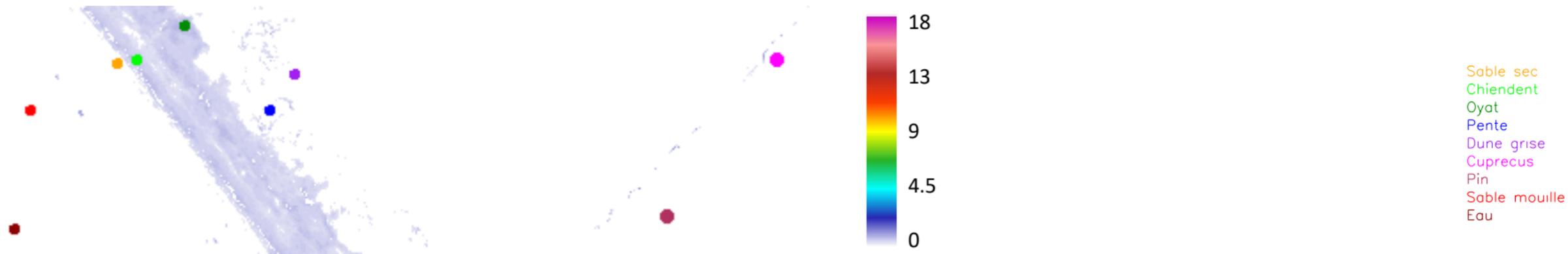
Un Modèle Numérique de Hauteur (MNH) peut être complété par la mesure de l'élargissement de la forme d'onde provoquée par une distribution de feuilles dressées pour atteindre au moins en partie l'épaisseur des oyats et du chiendent de cette dune. La zone de végétation basse vue en infrarouge est ici plus haute et ne forme qu'un seul ensemble du chiendent à l'oyat.

Somme forme d'onde complète infrarouge sous 1^{er} écho



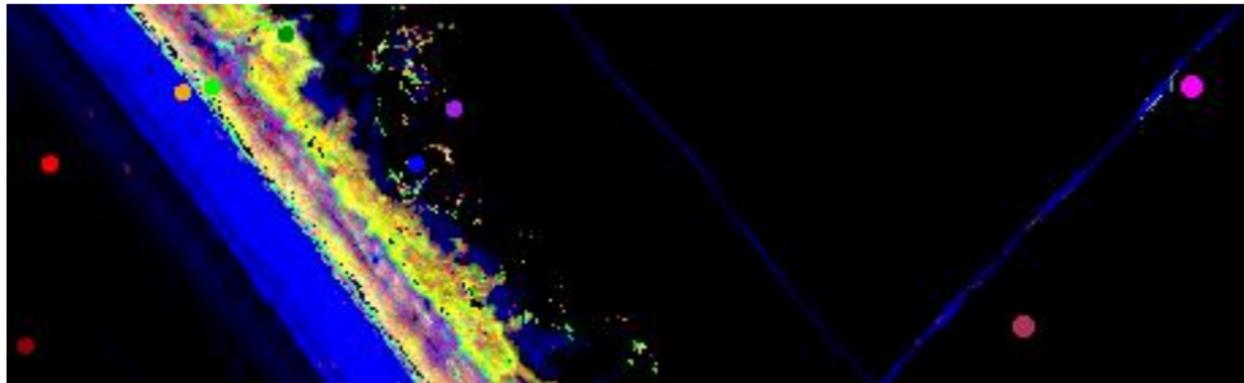
Les pentes élargissant les formes d'ondes différemment des graminées il est possible de les identifier pour les séparer des MNH de végétation basse (oyat inclus).

MNS-MNT et largeur de forme d'onde complète verte infrarouge



Ce MNH vert infrarouge est plus uniforme que le MNH infrarouge. Il n'y a plus de zone intermédiaire entre zone à oyat et chiendent. L'empreinte au sol du laser vert étant plus large et le contraste entre sable et végétation plus grand elle est plus sensible à la présence de brins d'herbes de chiendent dispersés et en mélange avec d'autres plantes comme le liseron.

Détection des oyats et du chiendent des dunes de sable par analyse de la déformation des formes d'ondes



Diffusion en-dessous du 1^{er} écho

Diffusion au-dessus 1^{er} écho

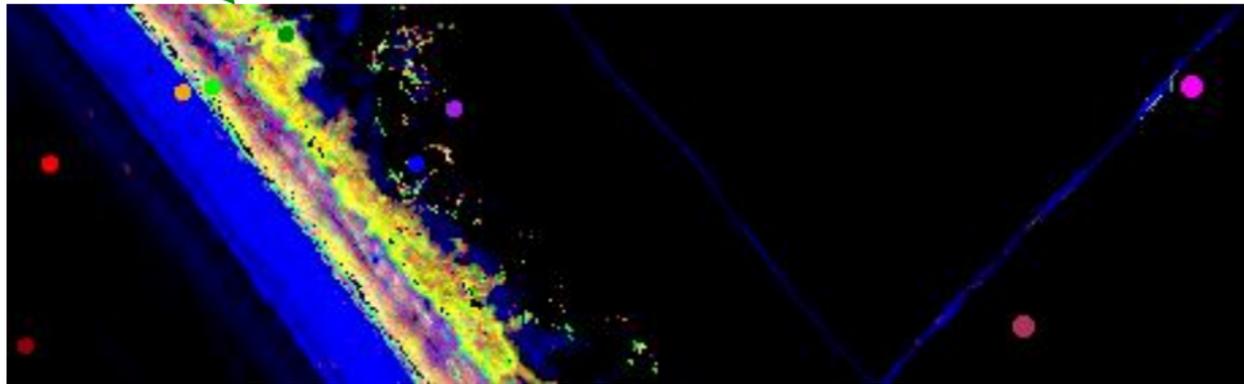
Intensité sable sec

Sable sec
Chiendent
Oyat
Pente
Dune grise
Cuprecus
Pin
Sable mouille
Eau

L'analyse de la forme d'onde combinée verte infrarouge permet de mettre en évidence cette zone intermédiaire à chiendent moins dense en mélange avec d'autres plantes entre chiendent plus dense au contact du haut de plage et oyat très dense au cœur de la dune. L'ajout de l'intensité du sable sec sur le canal bleu a pour but de bien visualiser cette disposition.

Thèse Giovanni Frati

oyat



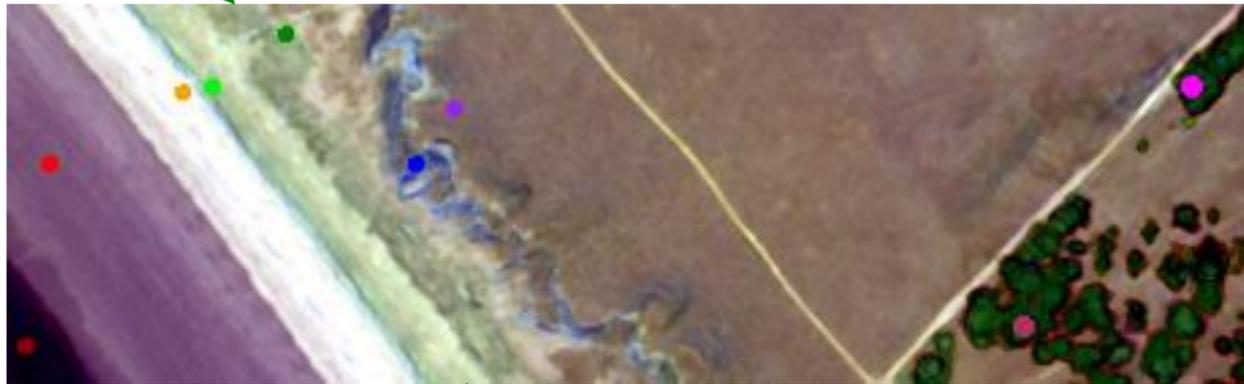
chiendent

Zone intermédiaire de chiendent avec liseron en mélange



Thèse Giovanni Frati

oyat

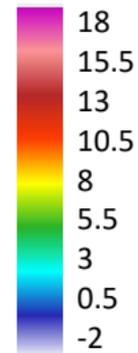
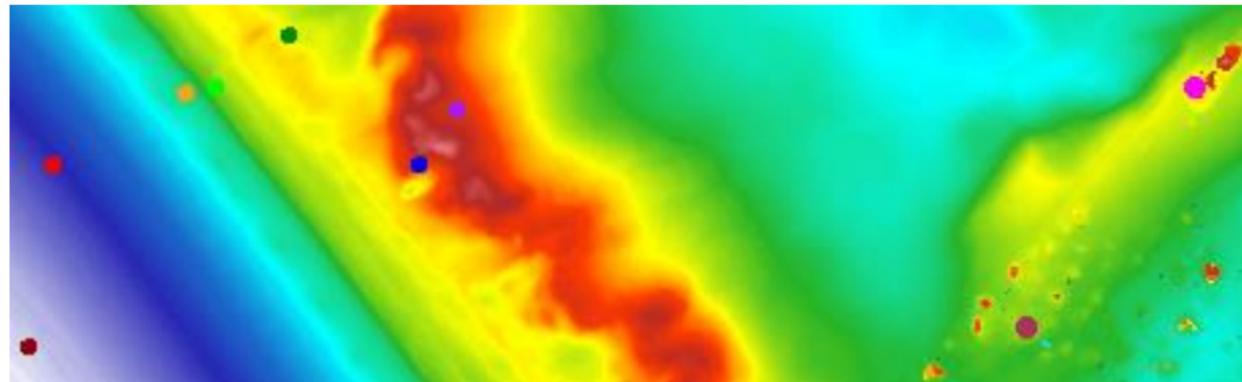


chiendent

Zone intermédiaire de chiendent avec liseron en mélange



Base forme d'onde verte et infrarouge



Sable sec
Chiendent
Oyat
Pente
Dune grise
Cuprecus
Pin
Sable mouille
Eau

En mer (coin sud ouest) ce Modèle Numérique de Bathymétrie (MNB) correspond à la base de la forme d'onde verte corrigée avec un indice d'eau de 1,34 sous la surface infrarouge de l'eau de mer. À terre ce MNB correspond à la base de la forme d'onde sous la frondaison des arbres. Si la forme d'onde est étalée vers le haut par les oyats leur pic n'est qu'à 20 cm du sol sableux.