Un tsunami a balayé les côtes des îles de Java et de Sumatra (Indonésie) des deux côtés du <u>Détroit de la Sonde</u> le samedi 22 décembre 2018 vers 21h30 (14h30 UTC), faisant de nombreuses victimes. Ce tsunami a été provoqué par un glissement de terrain d'une partie basse du cône volcanique et par l'effondrement du <u>volcan Krakatau</u> (également appelé Krakatao).

Les images satellitaires peuvent être largement utilisées pour le suivi des éruptions volcaniques, en particulier les images radar <u>Sentinel-1</u> pour lesquelles les nuages et les panaches sont presque transparents et très sensibles à la morphologie, aux variations de rugosité de la surface terrestre ou marine. Le temps de revisite est cours en fonction de l'utilisation des deux satellites S1A et S1B (même orbite avec déphasage de 6 jours), d'acquisitions d'orbite descendante et ascendante et d'une large bande de 240 km en mode IW par défaut.

La colonne de gauche des figures 1 et 2 comprend des images radar. L'instrument C-SAR à bord du Sentinel-1 est un radar actif; c'est-àdire qu'il émet la lumière micro-ondes le jour (orbite décroissante de la fig.1a) et la muit (orbite ascendante de la fig.1c). Cette illumination directionnelle traverse les nuages, révèle le relief particulièrement bien et illumine plus brillamment les faces exposées du cône volcanique. La colonne de droite monte les images <u>Sentinel-2</u> acquises par un instrument passi d'ans le domaine optique. Lorsqu'elle rést pas obstruée par les nuages, c'est donc la lumière du Soleil rétrodiffusée qui est mesurée dans 13 bandes spectrales allant du RVB aux infrarouges proche et moyen.

Tsunami Détroit de la Sonde entre Java et Sumatra

Sentinel-1 (radar) contre Sentinel-2 (optique)

2D_stack

Fig.1: Sentinel-1 radar (gauche) et Sentinel-2 optique (droite) avant le tsunami (a,b) et après (c,d). - Vue des scènes entières.



Fig.2: Sentinel-1 radar (gauche) et Sentinel-2 optique (droite) avant le tsunami (a,b) et après (c,d). - Vue de l'archipel.





Les images de la colonne de gauche de la figure 3 correspondent aux acquisitions radar de <u>Sentinel-1</u>, tandis que celles de la colonne de droite sont des images acquises dans le domaine optique par <u>Sentinel-2</u>. La première ligne (fig.3a et fig.3b) correspond aux observations antérieures au tsunami du 22 décembre 2018 et celles de la deuxième ligne (fig.3c et fig.3d) aux observations postérieures au tsunami.

Le relief révélé par les images radar permet de délimiter avec précision les contours des parties du cratère: principal et adventif (fig.3a) et le cratère très élargi après l'éruption (fig.3c). La composition colorée VV,VH,VV montre que la polarisation dominante est VH dans la partie végétalisée située à l'est de l'île alors que le magenta montre la prédominance de la polarisation VV, signe d'une faible dépolarisation sur une surface rugueuse de roches.

La composition colorée 12,8,4 utilisée en fig.3b implique le SWIR (infrarouge à ondes courtes) aussi appelé MI (moyen infrarouge), le NIR (proche infrarouge) et le rouge. La bande MIR (B12) révèle des points chauds dans le cratère et des points isolés au sud du cône du volcan.

La composition colorée 12,3,2 utilisée en fig.3d est celle qui minimise au mieux l'obstruction des nuages et de la fumée. Une fois encore, la bande MIR (B12) est utilisée pour localiser les points chauds autour du cratère.

Sentinel-1 contre Sentinel-2 Changement de la ligne de côte Elargissement du cratère

a
radar

b

b

optique

c

radar

b

optique

c

radar

b

optique

optique

Fig.3: Sentinel-1 radar (gauche) et Sentinel-2 optique (droite) avant le tsunami (a,b) et après (c,d). - Vue de l'île Anak Krakatau.



opernicus CCCSA



100 m

L'image 4.a a été acquise 8 heures après le tsunami. Dans la partie occidentale de l'île, on peut clairement constater la disparition d'une grande partie ouest de la côte (polygone blanc). Cette zone est probablement la partie supérieure du glissement de terrain qui a provoqué le tsunami.

La figure 4.b est floue. Un panache de haute densité, formant une masse sombre au-dessus du cratère, suggère que le signal a rencontré de grandes cibles, probablement des roches beaucoup plus grandes que la longueur d'onde radar de 5,5 cm de la bande C. Ce matériau, violemment projeté verticalement, peut avoir produit un effet Doppler restitué par les segments plus clairs (voir l'ellipse bleue perpendiculaire à la direction de l'impulsion étant représentée par une flèche dans la vignette). Les experts en traitement du signal radar pourront certainement estimer la vitesse d'éjection de cet effet Doppler.

Comme illustré en fig.4c et confirmé en fig.4d, un plus grand cratère d'explosion est maintenant présent du côté ouest, tandis que l'accumulation d'éjecta volcanique s'est étendue pour produire une accrétion de la côte dans sa partie orientale.

La figure 4d montre également l'émergence d'une île dans la partie inondée du nouveau cratère.

Fig.4: Série d'acquisitions Sentinel-1 (radar) après quelques heures et quelques jours après l'événement du tsunami.

Sentinel-1 (HR radar)

Haute résolution temporelle

Séries multi-dates des événements



HYP-066-Sentinels-F

La vue 3D de la scène radar <u>Sentinel-1</u> (fig.5b) montre la zone effondrée qui peut avoir causé le tsunami. La ligne de côte du volcan ne s'est pas déplacée, la forme semble invariante à l'exception de cette zone effondrée.

Cette vue 3D utilise le modèle de terrain numérique <u>SRTM</u> acquis en février 2000 et il est très probable que ce DEM soit désormais obsolète pour l'île «Anak Krakatau» («Enfant de Krakatau») apparue en 1927. L'image acquise le 22 décembre 2018 est la dernière de la présente étude qui utilise l'orthorectification VtWeb. Les images acquises après cette date sont simplement mappées sur l'ellipsoide WGS84. La différence entre ces deux techniques de géocodage est illustrée dans cette <u>animation</u>.

La scène radar datée du 22.12.2018 à 22:33:45 UTC a été acquise exactement 8 heures après le début du tsunami. L'image 5a « Avant » (en haut) est une moyenne des 4 scènes précédentes de Sentinel-1A avec un cycle de 12 jours (temps de revisite) en orbite décroissante. Les couleurs exploitent les deux polarisations VV et VH de l'instrument C SAR.

Sentinel-1 le 22.12.2018 8 heures après le tsunami

Effondrement du volcan

Selon le Professeur Jean Chorowicz, le panache observé le 22 décembre 2018 sur l'image radar (fig.6) n'est pas le panache atmosphérique lui-même car il n'apparait pas au-dessus de l'île de Panjang et les nuages de gouttelettes d'eau ou de microparticules sont presque transparents au radar. La surface de la mer est agitée sous le panache car les fragments de roches qui ont été projetés verticalement, tombent selon leur taille : les plus massifs (bombes de lave, gros fragments) sur le cône volcanique qu'ils construisent, d'autres (lapillis, particules de cendres), sont entraînés plus à l'est par le vent. Toutes ces particules tombent dans la mer où ils sont responsables de la rugosité de la surface de la mer et, par conséquent, d'une rétrodiffusion radar plus élevée (voir explications en fig.7). Plus à l'est, les microparticules ne tombent plus et l'effet de panache n'est pas visible sur l'image radar.

Selon ses effets sur la surface de la mer, ce panache est transporté vers l'est par les vents, comme le confirment les valeurs du modèle de vent de surface du <u>CEPMMT</u> s'appliquant à minuit le même jour. Le modèle des courants de surface de l'océan produit par le service maritime de Copernicus (CMEMS) est dirigé vers le nord-est et contribue lui aussi à la dérive de la surface de la mer

Sentinel-1 le 22.12.2018 8 heures après le tsunami

Fumées lourdes tombant dans la mer

Fig.6: Scène Sentinel-1 acquise le 22 décembre 2018, champ de vents (cyan) et courants océaniques de surface (rouge). vue_2D

Fig.7: Rugosité de la surface de la mer détectée par le signal radar.

L'image acquise le 22 décembre 2018 (8 heures après le tsunami) montre également des vagues concentriques à la surface de la mer.

Selon les Professeurs Jacques-Marie Bardintzeff et Jean Chorowicz, ces ondes sont une réponse au tsunami, mais elles sont concentriques au cratère, pas à la zone effondrée. Cela devrait signifier qu'ils ont été générés par l'activité volcanique plutôt que par des glissements de terrain. Les vagues distales ont été clairement déviées par les caps de la côte des îles environnantes.

Sentinel-1 le 22.12.2018 8 heures après le tsunami

Train de vagues concentriques

Fig.8: Scène Sentinel-1 acquise le 22 décembre 2018 - Composition colorée VV,VH,VV.

animation_2D

Fig.9: Scène Sentinel-1 acquise le 22 décembre 2018 - Polarisation VV (négatif).

animation_2D

powered by VisioTerra

Ce panache de fumée peut également être observé depuis le satellite Sentinel-5P et son instrument embarqué TROPOMI (TROPOspheric Monitoring Instrument) qui est un spectromètre à absorption de faible résolution spatiale (7,5 km) fonctionnant dans les domaines UV, visible, PIR et MIR. La fig.10 illustre la « Colonne totale de dioxyde de soufre (SO2) » de niveau 2A et fig.11 donne l'« Indice des osols par UV » observé un jour avant et jusqu'à cinq jours après le tsunami.

Les émissions de SO2 (fig.10) atteignent leur maximum dans les heures qui suivent le tsunami et la première éruption (23.12.2018 07:03 UTC). Ces émissions s'estompent puis un second panache se produit le 26.12.2018 constitué de trois groupes. Ces groupes correspondent probablement à des « bouffées » libérées par le volcan dans l'atmosphère de manière intermittente.

Les émissions d'aérosol (fig.11) ne connaissent pas ces deux phases. L'observation de la concentration des aérosols est continue jusqu'au 24 décembre, puis diminue jusqu'à disparaitre le 27 décembre 1818. Ce 27.12.2018, ne subsiste qu'un petit panache de SO2 qui disparaîtra complètement les jours suivants (voir l'animation).

Panache de fumées du volcan Sentinel-5P - Chimie de l'atmosphère SO2 - indice d'aérosols par UV

L'imagerie par satellite est particulièrement utile pour gérer les crises humanitaires. Plusieurs organisations ont mis en place des portails pour partager des données spatiales (liste non exhaustive):

- <u>CMEMS</u> La Commission européenne, par l'intermédiaire de son agence du CCR, a activé un «service de gestion des situations d'urgence» (voir <u>EMSR335</u>).
- <u>Nations Unies</u> Le 24 décembre 2018, une « <u>nouvelle de l'ONU</u> » souligne la situation humanitaire (voir fig.12).
- Charte des catastrophes activée le 23 décembre, une page a été ouverte avec le « <u>numéro</u> <u>d'activation 594</u> ».

Les extraits d'images radar Sentinel-1 (fig.13) montrent des zones intérieures (carré rouge sur la fig.12), inondées par le tsunami et apparaissant en noir. L'image de droite (fig.13b) a été acquise le 22.12.2018 à 22:33:45 UTC, soit 8 heures après le tsunami.

L'imagerie spatiale pour la protection civile et les organisations humanitaires

OCHA

Fig.12 Carte produite par OCHA (Office for the Coordination of Humanitarian Affairs) ou BCAH le 24 décembre 2018.

INDONESIA: Humanitarian Snapshot Sunda Strait Tsunami (as of 24 Dec 2018)

The boundaries and names shown and the designations used on this map do not imply official endorsement or acceptance by the United Nations. Creation date: 24 Dec 2018 Sources: OCHA, Indonesia Geospatial Agency (BIG), National Disaster Management Agency (BNPB), PVMBG, WorldPop Feedback: ocha-indonesia@un.org www.unocha.org http://humanitarianresponse.info/operations/indonesia www.relie/neb.

<u>VtWeb</u> permet de superposer en 2D ou 3D des données satellitaires, météorologiques, climatiques ou biogéophysiques telles que les cartes géologiques mises à disposition gratuitement par la « Commission de la Carte Géologique du Monde » (<u>CCGM</u>) en convention avec l'UNESCO.

La lithosphère océanique de la plaque indo-australienne s'enfonce à grande vitesse (-7 cm / an) dans la direction NNE sous la marge active du bloc de la Sonde (plaque Eurasienne). Il s'ensuit une fusion partielle en profondeur dans la dalle s'enfonçant qui produit des magmas responsables d'une ceinture volcanique (alignement des zones orange sur la figure 15), y compris le Krakatau. Les grandes failles de collision NE dans la plaque supérieure entre Java-Sumatra et Bornéo peuvent faciliter par endroits l'accès du magma à la surface.

Sentinel-1 au-dessus des cartes géologiques Cartographie d'un contexte tectonique complexe

Fig. 14: Scènes Sentinel-1 au-dessus de la carte géologique de l'Asie avec l'altimétrie d'un géoïde (x10000). vue 2D vue 3D

Fig. 15: Scènes Sentinel-1 au-dessus de la carte structurale du Pacifique Ouest. <u>vue 2D vue 3D</u>

