



Atelier disciplinaire

AD9

Exploration de la lithosphère depuis l'espace

Aurélien AUGIER, Education Nationale
Pierre FERRAND, Education Nationale, CNES

1 Préambule : paramétrage de QGIS 3 pour l'ajout de plugin pratiques

Parmi les avantages de google earth par rapport à QGIS est la possibilité de se « promener » sur la Terre entière en affichant les images satellites de la zone d'intérêt, mais aussi de faire des mesures rapides de distance. QGIS permet un tel affichage, mais qui n'est pas proposé par défaut. L'avantage fort de QGIS par rapport à google earth est la possibilité de choisir les fonds de cartes affichables et de les superposer. Certains plugin permettent aussi de faire des mesures de distance, mais aussi des profils topographiques, exportables vers un tableur.

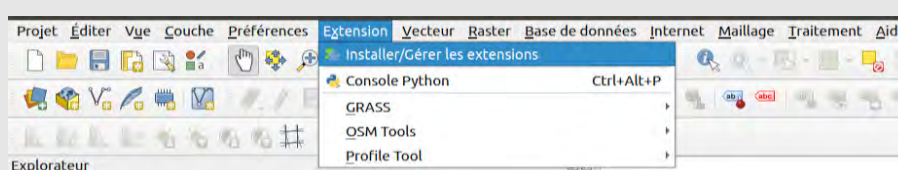
Toutes les procédures décrites sont valables avec QGIS 3 (3.16 dans le cadre des U.E. 2021)

1.1 Extension QuickMapServices : (affichage de différents fonds)

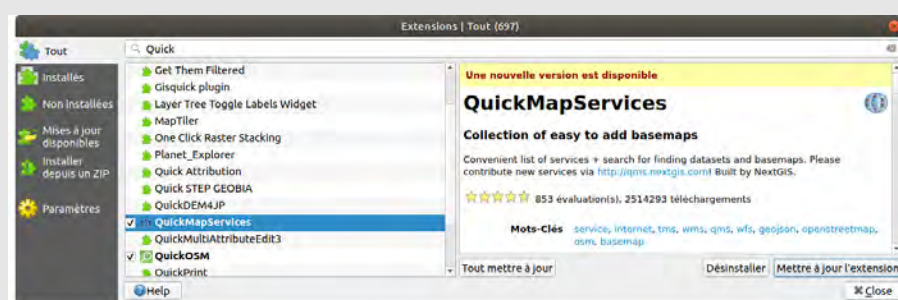
Cette extension permet d'afficher différents fonds de carte provenant de différents services.

Procédure : Installation de QuickMapServices

- Ouvrez le gestionnaire d'extensions (Extension → installer/gérer les extensions)



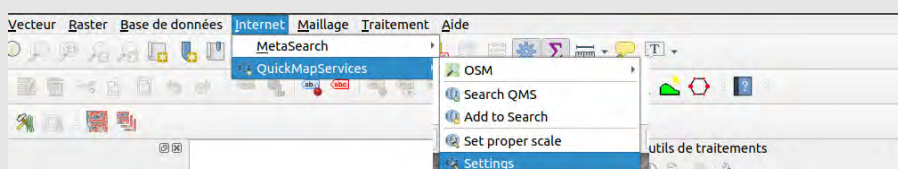
- Dans la barre de recherche, cliquez sur l'onglet « Tout », tapez « quickmap », puis dans le menu cochez « quickmap-service », puis cliquez sur le bouton « installer le plugin » si le plugin n'est pas déjà installé



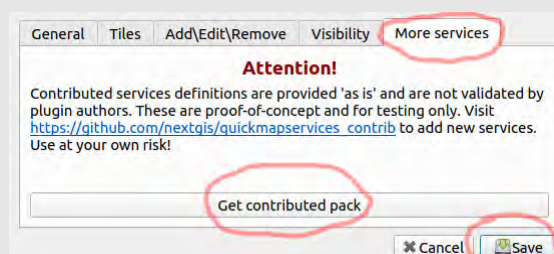
Procédure : Ajout des fonds de partenaires tiers

Le plugin est alors installé, et est accessible à partir de la barre de menu principal, dans l'onglet « internet », mais ne propose que quelques fonds de carte par défaut (OpenStreetMap). La suite de la procédure permet de mettre à jour la base de données des différents fonds carto :

- Allez dans internet → quickmapservices → settings

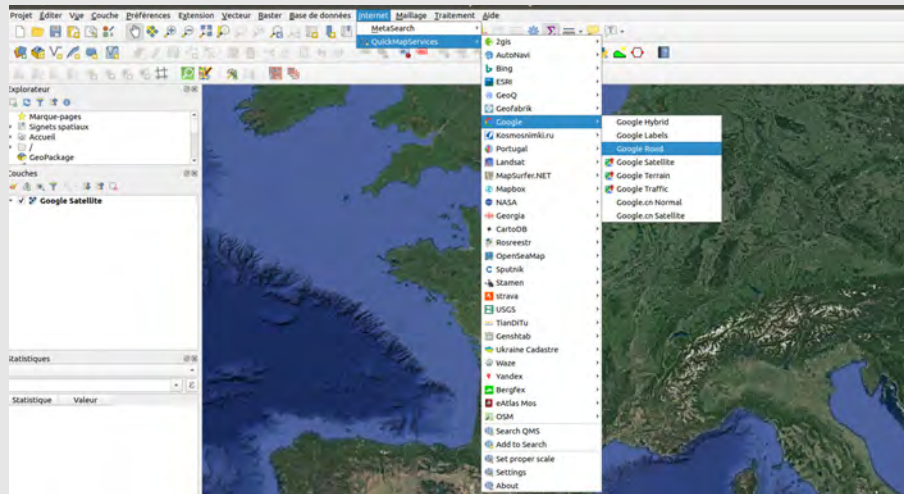


- Dans la fenêtre qui s'ouvre, choisissez l'onglet « More services » → cliquez sur le bouton « Get contributed pack » → cliquez sur le bouton « Save ».



Procédure : Insertion d'un fond carto google

- Allez dans internet → quickmapservices : maintenant différents fonds de carte sont disponibles, dont les images satellites de « google » et de « bing »

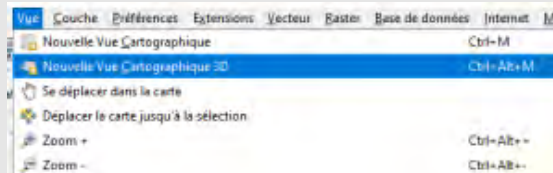


1.2 Faire des vues en 3D

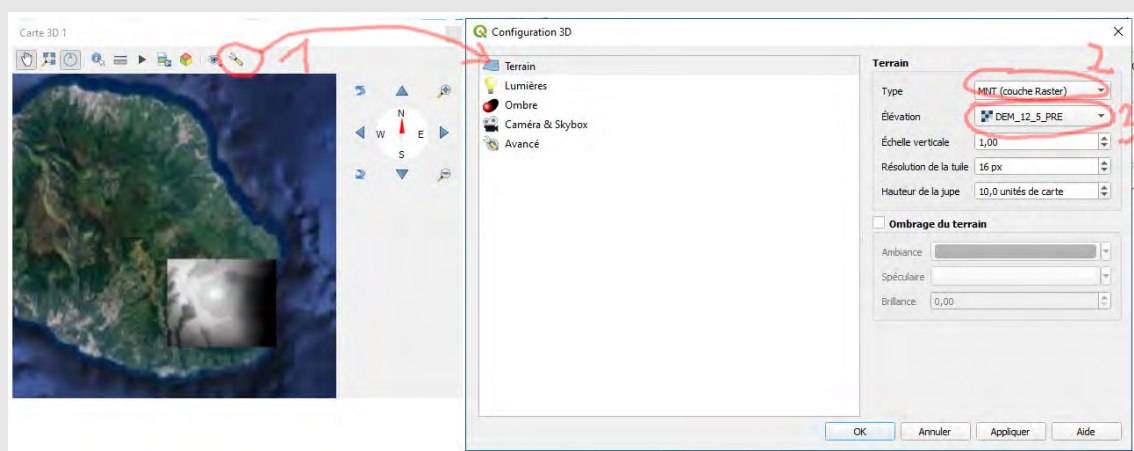
QGIS 3 permet aussi de faire des vues 3D à condition d'avoir chargé un modèle numérique de Terrain.

Procédure : Faire une vue 3D

- chargez un modèle numérique de Terrain (par exemple REUNION/DEM_12_5_PRE.tif)
- Dans le menu principal : « vue » → « nouvelle Vue Cartographique 3D »

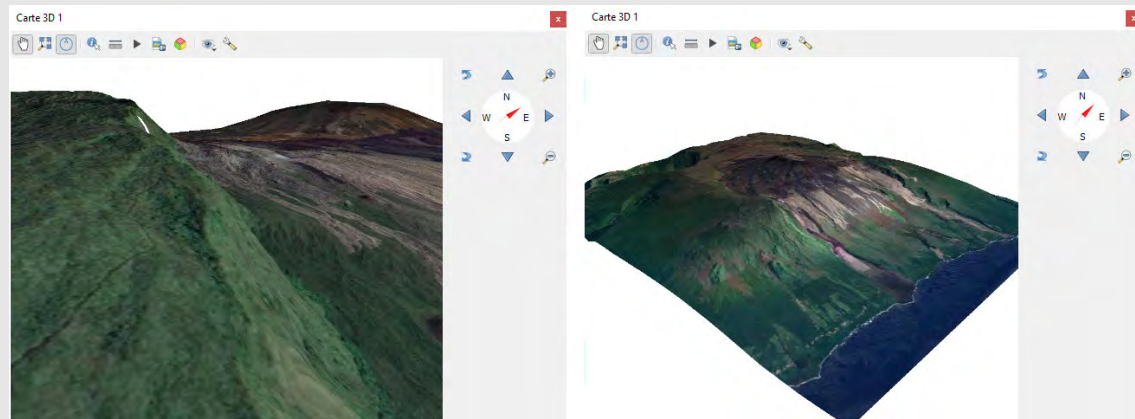


- Une nouvelle fenêtre s'ouvre. Cherchez l'icone « clé à molette », qui permettra de paramétrer le MNT à utiliser.
- Dans les propriétés de Terrain, menu « Type » choisissez « MNT (couche Raster) »
- Dans le menu « Élévation » choisissez le MNT à prendre en compte (DEM_12_5_PRE)
- Validez



Procédure : Faire une vue 3D

La vue 3D prend maintenant en compte le MNT choisi. Vous pouvez afficher ou masquer différentes couches dans l'interface de QGIS, l'affichage de la vue 3D sera mis à jour automatiquement.



2 Partie 1 : Analyse quantitative de l'éruption d'Avril 2007 du Piton de la Fournaise à partir de la comparaison de deux modèles numériques de terrain.

2.1 Contexte de l'étude : éruption d'avril 2007 au Piton de la Fournaise

2.1.1 Le Piton de la Fournaise dans son contexte géologique

L'île de la Réunion est localisée à l'Est de Madagascar dans l'Océan Indien. Elle est interprétée comme la manifestation actuelle du point chaud à l'origine des Trapps du Deccan (-65 Ma), comme semble l'indiquer l'alignement d'îles globalement Nord Sud partant de l'Inde jusqu'à la Réunion.

L'île de la Réunion repose sur un massif globalement conique d'environ 200 km de diamètre à sa base, reposant sur une lithosphère océanique à -4000 m de profondeur. Le point culminant de l'île est le Piton des neiges (environ 3000 m d'altitude), ce qui fait de ce volcan l'un des plus haut du monde (environ 7000 m)

Le Piton de la Fournaise est la partie active de l'île, et se situe dans la zone la plus à l'Est. C'est l'un des volcans les plus actifs du monde, puisqu'il rentre en éruption en moyenne plus d'une fois par an.

2.1.2 L'éruption d'avril 2007

Cette éruption est exceptionnelle à différents titres. C'est d'abord l'éruption qui a émis le plus gros volume de lave depuis que le volcan est étudié. Elle a ensuite été marquée par l'effondrement du cône central sur plus de 300 mètres de haut. Enfin, la déformation liée à cette éruption a été particulièrement importante, et, fait marquant, a duré plus d'un an après la fin de l'éruption. Enfin, le volcan est entré en phase de repos après cette éruption, il aura fallu attendre 3 ans pour que le volcan rentre de nouveau en éruption

L'éruption commence le 30 mars par l'émission d'une petite coulée de lave au sud-est de la base du cône central. Cette petite éruption dure environ 24 heures, et est suivie par l'ouverture d'une seconde fissure à plusieurs km à l'est, le 2 avril. Cette seconde phase durera environ 1 mois.

Le 6 avril commence l'effondrement du cône central. Cet effondrement est interprété comme la conséquence d'une dépression due au départ du magma de la chambre magmatique : le toit de la chambre s'effondre, et cet effondrement se propage jusqu'à la surface. Après l'effondrement, on observe des fontaines de lave d'environ 200 mètres de haut, ce qui est interprété comme la conséquence de l'effondrement : la colonne de roche appuyée sur la chambre magmatique et agit comme un piston, permettant d'augmenter la pression dans la chambre, un peu à l'image d'une seringue que l'on viderait brutalement.

L'éruption s'arrête le 30 avril.

Le scénario suivant a été proposé pour expliquer les différentes manifestations visibles de cette éruption, ainsi que différentes données de déformation.

2.2 Buts de l'activité

Les buts techniques de cette activité sont :

- importer des RASTER dans QGIS et les manipuler (ombrages, tables de couleurs incrustation)
- importer des données vectorielles et comprendre les données qu'elles embarquent
- faire des opérations sur des MNT
- extraire des statistiques de zones d'un RASTER à partir de polygones d'une couche vectorielles

Les buts scientifiques et pédagogiques de cette activité sont :

- valider la cohérence du mécanisme de « piston » lors de l'effondrement de 2007
- retrouver les arguments ayant permis d'établir le scénario de l'éruption d'avril 2007 à partir de données de déformation.

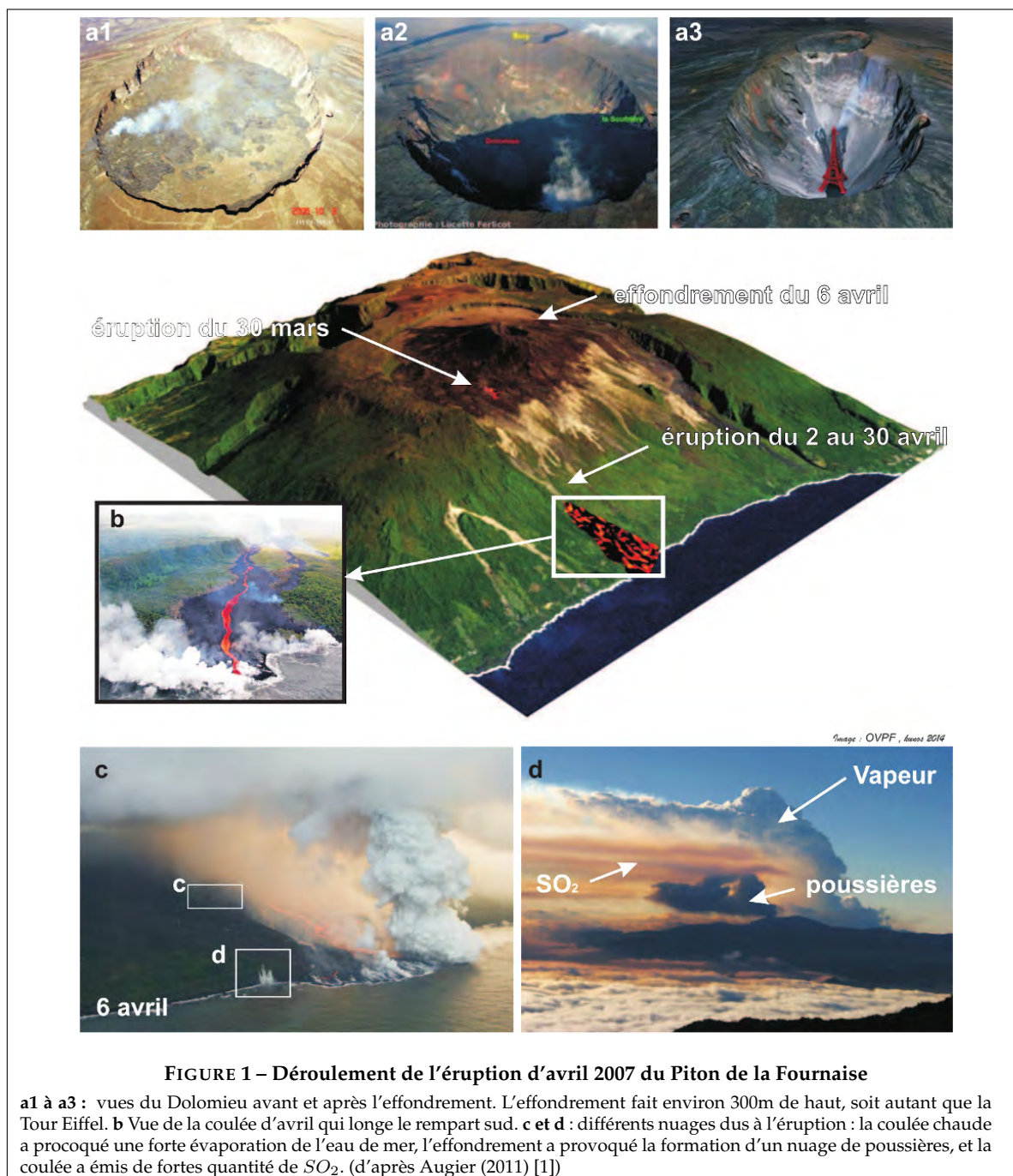


FIGURE 1 – Déroulement de l'éruption d'avril 2007 du Piton de la Fournaise

a1 à a3 : vues du Dolomieu avant et après l'effondrement. L'effondrement fait environ 300m de haut, soit autant que la Tour Eiffel. **b** Vue de la coulée d'avril qui longe le rempart sud. **c et d :** différents nuages dus à l'éruption : la coulée chaude a provoqué une forte évaporation de l'eau de mer, l'effondrement a provoqué la formation d'un nuage de poussières, et la coulée a émis de fortes quantités de SO_2 . (d'après Augier (2011) [1])

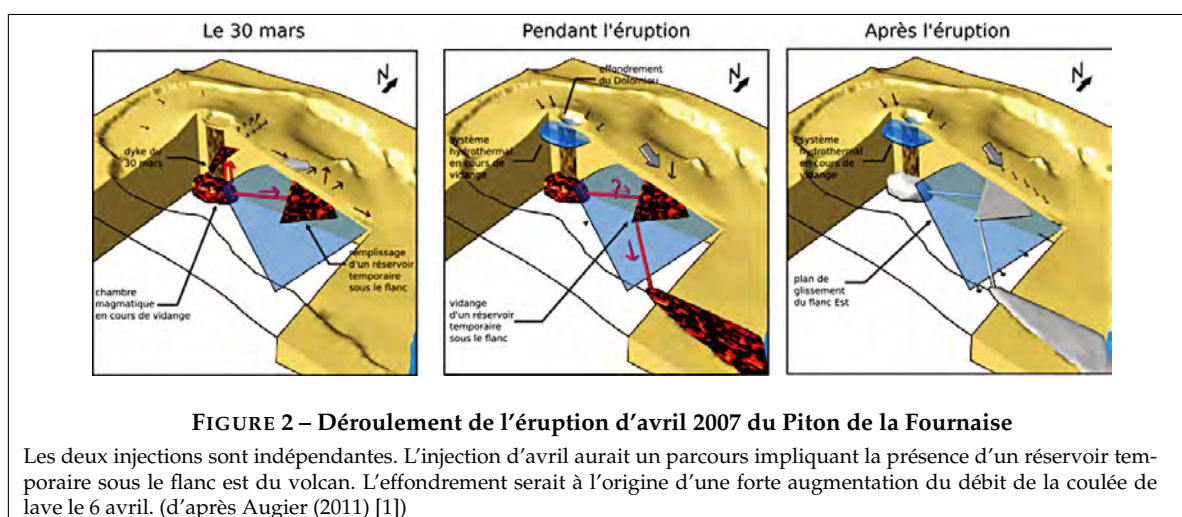


FIGURE 2 – Déroulement de l'éruption d'avril 2007 du Piton de la Fournaise

Les deux injections sont indépendantes. L'injection d'avril aurait un parcours impliquant la présence d'un réservoir temporaire sous le flanc est du volcan. L'effondrement serait à l'origine d'une forte augmentation du débit de la coulée de lave le 6 avril. (d'après Augier (2011) [1])

2.3 Étape 1 : Chargement des données

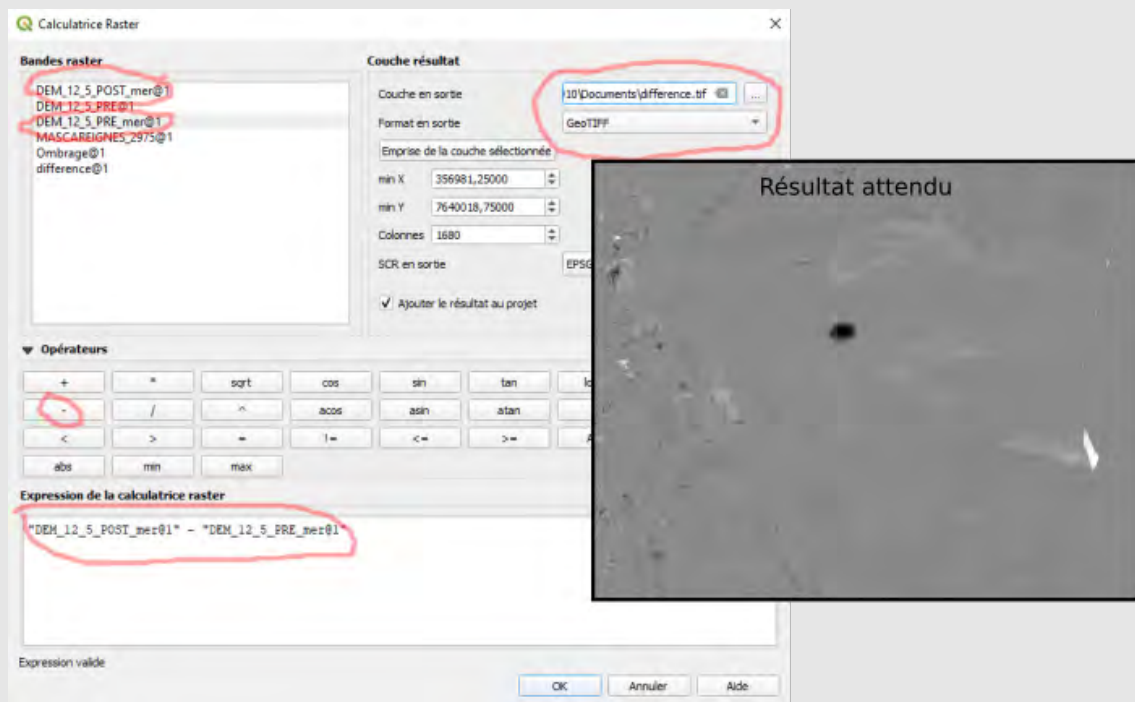
Procédure : Chargement des données

- Ouvrez un nouveau projet, puis chargez le fond google earth (internet → QuickMapService → google → google satellite). Ce fond permettra de se repérer
- À partir du répertoire contenant les données du TP (Documents → SVT → AD9 → REUNION) chargez les deux modèles numériques de terrain :
 - DEM_12_5_PRE_mer.tif (MNT datant d'avant 1998) (IGN (1998 ?) [7])
 - DEM_12_5_POST_mer.tif (MNT datant de 2010) (IGN (2010) [8])
- À partir du répertoire de travail, chargez le fichier vecteur « avril_2007.shp » contenant le contour de l'effondrement et de la coulée de lave d'avril 2007

2.4 Étape 2 : Calcul de la différence entre 2 MNT

Procédure : Calcul de la différence entre 2 Raster

- Dans le menu principal, aller dans « Raster » → « calculatrice raster »
- Faites l'opération « DEM_12_5_POST_mer - DEM_12_5_PRE_mer » :
 - double-cliquer sur « DEM_12_5_PRE_mer »
 - double-cliquer sur le bouton « - »
 - double-cliquer sur « DEM_12_5_POST_mer »
- Définissez un nom de fichier (différence dans mon cas) pour le résultat du calcul (couche en sortie). Ce fichier doit être enregistré dans un répertoire dans lequel vous avez les droits en écriture (Document ou Téléchargement)



Aide en cas de problème : Fichier de secours

En cas de problème le résultat est ici : REUNION/DATA_FAITES/1_REUNION_ETAPE_2.qgz

2.5 Étape 3 : Mise en forme esthétique du résultat du calcul

2.5.1 Colorisation avec une table de couleurs à 2 pôles

Procédure : Coloriser un raster

- Dans la liste des couches : double cliquer sur le nom de la couche de votre résultat de calcul (différence dans mon cas)
- Dans la fenêtre de propriété de couche qui vient de s'ouvrir, cliquez sur l'onglet « Symbolologie ». C'est cette fenêtre qui permet d'ajuster les paramètres d'affichage
- Dans « type de rendu » choisissez « Pseudo-couleur à bande unique ». Ce mode de rendu permettra d'attribuer une couleur à chaque valeur des pixels
- Choisissez une table de couleur à 2 pôles « palette de couleurs → RdBu » (j'aime bien un pôle bleu pour les valeurs négatives et un pôle rouge pour les valeurs positives, il est aussi possible de se créer ses propres palettes.)
- Centrez les bornes min et max, pour faire en sorte que la couleur blanche corresponde au 0. Dans notre cas, la différence d'altitude maximale de l'effondrement correspond à -250 mètres. Cependant, pour faire ressortir les coulées de lave, il vaut mieux choisir des bornes plus faibles, par exemple Min : -30 ; max 30. N'hésitez pas à tester plusieurs couples de valeurs pour voir les conséquences sur le rendu.
- Inverser la table de couleur si besoin, pour que les valeurs positives apparaissent en rouge (palette de couleurs → inverser la palette des couleurs)
- Validez

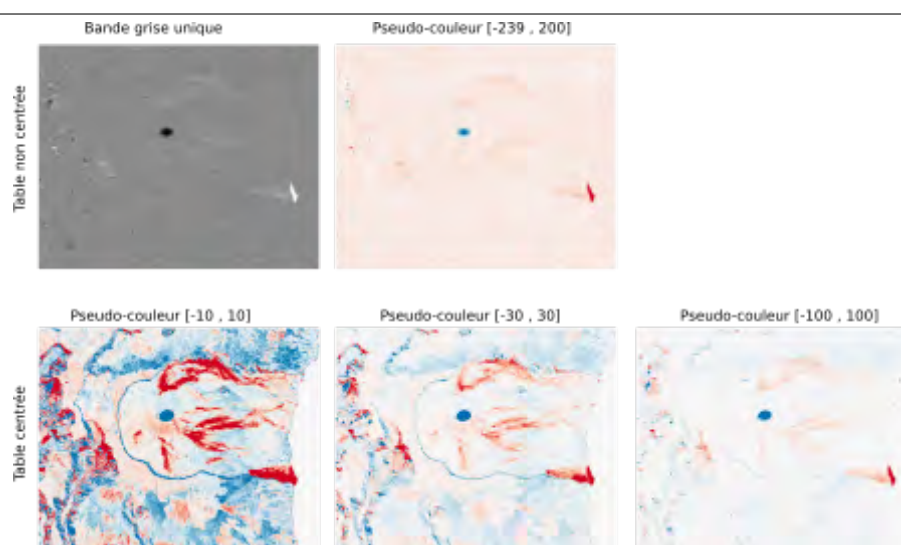
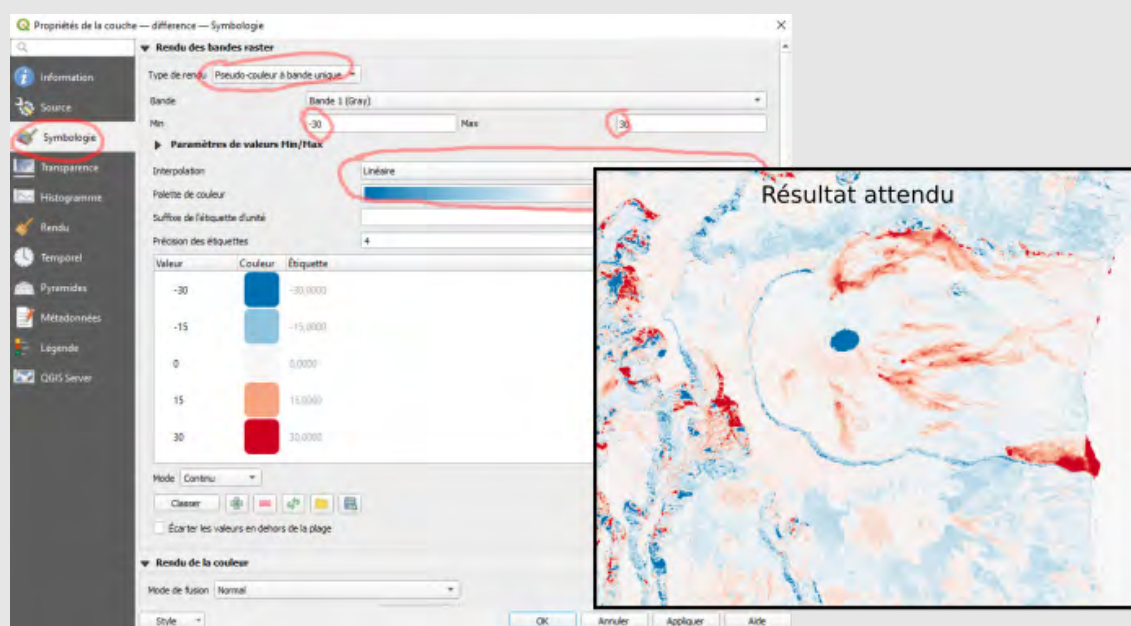


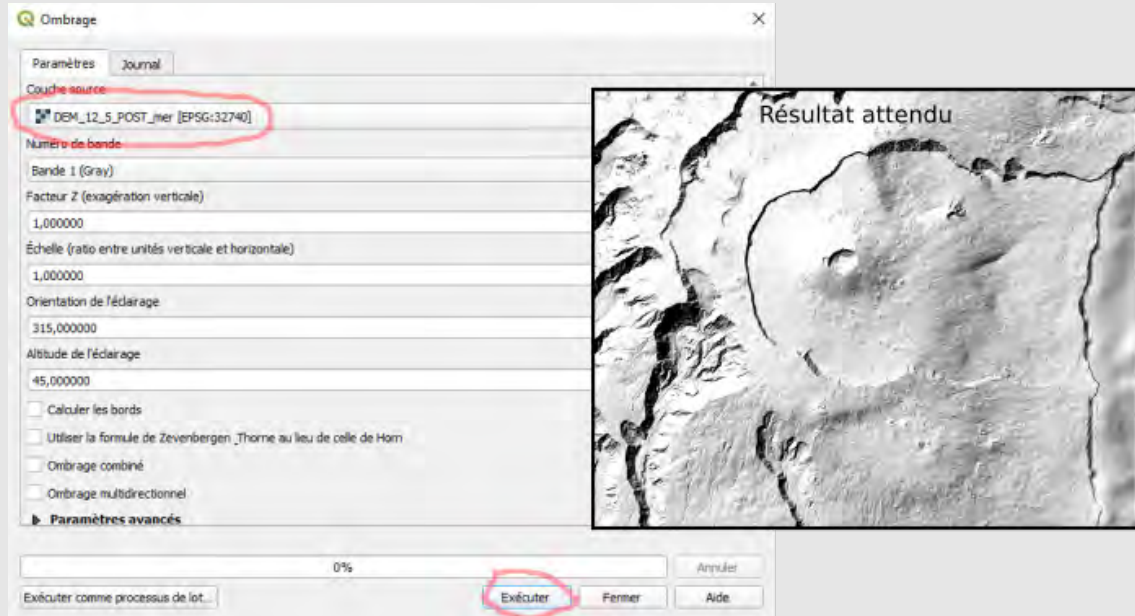
FIGURE 3 – Quelques exemples de colorisation du raster

Les différentes images représente la différence, colorisée de plusieurs manières. En haut : tables de couleur non centrées, et bornées par le minimum et le maximum des pixels de l'image. En bas : tables de couleur centrées sur 0, mais avec différentes valeurs pour les extrêmes. Il faut choisir un compromis entre discrimination des valeurs fortes et faibles.

2.5.2 Création d'un ombrage

Procédure : Création d'un ombrage

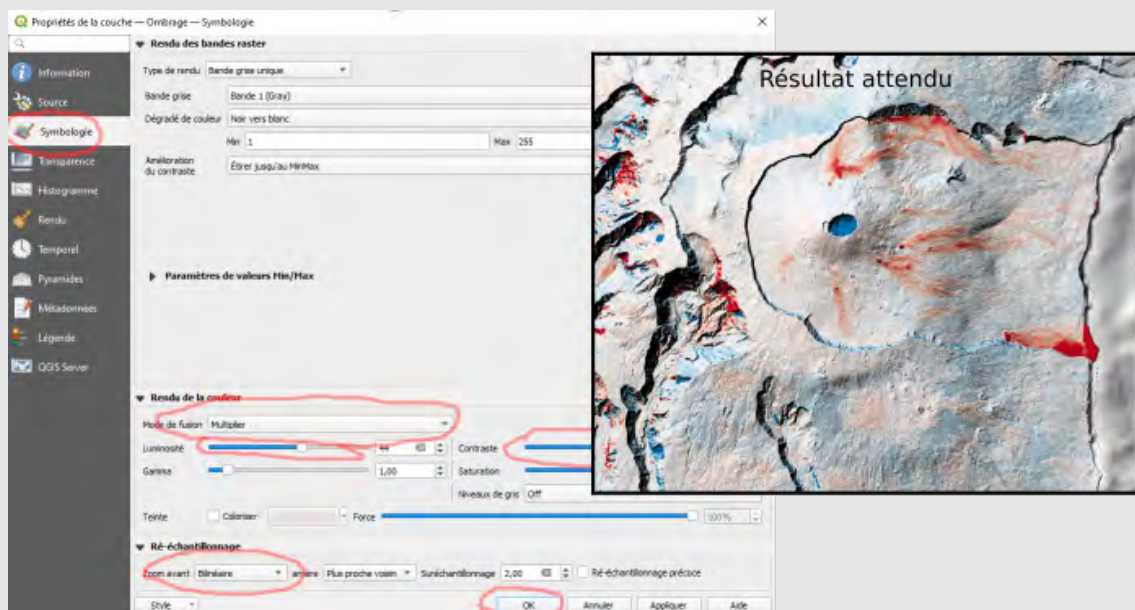
- Dans le menu principal, allez dans « Raster » → « Analyse » → « Ombrage »
- Dans la fenêtre qui s'ouvre, vérifiez que « DEM_12_5_POST_mer » est sélectionné dans le menu déroulant « Couche source », sélectionnez le si ce n'est pas le cas.
- Laissez les autres paramètres par défaut, puis validez
- L'ombrage apparaît dans la liste des couches, faites le monter au premier plan si ce n'est pas fait de manière automatique.



2.5.3 Incrustation d'un ombrage

Procédure : Incrustation d'un ombrage

- Dans la liste des couches : double cliquer sur le nom de la couche de l'ombrage (Ombrage dans mon cas)
- Dans l'onglet « Symbolologie », encart « rendu de la couleur », cherchez le menu déroulant « mode de fusion » et choisissez « multiplier »
- Jouez un peu avec les paramètres luminosité et contraste
- Dans l'encart « Ré-échantillonnage », menu « zoom avant » choisissez « Bilinéaire » : c'est un mode de lissage de l'affichage, qui permet de lisser les pixels lors d'un zoom avant important
- Validez



L'ombrage apparaît au premier plan et cache les autres couches. Souvent, on utilise la transparence pour faire apparaître les couches du dessous, mais la transparence provoque un « ternissement » des couleurs. Un autre mode permet d'assombrir ou éclaircir les couleurs en fonction de l'aspect clair ou sombre de l'ombrage : en considérant que le blanc vaut 1, le noir 0 et le gris est intermédiaire, il suffit de multiplier les couleurs par la valeur de l'ombrage pour donner un rendu plus esthétique

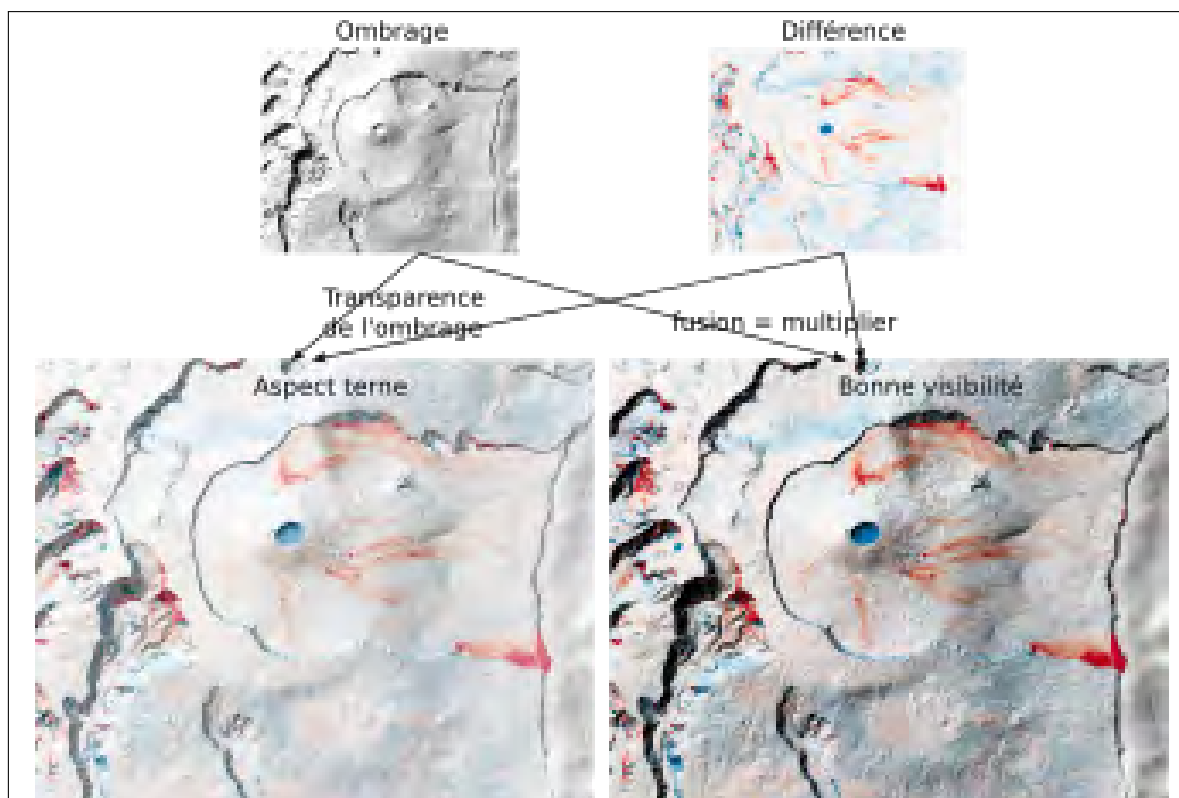


FIGURE 4 – Transparence VS multiplication

Les images montrent l'effet de la transparence et de l'incrustation par multiplication. Je trouve personnellement que la multiplication a un rendu qui "claque" mieux, et qui ne ternit pas l'ensemble.

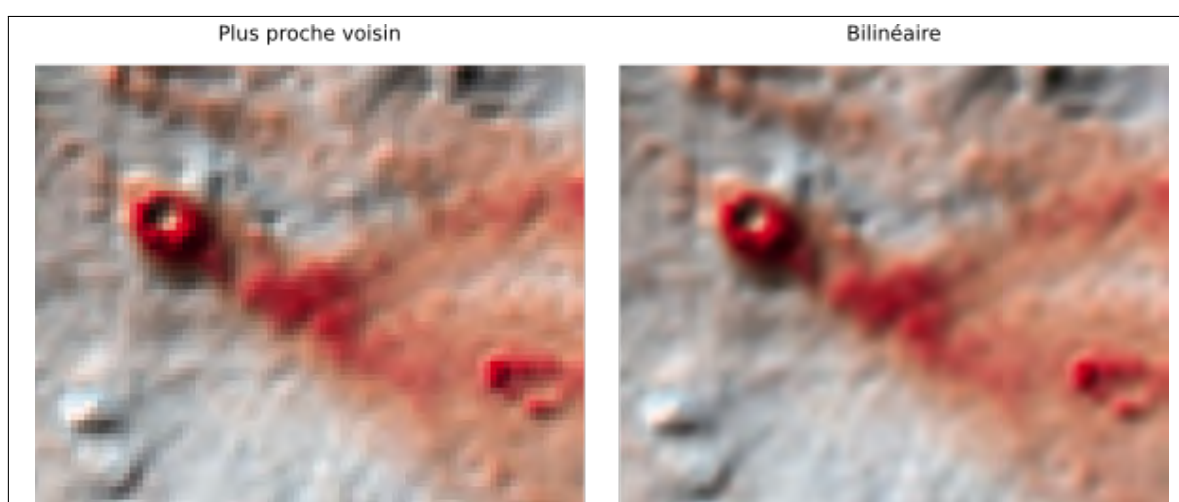


FIGURE 5 – Pas d'interpolation (proche voisin) VS interpolation

Les images montrent l'effet de l'interpolation lors d'un zoom fort : au lieu d'affecter aux points de l'écran la valeur du pixel le plus proche, l'algorithme permet d'interpoler les valeurs à chaque "ampoule" de l'écran. Le rendu est donc plus lisse, et les pixels ne sont plus visibles.

Aide en cas de problème : Fichier de secours

En cas de problème le résultat est ici : REUNION/DATA_FAITES/1_REUNION_ETAPE_3.qgz

2.6 Étape 4 : Quantification du volume de l'effondrement et du volume de lave émis

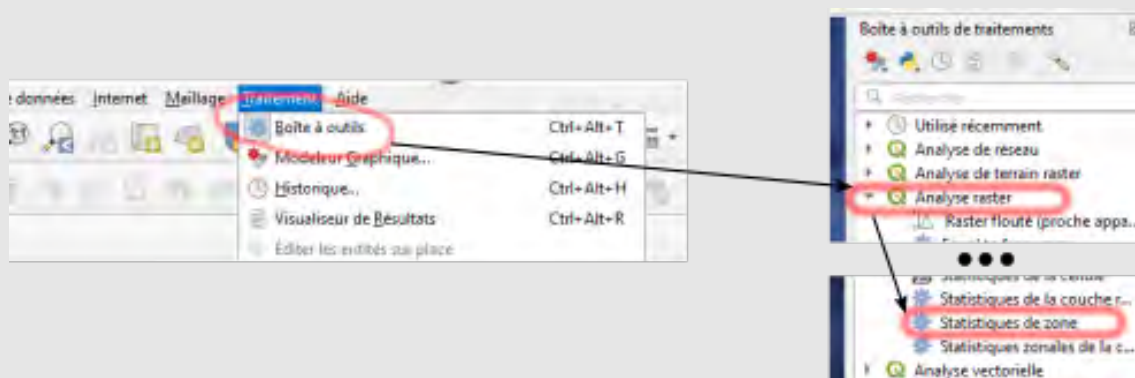
On cherche maintenant à quantifier le volume total de l'effondrement et le volume total de la coulée d'Avril 2007. Pour ça, on dispose des contours des deux objets (effondrement et coulée), ainsi que la valeur de la différence des deux modèles numériques de terrain. Comme la différence d'altitude est exprimée en mètres, et comme la résolution de l'image est de 12,5 mètres, il est possible d'accéder au volume en sélectionnant les pixels correspondant à chaque zone, puis en sommant la valeur des pixels sélectionnés (différence de hauteur totale intégrée sur la zone d'intérêt), et enfin en multipliant par la surface d'un pixel (obtention d'un volume).

QGIS propose un outil permettant de faire des statistiques sur des zones d'un Raster définies par des objets vectoriels de type polygone. Il permet d'en récupérer certaines valeurs, dont la somme.

2.6.1 Réalisation du calcul

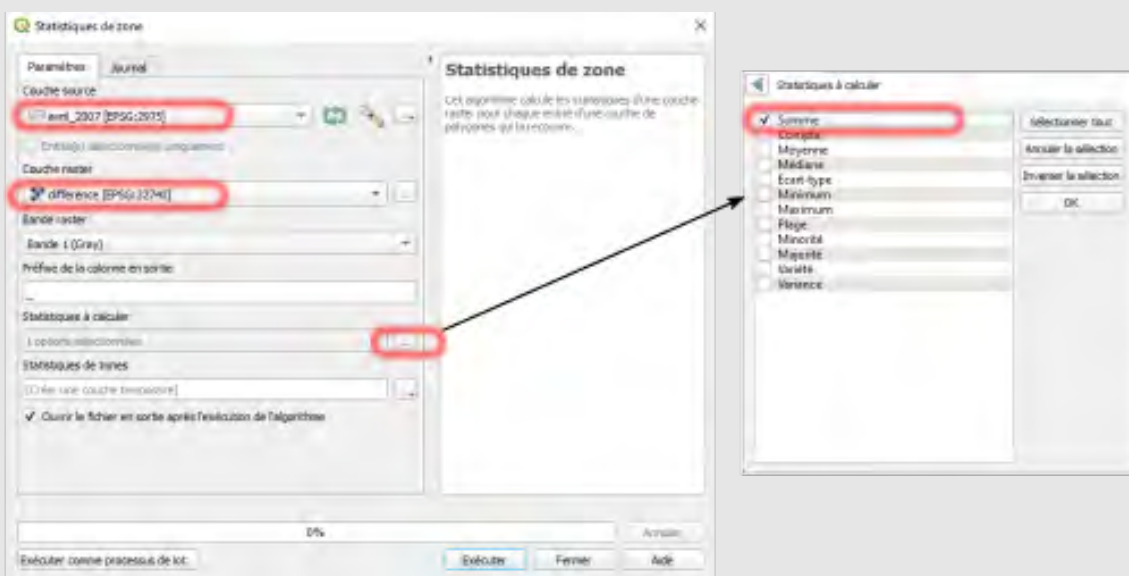
Procédure : Calcul d'une statistique de zone

- Dans le menu principal cherchez l'onglet « Traitement », puis cliquez sur « Boîte à outils »
- Dans la boîte à outils normalement apparue à droite de l'écran, cherchez « Analyse raster » → Statistique de zone



Une fenêtre s'ouvre permettant de paramétrer les calculs à faire, en choisissant le raster à analyser, et le fichier vectoriel délimitant les zones d'intérêt.

- Dans « Couche source » choisissez « avril_2007 [EPSG:2675] », qui contient les deux contours des zones d'intérêt (d'après OVPF (2021) [9])
- Dans « couche raster » choisissez le raster correspondant à la différence des deux MNT (dans mon cas : « difference »)
- Dans « statistique à calculer » cochez « somme » (ou tout ce que vous voulez calculer)
- Exécutez le calcul.
- Le calcul sera fait pour chaque polygone du fichier « couche source »



2.6.2 Accès aux résultats du calcul

Une couche de polygones peut être vue comme une base de données, ou un tableau à double entrée : elle contient plusieurs polygones, ayant chacun un nombre de propriétés dont les valeurs leur sont propres. Ces valeurs peuvent être manipulées et affichées de différentes manières.

Les calculs réalisés avant permettent de rajouter un champ au tableau de la base de données des polygones de la couche vectorielle. On peut accéder à ce tableau, et donc aux valeurs calculées, de cette manière :

Procédure : Table d'attributs d'une couche vecteur

- clic droit sur la couche vectorielle « avril_2007 » (ou sur « statistique de zone » si le logiciel a rajouté une copie de la couche de départ contenant les résultats)
- clic sur « ouvrir la table d'attributs »
- Le champ correspondant à la somme est alors visible, les valeurs pour chaque polygone sont alors récupérables. La valeur n'est pas convertie en m³, et correspond seulement à la somme.

Statistiques de zones — Total des entités: 2, Filtrées: 2

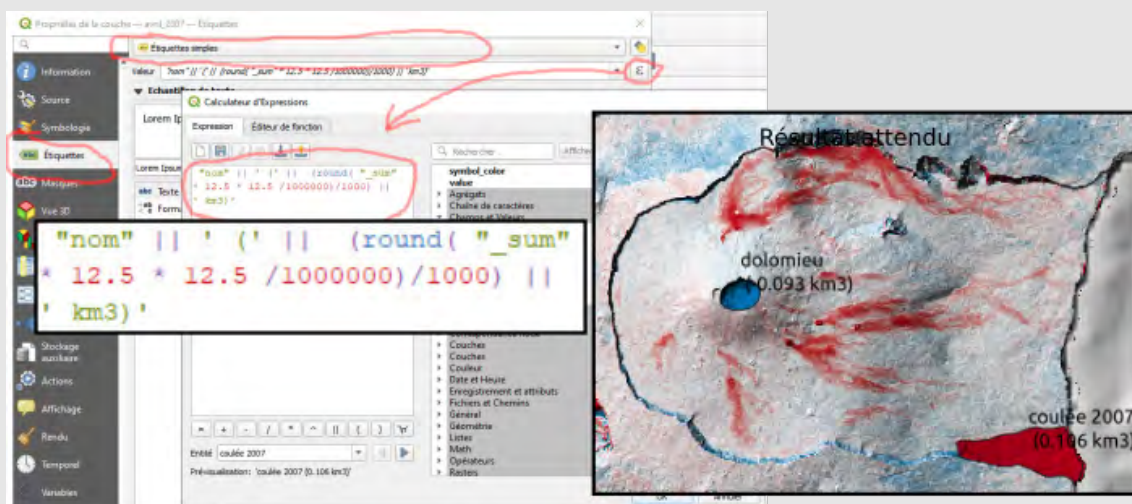
id	nom	_sum
1	coulée 2007	679824,4727396...
2	dolomieu	-594291,105712...

2.6.3 Mise en forme des résultats du calcul

Il est possible d'afficher les résultats du calcul en tant que paramètres graphiques. On va affecter à chaque polygone de la couche vecteur, une étiquette qui donnera le volume en km³ de la différence des deux MNT sur la zone couverte par chaque polygone

Procédure : Table d'attributs d'une couche vecteur

- double-clic sur la couche vecteur contenant le résultat du calcul
- « symbologie » → « étiquette » → « étiquette simple »
- clic sur le logo « epsilon » : permet de formater le texte à afficher
- remplir la formule tel que présenté sur l'image : le calcul présenté permet de convertir les valeurs du champs « _sum » en km³ et d'ajouter le nom du polygone (pour obtenir le volume, la somme est multipliée par la surface d'un pixel (12,5 x 12,5) puis arrondie et convertie en km³ pour en faciliter la lecture)



Aide en cas de problème : Fichier de secours

En cas de problème le résultat est ici : REUNION/DATA_FAITES/1_REUNION_ETAPE_4.qgz

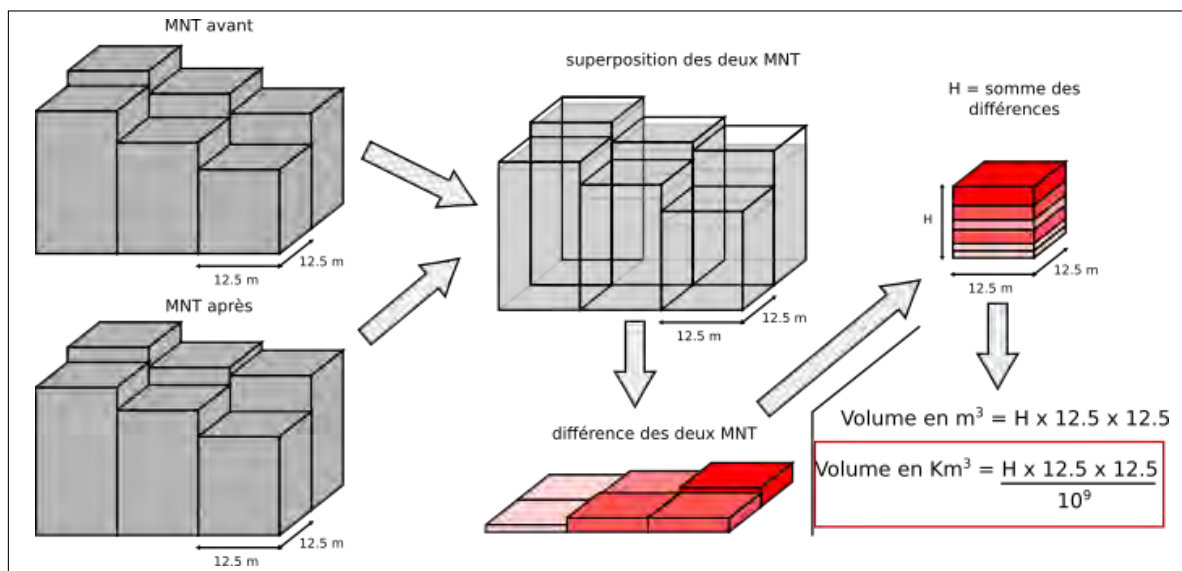


FIGURE 6 – Explication du calcul

La somme de la différence est homogène à une hauteur. On connaît la taille d'un pixel (résolution des MNT à 12.5 m), le volume est donc accessible en multipliant la hauteur par la surface d'un pixel. Dans la formule donnée pour les étiquettes, le round permet de faire un arrondi.

2.6.4 Analyse

On observe que les volumes impliqués dans la coulée d'avril 2007 et pour l'effondrement sont similaires (ordre de grandeur équivalent), ce qui n'est pas incompatible avec l'hypothèse du « piston » appuyant sur la chambre magmatique.

La différence de volume trouvée peut s'expliquer de différentes manières :

- Un volume de lave important s'est retrouvé sous l'eau (hors plateforme formée en 2007) et ne peut pas être cartographié de cette manière, ce qui aurait tendance à augmenter la différence entre les deux valeurs.
- De même tout le magma n'a pas été émis en surface, une partie du magma est probablement resté sous forme de filons dans l'édifice (dykes, sills ... provoquant une croissance endogène du volcan)
- L'effondrement s'est accompagné d'une fragmentation des roches, la même masse de roche se trouvant donc dans un volume plus grand, l'effondrement étant alors sous estimé.
- Enfin, d'autres coulées se sont mises en place après 2007 et avant 2010 dans le cratère central, qui commence donc à être de nouveau rempli, ce qui entraîne une sous-estimation du volume de l'effondrement.

2.7 Analyse de la déformation au cours de l'éruption et hypothèses sur le trajet du magma

La déformation du volcan a été suivie par interférométrie RADAR (cette méthode sera expliquée en partie 2, d'après Augier (2011) [1]) et par GPS, ce qui a permis d'obtenir 4 cartes de déformation différentes et des données temporelles :

- Les déplacements verticaux au cours de l'éruption (DEFORMATION_SYN_HB.tif)
- Les déplacements est/ouest au cours de l'éruption (DEFORMATION_SYN_EO.tif)
- Les déplacements verticaux après l'éruption (DEFORMATION_POST_HB.tif)
- Les déplacements est/ouest après l'éruption (DEFORMATION_POST_EO.tif)
- Les déplacements GPS durant l'éruption (DEFORMATION_GPS.tif)

Ces cartes sont intégrables dans QGIS et sont disponibles dans le répertoire de travail. Les valeurs indiquent la quantité de déplacement dans l'axe donné (valeurs négatives pour les déplacements vers le bas et vers l'ouest, valeurs positives pour les déplacements vers le haut ou vers l'est)

Exercice : Colorisation des cartes de déformation

En suivant la même procédure que pour la colorisation de la différence des MNT, intégrez et colorisez les cartes avec une table de couleur centrée.

Aide en cas de problème : Fichier de secours

Pour aller plus vite, ouvrez le fichier REUNION/DATA_FAITES/1_REUNION_ETAPE_5.qgz qui donne les cartes déjà colorisées

Exercice : Caractérisation de la déformation durant l'éruption

À partir des données de déformation concernant l'éruption (GPS et cartes ou figure 8) :

- montrez qu'il existe probablement un réservoir temporaire qui s'est rempli sous le flanc est
- montrez que l'éruption de mars et celle d'avril sont probablement issues de deux injections différentes
- montrez que le flanc est s'est déstabilisé et proposez une cause à cette déstabilisation.

Exercice : Caractérisation de la déformation après l'éruption

À partir des données de déformation de la période post-éruptive (Cartes ou figure 8) :

- montrez que la déstabilisation du flanc se poursuit et déterminez la direction du glissement
- montrez que le cône central « dégonfle »

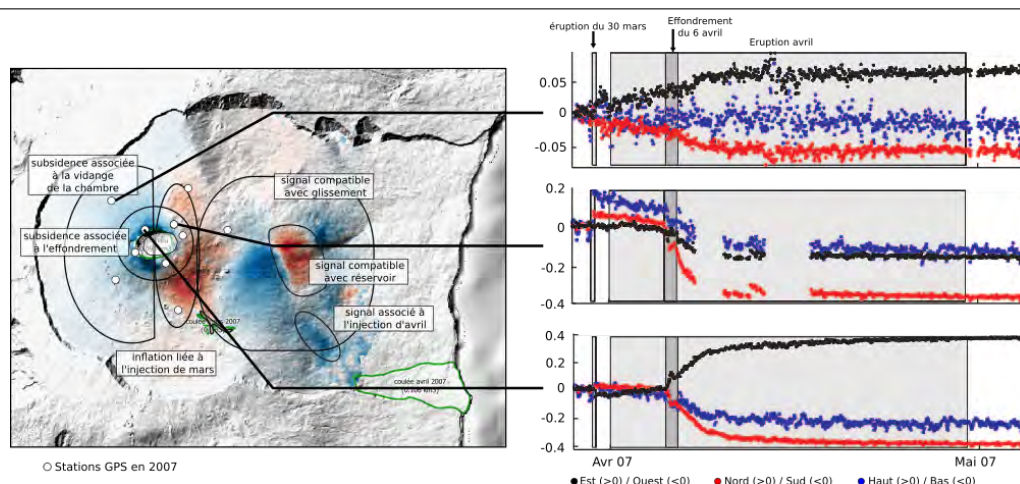


FIGURE 7 – Interprétation des données de déformation

Ces données sont celles qui ont permis d'établir le scénario présenté à la figure 2. Les motifs de déformation mis en évidence peuvent être interprétés grâce au GPS comme la conséquence de différentes sources en profondeur ayant joué à des moments particuliers. (d'après Augier (2011) [1])

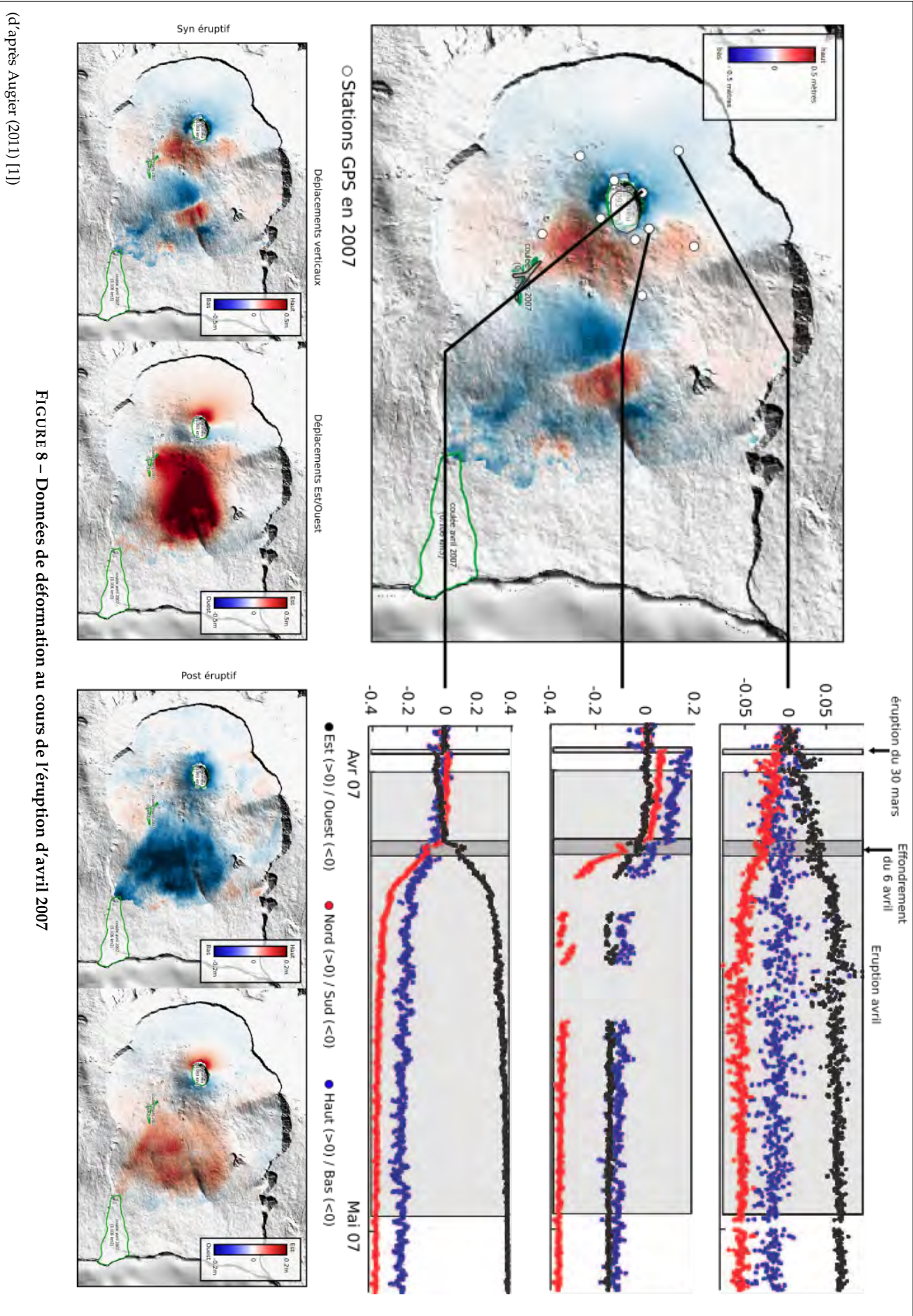


FIGURE 8 – Données de déformation au cours de l'éruption d'avril 2007

3 Partie 2 : Risque volcanique à Goma (RD Congo) vu par Interférométrie RADAR

3.1 Principes de l'interférométrie RADAR

[Cette partie est extraite de l'article *Interférométrie radar : principes et utilisation dans la surveillance de la déformation du sol* Augier (2020) [2]]

3.1.1 Satellites SAR

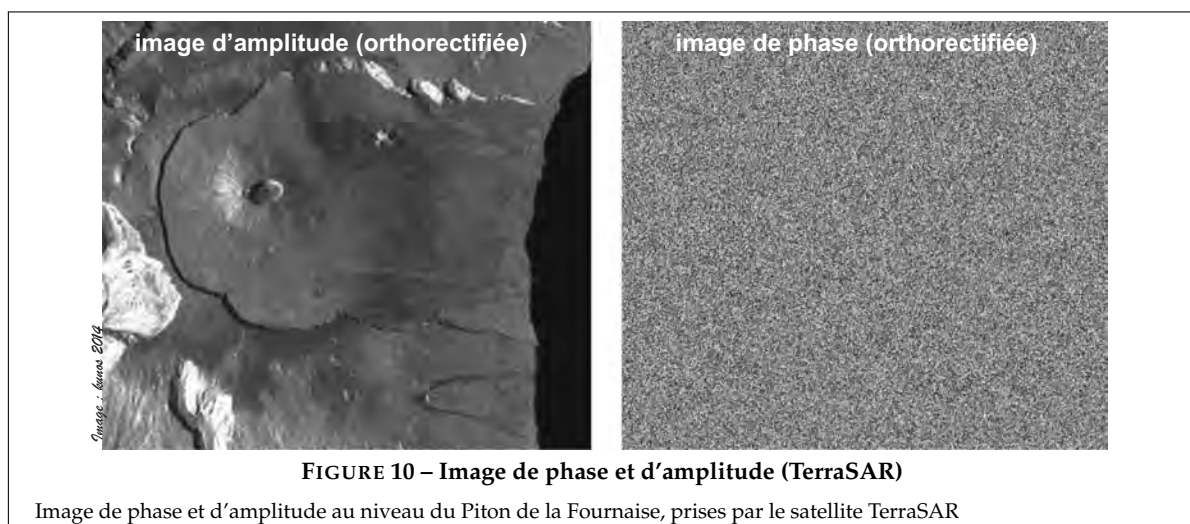
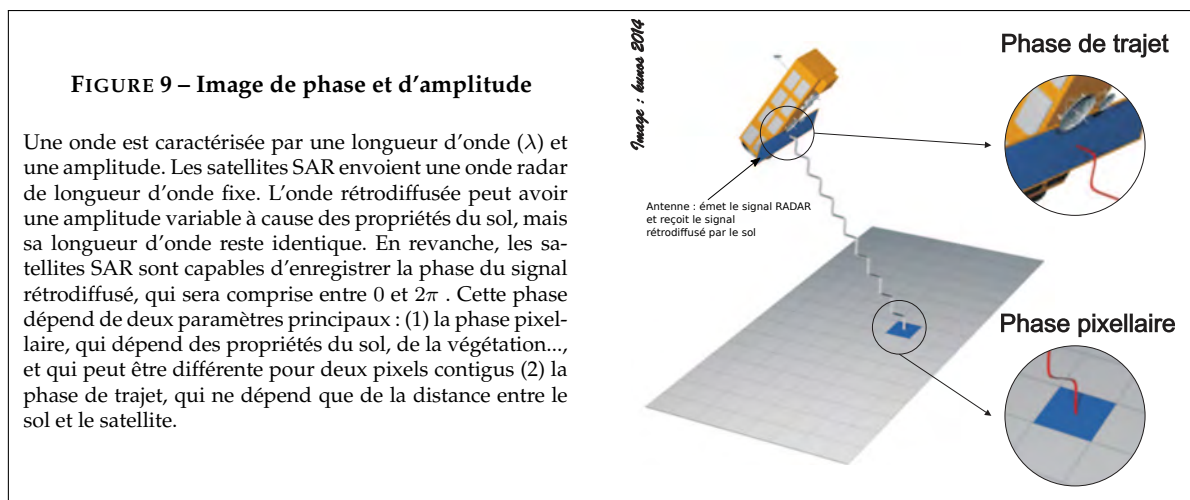
Un satellite capable de faire de l'interférométrie RADAR est un satellite dit actif : il éclaire lui même l'objet qu'il observe en émettant une onde RADAR, et en récupérant le signal renvoyé par la Terre. Il fonctionne de manière similaire à un appareil photo équipé d'un flash. Les satellites RADAR ne sont pas équipés de lentilles comme les satellites optiques, mais d'une antenne, et sont capables de synthétiser une image à partir d'un signal enregistré en continu. Cette étape de synthèse sort du cadre de notre étude, mais c'est elle qui a donné son nom aux satellites : on parle de satellites SAR pour Synthetic Aperture RADAR

3.1.2 Information contenue dans la phase reçue

Comme la lumière, une onde RADAR est une onde électromagnétique, caractérisée par une longueur d'onde comprise généralement entre 1 et 20 cm. Le signal réémis par la Terre pour une zone donnée est donc caractérisé par son amplitude et sa phase, que le satellite est capable de mesurer.

L'amplitude du signal reçu dépend des propriétés du sol (le signal est plus ou moins réfléchi, transmis ou diffusé) et correspond à la quantité de lumière revenant vers le satellite. Par exemple, une zone lisse aura tendance à réfléchir le signal comme un miroir, et apparaîtra sombre sur l'image d'amplitude.

La phase du signal reçu dépend de la phase pixelaire (due à la nature du sol et des objets qui y sont présents), et de la phase de trajet, qui ne dépend que de la distance entre le satellite et le sol. Les images de phase ressemblent à du bruit, et ne sont pas exploitables en tant que telles.



3.1.3 Méthode InSAR et mesure de la déformation du sol

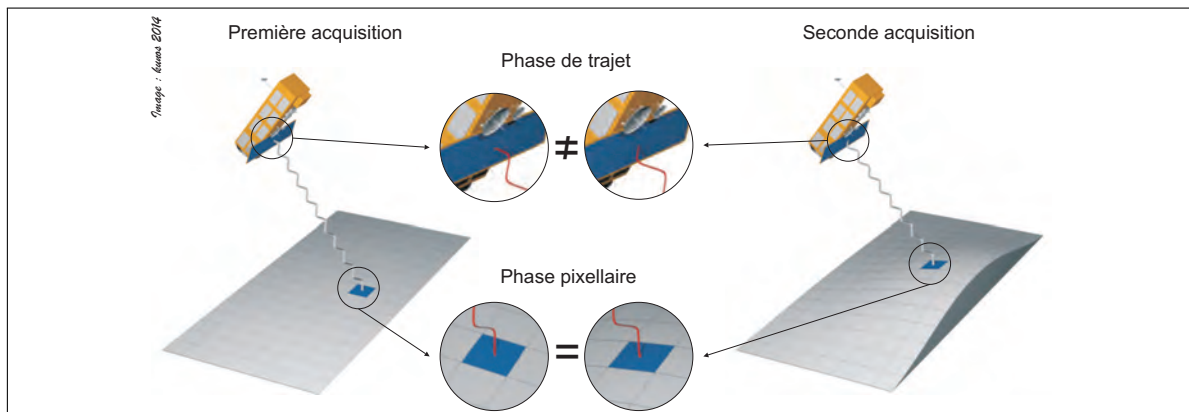


FIGURE 11 – Principes de l'InSAR

Principes de l'interférométrie RADAR : une image de phase est acquise à deux moments différents. Si la phase pixellaire est restée constante entre les deux images, la différence de phase de trajet entre les deux acquisitions ne dépendra que du déplacement du sol dans la direction du satellite.

- si la nature du sol reste constante, la phase pixellaire restera aussi constante et sera la même sur les deux images
- si le satellite occupe exactement la même position lors des deux acquisitions, et que le sol n'a pas bougé, alors la distance entre le satellite et chaque point de la Terre est exactement la même, la phase de trajet des deux images sera la même et les deux images de phase seront strictement identiques.
- en revanche, si le sol a bougé entre les deux acquisitions, les valeurs de phase de trajet pourront être différentes, et ne dépendront que de la quantité de déplacement.

En faisant la différence entre les deux valeurs de phase, on a donc accès à la quantité de déplacement d'un pixel dans la direction du satellite.

3.1.4 Valeur des pixels dans un interférogramme

Un interférogramme correspond à la différence entre les deux images de phase, il est donc assimilable à une carte de déplacements du sol dans la direction du satellite.

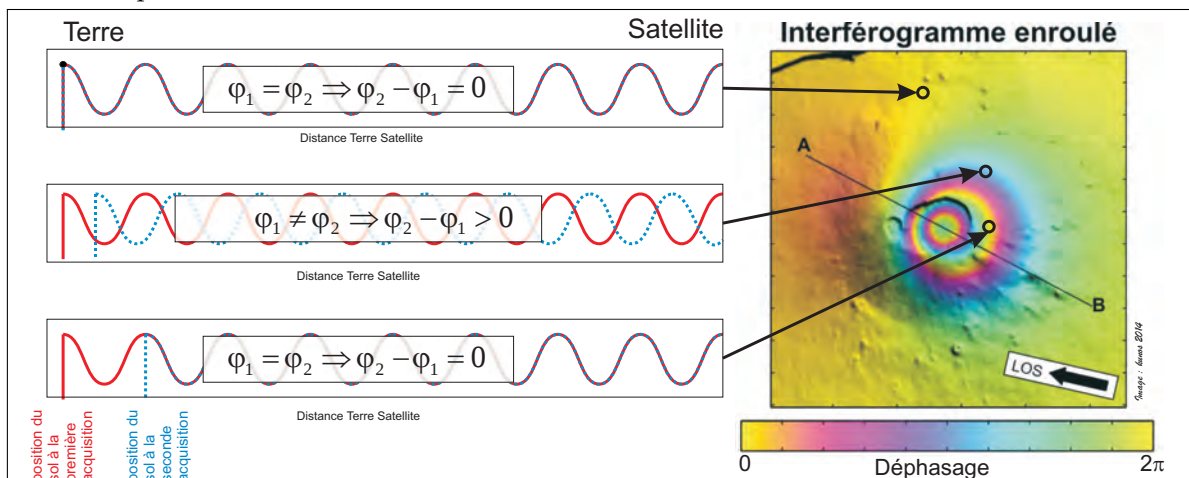


FIGURE 12 – Les franges dans un interférogramme

Explication des franges sur les interférogrammes : si le déplacement du sol dans l'axe de visée du satellite (désigné par LOS) correspond à 0 ou à un multiple de la longueur d'onde de l'onde RADAR, alors la valeur de la différence des phases est égale à 0. Une frange peut donc être vue comme une ligne de niveau de déplacement.

Pour un pixel donné :

- si le déplacement est inférieur à la longueur d'onde λ , la différence entre les deux valeurs de phase sera comprise entre 0 et 2π .
- si le déplacement est strictement égal à la longueur d'onde λ , alors la valeur de phase enregistrée sera la même pour les deux images, et leur différence sera égale à 0.
- enfin, si le déplacement est supérieur à la longueur d'onde λ , la seconde valeur de phase étant elle-même comprise entre 0 et 2π , la différence des valeurs de phase sera encore comprise entre 0 et 2π comme dans le cas d'un déplacement inférieur à la longueur d'onde.

On dit alors qu'un interférogramme est capable de mesurer un déplacement "à 2π près" (ou modulo 2π) dans la ligne de visée du satellite et c'est pourquoi les interférogrammes présentent des motifs concentriques appelés "franges".

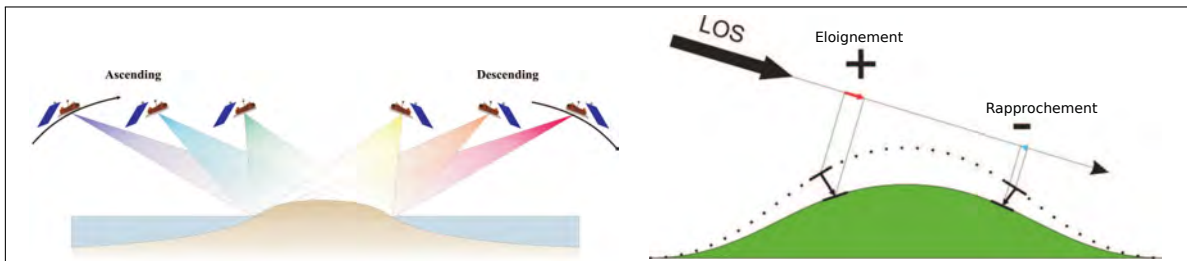


FIGURE 13 – Effet de la ligne de visée, principes

A gauche : une même zone peut être vue selon différentes lignes de visée (Line of Sight ou LOS), en fonction de l'orientation de l'antenne RADAR et du sens de passage du satellite (passe ascendante ou descendante). A droite : Deux pixels sur un terrain en subsidence n'ont pas forcément la même direction de déplacement. Le satellite enregistre le projeté du vecteur de déformation sur l'axe de visée du satellite. En fonction de cette ligne de visée, un même déplacement ne sera pas enregistré de la même manière. Un déplacement perpendiculaire à l'axe de visée du satellite ne sera pas enregistrable.

3.1.5 Une fiche de synthèse

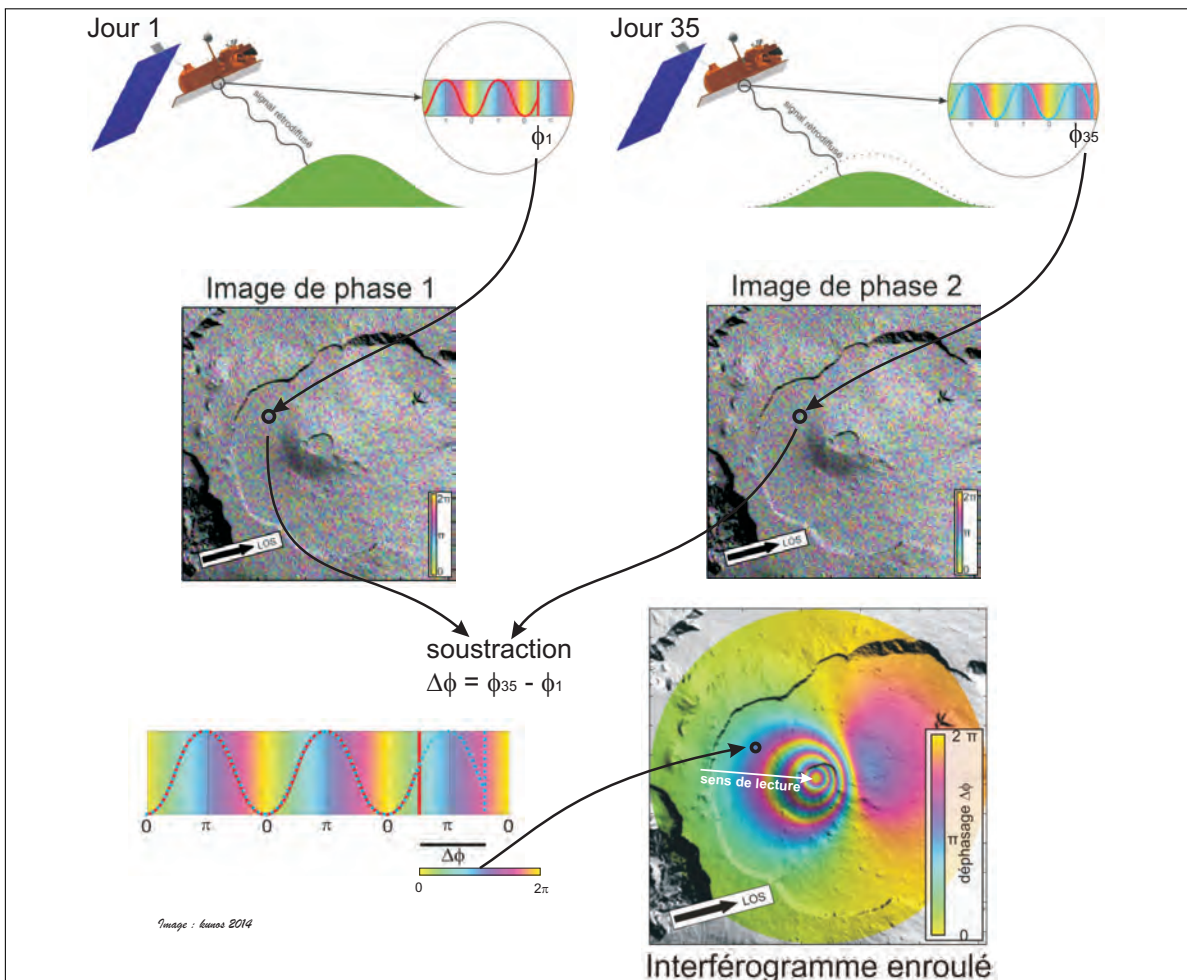


FIGURE 14 – Principes de l'interférométrie RADAR

1. le jour 1, le satellite enregistre pour chaque pixel, la valeur de la phase (entre 0 et 2π) du signal rétrodiffusé
2. à la revisite du satellite (ici le jour 35), le satellite revient exactement à la même position et enregistre de nouveau une image de phase. Si le sol a bougé entre les deux acquisitions, la valeur de la phase pour chaque pixel ne sera pas la même
3. Pour chaque pixel, on calcule le déphasage entre les deux dates (différence entre les deux valeurs de phase). Pour les zones n'ayant pas bougé, ou ayant bougé d'un multiple de la longueur d'onde, la valeur sera de 0, ce qui fait apparaître des franges sur l'interférogramme.

Pour déterminer le sens des déplacements

1. on part d'un endroit qui n'a pas bougé
2. puis on suit l'ordre des couleurs vers un endroit qui a beaucoup bougé (flèche blanche)

Ici on part du vert, puis rose, puis jaune, puis vert, puis rose.... : la valeur de la phase augmente, la distance Terre-Satellite a donc augmenté, et comme le satellite est fixe, c'est le sol qui s'est éloigné. Il s'agit dans cet exemple d'un signal compatible avec une subsidence.

3.2 Contexte géologique de Goma et du Nyiragongo

[Cette partie est en partie extraite de l'article *L'éruption de mai 2021 du Nyiragongo (République démocratique du Congo) vue par interférométrie radar* Augier (2021) [3]]

3.2.1 Contexte géologique

Le Nyiragongo est un volcan situé en République démocratique du Congo, à quelques kilomètres à l'Ouest de la frontière avec le Rwanda et quelques kilomètres au Nord de la ville de Goma et du lac Kivu. Ce strato-volcan se trouve dans la branche Ouest du Rift Est-africain (Rift albertin) soumis à un régime d'extension et émet des laves très alcalines généralement fluides. Il a la particularité d'héberger dans son cratère un lac de lave quasi-permanent. Il a connu en 2002 une éruption majeure qui a été suivie par interférométrie RADAR, qui s'est soldée par l'émission de plusieurs coulées de lave qui ont traversé la ville et détruit l'aéroport.

Il est entré en éruption mi-mai 2021, et a émis une coulée de lave fluide en direction de la ville de Goma. Bien que fonctionnel au moment de l'éruption, l'observatoire n'a pas pu prévoir l'éruption à cause de l'extrême fluidité du magma n'entraînant qu'une faible sismicité.

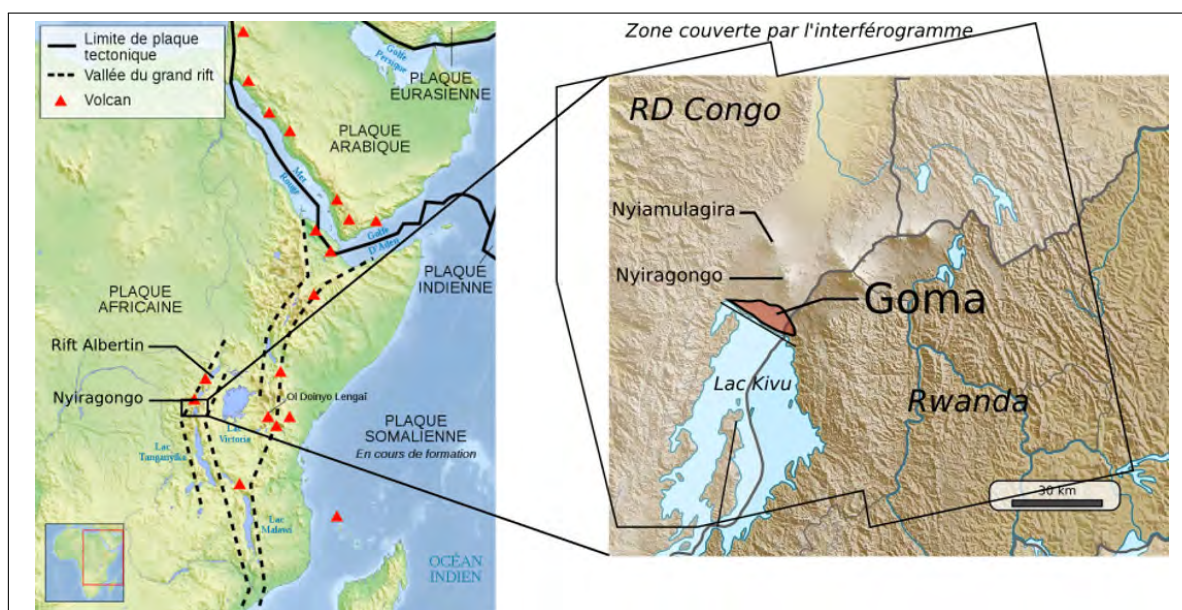


FIGURE 15 – Localisation de Goma et du Nyiragongo

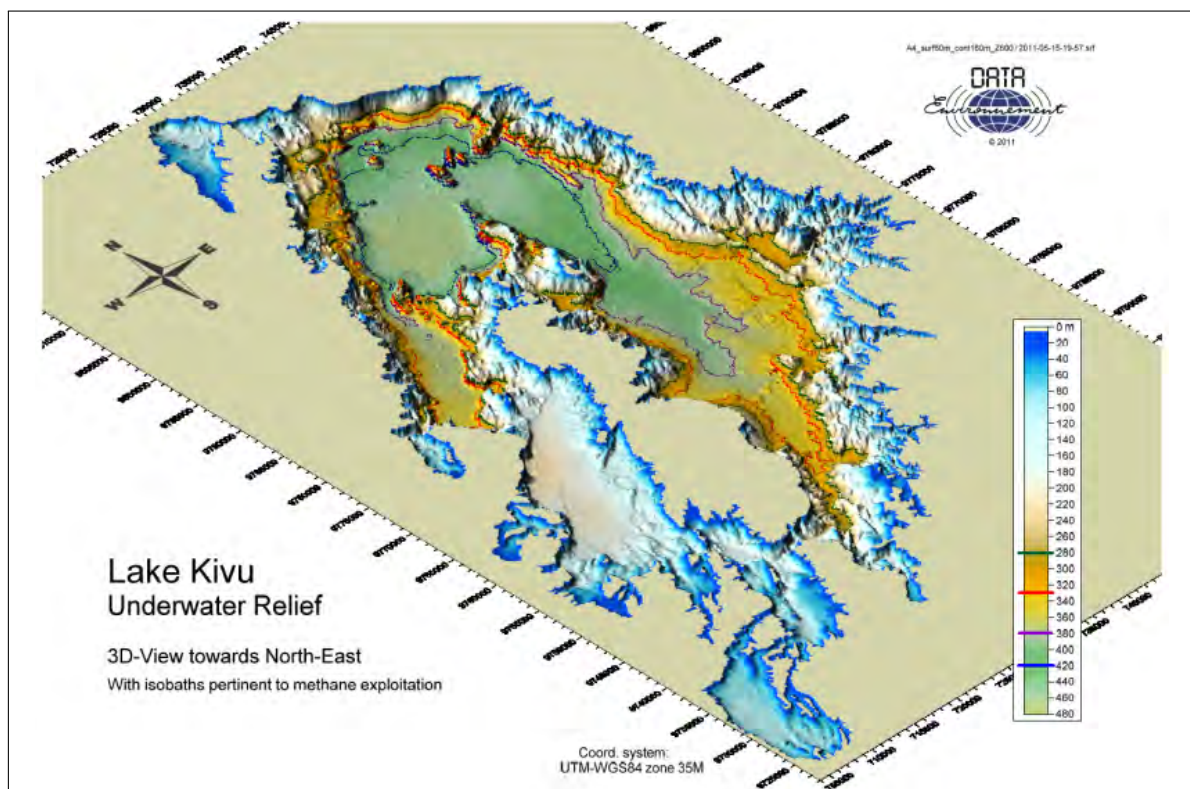
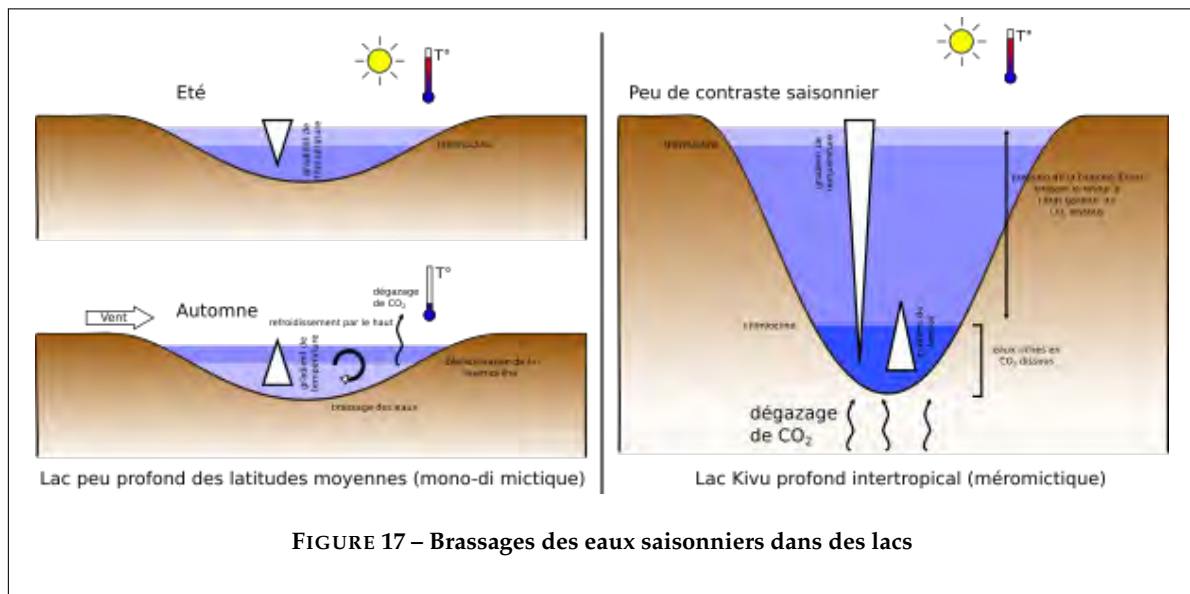


FIGURE 16 – Vue de Goma et du Nyiragongo en arrière plan (wikipedia)

3.2.2 Goma et le lac Kivu

Contrairement aux autres lacs du rift est-africain qui ont rempli des dépressions (grabben) provoquée par l'extension du rift et qui sont généralement peu profonds, le lac Kivu est similaire à un lac de barrage : les volcans Nyamulagira et Nyiragongo ont bloqué l'écoulement naturel des rivières dans le rift et ont provoqué la mise en place de ce lac aux contours très découpé (remplissage des vallées pré-existantes) et dont la profondeur atteint environ 450 mètres.

Ce lac est méromictique, c'est-à-dire que ses eaux de surface et de profondeur ne se mélangent que rarement. Le CO_2 dégagé par le volcan sous le lac se dissout dans les eaux profondes, les rendant plus denses, ce qui empêche leur brassage avec les eaux superficielles. Des mesures faites dans les eaux profondes (300 m) montrent que les concentrations en CO_2 (et méthane d'origine biologique) sont très élevées.



La profondeur maximale du lac est estimée à environ 450 mètres. Les concentrations en CO_2 et méthane rendent l'exploitation de ces gaz économiquement intéressante. (d'après Votava et al. (2017) [13])

3.2.3 Contexte géopolitique de Goma et conséquences sur l'observatoire

Goma est une agglomération d'environ 1 million d'habitants. Cette ville est très loin du centre politique et économique de la République démocratique du Congo, ce qui a eu pour conséquence de limiter le développement d'infrastructures de service public, sans pour autant limiter sa population : la ville héberge plusieurs bidonvilles, et a accueilli de nombreux réfugiés lors du génocide rwandais en 1994, dans des camps qui sont en partie devenus des quartiers de la ville. La France a participé à l'évacuation de civils du Rwanda lors de l'opération Turquoise et était alors basée à Goma. L'instabilité politique y demeure forte (plusieurs assassinats politiques et ethniques depuis 2006), et différentes ONG tentent de maintenir ces camps tant bien que mal, dont certains sont devenus pérennes et constituent des quartiers de la ville. Les voies de circulation sont rarement goudronnées, ce qui limite la capacité d'intervention en cas de crise.



FIGURE 19 – Comparaison de l'urbanisation de Goma (RDC) et Gisenyi (Rwanda)

Goma reste loin des centres politiques, héberge une population pauvre et son développement est très peu encadré, comparé au Rwanda voisin, dont le développement économique contraste fortement avec celui de la RDC

L'observatoire volcanologique lui-même peine à se maintenir. Il dépend principalement de subventions internationales et d'un partenariat avec le Luxembourg qui permet une surveillance et un traitement des données en temps réel par les deux pays. Cependant, la Banque mondiale a suspendu ses subventions en 2020 suite à des suspicions de corruption, empêchant l'observatoire de faire son suivi en temps réel et l'empêchant même de maintenir son site internet (un nouveau site OVG a émergé le 25 mai 2021 mais sans alimentation des actualités, la communication vers les populations se faisant principalement via la page Facebook de l'observatoire et via des comptes Twitter, pourtant canaux de communication "non officiels"). Cette situation a abouti à une perte de confiance de la population envers l'observatoire, comme en témoignent les commentaires suite à la publication de l'interférogramme du 27 mai.

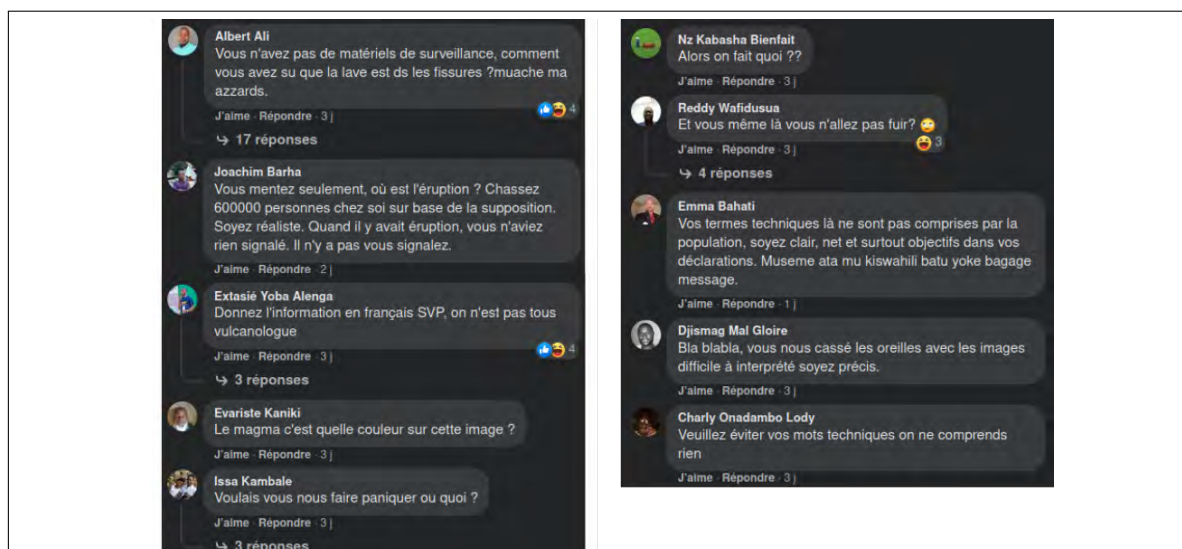


FIGURE 20 – Extrait du compte facebook de l'observatoire suite à la publication des interférogrammes et de l'annonce de l'évacuation de la ville

Les témoignages montrent une perte de confiance de la population envers l'observatoire.

3.3 Étape 1 : Étude préliminaire des données de l'éruption de 2002

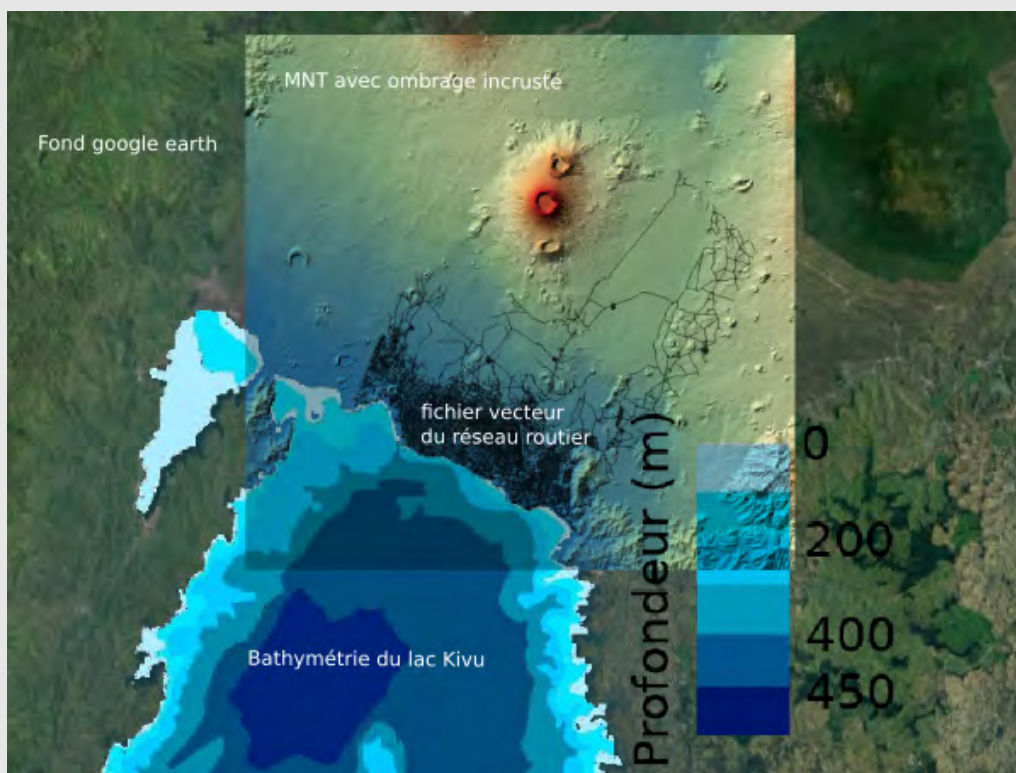
Cette éruption est à l'origine d'une coulée de lave ayant traversé la ville et ayant détruit une partie de l'aéroport. On cherche ici juste à mieux comprendre le déroulement de cette éruption pour comprendre la décision de l'évacuation de Goma lors de l'éruption de 2021

3.3.1 Paramétrage du projet

Procédure : import des différentes données

Dans un nouveau projet QGIS :

- intégrez le fichier **bathy_kivu.tif** (bathymétrie du lac Kivu, ce fichier est une image tirée d'un article puis géoréférencée. Ce ne sont pas des données quantitativement exploitables)
- vérifiez que le EPSG du projet est bien 32735 (tout en bas à droite de la fenêtre QGIS, logo « sphère avec chapeau chinois »). *[Si ce n'est pas le cas, modifiez le SCR : double clic sur le logo « sphère chapeau chinois » → dans filtre mettre « 32735 » → dans « Système de Coordonnées de Référence » : choisir « WGS 84 / UTM zone 35S »]*
- intégrez le fichier contenant le réseau routier de Goma, qui nous permettra de repérer la ville grâce à la densité du réseau routier **2021_coulee/MSR513_AOI01_GRA_MONIT01_transportationL_r1_v1.shp** (d'après Copernicus (2021) [5])
- intégrez le fichier **DEM_ROI_2.tif** (Modèle Numérique de Terrain de la zone)
- paramétrez le style du MNT (double clic sur la couche) pour lui attribuer une table de couleur plus visible que la palette de gris (« symbologie » → « Type de rendu » → « pseudo-couleur à bande unique » → choisissez une table de couleur qui vous convient)
- intégrez le fichier **ombrage.tif** : ombrage du modèle numérique de Terrain de la zone, obtenu de la même manière que lors de l'activité précédente (d'après SRTM (2000) [6]). (Attention si vous essayez de le refaire, veillez à mettre le paramètre « Echelle » à la valeur 100000, il y a un problème dans ce fichier)
- paramétrez le style de l'ombrage (double clic sur la couche) en mettant le « mode de fusion » à « multiplier » pour incruster l'ombrage aux autres couches (elle doit être le plus haut possible dans la pile des couches)
- Intégrez un fond google earth pour pouvoir se repérer facilement (Internet → Quickmapservices → google → google satellite) et mettez le au fond de la pile des couches.



Aide en cas de problème : Fichier de secours

En cas de problème, ouvrez le fichier **GOMA/DATA_FAITES/2_GOMA_ETAPE_1_DEM_OMBRAGE.qgz** qui donne les cartes déjà colorisées

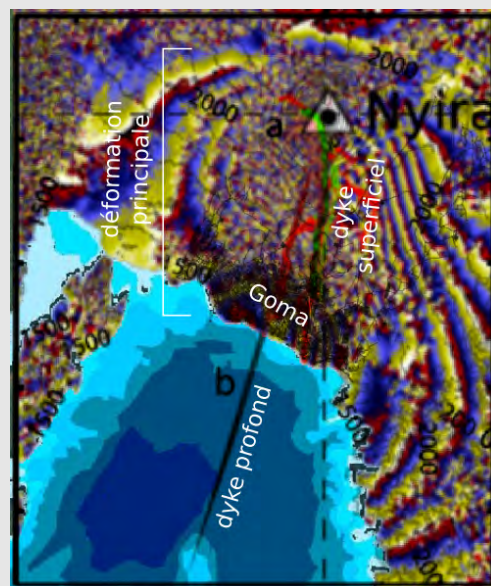
3.3.2 Étude préliminaire de l'éruption de 2002

Procédure : import de l'interférogramme

- intégrez le fichier **2002_insar_georef.tif** (interférogramme de l'éruption, tiré d'un article puis géoréférencé d'après Wauthier et al. (2012) [14])

L'interférogramme montre que la déformation principale est localisée sous la ville de Goma au sud du volcan. La fissure éruptive à l'origine des différents bras de la coulée s'est en partie ouverte en ville. Ces données de déformation permettent de caractériser les sources à l'origine de cette déformation :

- ajoutez le fichier **2002_model_georef.tif** (modèle tiré d'un article puis géoréférencé d'après Wauthier et al. (2012) [14]). Pour mieux intégrer l'image, vous pouvez paramétrer le « mode de fusion » à « multiplier » (le blanc devient transparent)



Aide en cas de problème : Fichier de secours

En cas de problème, ouvrez le fichier **GOMA/DATA_FAITES/2_GOMA_2_GOMA_ETAPE_2_INSAR_2002.qgz** qui donne les cartes déjà colorisées

Ce fichier montre la position des sources permettant d'expliquer au mieux la déformation. Elle ne peut être expliquée que par la présence de deux intrusions, l'une profonde et l'autre superficielle (filons ou dykes), provenant du sud de Goma. Le dyke le plus superficiel a connecté le lac de lave du sommet au flanc, ce qui a provoqué la vidange du lac de lave. Plus au sud, les deux dykes sont donc passés sous le lac Kivu, à proximité du maximum de profondeur du lac, mais n'ont atteint la surface que en dehors du lac. Cette éruption a bien failli provoquer une déstabilisation du lac Kivu. Les auteurs de l'article d'où sont tirés les interférogrammes proposent le scénario suivant :

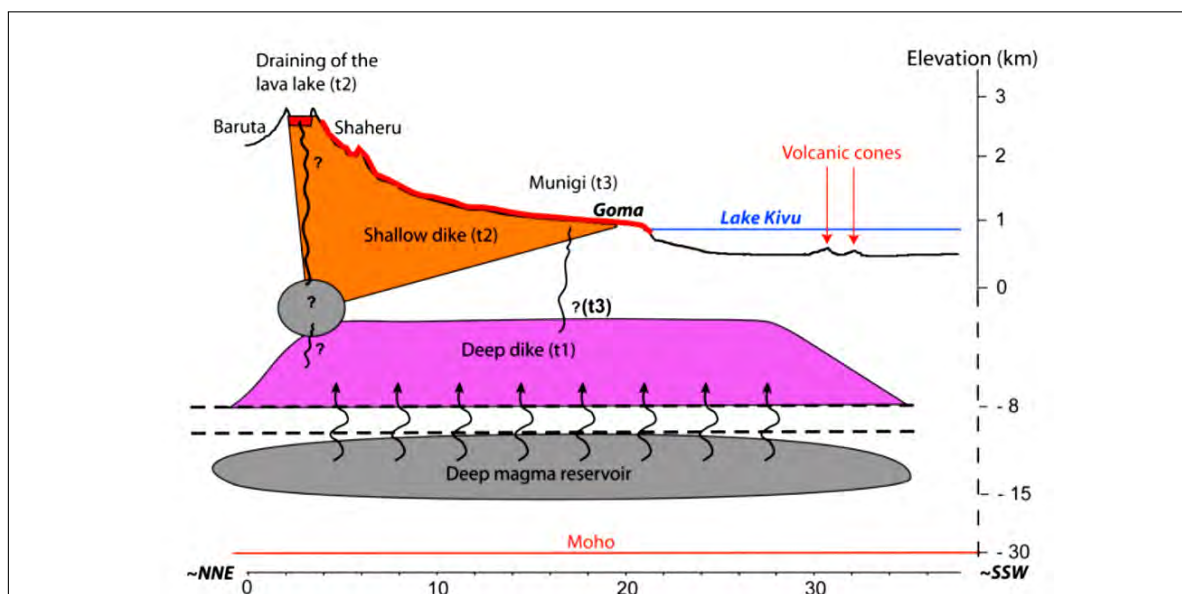


FIGURE 21 – Modèle conceptuel de l'éruption du Nyiragongo de 2002.

Le dyke superficiel se serait injecté en connectant le lac de lave et la fissure, permettant le drainage du lac de lave. Le dyke s'est propagé vers le Sud en traversant Goma mais n'a pas atteint le lac Kivu. Un scénario similaire est envisageable pour l'éruption de 2021. (d'après Wauthier et al. (2012) [14])

3.4 Étape 2 : Cartographie de la coulée de 2021 et position des fissures éruptives

Les procédures de modélisation permettant de connaître la géométrie des sources à l'origine de la déformation ne permettent pas d'obtenir des modèles en temps réel. Cette procédure demande généralement plusieurs mois de calcul, et des observations de terrain telles que la localisation des fissures éruptives permettent de mieux contraindre les modèles. On cherche ici à caractériser la coulée de lave lors de l'éruption de 2021, et à localiser la fissure éruptive.

3.4.1 Le radar pour cartographier la coulée

L'imagerie RADAR permet d'acquérir des données indépendamment de la météo (le signal RADAR traverse les nuages). On va donc comparer une image avant et après l'éruption pour essayer de cartographier la coulée. Les images RADAR brutes ne sont pas facilement exploitables dans la mesure où une dimension est spatiale et la seconde est temporelle. On utilisera des images orthorectifiées qui permettent de corriger ce biais, acquises par les satellites de la mission SENTINEL 1

Procédure : import d'images RADAR

- Intégrez le fichier `SENTINEL1/2021-05-19-00_00_2021-05-19-23_59_Sentinel-1_AWS-IW-VVHH_VH_-_decibel_gamma0_-_orthorectified` (acquisition le 19 mai 2021 d'après ESA (2021) [11])
- Intégrez le fichier `SENTINEL1/2021-06-06-00_00_2021-06-06-23_59_Sentinel-1_AWS-IW-VVHH_VH_-_decibel_gamma0_-_orthorectified` (acquisition le 06 juin 2021 d'après ESA (2021) [11])

La couleur sombre est due aux surfaces plutôt lisses qui réfléchissent bien la lumière (peu de retour vers le satellite) alors que les zones claires correspondent aux zones renvoyant beaucoup de signal vers le satellite. Comparez les deux images pour identifier la coulée et caractérisez sa surface (plutôt lisse ou plutôt rugueuse).

Généralement, ces images RADAR permettent de cartographier rapidement une coulée de lave. Il existe des méthodes plus robustes telles que l'analyse de cohérence entre deux images RADAR, qui permettent de mettre en évidence les zones où la texture du sol a beaucoup changé entre deux images, ce qui est plus robuste que de se baser sur la couleur seule du sol (des coulées sur des coulées ont la même couleur!). On peut alors en dessiner le contour et en faire un fichier vectoriel.

Procédure : import d'un contour de la coulée

- Intégrez le fichier `2021_coulee/EMSR513_AOI01_GRA_MONIT02_observedEventA_r1_v3.shp` (publiée le 06 juin 2021, d'après Copernicus (2021) [5])
- Jouez avec sa symbologie pour afficher la coulée avec un fond transparent et un bord opaque

Exercice :

Pouvez vous expliquer la forme de la coulées ? Proposez des hypothèses.

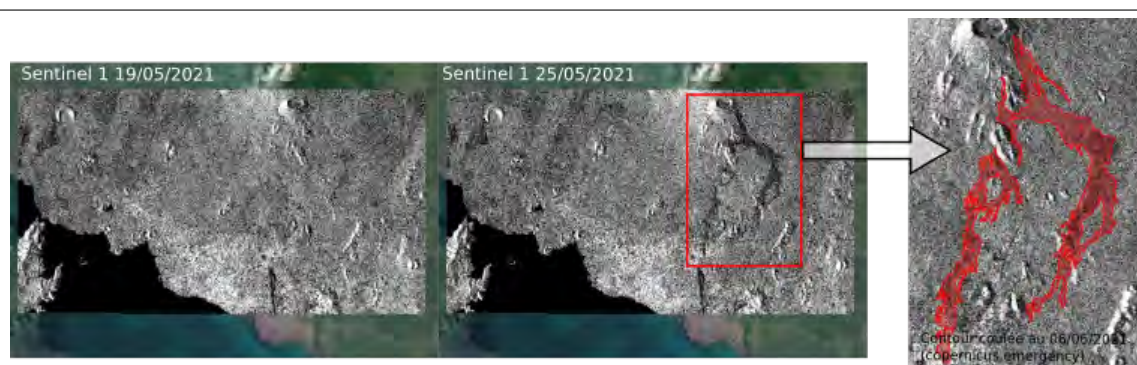


FIGURE 22 – Images RADAR et contour de la coulée de 2021

Images RADAR obtenues par les satellites de la constellation sentinel 1, avant et après l'éruption. Elles ont été récupérées à l'aide de EO Browser (d'après ESA (2021) [11]). Le contour de la coulée provient de Copernicus (2021) [5]

Aide en cas de problème : Fichier de secours

En cas de problème, ouvrez le fichier `GOMA/DATA_FAITES/2_GOMA_2_GOMA_ETAPE_3_RADAR_COULEE.qgz` qui donne les cartes déjà colorisées

3.4.2 Écoulement et ligne de plus grande pente : détermination de la position de la fissure éruptive

L'écoulement d'un fluide sur une surface se fait selon la ligne de plus grande pente. En cartographie, cela se traduit par un écoulement perpendiculaire aux lignes de niveau (une ligne de niveau marque une horizontale à une altitude donnée). Pour mieux caractériser l'écoulement de la coulée, il est possible d'afficher les courbes de niveau de la topographie et vérifier comment s'écoule la coulée. On va faire apparaître des courbes de niveau tous les 50 mètres

Procédure : Afficher des lignes de niveau

- Dans le menu principal allez dans « Raster » → « Extraction » → « Contour »
- Sélectionnez le raster correspondant au modèle numérique de terrain (DEM_ROI_2)
- Dans l'onglet « Paramètres » → « intervalle entre les courbes » mettez la valeur 50
- « Exécuter »

Vous pouvez faire la même chose pour faire apparaître des courbes de niveau tous les 10 mètres. En jouant sur les paramètres de style, on peut faire apparaître les deux familles de courbes de manière différente.

Exercice : Forme de la coulée de lave et points de sortie

Vos hypothèses sont-elles valides ? Comment peut-on interpréter l'alignement des points de sortie de la lave ?

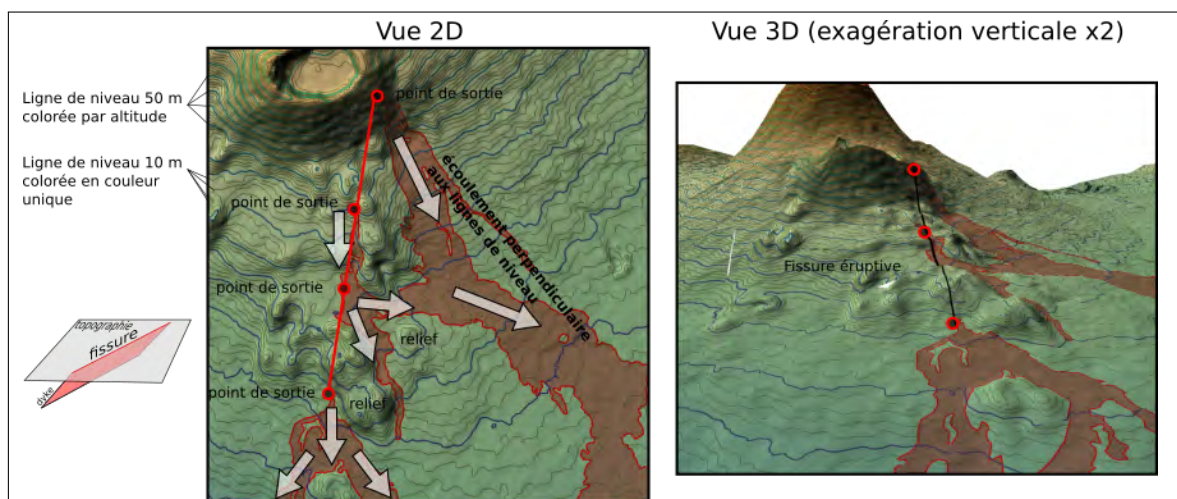


FIGURE 23 – Superposition de la coulée et des lignes de niveau

On remarque qu'on ne peut expliquer la forme de la coulée que si on envisage au moins 3 points de sortie différents. Ces points de sortie sont alignés, ce qui est dû à la forme de l'intersection entre la surface de la topographie et le plan du dyke (ou du filon), cet alignement marque donc la fissure éruptive.

Aide en cas de problème : Fichier de secours

En cas de problème, ouvrez le fichier GOMA/DATA_FAITES/2_GOMA_2_GOMA_ETAPE_4_FISSURE.qgz qui donne les cartes déjà colorisées

3.5 Étape 3 : Risque géologique lors de l'éruption de mai 2021

3.5.1 Risque lié à la coulée de lave

Dès le début de l'éruption les débits de lave ont nécessité l'évacuation des quartiers Nord de Goma. La coulée s'est ensuite dirigée vers l'aéroport et s'est arrêtée à quelques centaines de mètres des pistes. Lors de l'éruption de 2002 la partie nord des pistes avait été détruite. On se demande si cette zone est plus sensible à l'aléa coulée de lave.

Procédure : Afficher de la carte Aléa coulée de lave

- Intégrez le fichier **RISQUE/EMSN047_01NYIRAGONGO_LAVAFLOWHAZARD.png** qui donne l'aléa coulée de lave dans la zone de Goma (d'après Copernicus (2018) [4])

Exercice : Aléa coulée de lave dans la zone de l'aéroport

À partir de cette image et d'une analyse du modèle numérique de Terrain, trouvez l'extension de la zone dans laquelle une ouverture de fissure éruptive peut aboutir à une coulée affectant l'aéroport.

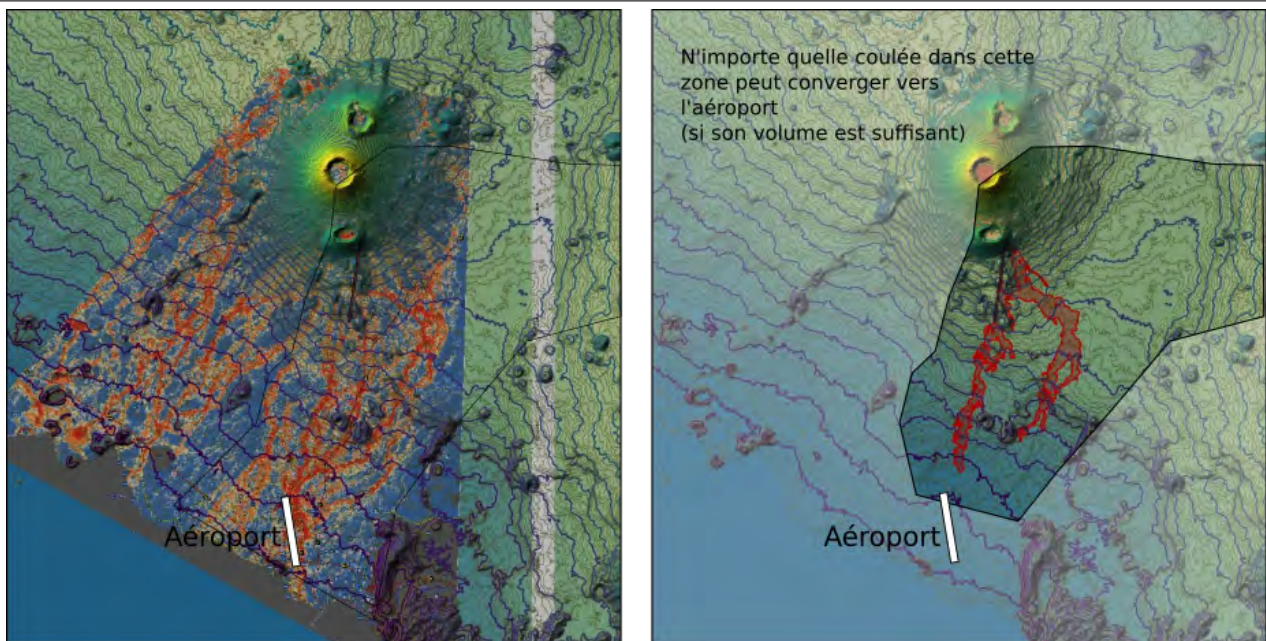


FIGURE 24 – Aléa coulée de lave au niveau de l'aéroport

L'aéroport est au fond d'une vallée, qui même si elle est de faible pente, fait converger les coulées vers les pistes.

Aide en cas de problème : Fichier de secours

En cas de problème, ouvrez le fichier **GOMA/DATA_FAITES/2_GOMA_2_GOMA_ETAPE_5_RISQUE_COULEE.qgz** qui donne les cartes déjà colorisées

3.5.2 Risque lié à une éruption limnique : apport des données d'interférométrie RADAR

L'observatoire de Goma a recommandé l'évacuation de la ville le 25 mai 2021 suite à la publication de mesures de déformation. Cependant, la coulée de lave n'a atteint que les quartiers nord de Goma. On se demande ce qui justifie l'évacuation totale de la ville.

Procédure : Affichage des données InSAR de l'éruption de 2021

- Intégrez le fichier **2021_InSAR/2021_INSAR_NORD_S1AA_20210513_20210527.png** (interférogramme entre le 13 mai et le 27 mai couvrant la partie Nord) (d'après Copernicus (2018) [4])
- Intégrez le fichier **2021_InSAR/2021_INSAR_SUD_S1BA_20210519_20210525.png** (interférogramme entre le 13 mai et le 27 mai couvrant la partie Nord) (d'après Copernicus (2018) [4])
- Intégrez le fichier **2021_fissure/fissure.shp** (fissure éruptive de l'éruption)

Exercice : Probabilité d'éruption limnique en 2021

À partir des données de l'éruption de 2021 et d'après le scénario proposé pour l'éruption de 2002 ainsi que des caractéristiques du lac Kivu, expliquez pourquoi l'observatoire a recommandé l'évacuation de la ville.

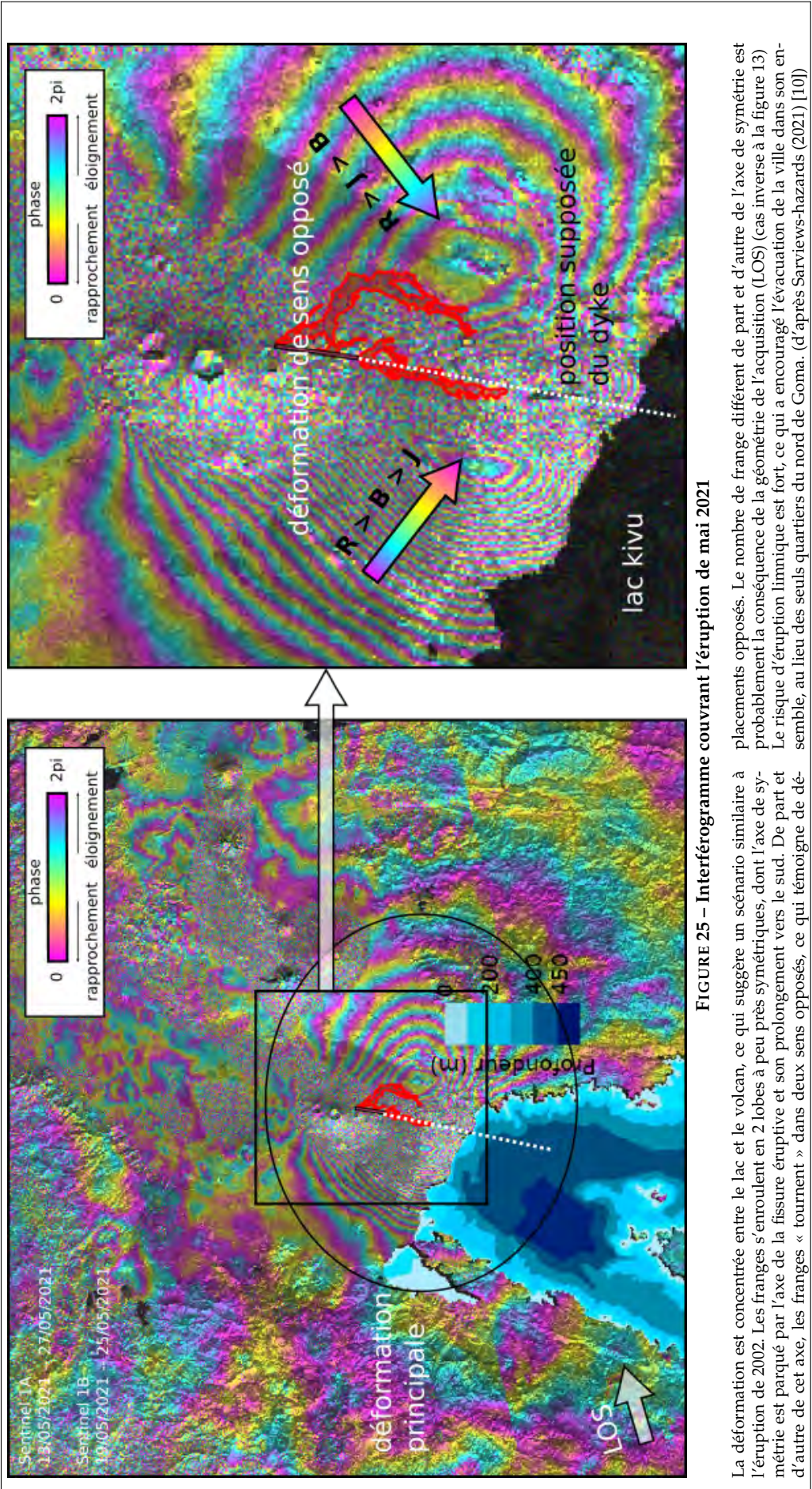
Elements de correction

En 2002 la déformation liées à l'éruption a été modélisée, et on sait qu'elle a été due à l'injection de 2 dykes, l'un profond, l'autre superficiel (fig. 21). Ces dykes sont passés sous le lac Kivu, à des endroits où le lac est profond (400m), et dont les eaux sont riches en CO₂, la probabilité d'une éruption limnique était alors très forte, en cas d'éruption sous l'eau, provoquant un réchauffement des eaux profondes, et donc leur remontée accompagnée d'un dégazage massif. (fig. 17).

En 2021 la fissure éruptive a un alignement NS (fig. 23), et la déformation se concentre en 2 lobes symétriques dont l'axe de symétrie correspond au prolongement de la fissure vers le sud et même sous le lac Kivu (fig. 25) : même s'il n'a pas été modélisé, le dyke à l'origine de cette éruption doit donc partir du sud, sous le lac et remonter vers le nord. L'éruption et la déformation associée est donc très similaire à l'éruption de 2002 (fig. 21), la probabilité qu'une fissure s'ouvre sous le lac, provoquant une éruption limnique, était donc très élevée.

Aide en cas de problème : Fichier de secours

En cas de problème, ouvrez le fichier **GOMA/DATA_FAITES/2_GOMA_2_GOMA_ETAPE_6_INSAR_2021.qgz** qui donne les cartes déjà colorisées



3.6 Ré-urbanisation des coulées de lave

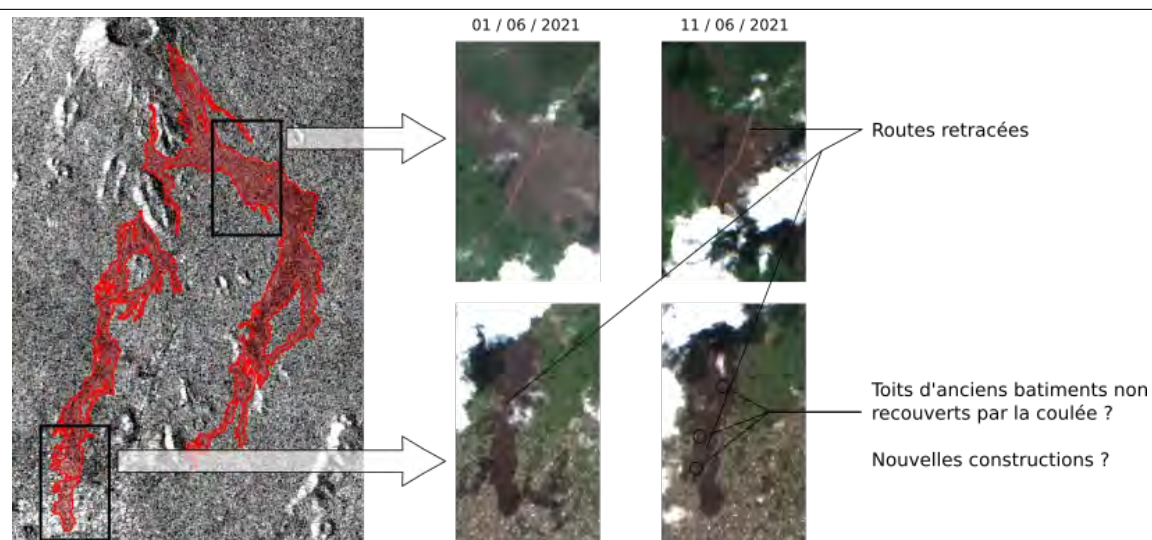


FIGURE 26 – Images sentinel 2 sur certaines zones de la coulée, le 01 juin et le 01 juillet

d'après ESA (2021) [12]

3.7 Synthèse : risque géologique dans la zone de Goma

Exercice : Probabilité d'éruption limnique en 2021

En partant de toutes les indications données dans cette partie, et en utilisant la définition d'un risque

$$\text{Risque} = \text{Alea} \times \text{Vulnerabilite}$$

- Estimez le risque "éruption limnique" dans la zone
- Estimez le risque "coulée de lave" dans la zone

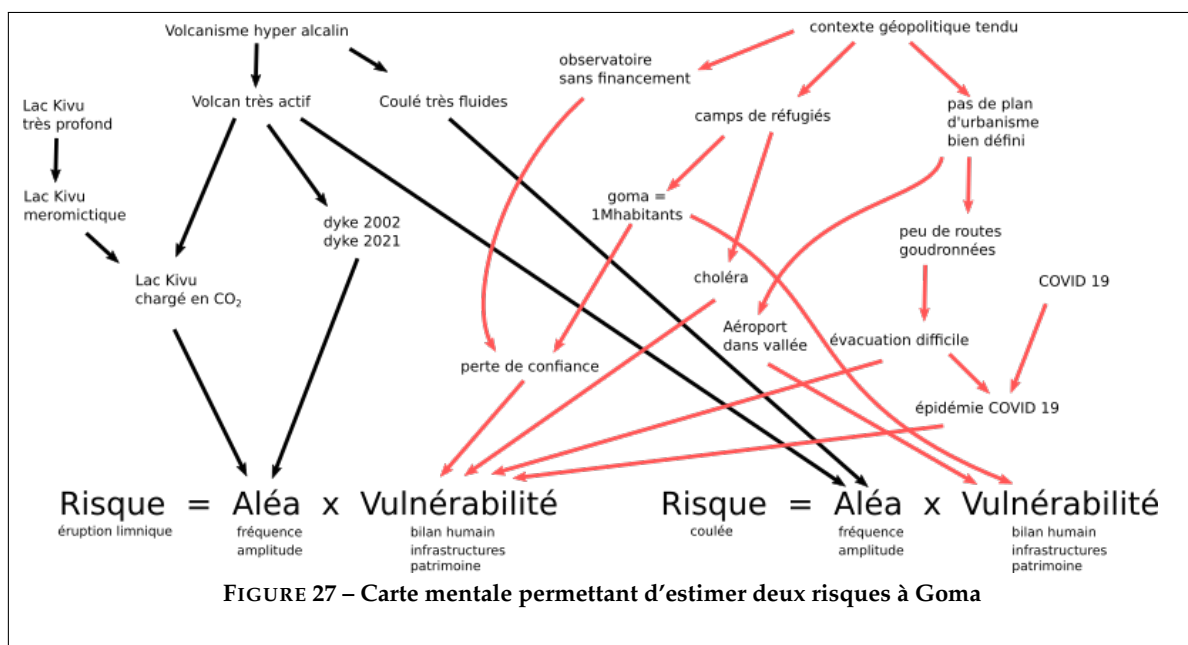


FIGURE 27 – Carte mentale permettant d'estimer deux risques à Goma

3.8 À propos de l'utilisation de l'InSAR en classe

L'interférométrie RADAR peut paraître difficile à utiliser en classe à cause de la complexité de l'interprétation fine des données. Cependant, il est possible de se limiter à une simple analyse qualitative :

- où est ce que ça bouge ?
- est-ce que ça bouge beaucoup ?

La communauté "InSAR" est généralement très réactive : sur des événements importants, les interférogrammes sont généralement publiés moins d'une semaine après l'événement, ce qui permet d'envisager une utilisation en classe pour étudier des faits d'actualité. À ma connaissance, deux sites publient rapidement des interférogrammes :

- SARVIEW : <https://sarviews-hazards.alaska.edu> (événements volcaniques ou séismes)
- MOUNTS : <http://www.mounts-project.com> (uniquement volcans)

mais en tapant "insar + événement" dans votre navigateur, on trouve des images publiées en dehors de ces plateformes. J'ai ainsi trouvé un interférogramme du Teil 2 jours après le séisme du 11 novembre 2019

Cette réactivité de la communauté InSAR est principalement due au changement de paradigme de plus en plus d'agences spatiales, qui ont ouvert leurs bases de données, en les mettant à disposition très rapidement après leur acquisition : les données étant en accès libre, la communauté scientifique n'a plus à payer, ce qui permet d'accélérer leur utilisation.

Références

- [1] **Augier (2011)**
Données issu du traitement d'interférogrammes ENVISAT couvrant les périodes de mai 2007 à mai 2009, données GPS : OVPF– Thèse de doctorat : *Etude de l'éruption d'avril 2007 du Piton de la Fournaise (île de la Réunion) à partir de données d'interférométrie RADAR et GPS, développement et application de procédures de modélisation*
- [2] **Augier (2020)**
Interférométrie radar : principes et utilisation dans la surveillance de la déformation du sol– *planet-terre (ens-lyon)*
- [3] **Augier (2021)**
L'éruption de mai 2021 du Nyiragongo (République démocratique du Congo) vue par interférométrie radar– *planet-terre (ens-lyon)*
- [4] **Copernicus (2018)**
EMSN047 : Volcanic risk in Democratic Republic of the Congo – <https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSN047>
- [5] **Copernicus (2021)**
EMSR513 : Nyiragongo volcano's eruption, DR Congo and Rwanda– <https://emergency.copernicus.eu/mapping/list-of-components/EMSR513>
- [6] **SRTM (2000)**
Modèle numérique de Terrain SRTM – <https://urs.earthdata.nasa.gov/YsEzeg45xTZWZ2d>
- [7] **IGN (1998?)**
BD Alti 25 m de l'île de la Réunion avant 1998 (ce fichier n'est plus distribué par l'IGN). La partie sous-marine a été obtenue à partir de la base shom (<https://diffusion.shom.fr>)– *geoservices.ign.fr*
- [8] **IGN (2010)**
BD Alti 25 m de l'île de la Réunion (librement téléchargeable). La partie sous-marine a été obtenue à partir de la base shom (<https://diffusion.shom.fr>)– *geoservices.ign.fr*
- [9] **OVPF (2021)**
Contour des coulées fourni par l'Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise (merci à Aline Peltier)–
- [10] **Sarviews-hazards (2021)**
Interférogrammes calculés à partir d'images RADAR sentinel 1 <https://sarviews-hazards.alaska.edu/>– (<https://sarviews-hazards.alaska.edu/Event/221?pinmed=d989972a-8f8e-4337-9744-f9dbb668ef33,406295fb-403e-4604-acc9-4cd65ddeae09>)
- [11] **ESA (2021)**
Images sentinel 1, obtenues via EO Browser– <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser>
- [12] **ESA (2021)**
Images sentinel 2, obtenues via sentinel-open access hub– <https://scihub.copernicus.eu/dhus/>
- [13] **Votava et al. (2017)**
Holocene carbonate record of Lake Kivu reflects the history of hydrothermal activity– *Proc Natl Acad Sci USA*
- [14] **Wauthier et al. (2012)**
Magma sources involved in the 2002 Nyiragongo eruption, as inferred from an InSAR analysis– *Journal of Geophysical Research : Solid Earth*