Les barrages se tordent (de rire) : analyse des images (mal) géoréférencées et par interférométrie RADAR spatioporté

J.-M Friedt, 26 janvier 2021

Nombre d'images diffusées sur le web sont manipulées, en particulier pour être projetées dans un référentiel géographique. Des projections automatiques mal contrôlées peuvent aboutir à un résultat aberrant ... repris dans un documentaire diffusé par France 24 et donnant lieu à polémique sur les risques de rupture du plus gros barrage hydroélectrique du monde. Un peu de bon sens et de contrôle de l'information aurait pu éviter la bévue.

Sachant que nous [1, 2] analysons les déformations de structures géologiques ou anthropiques par interférométrie RADAR [3], un collègue a récemment attiré notre attention sur un documentaire diffusé par France 24 sur les déformations induites par les crues de la retenue d'eau du barrage des Trois Gorges en Chine (111° E, 31° N). Le RADAR interférométrique au sol (GB-SAR) étant effectivement utilisé pour surveiller de telles structures [4, 5], notre curiosité a été éveillée pour savoir si nous pourrions mesurer de telles déformations par analyse des données acquises par Sentinel1, le RADAR spatioporté européen pour obtenir une estimation cohérente avec les observations au sol [6] : pour ce faire, nous devions avoir une idée de l'ordre de grandeur desdites déformations. Et là ... ça se gâte.



FIGURE 1 – Extrait du documentaire faisant référence aux déformations du barrage des Trois Gorges soi-disant observées sur les images Google Earth.

Le documentaire en question intitulé "Chine : le barrage des Trois Gorges, chantier pharaonique aux conséquences désastreuses" [7] est une critique assez banale de tout grand chantier qui impacte sur l'environnement, et toutes les excuses sont bonnes pour en dénigrer les conséquences. Un choix éditorial quelque peu surprenant de la chaîne nationale française diffusée vers l'étranger, mais si l'argumentaire pouvait se tenir, pourquoi pas. Nous ne sommes pas compétents pour juger des premiers argumentaires, mais la partie concernant les risques de l'intégrité structurelle au vu des photographies aériennes est simplement risible. Plus étonnant, le journaliste auteur de ce documentaire ne fait que reprendre une série d'affirmations basées sur une photographie prise par satellite et diffusée sur un réseau social sans contrôle ni de l'auteur, ni du journaliste (Fig. 1). En cette période de tensions géopolitiques, ce type d'affirmations mériterait au minimum une analyse, et pas juste par des géologues exilés tel que le propose le documentaire.

1 Les faits

La photographie diffusée sur les réseaux sociaux tel que nous le vérifions en consultant `https://twitter.com/jenniferatntd/status/1273381803211010049` et qui laisse présager d'une rupture possible du barrage a été prise autour du 23 Février 2018 et loin d'avoir été censurées comme l'annonce le documentaire (l'auteur du documentaire a été contacté et précise que "des photos satellites diffusées sur internet puis censurées" s'applique *au web chinois*), la photographie est parfaitement accessible sur Google Earth au moyen de son "Time Slider" en haut à gauche qui permet de remonter aux images passées. Nous sommes cependant interloqués par la périodicité de la déformation qui ne semble pas crédible pour ce type de structure (Figs. 3 et 4, milieu).

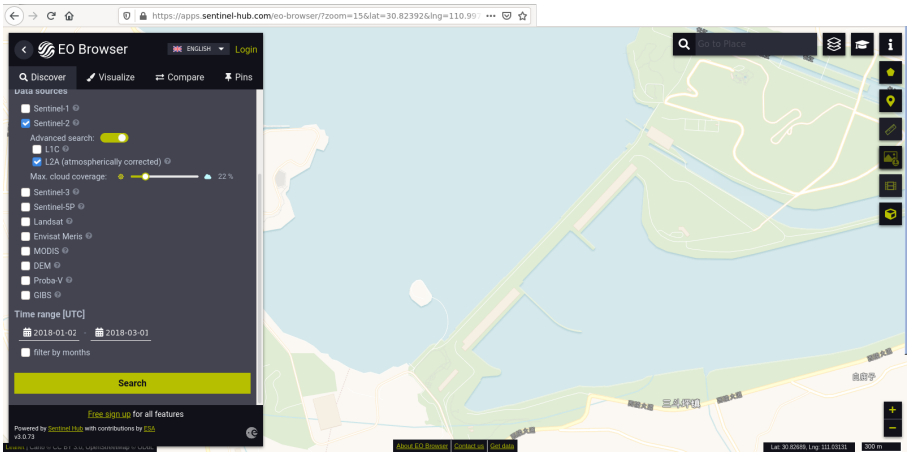


FIGURE 2 – L'Agence Spatiale Européenne donne accès non seulement aux données brutes des satellites d'observations dans les bandes optiques Sentinel 2A et B mais aussi aux données traitées et classées par date, sélectionnables pour un site géographique donné. Cette page est accessible à `https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/?zoom=15&lat=30.82392&lng=110.99715`

Les images satellitaires de l'Agence Spatiale Européenne (ESA) prises par Sentinel2 étant accessibles à `https://www.sentinel-hub.com/explore/eobrowser/` (Fig. 2), il nous suffit de vérifier ce que ces satellites construits par Airbus Defence ont vu autour de cette date (Figs. 3 et 4 à gauche et droite). Dans tout l'exposé qui va suivre, les annotations en rouge sur les photographies aériennes – droites pour expliciter les déformations ou ellipses pour attirer l'œil sur les incohérences – sont notre contribution à l'analyse de ces images et ne sont pas présentes sur les photographies originales avant analyse.

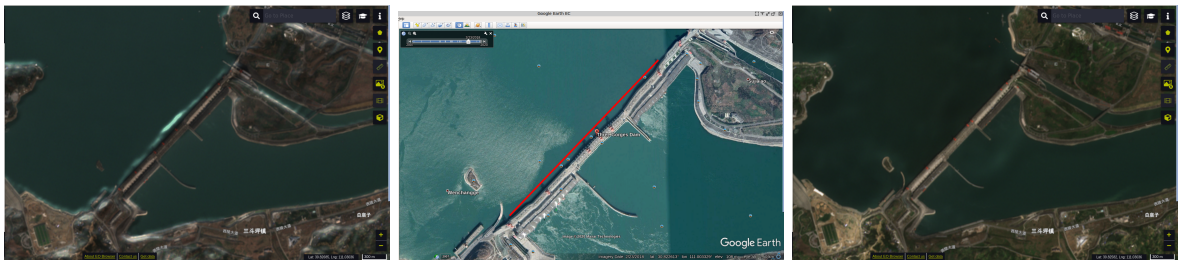


FIGURE 3 – Photographies satellitaires acquises par Sentinel2 et mises à disposition par l'ESA le 11 Janvier 2018 (gauche), Google Earth du 23 Février 2018 (milieu) et citée dans le documentaire, et l'archive de l'ESA diffusant les images optiques de Sentinel2 (droite) du 27 Mars 2018.

On commence à avoir un doute, la déformation n'est pas visible sur les images Sentinel 2 ni avant (11 Janvier 2018) ni après (27 mars 2018). On est peut être mal tombés et on regarde les autres photographies archivées par Google Earth, pour se rendre compte que ce barrage a un vrai soucis, il n'arrête pas de se

tordre dans tous les sens ... sur les images diffusées par Google, Figs. 3 à 5. Un seul cas où le barrage cesse de se tortiller : le 4 Juin 2020 en Fig. 6 (on verra plus loin pourquoi !).

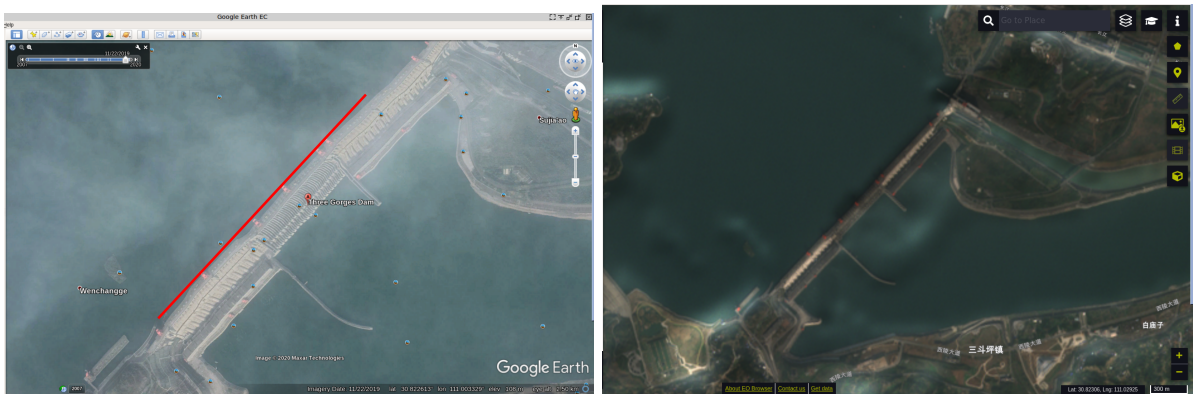


FIGURE 4 – Photographies satellitaires diffusées par Google Earth du 22 Novembre 2019 (gauche) et l'archive de l'ESA diffusant les images optiques de Sentinel2 (droite) du 7 Décembre 2019.

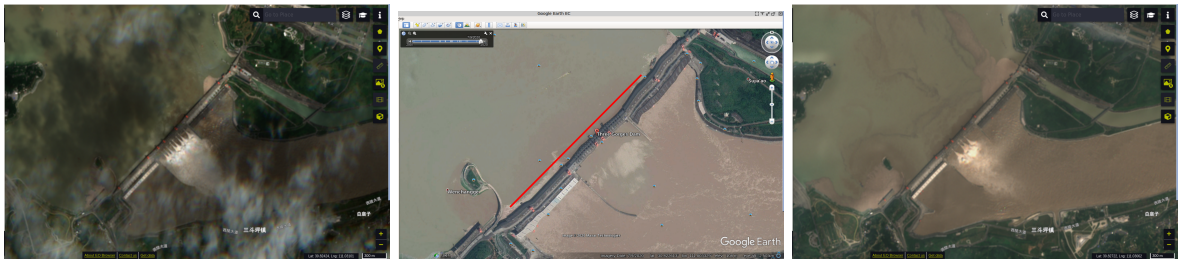


FIGURE 5 – Photographies satellitaires acquises par Sentinel2 et mises à disposition par l'ESA le 18 Aout 2020 (gauche), Google Earth du 7 Septembre 2020 (milieu) et l'archive de l'ESA diffusant les images optiques de Sentinel2 (droite) du 28 Aout 2020.

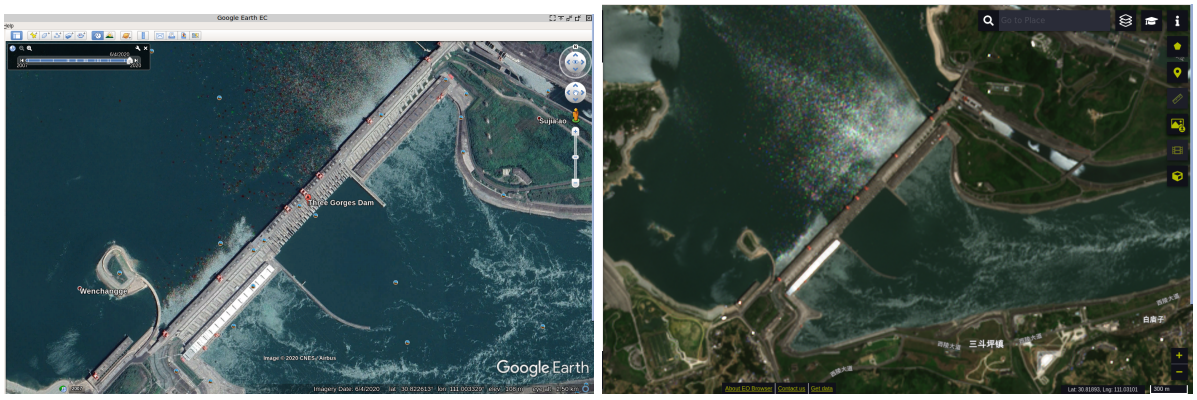


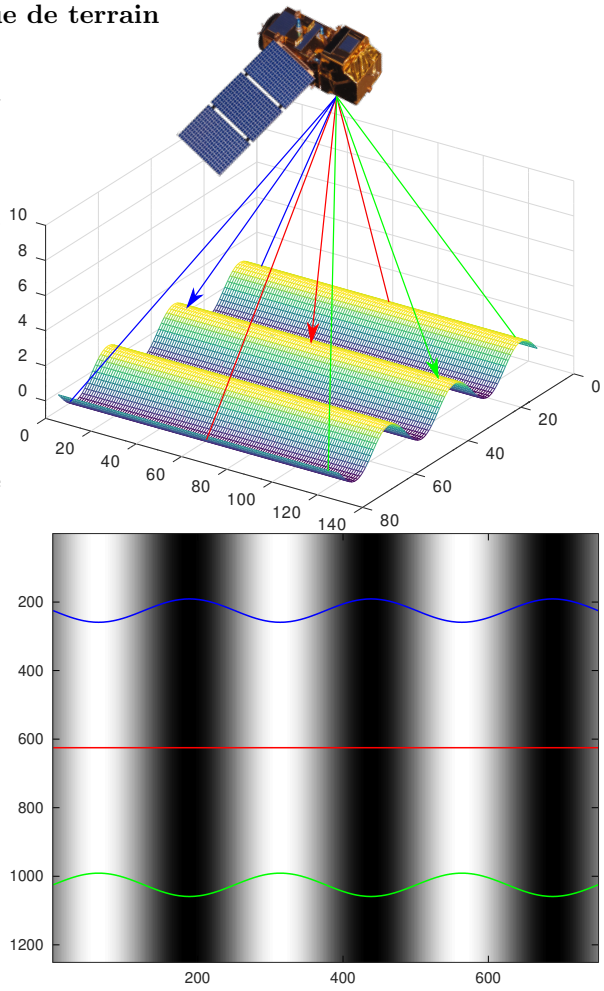
FIGURE 6 – Photographies satellitaires diffusées par Google Earth du 4 Juin 2020 (gauche) et l'archive de l'ESA diffusant les images optiques de Sentinel2 (droite) du 4 Juin 2019 (il s'agit bien de la même date ! voir texte).

2 Analyse

Le 4 Juin marque l'unique date de la série de prises de vues spatiales depuis 2016 lorsque Google a acquis son image auprès de ... Airbus (le copyright de chaque photographie est indiqué en bas d'écran). Les autres images ont pour copyright Maxar Technologies, ex-DigitalGlobe qui exploite les satellites haute-résolution de la série WorldView, GeoEye et autres Ikonos américains. On pourra donc mettre en doute les déformations introduites par Maxar lors de la projection des images : par exemple Worldview (`https://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/worldview-2/`) observe jusqu'à $\pm 40°$ de la verticale (*off nadir*), induisant des déformations significatives sur les bords de l'image qu'il faut compenser par une projection sur le modèle numérique de terrain [8]. Or un modèle numérique de terrain est excessivement difficile à réaliser par traitement stéréoscopique sur les régions couvertes d'eau (difficile de faire une corrélation sur la surface de l'eau où toutes les vagues se ressemblent) et par RADAR sur une rupture de pente aussi abrupte que la façade d'un barrage. Nous pouvons donc raisonnablement supposer que les images Maxar sont fortement déformées par la grande ouverture angulaire de la prise de vue (double de celle de Sentinel2) et/ou par un modèle numérique de terrain médiocre dans cette région.

Projection d'image sur un modèle numérique de terrain

Une image est acquise depuis un vecteur de vol – aérien ou spatial – au moyen d'un appareil photographique présentant une certaine ouverture angulaire. Alors qu'un satellite à l'infini (c'est loin) pourrait supposer que le capteur est illuminé par une onde plane, un capteur à distance finie du plan imagé est illuminé par un cône convergent. La topographie du sol observé a donc une influence sur la position de chaque pixel par rapport à ce que nous observerions en projection azimutale (i.e. avec un capteur à l'infini). Sous QGis, le greffon expérimental `pic2map` disponible à `https://github.com/tproduit/pic2map` propose cette opération de projection sur un modèle numérique de terrain. Nous proposons ici une expérience de pensée dans laquelle l'image d'une structure linéaire est projetée sur un modèle numérique de terrain en tôle ondulée. En vue azimutale (droite rouge) la structure linéaire est observée comme une droite, mais en vue oblique (vert ou bleu) la droite est déformée par le modèle numérique de terrain pour former ici une sinusoïde, d'autant plus prononcée que l'angle de visée est rasant. Si le modèle numérique de terrain est erroné – comme c'est souvent le cas en présence de surfaces d'eau ou de ruptures de pentes rapides tel que le mur d'un barrage – alors la projection de l'image aérienne sera tout aussi erronée.



Droite : code GNU/Octave pour afficher le graphique ci-dessus illustrant la projection d'une image (lignes rouges) de structures linéaires sur un modèle numérique de terrain (tons de gris en arrière plan).

```
x=sin(2*pi*[0:0.004:3]);
y=ones(1,1251);
xx=meshgrid(x,y);
imagesc(xx)
colormap gray;hold on
plot(x*34+625-400,'r')  % cos (theta<90)
plot(-x*34+625+400,'r') % cos (theta>90)
plot(-x*0+625,'r')      % cos (theta=90)
```

Sans vouloir simplement répéter le contenu de `https://medium.com/annie-lab/misleading-satellite-images-of-`

auquel nous ne voyons rien à redire, nous nous sommes efforcés ici de croiser nos données et d'identifier les lacunes potentielles des certaines informations. Nous ne saurions en aucun cas blâmer Google qui n'a aucune prétention de rigueur de Google Earth mais fournit simplement un jouet pour permettre à chacun de visualiser des paysages drapés sur un modèle numérique de terrain affublés de photographies associées aux divers sites. L'utilisation de ces données sans garantie de qualité est à la responsabilité de ses utilisateurs, critiques ou non des données fournies, lors de leur exploitation [9].

Le message d'origine était portant accompagné de diverses analyses circonstanciées démontrant clairement l'erreur d'analyse, et ce dès le 18 Juin 2020, qui aurait du jeter le discrédit sur cette information (Fig. 7). Pourtant l'image et l'analyse erronée se retrouve dans maintes publications après le mois de Juillet et jusque dans le documentaire "journalistique" qui a initié cette étude.



FIGURE 7 – Le message "original" affiché sur un réseau social bien connu datant du 18 Juin 2020 (gauche) était accompagné de diverses analyses circonstanciées sur la conclusion erronée qui était faite (droite) ... et pourtant l'information originale a été reprise et diffusée sans analyse critique par nombre de media.

3 Mais ... la maladie se propage

On recommence, l'analyse sur le Hoover Dam américain pour voir si la maladie des barrages qui se tortillent s'est propagée de Chine vers les États Unis d'Amérique ... et en effet en observant autour de 36° N, 114° W ne retrouvons nous pas le même type de phénomène sur le mur vertical entouré d'un côté de la surface homogène qu'est le lac de retenue. Toutes les images sont de copyright Landsat (qui apparaît brièvement si nous désactivons le cache de Google Earth lors du chargement des tuiles de l'image) sauf l'apothéose de Mai 2020 fournie par ... Maxar Technologies ! (Fig. 8).

Peu de doutes subsistent sur le fait que les déformations observées sont des artefacts de projection sur des conditions particulièrement défavorables de modèle numérique de terrain localement erroné d'images prises en vue oblique. Est-ce que le RADAR spatioporté saurait faire mieux par une mesure interférométrique, certes moins spectaculaire visuellement, mais qui pourrait avoir le bon goût de ne pas

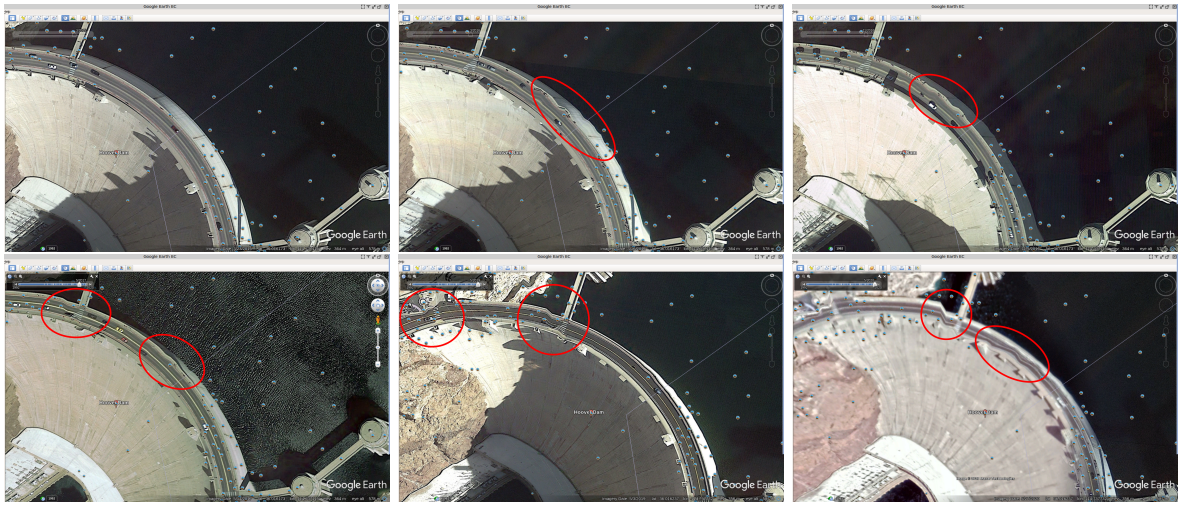


FIGURE 8 – Le barrage de Hoover aux États-Unis d'Amérique vu par Google Earth est aussi sujet aux secousses visuelles. Les images Landsat sont plutôt bien géoréférencées jusqu'à la dernière image fournie par ... Maxar Technologies ! (en bas, droite)

être affectée par de tels artefacts (au détriment d'autres dont nous nous efforcerons de minimiser les conséquences) ?

4 Mesure des déformations par interférométrie RADAR

Pour en revenir à la sollicitation première qui était d'évaluer la faisabilité de mesurer depuis l'espace les déformations du barrage par mesure interférométrique des signaux RADARs [10, 11] émis par Sentinel1 [12] et réfléchis depuis le sol, nous avons acquis les données sur le site web de l'ESA. Étrangement, Sentinel 1B ne collecte jamais de données au-dessus de cette région de la Chine, et Sentinel 1A ne présente qu'une seule orbite pendant laquelle les données sont collectées, toujours ascendante donc observant le barrage depuis l'ouest. Ce plan d'acquisition décrit à `https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-1/observation-scenario` tel que nous le présente S. Gascoin du CESBIO de Toulouse n'est pas de chance car c'est le côté de la retenue d'eau, mais faisons avec ce que nous avons. La procédure de traitement a été décrite en détail auparavant [2] donc nous ne reprenons pas ici le descriptif de la chaîne d'analyse interférométrique des mesures acquises entre Juin et Septembre 2020 couvrant cette partie du Yangtze parfaitement visible sur les images acquises depuis l'espace. Dans les affichages qui vont suivre, nous ne fournirons la mesure de différence de phases $\delta\varphi$ entre deux acquisitions successives séparées de 12 jours, qui rappelons le est lié au déplacement du réflecteur δr dans la direction de visée (LOS pour *Line of Sight*) par $\delta\varphi = \delta r/\lambda \times 4\pi$ pour un signal de longueur d'onde $\lambda = 5,6$ cm pour Sentinel1 (le facteur 2 multiplicatif de 2π vient de l'aller-retour du signal). Par rapport aux analyses proposées dans [2], nous allons ajouter une condition sur l'affichage de la phase : cette mesure n'est correcte que si le rapport signal à bruit indiqué par le degré de cohérence (compris entre 0 et 1) est supérieur à un seuil que nous fixons arbitrairement à 0,7. L'astuce pour filtrer une image (carte de la phase) par les grandeurs d'une autre image (carte de la cohérence) dans bien des langages et notamment QGis est de sélectionner la condition $coherence \geq 0,7$ qui répond 1 ou 0 selon que la condition soit vérifiée ou non, et de multiplier le résultat par la carte à afficher, ici la phase. Sous QGis, dans le *Raster Calculator*, nous créerons donc une nouvelle couche résultant de l'opération `(coh >= 07) * phase` pour n'afficher que la phase si la cohérence est supérieure à 0,7 en imposant la transparence pour les valeurs nulles de la couche ainsi créée. Si une phase statique doit être ajoutée (par exemple pour compenser les délais variables de propagation à travers l'atmosphère de permittivité variable avec la température et le taux d'humidité), alors une équation de la forme `-(couche>=3.14)*6.28+couche` fera office de modulo 2π.

Le niveau d'eau dans la retenue du barrage des Trois Gorges est disponible par exemple à `https://journal.probeinternational.org/reservoir-level-3` : nous n'avons aucune capacité à vérifier ces

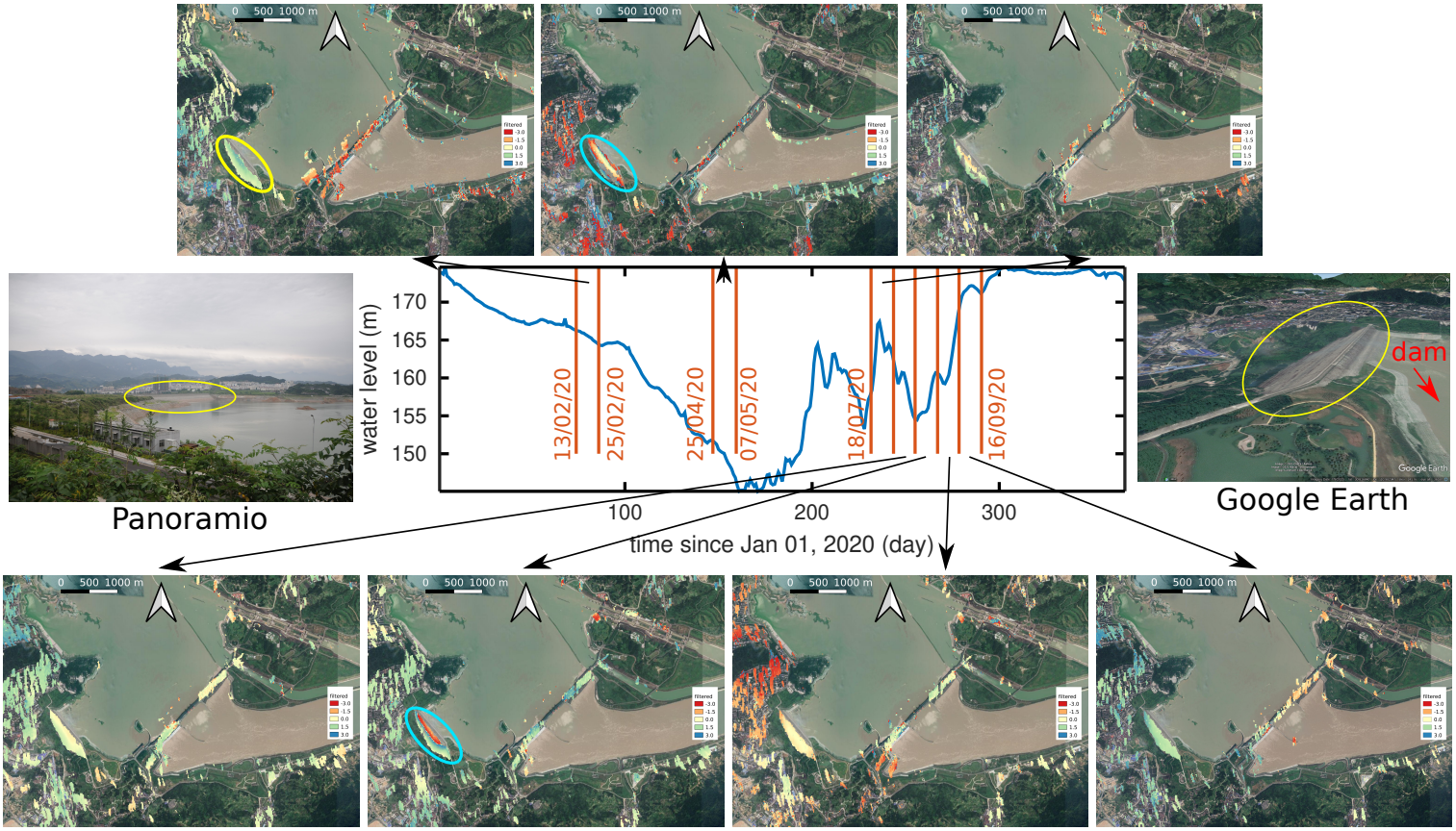


FIGURE 9 – Phase de la mesure interférométrique issue de Sentinel1, en haut de gauche à droite entre 13 et 25 février 2020, 25 avril et 7 mai 2020, 18 et 30 juillet 2020, puis en bas du 30 juillet au 16 septembre par pas de 12 jours. L'image en arrière plan du barrage des Trois Gorges est issue de Google Maps et ne présente aucun contenu informatif autre que de donner le contexte géographique des points où la phase est pertinente. La photographie de gauche est [13] de Panoramio, l'image à droite est une vue oblique de Google Earth mettant en évidence la structure de digue utilisée comme référence (ellipses jaunes).

mesures et devons y faire aveuglément confiance – au pire quelques valeurs pourraient être vérifiées en observant le niveau du lac de retenue sur les images de Sentinel2 si nous étions vraiment paranoïaques. Le tracé de ces mesures montre la lente décroissance du niveau d'eau avant la saison des moussons qui commence autour de Juillet. L'analyse que nous proposons en Fig. 9 tente de corroborer le niveau du lac de retenue du barrage des Trois Gorges avec la déformation observée par interférométrie RADAR par Sentinel1. Une analyse en double différence [14] est opérée : différence temporelle entre deux passages successifs du satellite avant que la décorrélation ne devienne excessive et n'empêche la mesure de phase, et différence spatiale entre une référence supposée fixe et la zone en mouvement pour s'affranchir des retards atmosphériques variables, dépendant des conditions atmosphériques (température, humidité). Nous avons fait l'hypothèse que la structure sur la berge entourée d'une ellipse jaune sur la figure en haut à gauche est fixe, hypothèse que nous ne pouvons vérifier en n'étant pas sur place pour connaître la nature de cet ouvrage d'art qui semble être une digue pour empêcher l'écoulement de l'eau vers le village en aval. L'hypothèse peut sembler discutable sur l'image du milieu en haut et en bas, deuxième de la gauche, où cette structure a clairement évolué entre les deux prises de vues (ellipses cyan). Néanmoins, nous observons une déformation potentielle du barrage sur les trois figures du haut et la deuxième du bas, tandis que les trois autre figures du bas ne présentent pas de déformation notable avec une phase le long du barrage proche de 0. On notera que sur toutes ces figures, un déphasage de $\pm\pi$ (rouge et bleu respectivement sur la légende à droite de chaque figure) correspond qu'à $\pm 1,4$ cm (quart de longueur d'onde), qui n'est clairement pas visible depuis un satellite observant dans les longueurs d'onde optique. En effet, sans compter l'impact de l'atmosphère, un simple critère de Rayleigh d'optique géométrique

impliquerait un télescope spatial à $R = 700$ km d'altitude avec une optique de diamètre $D \simeq \lambda \times R/\delta r = 600 \cdot 10^{-9}/0,014 \times 700 \times 10^3 = 30$ m (pour rappel, le téléscope spatial Hubble présente un diamètre de 2,4 m !). Ces résultats sont du même ordre de grandeur que ceux présentés à la réunion du European Geophysical Union sur le barrage de Hoover [15]. Une telle étude a bien entendu été menée depuis longtemps par des chercheurs locaux mais à une période précédent les grandes crues observées ces dernière années dans cette région [16].

5 Conclusion

Partant d'une information communiquée sur un réseau social et reprise dans un documentaire diffusé par France 24, nous nous sommes efforcés de valider les contenus transmis et surtout l'analyse qui en est faite. Le journaliste, surtout sur une chaîne nationale supposant faire rayonner l'État financeur à l'international, se devrait d'analyser de façon critique des informations aussi incroyables que fausses. Il nous a néanmoins fallu, au cours de la rédaction de cette prose, une journée pour comparer les images de Google Earth avec les photographies de Sentinel2, et une autre journée pour retrouver les fils des messages originaux sur le réseau social dont nous ne maîtrisons pas l'utilisation. Nous pourrions attendre d'informations diffusées sur les chaînes de télévision habituellement considérées comme sérieuses ce minimum de vérification.

Le plus ahurissant dans cette histoire est que des officiels chinois aient cru bon de répondre [17] à la diffusion de ces images clairement déformées par traitement lors de la projection pour expliquer que le barrage est resté dans ses limites de déformation élastique, donc réversible et opposée à plastique qui est la déformation irréversible de la structure (combien de lecteurs de Twitter connaissent la différence entre déformation élastique et plastique ?), et sans fournir la valeur définissant la limite entre ces deux régimes.

Extraordinary claims require extraordinary evidence nous disait Carl Sagan en 1980 [18] : cette affirmation reste d'autant plus d'actualité en ce moment de diffusion effrénée des informations peu ou pas vérifiées.

Remerciements

Mes collègues X. Vacheret et É. Carry (FEMTO-ST/Temps-Fréquence, Besançon) m'ont aidé à collecter une partie des informations analysées dans ce document. L'auteur du documentaire, A. Védéilhé, a gracieusement répondu à notre demande de commentaires en maintenant l'exactitude de son exposé et en réfutant l'opinion que nous exprimons sur le travail journalistique : nous le remercions pour cet échange de mails, et laissons le lecteur juger de l'adéquation du discours aux faits exposés. Library Genesis à `gen.lib.rus.ec` reste la source incontournable à nos activités de recherche et développement pour acquérir les références bibliographiques qui ne sont pas disponibles librement sur le web.

Références

[1] J.-M Friedt, W. Feng, *Mesure fine de déplacement par RADAR interférométrique à synthèse d'ouverture (InSAR) par radio logicielle (3/3)*, GNU/Linux Magazine France **244** (Jan. 2021)

[2] J.-M Friedt, P. Abbé, *Parler à un RADAR spatioporté : traitement et analyse des données de Sentinel1*, GNU/Linux Magazine France **246** (Mars 2021)

[3] J. & T.J. Wright, *How satellite InSAR has grown from opportunistic science to routine monitoring over the last decade*, Nature Communications **11** 3863 (2020)

[4] P. Wang *& al.*, *Reservoir Dam Surface Deformation Monitoring by Differential GB-InSAR Based on Image Subsets*, MDPI Sensors **20** 396 (2020)

[5] Z. Qiu *& al.*, *Dam Structure Deformation Monitoring by GB-InSAR Approach*, IEEE Access **8** 123287–123296 (2020)

[6] L. Mascolo, G. Nico, & A. Pitullo, *Merging Ground-Based and Spaceborne InSAR Data to Monitor an Earth Dam*, Proc. ESASP, 731, 19 (2015)

[7] https://www.france24.com/fr/asie-pacifique/20201002-chine-le-barrage-des-trois-gorges-chantier-pl
C3%A9quences-d%C3%A9sastreuses disponible pour visionnage à https://www.youtube.com/
watch?v=FbZLElk4ae4 avec la séquence malheureuse commençant à 14 minutes

[8] J.-M Friedt, *Correction géométrique d'images prises en vue oblique – projection sur modèle numérique d'élévation pour exploitation quantitative de photographies numériques*, GNU/Linux Magazine France **167** 42–57 (2014)

[9] J. Liang, J. Gong & W. Li, *Applications and impacts of Google Earth : A decadal review (2006–2016)*, ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing **146** 91–107 (2018)

[10] M. Corsetti *& al.*, *Advanced SBAS-DInSAR Technique for Controlling Large Civil Infrastructures : An Application to the Genzano di Lucania Dam*, MDPI Sensors **18** 2371 (2018)

[11] P. Mazzanti *& al.*, *Structural Health Monitoring of Dams by Advanced Satellite SAR Interferometry : Investigation of Past Processes and Future Monitoring Perspectives*, Proc. 7th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, Turin, Italie (2015) à https://www.nhazca.it/pdf/Monitoring_Dams_A-DInSAR.pdf

[12] S. Ullo *& al.*, *Application of DInSAR technique to high coherence Sentinel-1 images for dam monitoring and result validation through in situ measurements*, IEEE J. of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing **12** (3) 875–890 (2019)

[13] https://lh5.googleusercontent.com/p/AF1QipMm74ROUHlsuI8jjdJcOPP4Y7jn889jSYgpa__j=
h1440

[14] P. Marinkovic *& al*, *InSAR quality control : Analysis of five years of corner reflector time series*, Proc. Fringe 2007 Workshop (ESA SP-649), Frascati, Italie **26** 30 (2007)

[15] M. Darvishi *& al.*, *Lake Mead and Hoover Dam monitoring in Nevada and Arizona states, USA using InSAR*, EGU (2020) à https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2020/EGU2020-21582.
html

[16] T. Wang *& al.*, *Three Gorges Dam stability monitoring with time-series InSAR image analysis*, Science China – Earth Science **54** (5), 720–732 (Mai 2011) à https://www.researchgate.
net/profile/Teng_Wang3/publication/225713220_Three_Gorges_Dam_stability_
monitoring_with_time-series_InSAR_image_analysis/links/0912f505c5cf4367a6000000/
Three-Gorges-Dam-stability-monitoring-with-time-series-InSAR-image-analysis.pdf

[17] F. Chen, *Three Gorges Dam deformed but safe, say operators*, Asia Times (21 Juillet 2020) à https:
//asiatimes.com/2020/07/three-gorges-dam-deformed-but-safe-say-operators/ où l'image déformée continue à apparaître.

[18] C. Sagan, *Cosmos Episode 12 : Encyclopedia Galactica*, 1 min 25 secondes à https://www.youtube.
com/watch?v=f77B2gRZhSo