



**HAL**  
open science

## Effet de site topographique en champ proche : rôle de l'éclairage sismique et glissements de terrain induits

Aline Bou Nassif, Emeline Maufroy, Pascal Lacroix, Emmanuel Chaljub,  
Mathieu Causse, Pierre-Yves Bard

### ► To cite this version:

Aline Bou Nassif, Emeline Maufroy, Pascal Lacroix, Emmanuel Chaljub, Mathieu Causse, et al.. Effet de site topographique en champ proche : rôle de l'éclairage sismique et glissements de terrain induits. 5èmes Rencontres Scientifiques et Techniques Résif, Nov 2021, Obernai (67210), France. hal-03442174

**HAL Id: hal-03442174**

**<https://hal.science/hal-03442174v1>**

Submitted on 23 Nov 2021

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



# Effet de site topographique en champ proche : rôle de l'éclairage sismique et glissements de terrain induits

Aline Bou Nassif<sup>1</sup>, Emeline Maufroy<sup>1</sup>, Pascal Lacroix<sup>1</sup>, Emmanuel Chaljub<sup>1</sup>, Mathieu Causse<sup>1</sup> et Pierre-Yves Bard<sup>1</sup>

(1) Univ. Grenoble Alpes, Univ. Savoie Mont Blanc, CNRS, IRD, UGE, ISTerre, 38000 Grenoble, France. Email : [aline.bou-nassif@univ-grenoble-alpes.fr](mailto:aline.bou-nassif@univ-grenoble-alpes.fr)

## Résumé

Les effets de site topographique, causés par la focalisation des ondes sismiques dans le relief, peuvent localement amplifier le mouvement sismique (Maufroy 2010; Massa et al. 2014). Lors d'un séisme en zone montagneuse, ils peuvent causer d'importants dégâts et favoriser le déclenchement des glissements de terrain (Çelebi 1987; Kawase & Aki 1990; Bouchon & Barker 1996; Meunier et al. 2008). La variabilité de la réponse sismique d'un site topographique à différents séismes reflète la dépendance de cette réponse non seulement à la forme du relief mais aussi à la localisation de la source sismique. Pour mieux comprendre les origines de cette variabilité, nous déterminons les paramètres qui contrôlent les niveaux d'amplification topographique, en se concentrant sur la zone de champ proche du séisme (à quelques kilomètres de l'épicentre). Nous couplons des données de simulation numérique 3D de la propagation des ondes sismiques avec des méthodes d'intelligence artificielle (réseaux de neurones) pour identifier ces paramètres-clés. Nous proposons ensuite une nouvelle définition du phénomène d'éclairage sismique, qui explique pourquoi les amplifications sont généralement plus importantes sur les crêtes opposées au champ des ondes incidentes (Bouchon 1973 ; Maufroy et al. 2015). Nous proposons également une méthode pour calculer ce paramètre et quantifier sa contribution en l'incluant dans un nouvel estimateur du mouvement sismique.

Dans le but d'étudier le lien entre les amplifications du mouvement sismique prédites par le nouvel estimateur et la répartition spatiale des glissements de terrain induits en zone montagneuse, nous confrontons l'estimateur à l'inventaire des glissements de terrain du Népal déclenchés par le séisme de Gorkha en 2015 (Mw 7.8). Cet exercice illustre la contribution significative de l'amplification topographique dans la zone la plus affectée à 44-75 km du point pondéré du glissement (14-23 km du plan de rupture). La contribution relative des différents paramètres de l'estimateur (courbure, orientation des pentes) varie dans l'espace et en fréquence, suggérant l'implication de plusieurs phénomènes physiques dans le déclenchement des glissements de terrain cosismiques (focalisation des ondes, éclairage sismique, déformation sur les pentes).

## PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

Glissements de terrains induits par le séisme de Gorkha 2015



<https://newsroom.ucla.edu/releases/imaging-technique-identify-landslides>

### Problématique:

Après un séisme en zone montagneuse, lorsqu'on est en champ proche, une grande variabilité spatiale de la distribution des dégâts est observée.

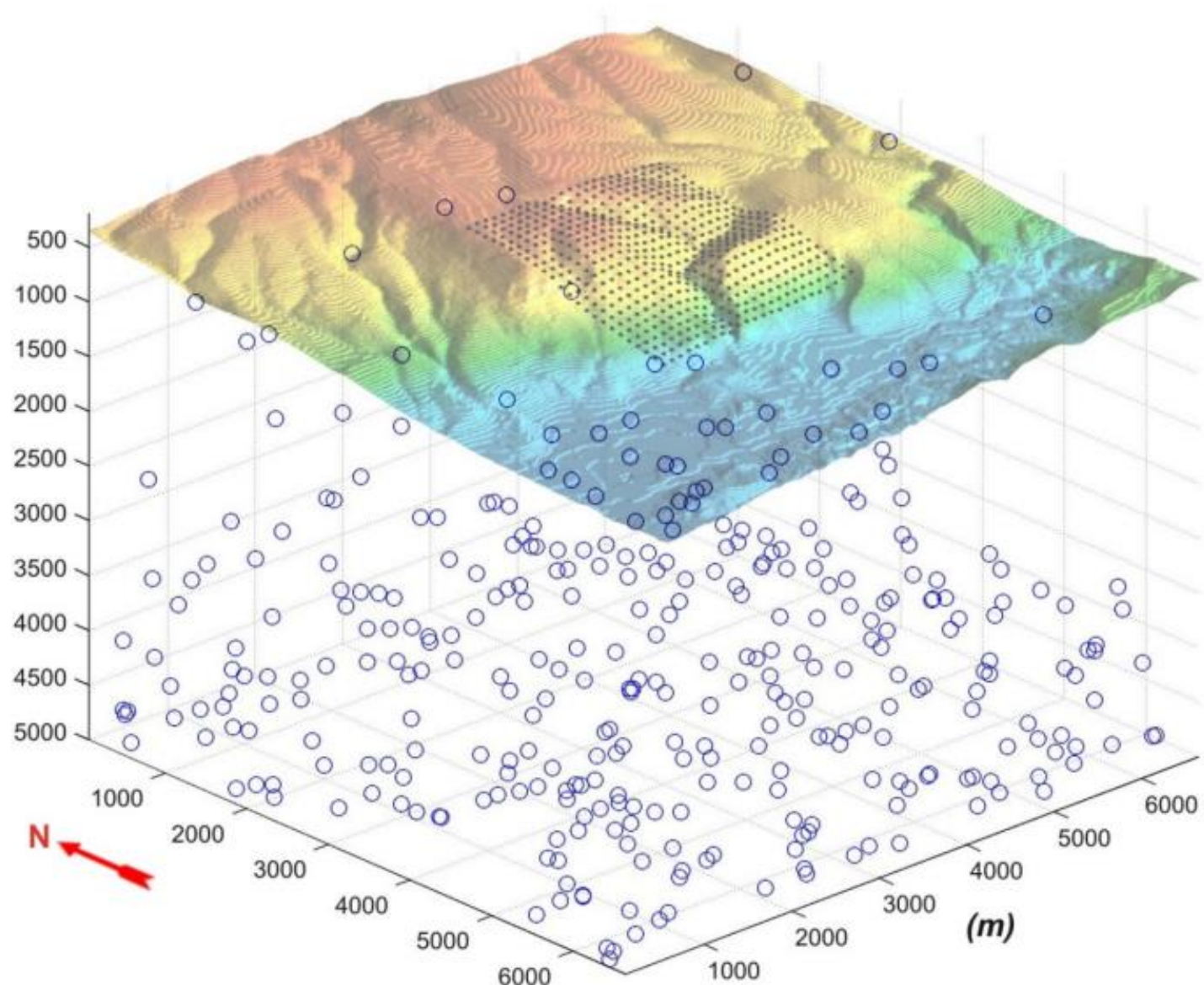
Les effets de site topographique peuvent jouer un rôle : En amplifiant le mouvement sismique du sol ils peuvent causer d'importants dégâts et favoriser le déclenchement des glissements de terrain. Comment prédire ces effets ?

### Objectifs:

- Déterminer les paramètres qui contrôlent les niveaux d'amplification topographique, en champ proche.
- Intégrer ces paramètres dans un estimateur du mouvement sismique.
- Etudier le lien entre les amplifications du mouvement sismique prédites par le nouvel estimateur et la répartition spatiale des glissements de terrain induits en zone montagneuse

## BASE DE DONNÉES ET METHODOLOGIE

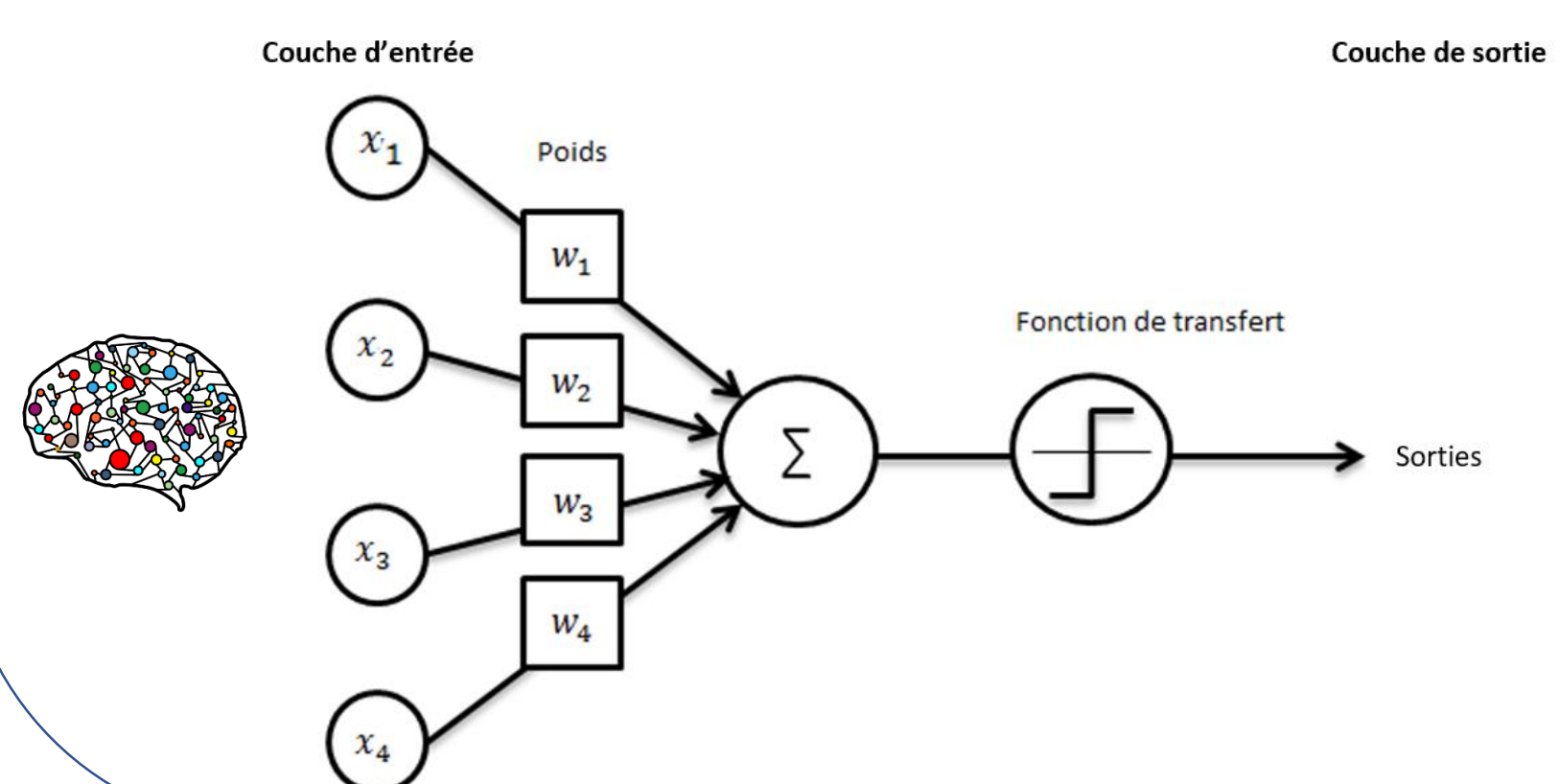
Modèle topographique & localisation des sources et des stations utilisés dans le modèle de simulation 3D (Maufroy 2010)



Données de simulation numérique 3D de la propagation des ondes sismiques:

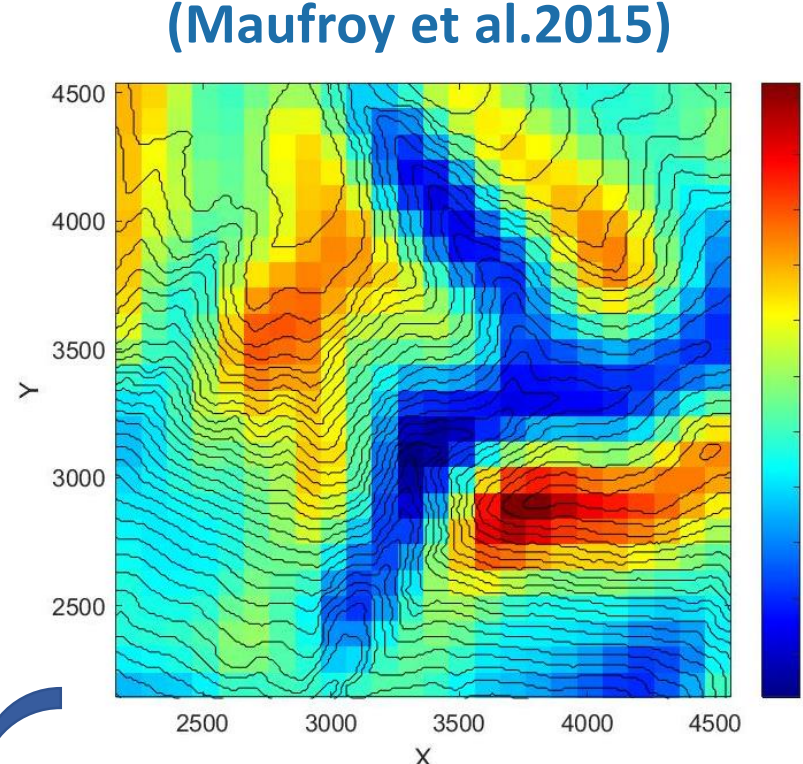
- 200 sources ponctuelles
- 9 fréquences étudiées (1 Hz → 5 Hz)
- 576 stations (24x24 stations espacées de 100 m)
- Topographie discrétisée:  $h=dx=dy=dz=10m$
- Sol homogène:  $V_p=5 km/s$ ,  $V_s=3 km/s$ ,  $\rho=2.6 g/cm^3$

Méthode d'intelligence artificielle: Réseau de neurones

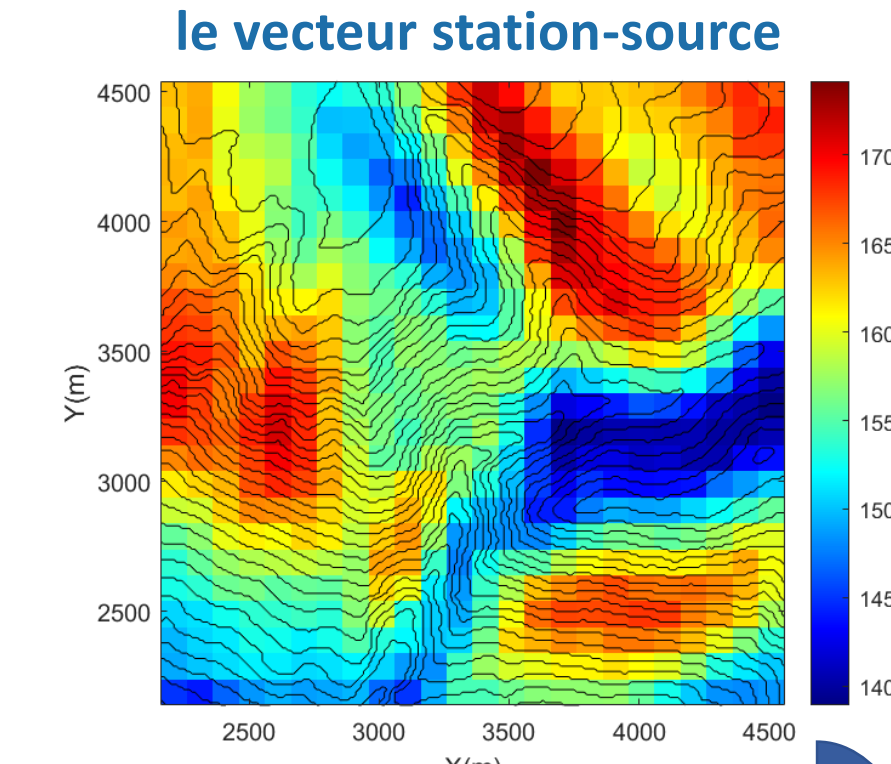


## IDENTIFICATION DES PARAMÈTRES CONTRÔLANT L'AMPLIFICATION TOPOGRAPHIQUE

Courbure topographique (Maufroy et al. 2015)



Angle entre la normale à la surface et le vecteur station-source

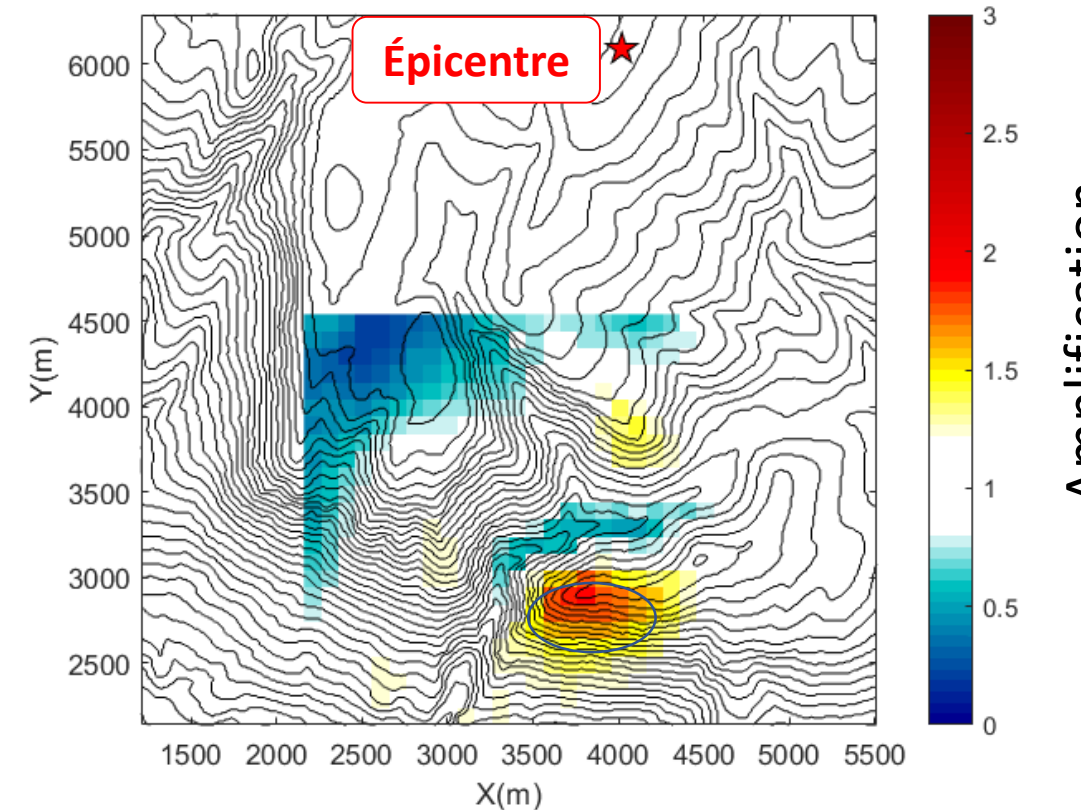


$$C_s = \frac{1}{n^4} \left[ C * \begin{pmatrix} 1_{11} & \dots & 1_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1_{n1} & \dots & 1_{nn} \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} 1_{11} & \dots & 1_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 1_{n1} & \dots & 1_{nn} \end{pmatrix} \right]$$

Avec n Impaire et  $\sim \frac{\lambda_s}{4+4t}$

$$A = \cos^{-1} \left( \frac{Xn \times (X_{source} - X_{stat}) + Yn \times (Y_{source} - Y_{stat}) + Zn \times (Z_{source} - Z_{stat})}{\sqrt{Xn^2 + Yn^2 + Zn^2} \times \sqrt{(X_{source} - X_{stat})^2 + (Y_{source} - Y_{stat})^2 + (Z_{source} - Z_{stat})^2}} \right)$$

Effet de l'éclairage sismique



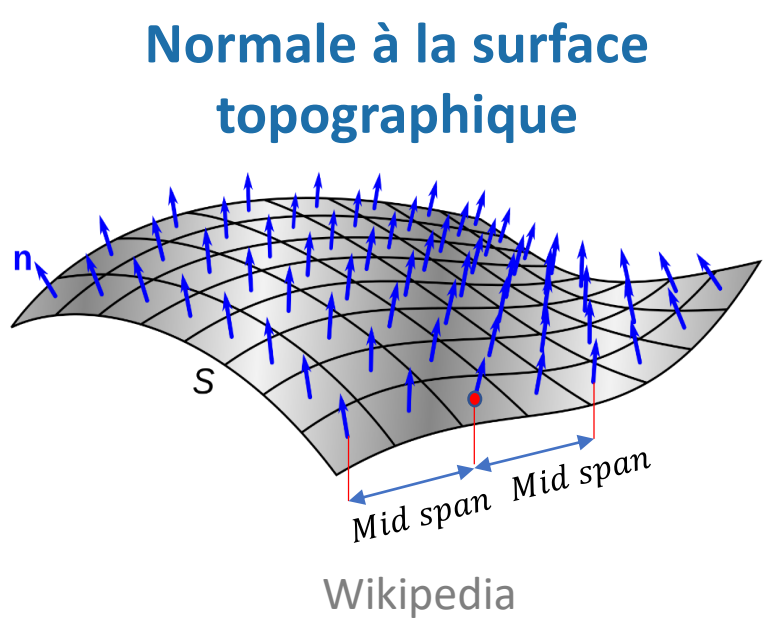
## ELABORATION D'UN ESTIMATEUR DE L'AMPLIFICATION TOPOGRAPHIQUE

$$MAF = \alpha * Csm + \beta * Am + \gamma$$

$$\alpha = \frac{2.5 * 3000^{-1.1}}{\lambda_s^{-1.1}}$$

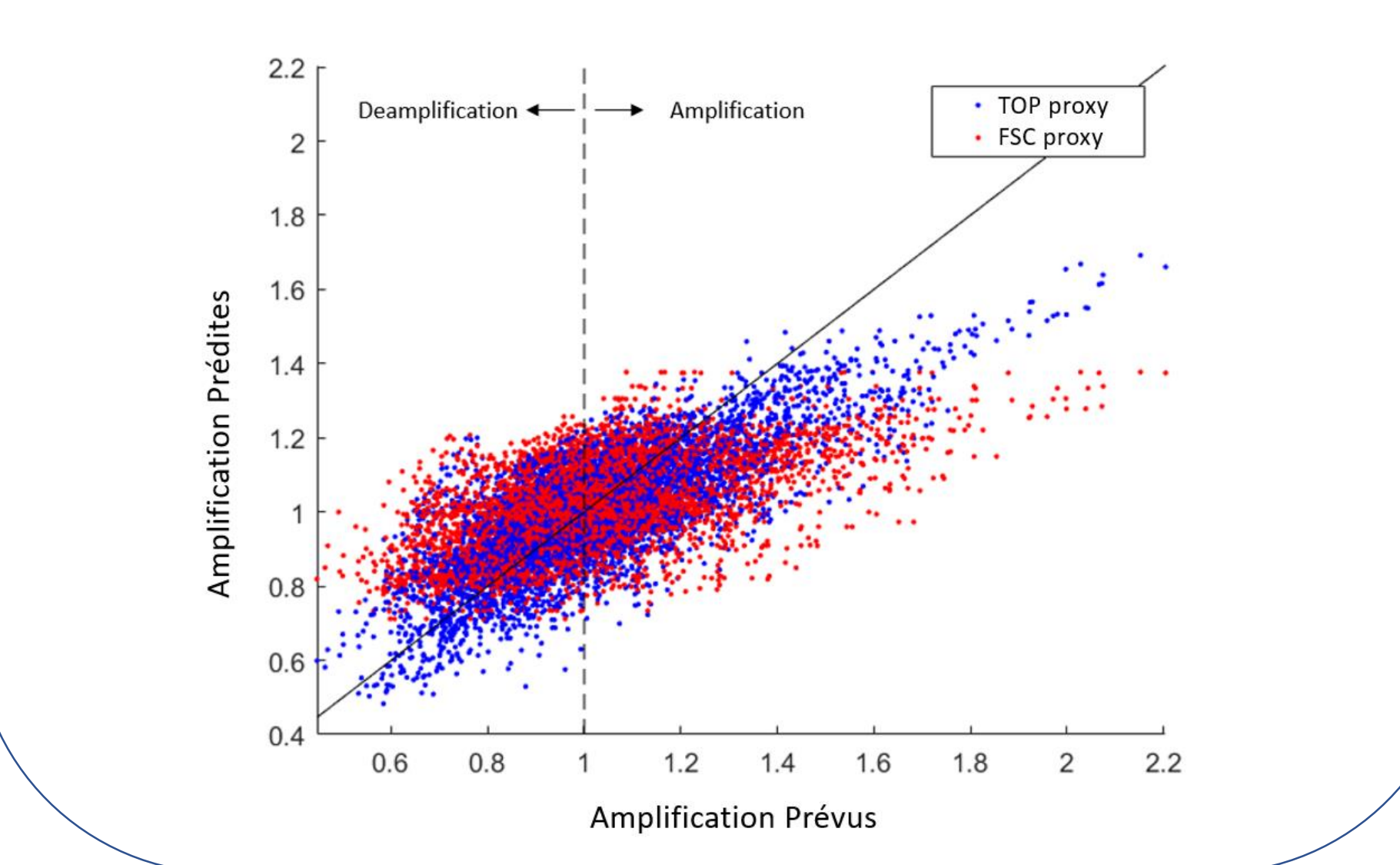
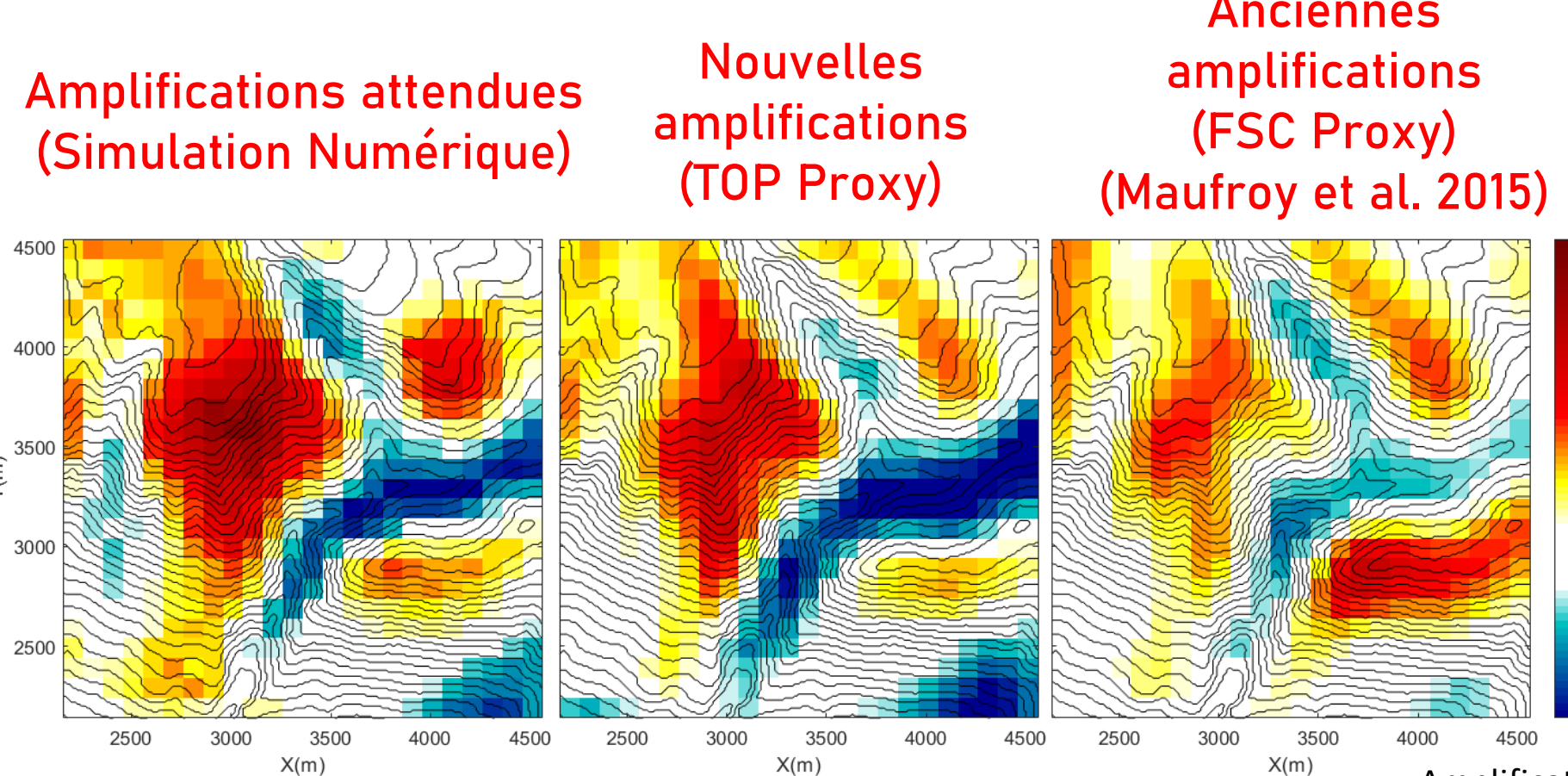
$$\beta = \frac{0.02 * 3000^{-0.4}}{\lambda_s^{-0.4}}$$

$$\gamma = 1$$



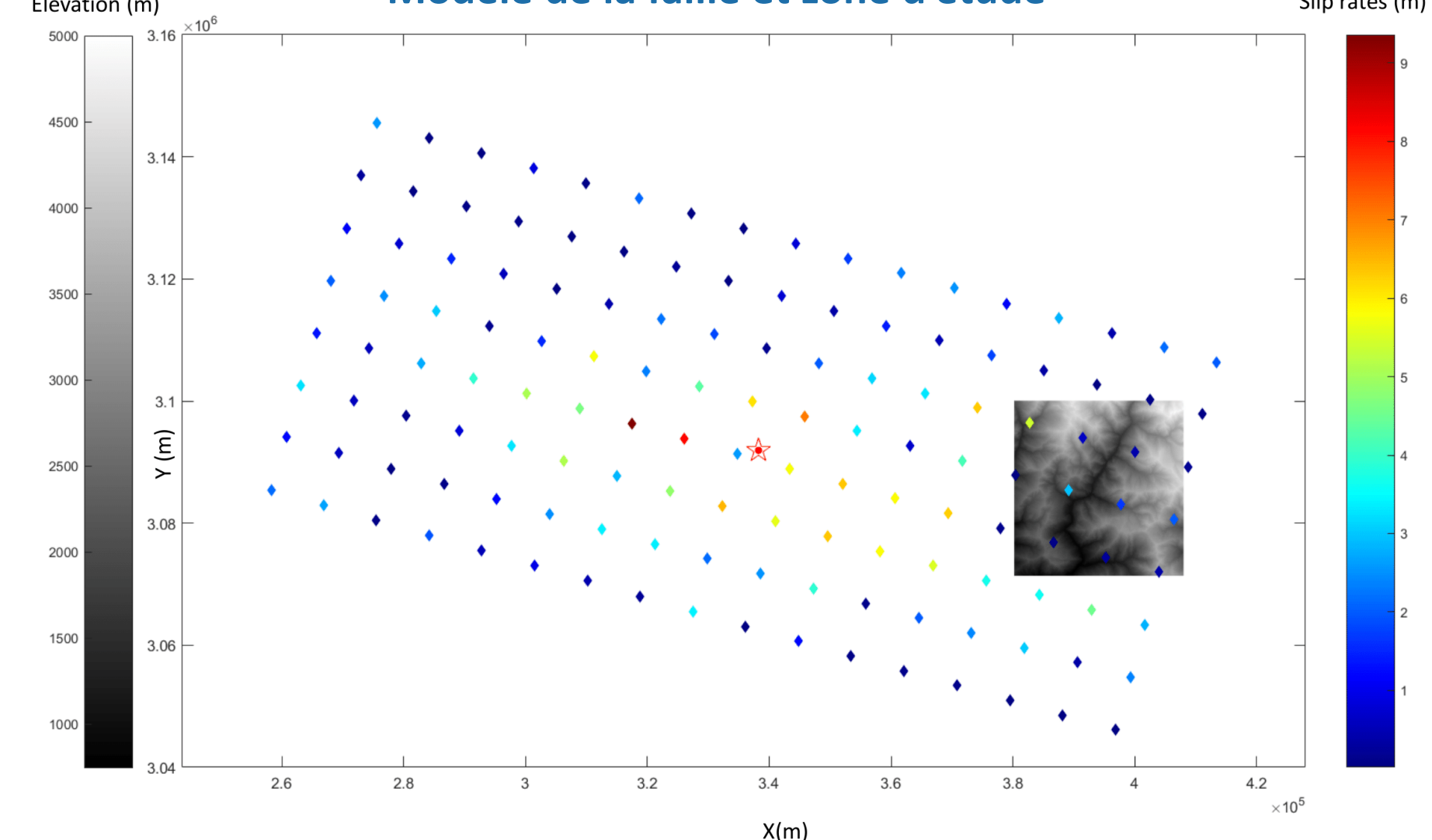
$$\text{Mid span du vecteur normal} = \frac{0.26 * \lambda_s - 46}{h} (m)$$

## FSC PROXY VS. TOP PROXY



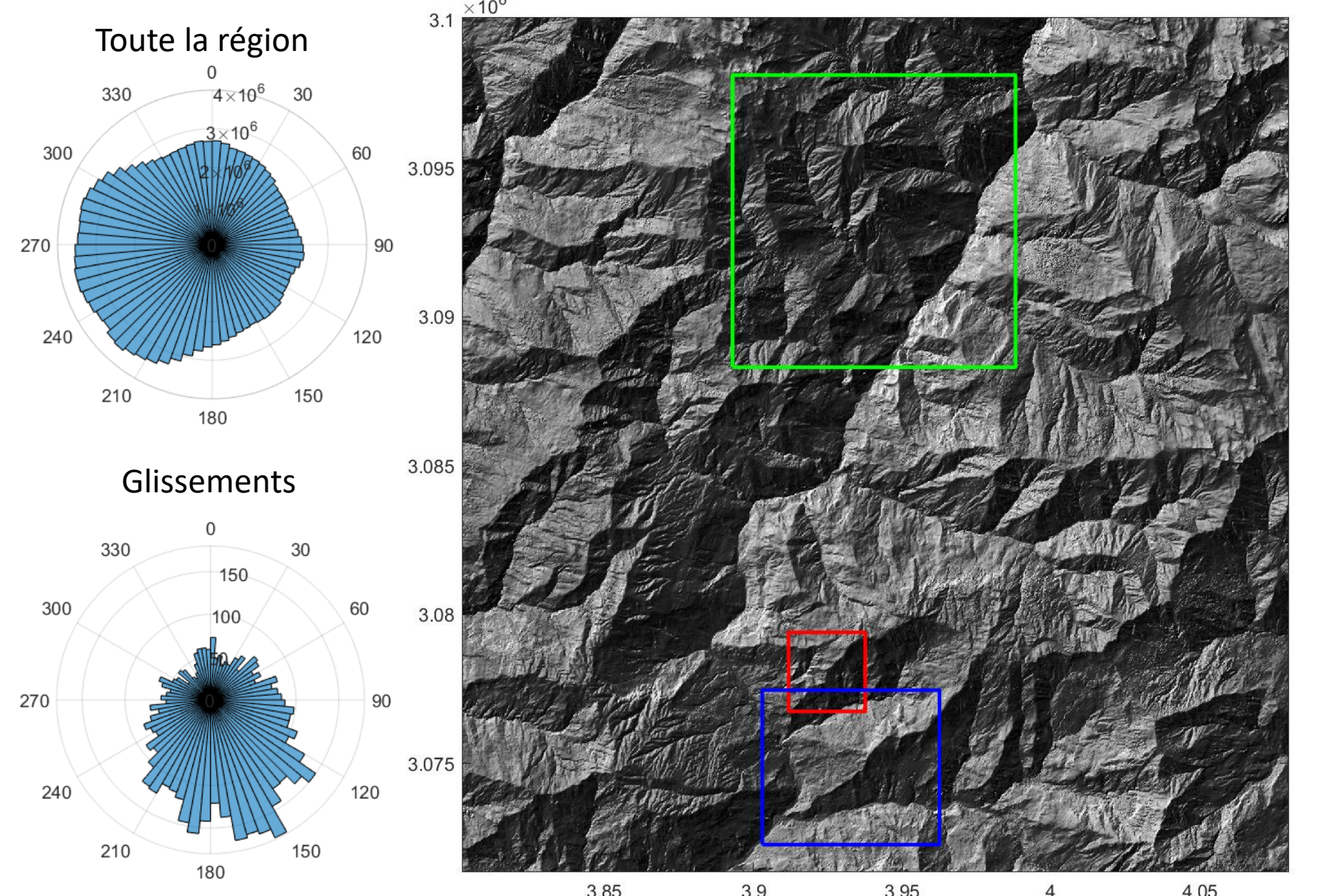
## TOP PROXY VS. GLISSEMENTS DE TERRAIN INDUITS

Modèle de la faille et zone d'étude



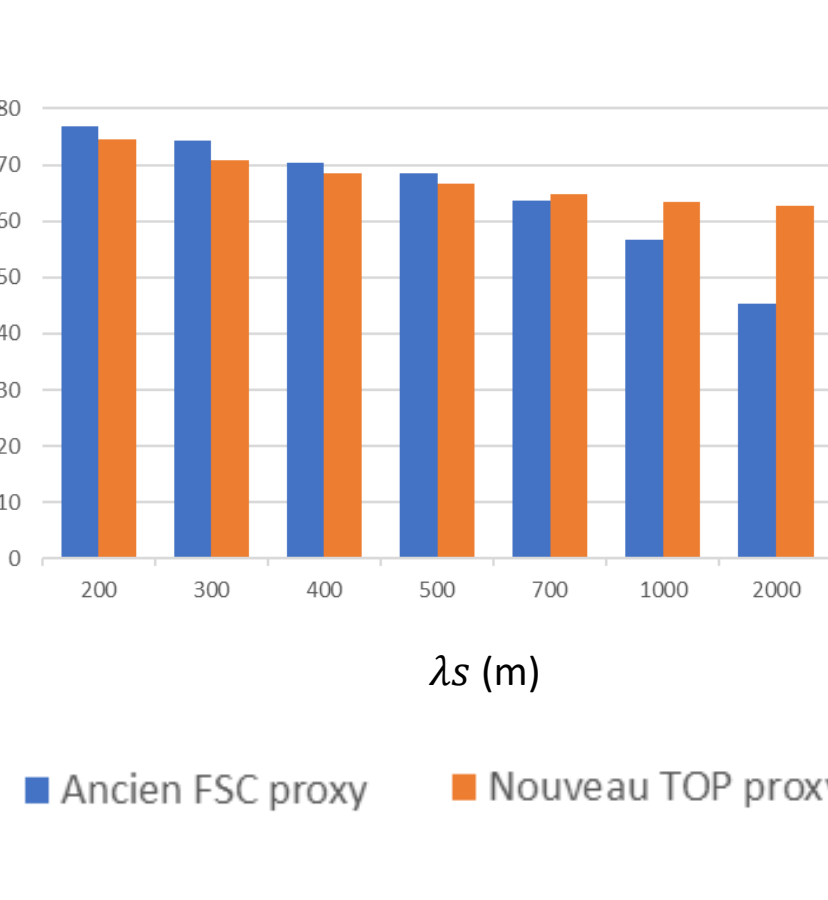
- Séisme de Gorkha (Avril 25, 2015 Mw 7.8):**
  - Faille rompue: 140 km
  - Réplique: 12 mai 2015 Mw 7,2
  - Profondeur de l'hypocentre 10 +/- 2 km
  - 25000 glissements de terrain induits
- Zone d'étude:**
  - Surface 750 km<sup>2</sup>
  - comprend 6148 glissements induits
  - Resolution: 2 m
- Inventaire des glissements:** [Roback et al. 2018]
- Rupture de faille:** [Grandin et al. 2015]

### Azimuth des pentes

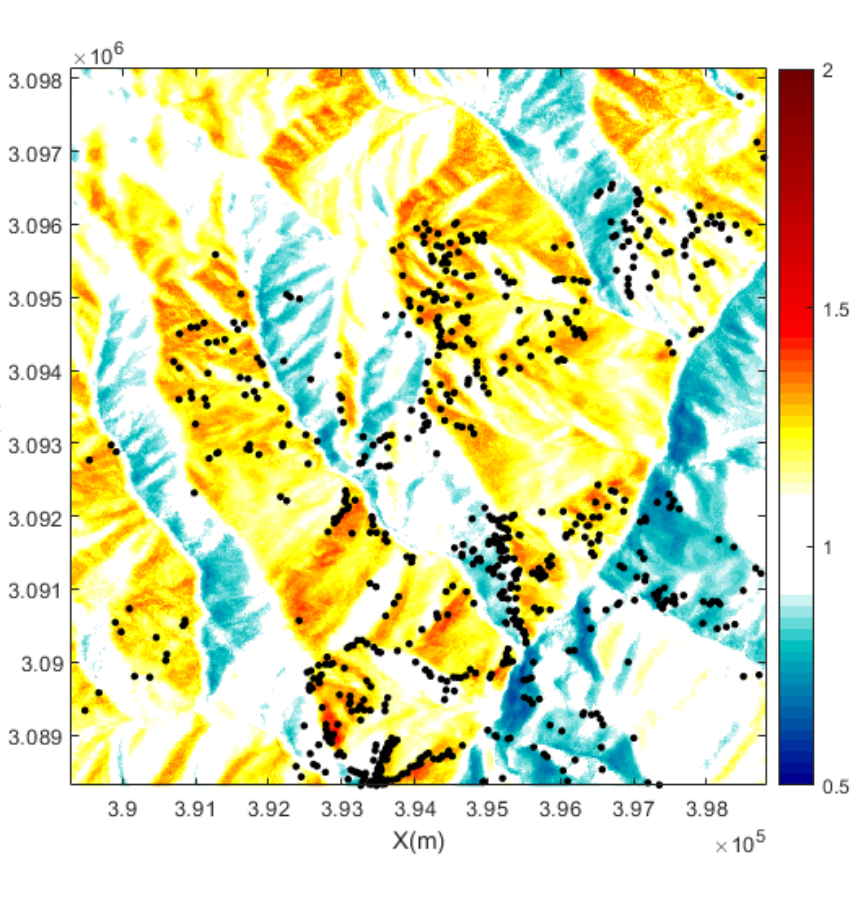


ZOOMS:

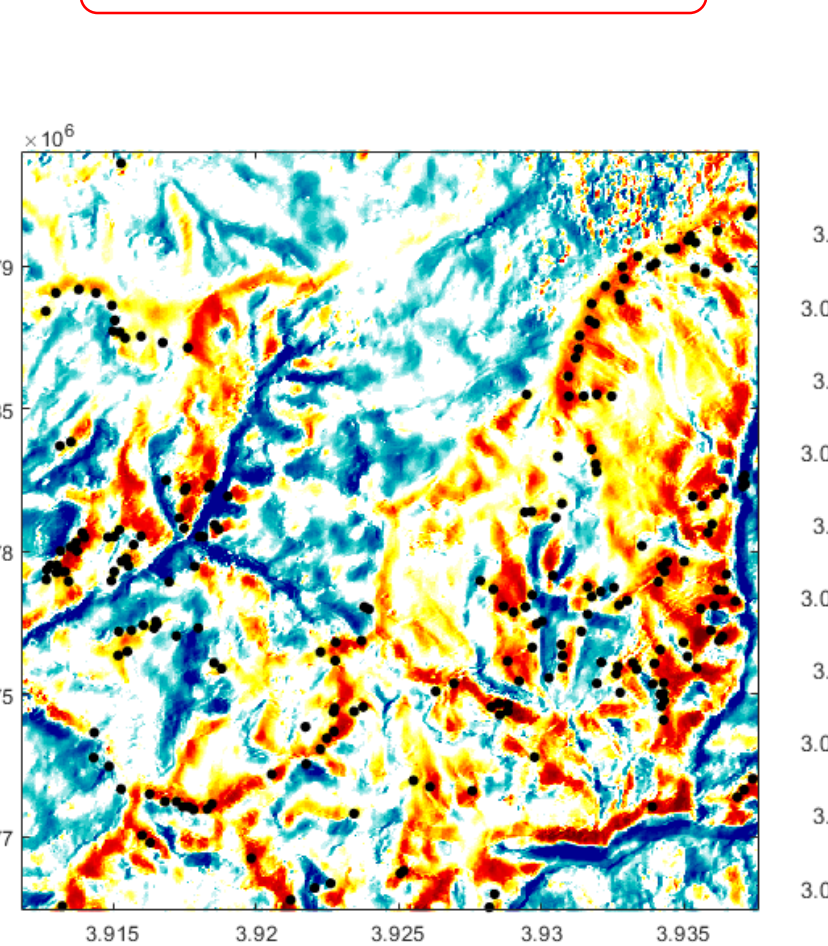
Pourcentages des glissements de terrains localisés sur des zones amplifiées prédites par le TOP proxy



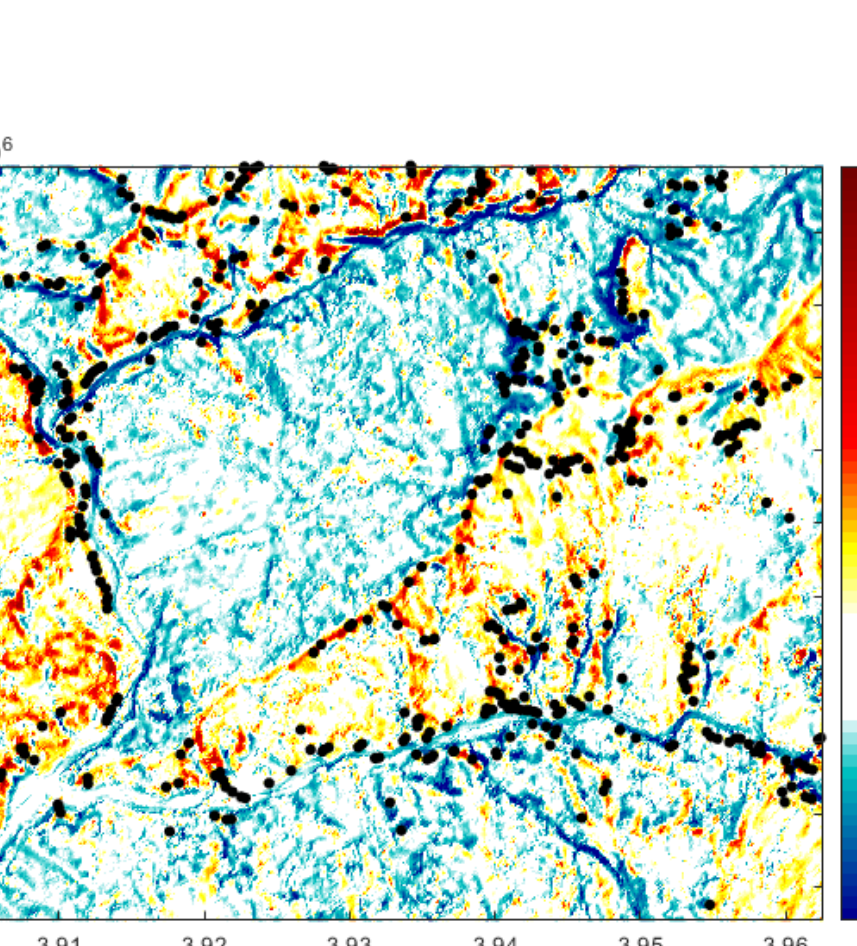
Effet de l'éclairage sismique



Effet de la courbure



Effet de la déformation



## REFERENCES

Bouchon, M., 1973. Effect of topography on surface motion, *Bull. seism. Soc. Am.*, **63**(2), 615–632, doi: <https://doi.org/10.1785/BSSA0630020615>.

Bouchon, M. & Barker, J.S., 1996. Seismic response of a hill: the example of Tarzana, California, *Bull. seism. Soc. Am.*, **86**(1A), 66–72, doi: <https://doi.org/10.1785/BSSA08601A0066>.

Çelebi, M., 1987. Topographical and geological amplifications determined from strong motion and aftershock records of the 3 March 1985 Chile earthquake, *Bull. seism. Soc. Am.*, **77**(4), 1147–1167, doi: <https://doi.org/10.1785/BSSA0770041147>.

Grandin, R., Vaille, M., Satriano, C., Lacassin, R., Klinger, Y., Simoes, M., & Bollinger, L., 2015. Rupture process of the Mw = 7.9 Gorkha earthquake (Nepal): insights into Himalayan megathrust segmentation, *Geophys. Res. Lett.*, doi: <https://doi.org/10.1002/2015GL066044>.

Kawase, H. & Aki, K., 1990. Topography effect at the critical SV-wave incidence: possible explanation of damage pattern by the Whittier Narrows, California, Earthquake of 1 October 1987, *Bull. seism. Soc. Am.*, **80**, 1–22, doi: <https://doi.org/10.1785/BSSA0800010001>.

Massa, M., Barani, S. & Lovati, S., 2014. Overview of topographic effects based on experimental observations: meaning, causes and possible interpretations, *Geophys. J. Int.*, **197**, 1537–1550, doi: <https://doi.org/10.1093/gji/ggt341>.

Maufroy, M., 2010. Caractérisation et modélisation numérique de l'effet de site topographique 3D: Application à la Grande Montagne de Rustrel, Vaucluse, *PhD thesis*, University of Nice, 245 pp.

Maufroy, E., Cruz-Atienza, V.M. & Gaffet, S., 2012. A robust method for assessing 3-D topographic site effects: a case study at the LSBB Underground Laboratory, France, *Earthq. Spectra*, **28**, 1097–1115, doi: <https://doi.org/10.1193/1.4000050>.

Maufroy, E., Cruz-Atienza, V.M., Cotton, F. & Gaffet, S., 2015. Frequency-scaled curvature as a proxy for topographic site-effect amplification and ground-motion variability, *Bull. seism. Soc. Am.*, **105**(1), 354–367, doi: <https://doi.org/10.1785/0120140089>.

Meunier, P., Hovius, N. & Haines, J.A., 2008. Topographic site effects and the location of earthquake induced landslides, *Earth planet. Sci. Lett.*, **275**(3–4), 221–232, doi: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.07.020>.

Roback, K., Clark, M.K., West, A.J., Zekkos, D., Li, G., Gallen, S.F., Chamlagan, D., Godt, J.W., 2018. The size, distribution, and mobility of landslides caused by the 2015 Mw7.8 Gorkha earthquake, Nepal, *Geomorphology*, **301**,121–138, ISSN 0169-555X, doi: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.01.030>.

<https://newsroom.ucla.edu/releases/imaging-technique-identify-landslides>

Wikipedia