I-SITE CAP 20-25 - Challenge 4

# Évaluation de l'aléa volcanique des retombées de cendres pour les volcans Cotopaxi et Guagua Pichincha: implications pour la région de Quito


**Alessandro Tadini**

*Clermont-Ferrand*

*26/01/2021*

**O. Roche, P. Samaniego, M. Gouhier, J. Eychenne – LMV**

**N. Azzaoui, A. Guillin – LMBP**

**B Bernard, S. Hidalgo – IG Quito**

**A. Bevilacqua – INGV Pise**

**W. Aspinall – Université de Bristol**

M. de' Michieli Vitturi, F. Pardini, J. L. Le Pennec, A. Neri, R. Cioni, M. Pistolesi, E. Gaunt, S. Vallejo, M. Encalada, H. Yepes, A. Proaño, M. Pique

# Plan

## PROJET I-SITE

- *Introduction*
  - Importance du projet
  - Overview sur Cotopaxi et Guagua Pichincha
- *Modélisation numérique et quantification des incertitudes*
  - *PLUME-MoM/HYSPLIT*
- *Expert elicitation*
- *Développement de cartes et de courbes d'aléa*

## PROJET CLERVOLC

- *Modélisation numérique des panaches de cendres volcaniques*

# Projet I-SITE

## OBJECTIF DU PROJET

Création de cartes d'aléa probabilistes des retombées de cendre pour les volcans Cotopaxi et Guagua Pichincha et réalisation d'une étude d'aléa plus détaillé pour la ville de Quito

## NOUVEAUTÉS

Utilisation d'un modèle numérique (PLUME-MoM / HYSPLIT) jamais utilisé pour produire des cartes d'aléa probabilistes des retombées de cendre

Quantification explicite des principales sources d'incertitudes

1. Du modèle numérique
2. De la probabilité d'avoir différents styles éruptifs
3. De la plage de variation des paramètres éruptifs

→ ***Expert elicitation***

# Introduction

# Importance du projet: aléa volcanique du retombée des cendres

*Problèmes de santé et respiratoires*
*Sécurité aérienne*

- «Tephra» indique toutes les particules éjectées d'un volcan, tandis que «tephra fall» indique le processus de retombées des particules.

- La chute et l'accumulation de tephra dans l'atmosphère sont des sources majeures de menace pour les activités humaines et la santé humaine
  - Pour la santé humaine
  - Dans l'aviation
  - Pour les cultures
  - Pour la stabilité du bâtiment
  - Génération de lahar à partir de dépôts

*Dommages aux cultures*

*Effondrements des toits*

# Importance du projet: Equateur et la région de Quito

- 21 volcans actifs en Equateur (activité Holocène)
- Quito menacée par plusieurs volcans actifs (par exemple, Guagua Pichincha est à seulement 16 km à l'ouest de Quito)
- Plusieurs études pour produire de cartes d'aléa de retombée du téphra mais:
  - une approche probabiliste n'a pas toujours été utilisée
  - la quantification de l'incertitude n'a pas toujours été appliquée

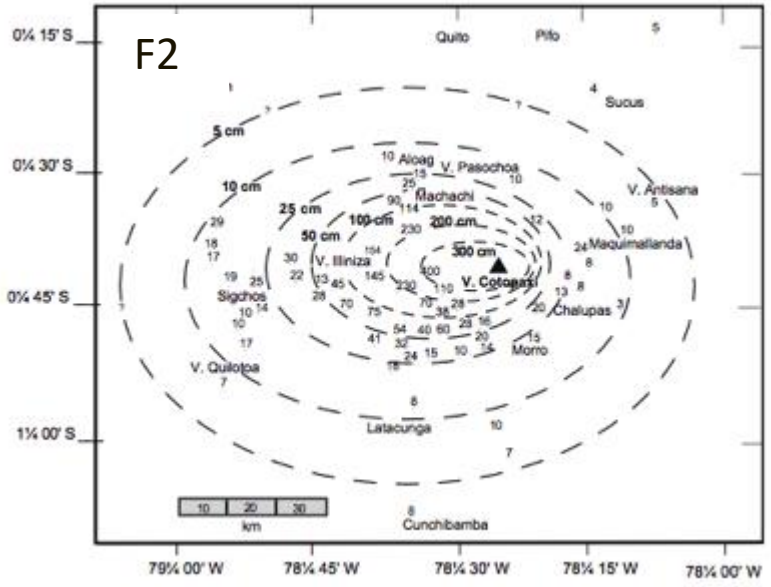
# Cotopaxi: histoire éruptive et scénarios éruptif

## Rhyolitique

- *Sub-plinienne (VEI 3-4)* – (Peñas Blancas ~2000 yBP)
- *Plinienne (VEI 4-5)* – (F-series, 6-8 ka)

## Andésitique

- *Émissions de cendres durables (VEI 1-2)* – (i.e. *CE* 2015)
- *Strombolien violent (VEI 2-3)* – (i.e. CE 1853)
- *Sous-plinienne (VEI 3-4)* – (i.e. *CE* 1877)
- *Plinienne(VEI 4-5)* - (i.e. CE 1742-44 or layer 3//X)

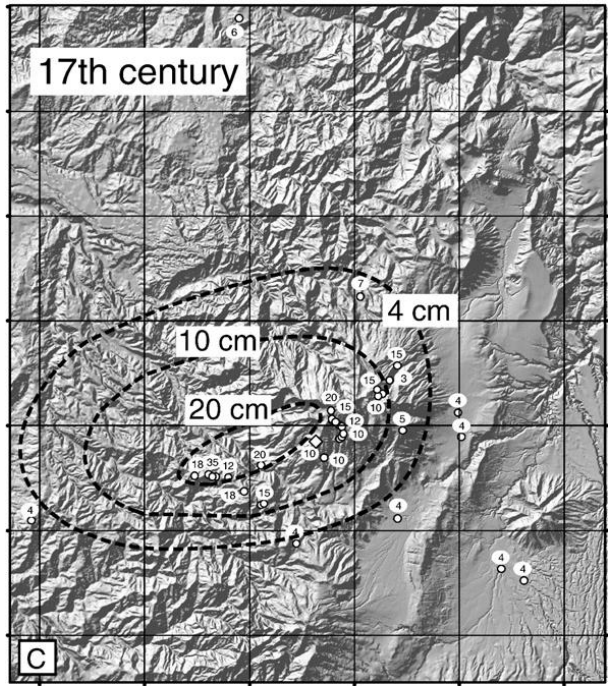


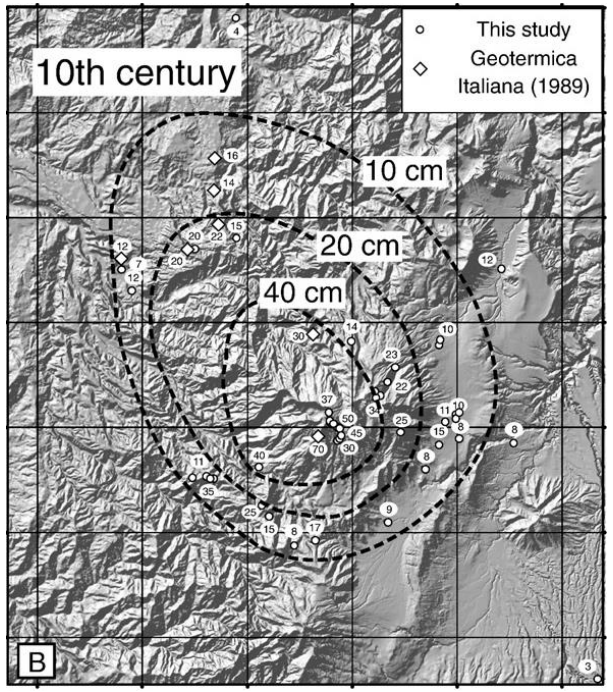
CE 2015 eruption

# Guagua Pichincha: histoire éruptive et scénarios éruptif

CE 1999 eruption

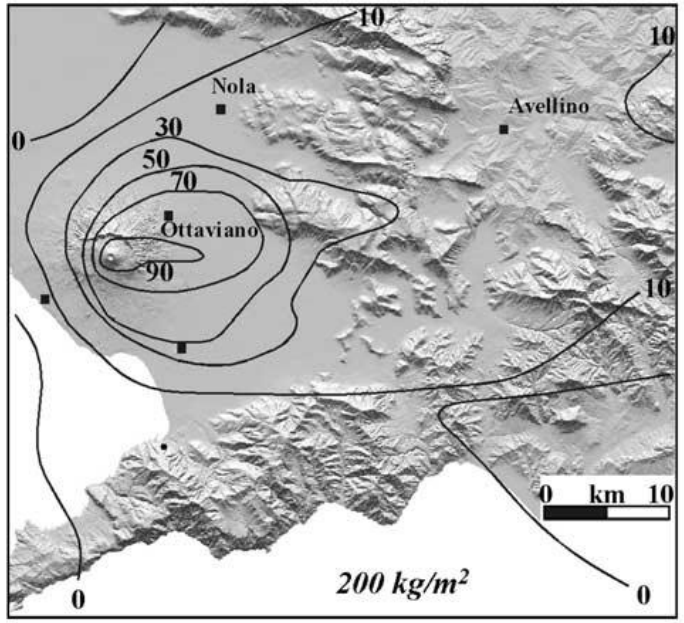
- Vulcanien (VEI 1-2) – (i.e. *CE* 1999)
- Sub-plinienne (VEI 3-4)
- Plinienne (VEI 4-5) – (i.e. CE 1660, 10th et 1st siècle)



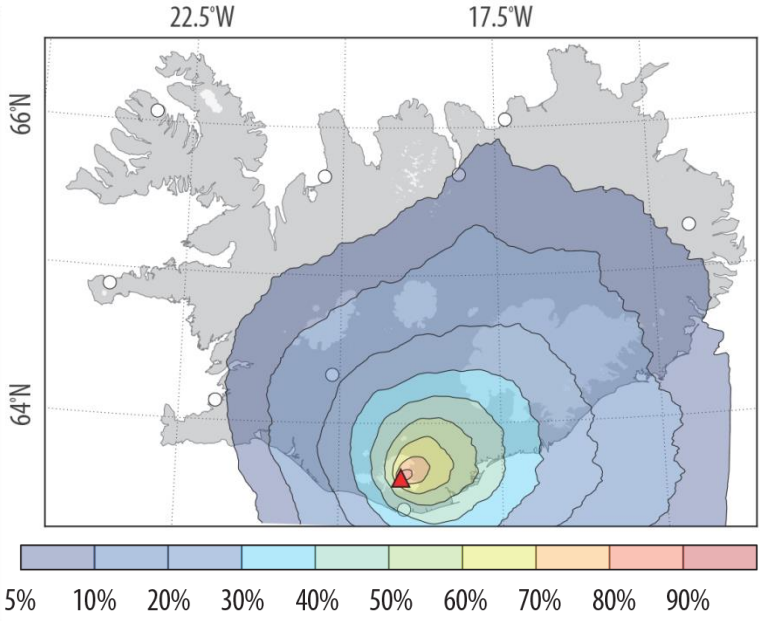



# Evaluation de l'aléa volcanique de retombée des cendres

- En fonction de la charge massique (en kg/m$^2$ ou g/cm$^2$) ou de l'épaisseur (cm ou mm)
- Avec une approche déterministe, semi-probabiliste ou probabiliste
- En utilisant des données de terrain ou une modélisation numérique




*Cioni et al., 2003*



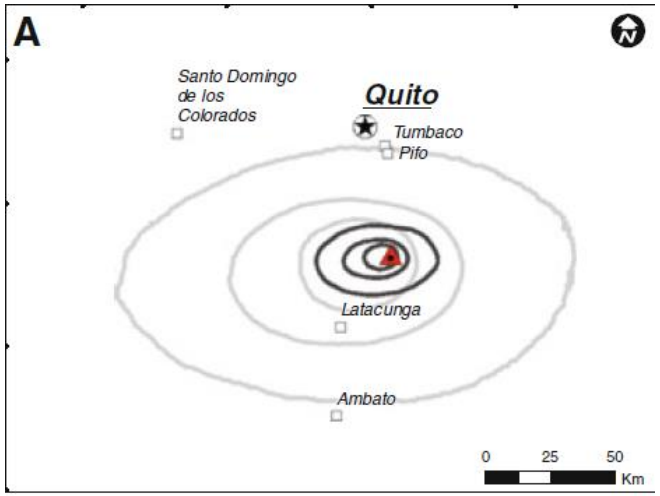

*Biass et al., 2014*

**Incertitude aléatoire et épistémique lors de la production de cartes des aléas**

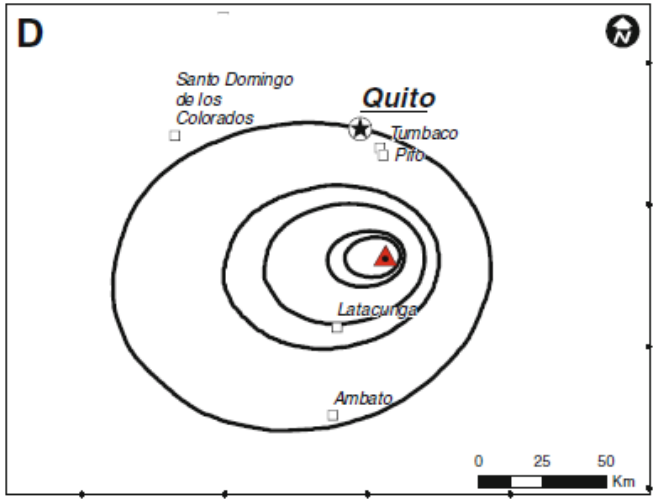
- Incertitude dans les paramètres d'entrée
- Incertitude du modèle numérique
- Incertitude dans l'occurrence du type d'éruption

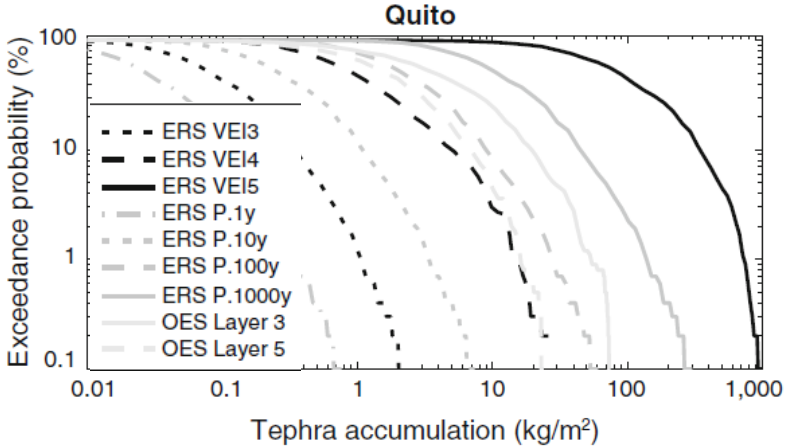
# Volcan Cotopaxi: évaluation d'aléa des retombée des cendres

Contours de probabilité pour des valeurs de seuil données de chargement de masse




Différentes valeurs de charge de masse pour une probabilité d'occurrence donnée



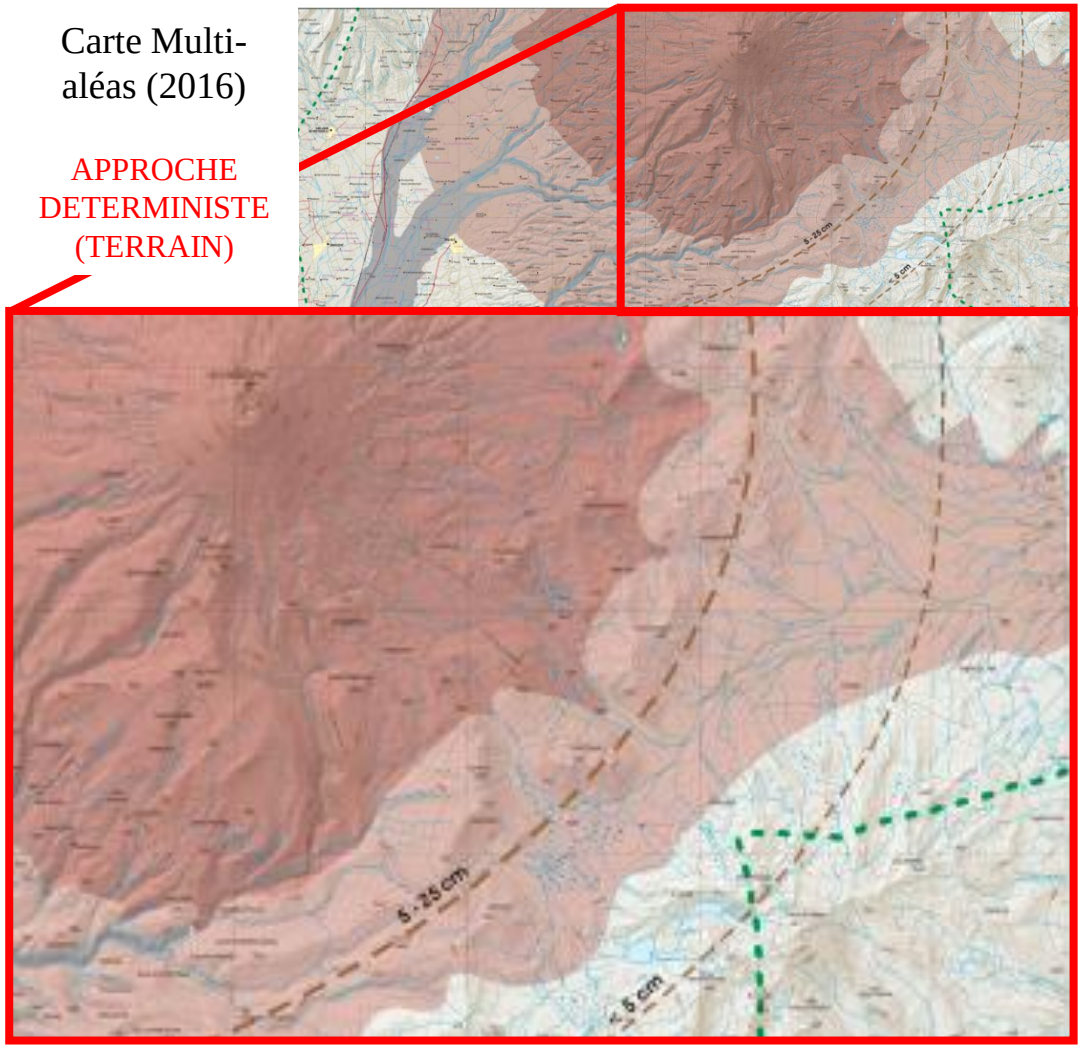

Courbes d'aléa pour certains endroits

APPROCHE SEMI-PROBABILISTE et PROBABILISTE (TEPHRA 2)

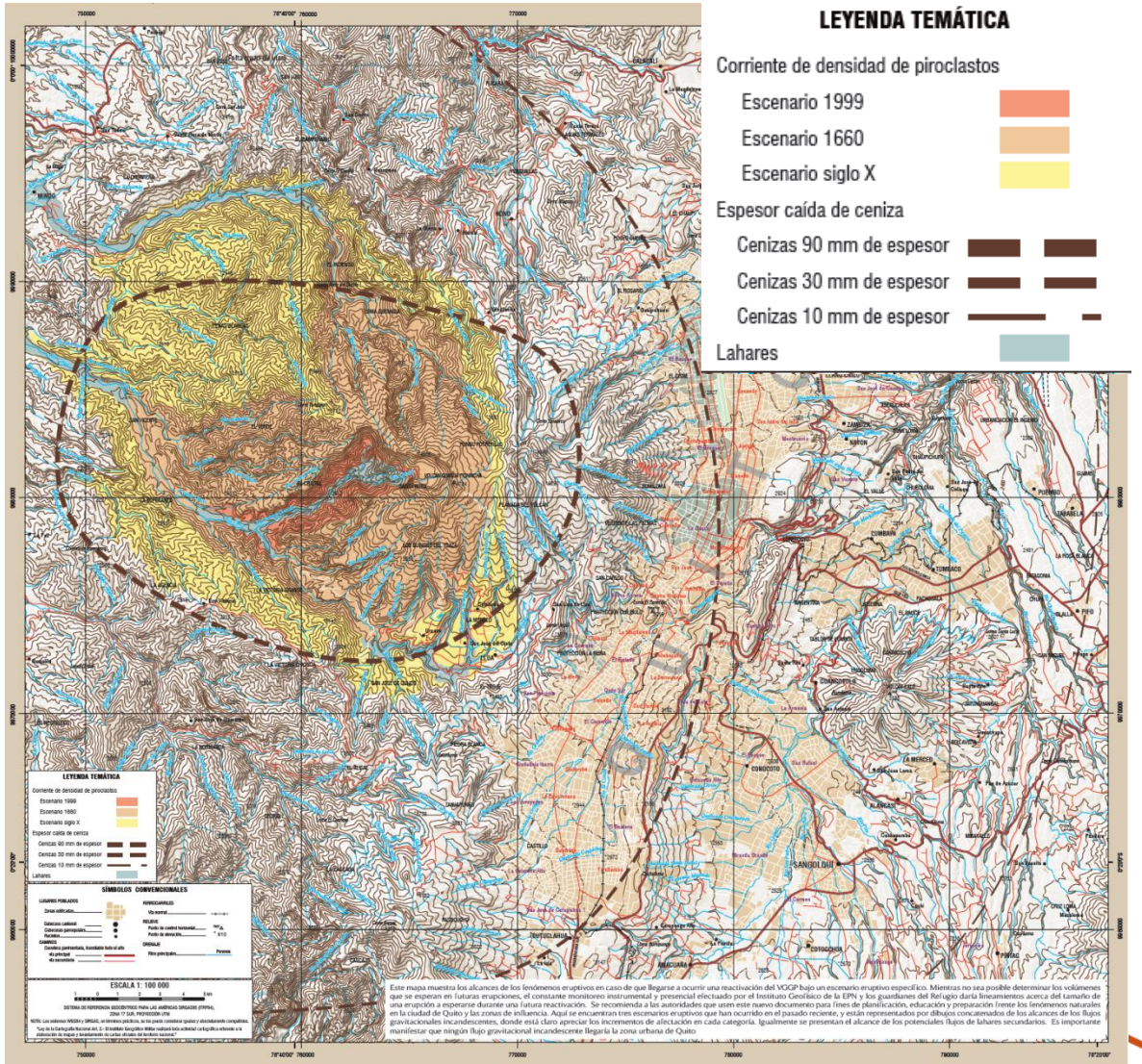
*Biass and Bonadonna, 2013*

Carte Multi-aléas (2016)

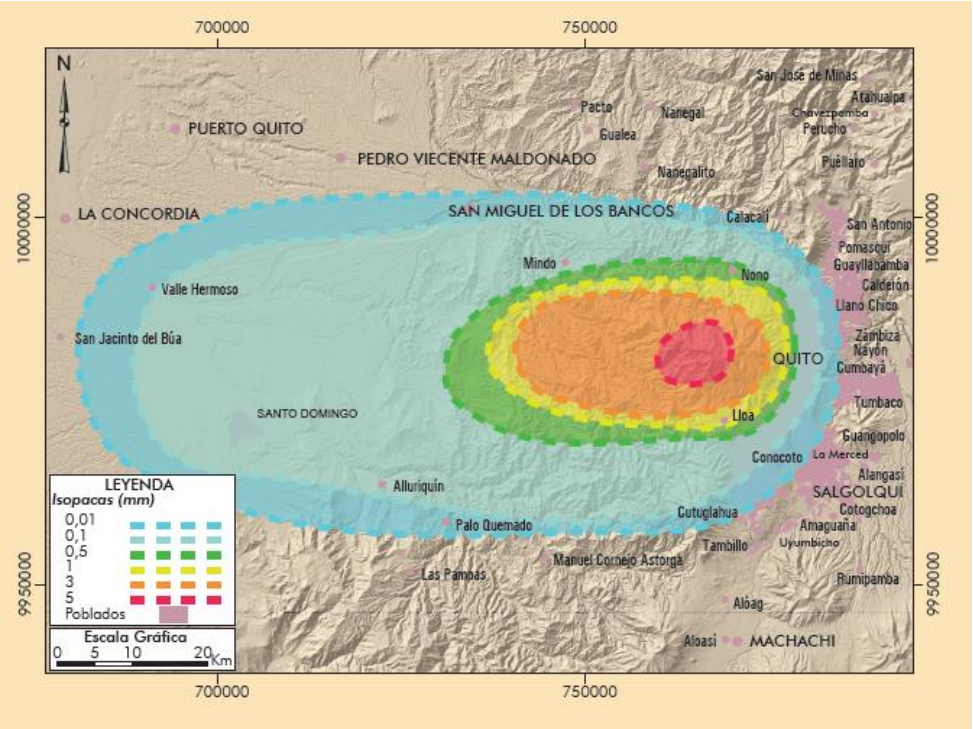
APPROCHE DETERMINISTE (TERRAIN)



# Volcan Guagua Pichincha: évaluation d'aléa de retombée des cendres



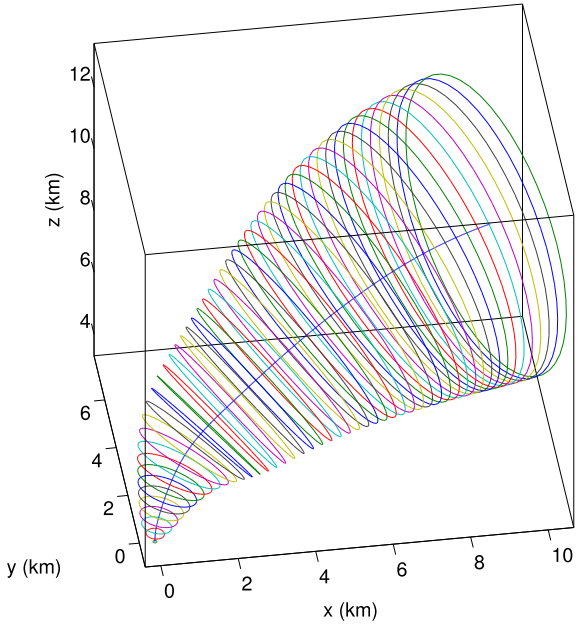

- Carte Multi-aléas (2019)
- Aléa de retombées de cendres: modélisation de 3 scénarios de référence (1999-2001, AD 1660 and AD 970) avec Ash 3D – APPROCHE DETERMINISTE AVEC PLUSIERS SCÉNARIOS

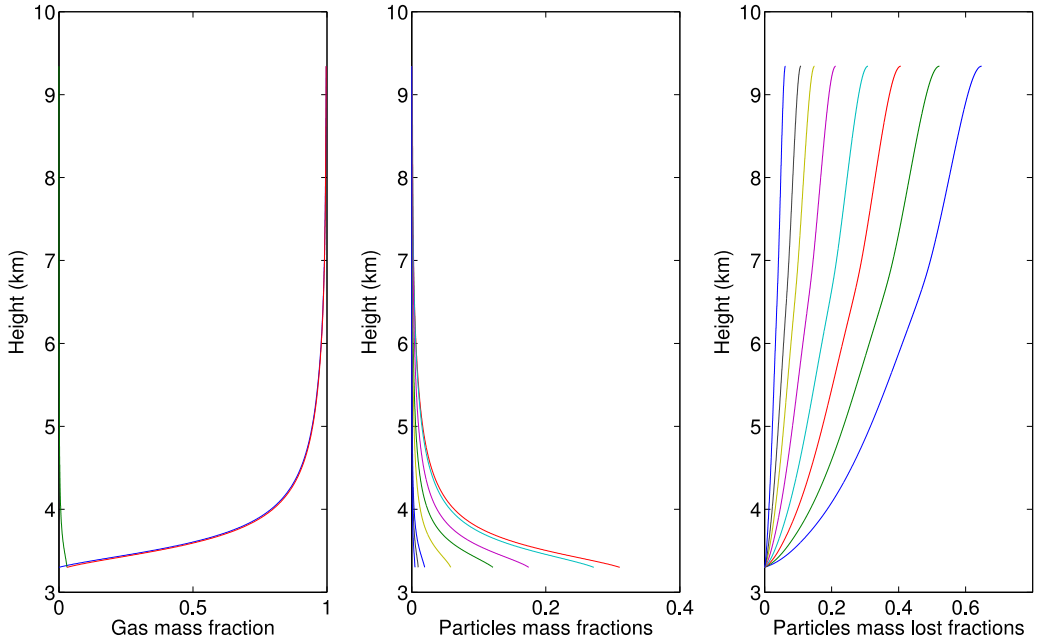


# Modélisation numérique et quantification des incertitudes

# PLUME-MoM (de' Michieli Vitturi et al., 2015)

PLUME-MoM: modèle intégrale eulérien pour la dynamique « steady-state » d'un panache dans un système de coordonnées 3D




- Données d'entrée: TGSD, MFR, fraction massique d'eau, durée de l'éruption, profil météorologique au-dessus de l'évent.
- Données de sortie: hauteur du panache et fraction de masse de particules perdue le long de la colonne

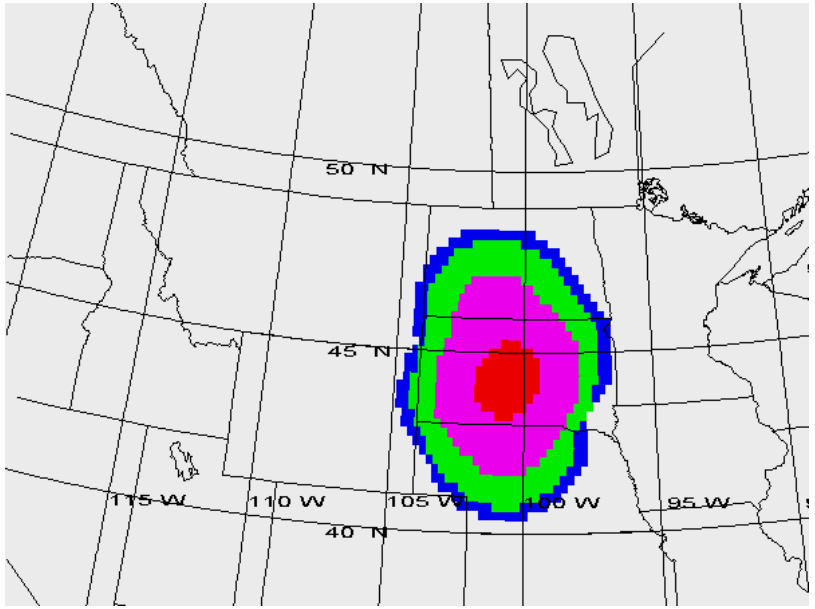
# HYSPLIT (Stein et al., 2015)

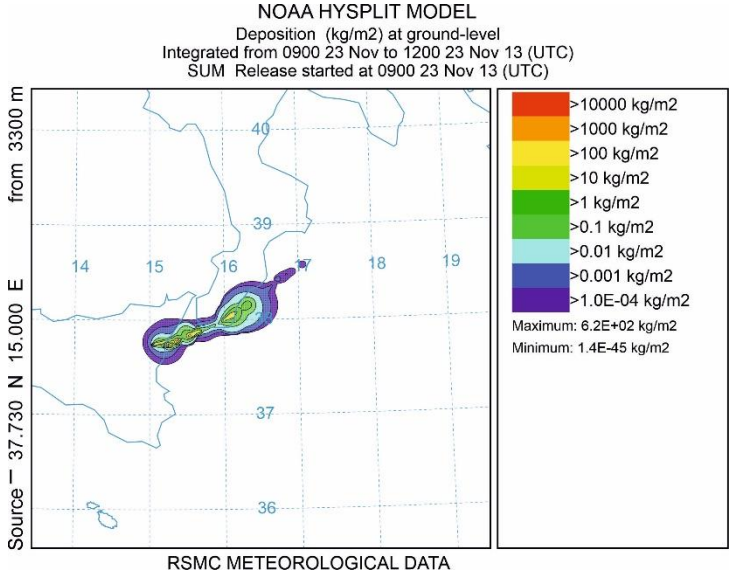
Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory

- Approches mixtes lagrangiennes (particules/puffs) et eulériennes (concentration massique/dépôt aux récepteurs fixes)
- Données météo dans un format spécifique (arl)

## CONFIGURATION

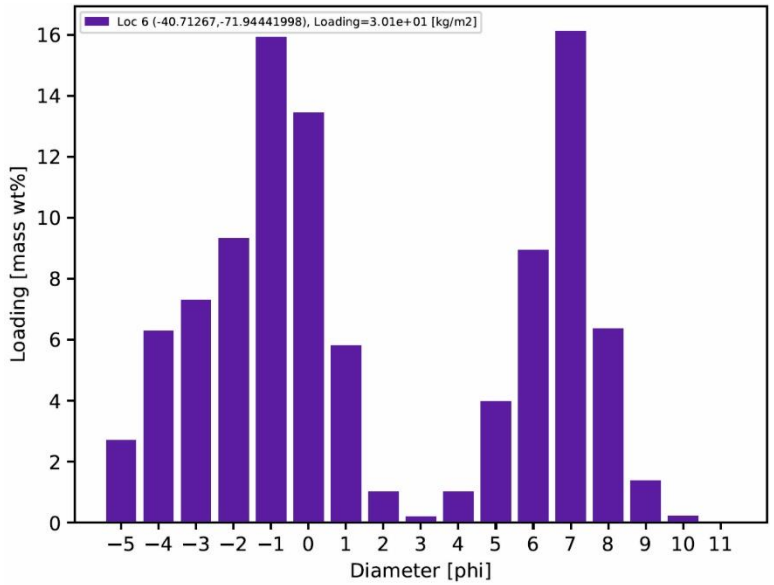
- **Hybride**: objet circulaire 2D (masse plane, profondeur nulle), avec une distribution « puff » gaussienne horizontale et une distribution de particules 3D verticale.

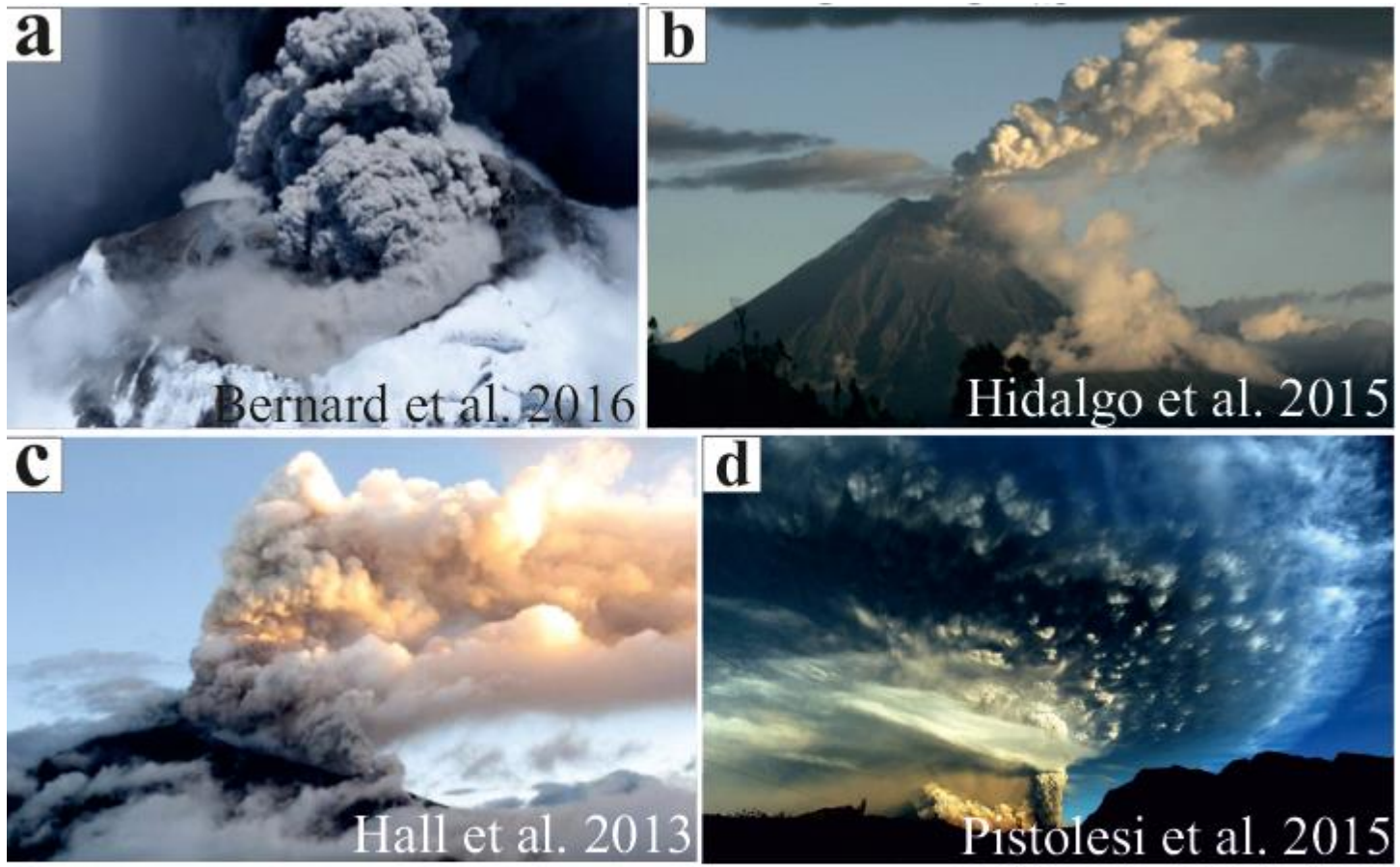



## OUTPUTS

- *Cartes de concentration (kg/m$^3$)*
- *Cartes de dépôt instantanées et cumulatives (kg/m$^2$)*
- *Charge massique (kg/m$^2$) et granulométrie aux sites d'échantillonnage*





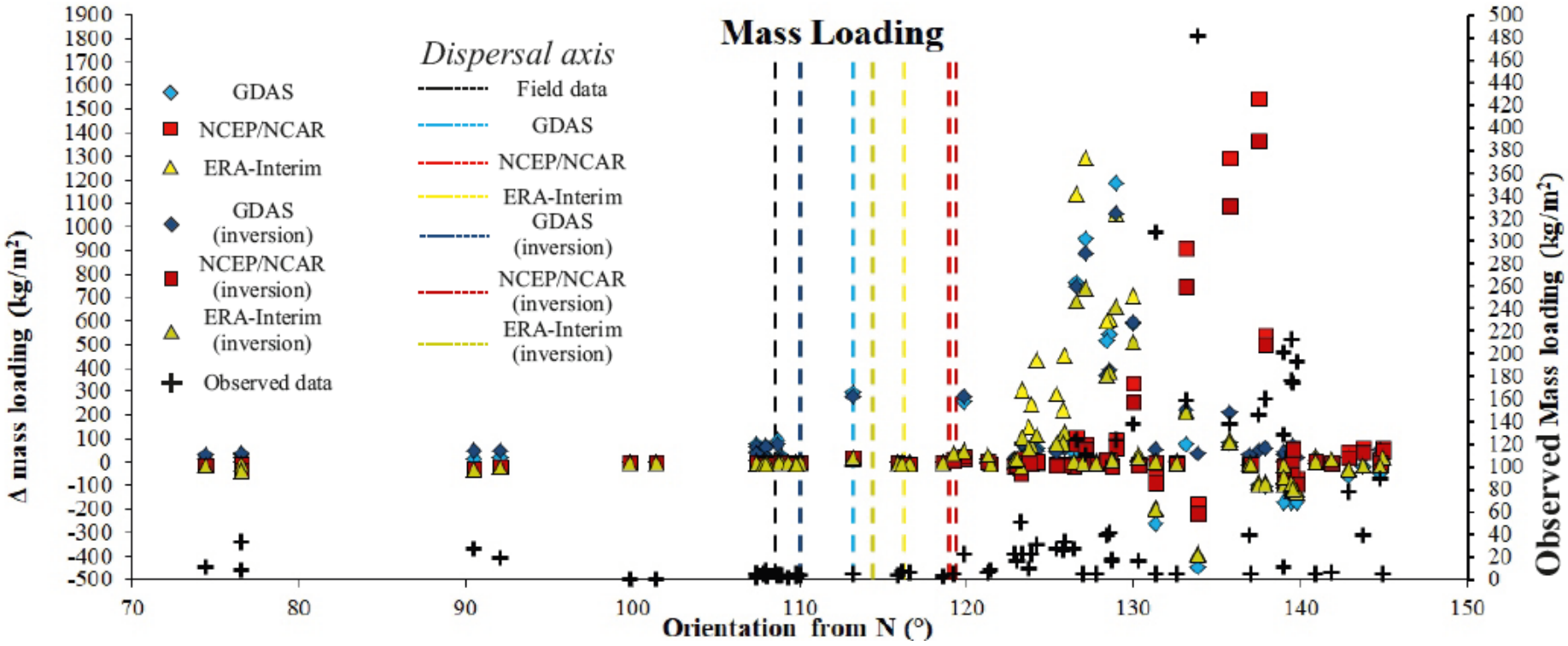

a) Cotopaxi (08/2015-12/2015) Hydrovolcanic/Ash emission
b) Tungurahua (14-30/07/2013) Violent Strombolian
c) Tungurahua (16/08/2006) SubPlinian
d) Cordòn Caulle (04-06/06/2011) SubPlinian

# Incertitude du modèle

Tadini et al. (2020)

- Par rapport à la hauteur du panache
- Par rapport à le chargement de masse sur des sites spécifiques
- Par rapport à la taille des grains sur des sites spécifiques

Tadini et al. (2020)




$$\begin{cases} \dfrac{MO}{MML} = \dfrac{\frac{\sum_{i=1}^{N_o} \Delta_i}{N_o}}{\mu_{ML}} & for\ \Delta_i > 0 \\ \dfrac{MU}{MML} = \dfrac{\frac{\sum_{i=1}^{N_u} \Delta_i}{N_u}}{\mu_{ML}} & for\ \Delta_i < 0 \end{cases}$$

Mean Overestimation (MO)
Mean Underestimation (MU)
Mean Mass Loading (MML)

PLUME-MoM/HYSPLIT le mieux adapté pour éruptions de plus grande magnitude (sub-plinienne ou plinienne).

**$MO/MML_{\text{Cordón Caulle 2011}} = 2.20$**

**$MU/MML_{\text{Cordón Caulle 2011}} = -0.12$**

# Expert Elicitation

# POURQUOI?

- Quelqu'un (le «problem owner») doit prendre une décision rapide ou une planification à long terme
- Pas (ou très peu) de données disponibles
- Les données disponibles sont affectées par l'incertitude aléatoire / épistémique
- Sources de données existantes inadéquates pour une analyse prévue

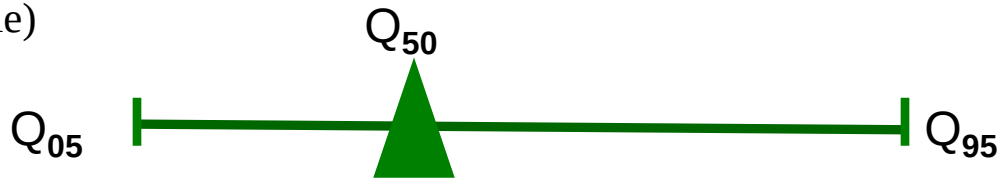
# COMMENT?

1. **Choisir les experts**
   - 15-20 experts
   - Tous avec un contexte de base sur le problème
   - Qui ont pour la plupart travaillé dans la zone d'étude

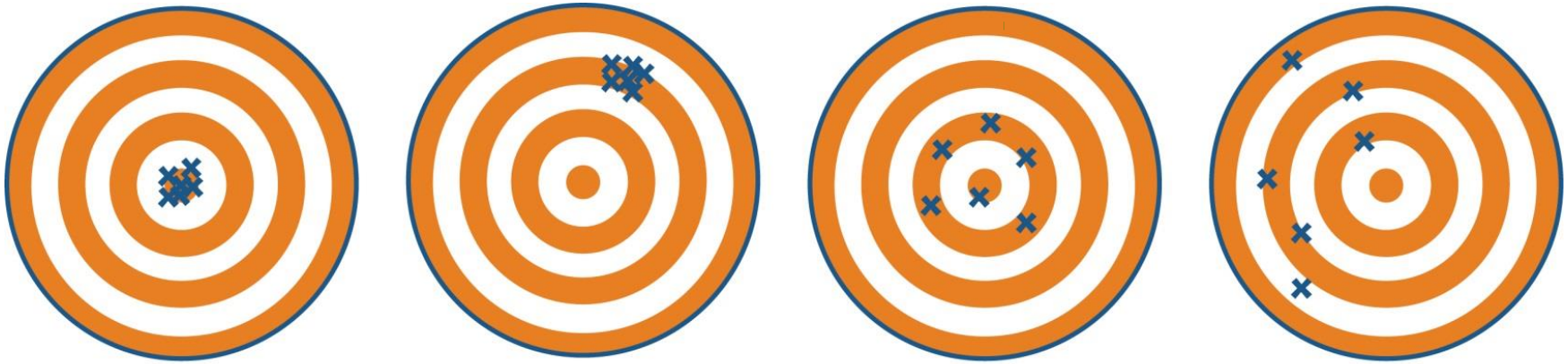
2. **Seed questions**
   - Mesurer les performances de chaque expert

3. **Target questions**
   - Le problème à l'étude

- Pour chaque question - valeur médiane avec deux limites d'incertitude supérieure et inférieure (généralement 5 ° et 95 ° percentile)




- Calibration (accuracy): dans quelle mesure les évaluations des experts correspondent aux valeurs réelles
- Informativeness (precision): degré de concentration de la distribution



High Accuracy High Precision | Low Accuracy High Precision | High Accuracy Low Precision | Low Accuracy Low Precision

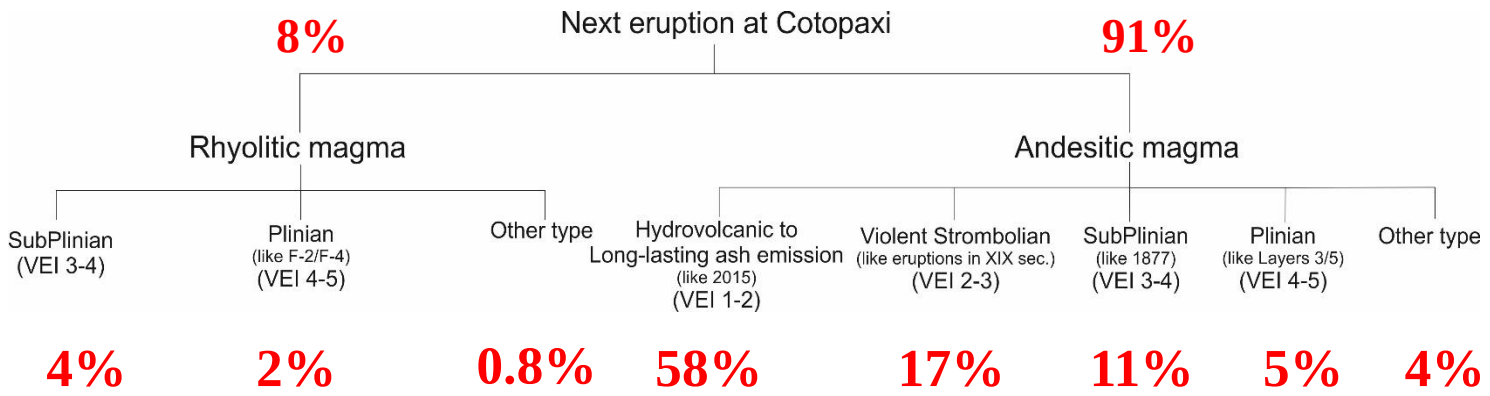
# Expert elicitation pour Cotopaxi et Guagua Pichincha

Tadini et al. (in review)

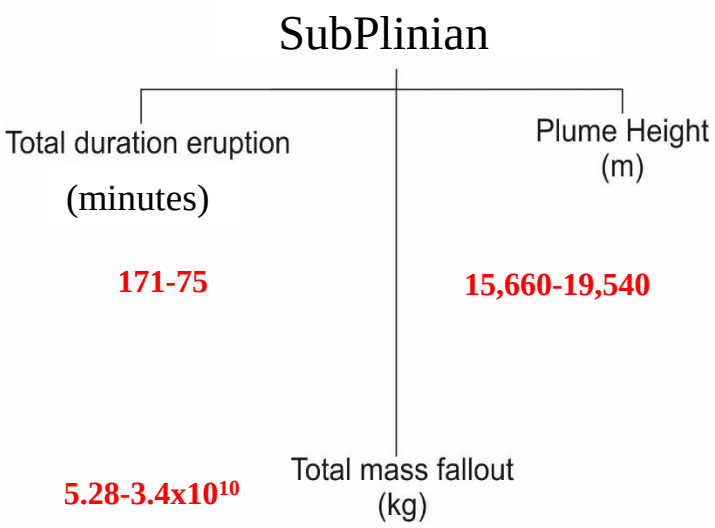
1. 20 experts
   - 5 de France (UCA-LMV-IRD-OPGC-LMBP)
   - 9 de l'Équateur (IGEPN Quito)
   - 5 d'Italie (INGV Pisa/University of Firenze)
   - 1 du Royaume-Uni (University of Bristol)
   - 14 «Seniors» et 6 «Juniors»
   - 12 «Geologists» et 8 «Mathematicians/Modelers»

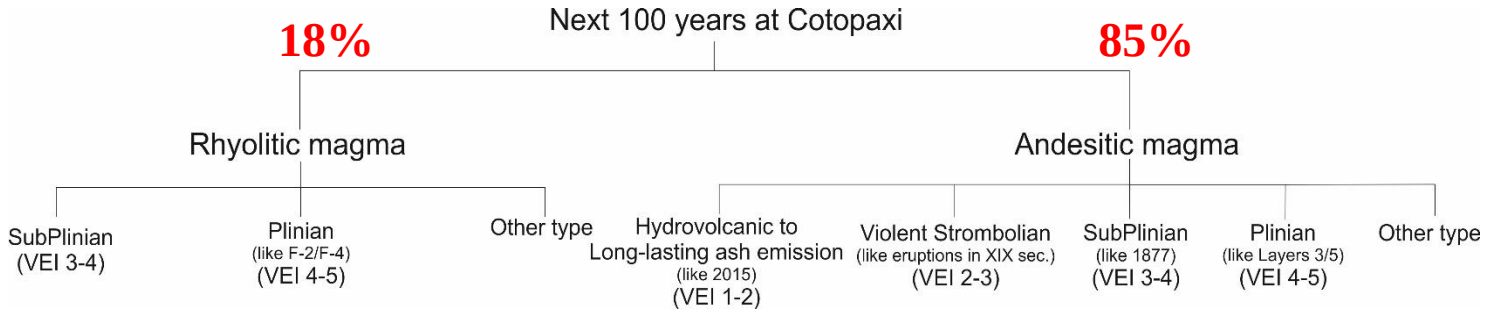
2. 14 seed questions
   - volcanisme sud-américain
   - panaches volcaniques/dispersion du téphra

3. Target questions – plage d'incertitude pour:
   - le comportement futur des volcans
   - les paramètres éruptifs

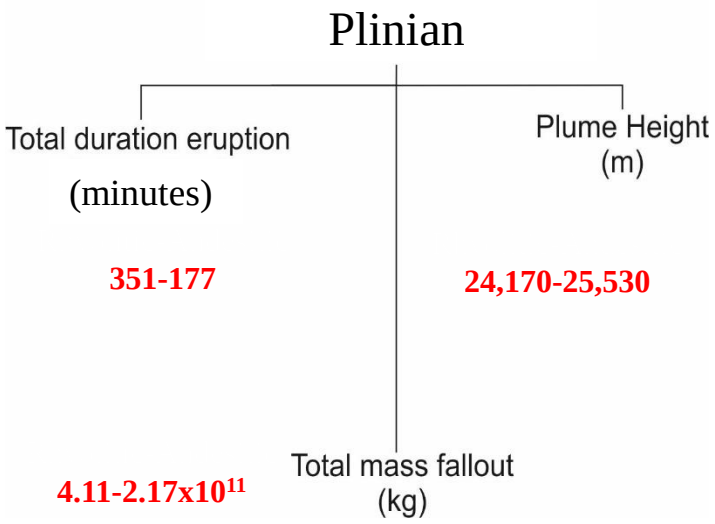



***MEDIAN VALUES***




***MEDIAN VALUES***



## Next eruption at Guagua Pichincha

| Vulcanian (like 1999 AD) (VEI 1-2) | SubPlinian (VEI 3-4) | Plinian (like 70 AD, 970 AD or 1660 AD) (VEI 4-5) | Other type |
|---|---|---|---|
| **60%** | **18%** | **11%** | **7%** |

***MEDIAN VALUES***

### SubPlinian

| Total duration eruption (minutes) | Plume Height (m) | Total mass fallout (kg) |
|---|---|---|
| **88** | **17,150** | **$2.67 \times 10^{10}$** |

## Next 100 years at Guagua Pichincha

| Vulcanian (like 1999 AD) (VEI 1-2) | SubPlinian (VEI 3-4) | Plinian (like 70 AD, 970 AD or 1660 AD) (VEI 4-5) | Other type |
|---|---|---|---|
| **66%** | **25%** | **17%** | **8%** |

***MEDIAN VALUES***

### Plinian

| Total duration eruption (minutes) | Plume Height (m) | Total mass fallout (kg) |
|---|---|---|
| **194** | **24,500** | **$1.65 \times 10^{11}$** |

# Développement de cartes et de courbes d'aléa

***Eruption type a***

Uncertainty Input parameters - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - - Creating input file

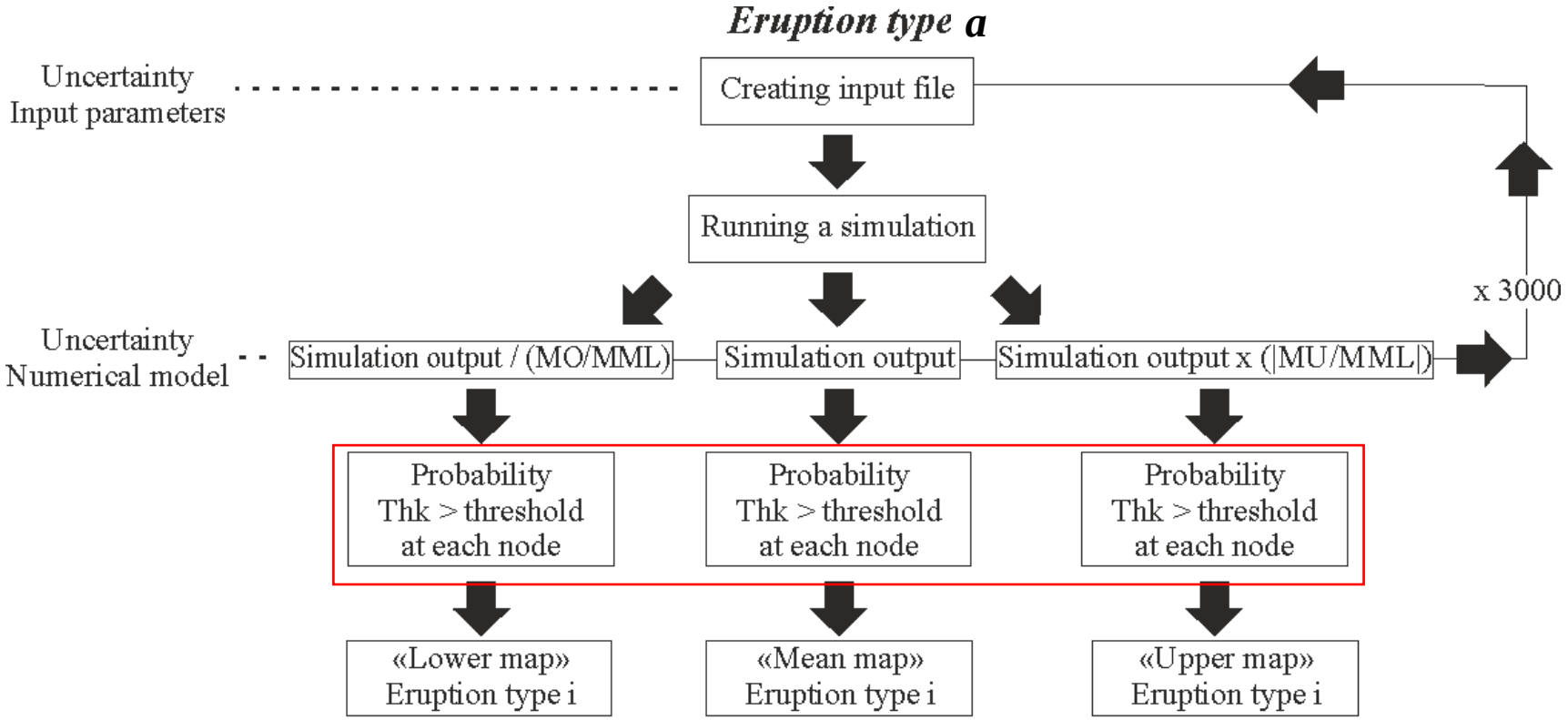
- Données météo GDAS (12/2004-12/2019)

- Paramètres - distributions triangulaires elicitées:
  - Durée de l'éruption
  - Débit massique (masse totale de retombées / durée)
  - Hauteur moyenne du panache (pour TGSD avec viscosités magma)

Un paramètre échantillonné, les deux autres calculés selon Mastin et al. (2009)

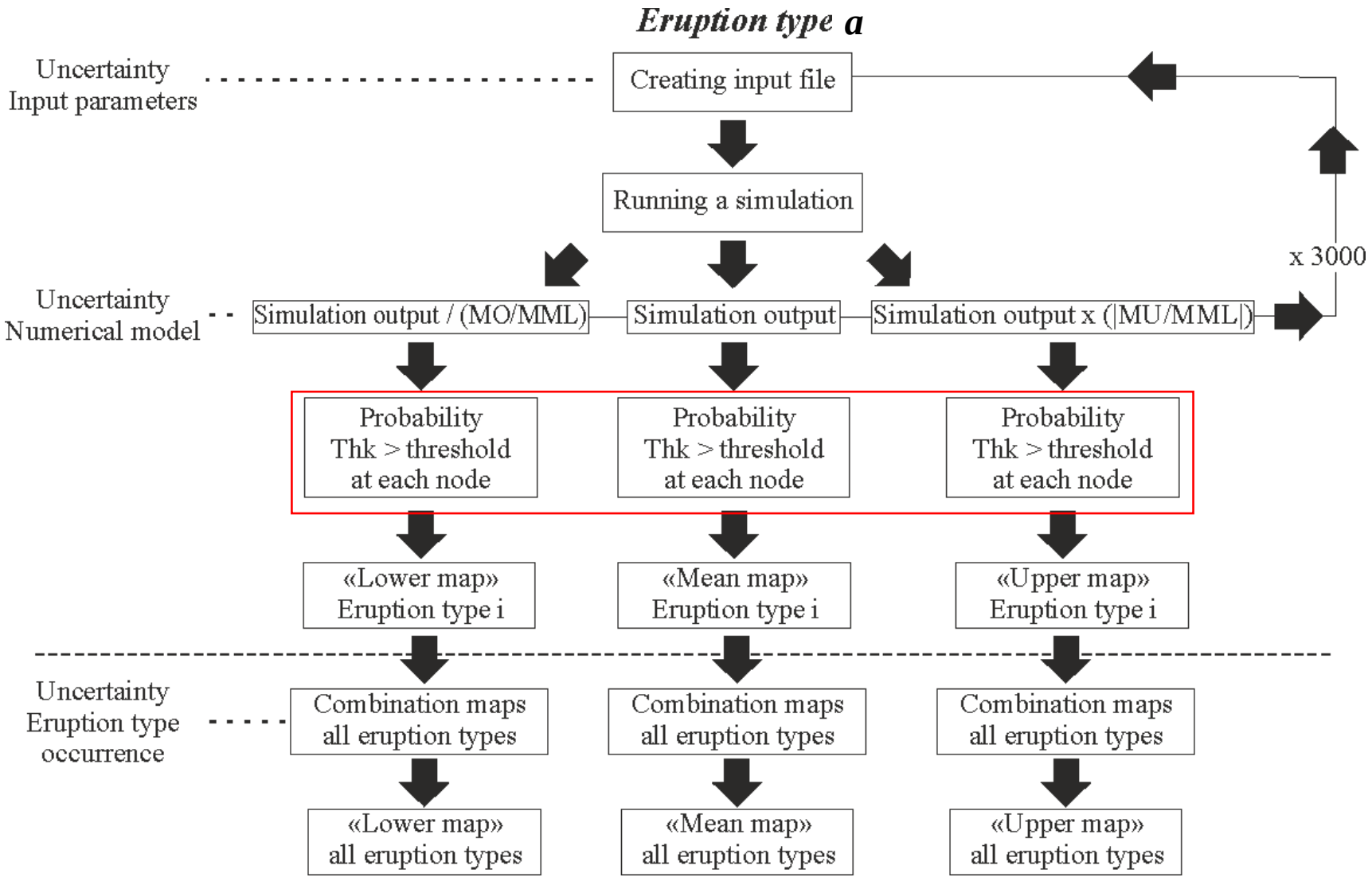
- Paramètres - distributions uniformes:
  - Densité des particules
  - Teneur en eau initiale du magma
  - Facteur de forme des particules

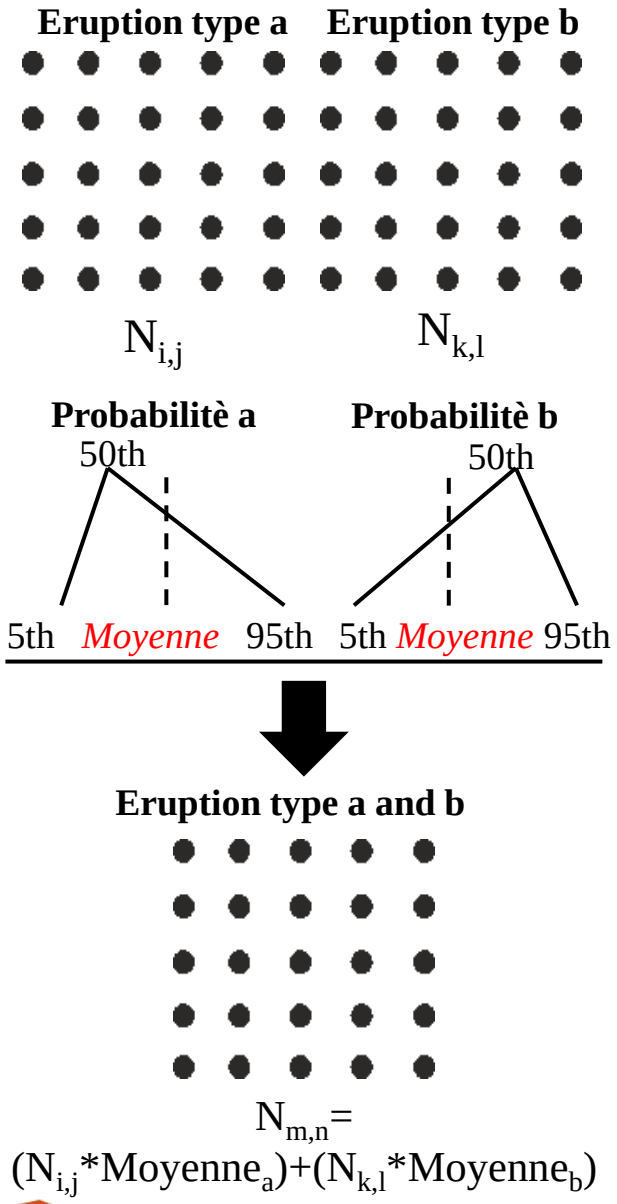
- TGSD selon Costa et al. (2016)




250 simulations par mois

Output en kg / m2, converti en épaisseur
(Seuils: 1, 3, 10, 30, 100, 300 mm)


Eruption type a
Uncertainty
Input parameters
Creating input file
Running a simulation
x 3000
Uncertainty
Numerical model
Simulation output / (MO/MML)
Simulation output
Simulation output x (|MU/MML|)
Probability
Thk > threshold
at each node
Probability
Thk > threshold
at each node
Probability
Thk > threshold
at each node
«Lower map»
Eruption type i
«Mean map»
Eruption type i
«Upper map»
Eruption type i
Uncertainty
Eruption type
occurrence
Combination maps
all eruption types
Combination maps
all eruption types
Combination maps
all eruption types
«Lower map»
all eruption types
«Mean map»
all eruption types
«Upper map»
all eruption types


Eruption type a
Eruption type b
$N_{i,j}$
$N_{k,l}$
Probabilitè a
Probabilitè b
50th
50th
5th
Moyenne
95th
5th
Moyenne
95th
Eruption type a and b
$N_{m,n}$=
$(N_{i,j}*Moyenne_a)+(N_{k,l}*Moyenne_b)$

Cartes pour éruptions sub-pliniennes et pliniennes considéré individuellement et ensemble:

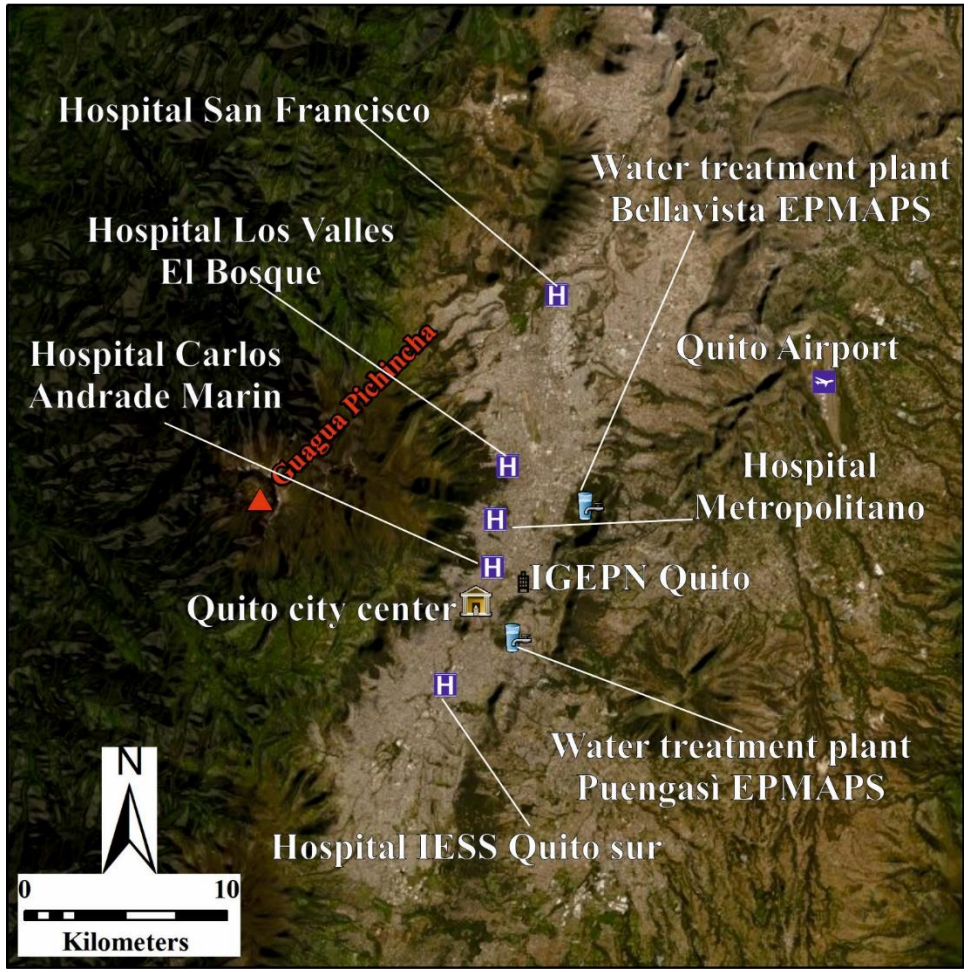
- pour Cotopaxi, rhyolitiques (2) et andésitiques (2) – *TOTAL 4*
- pour Guagua Pichincha, dacitiques (2) – *TOTAL 2*

Cartes:

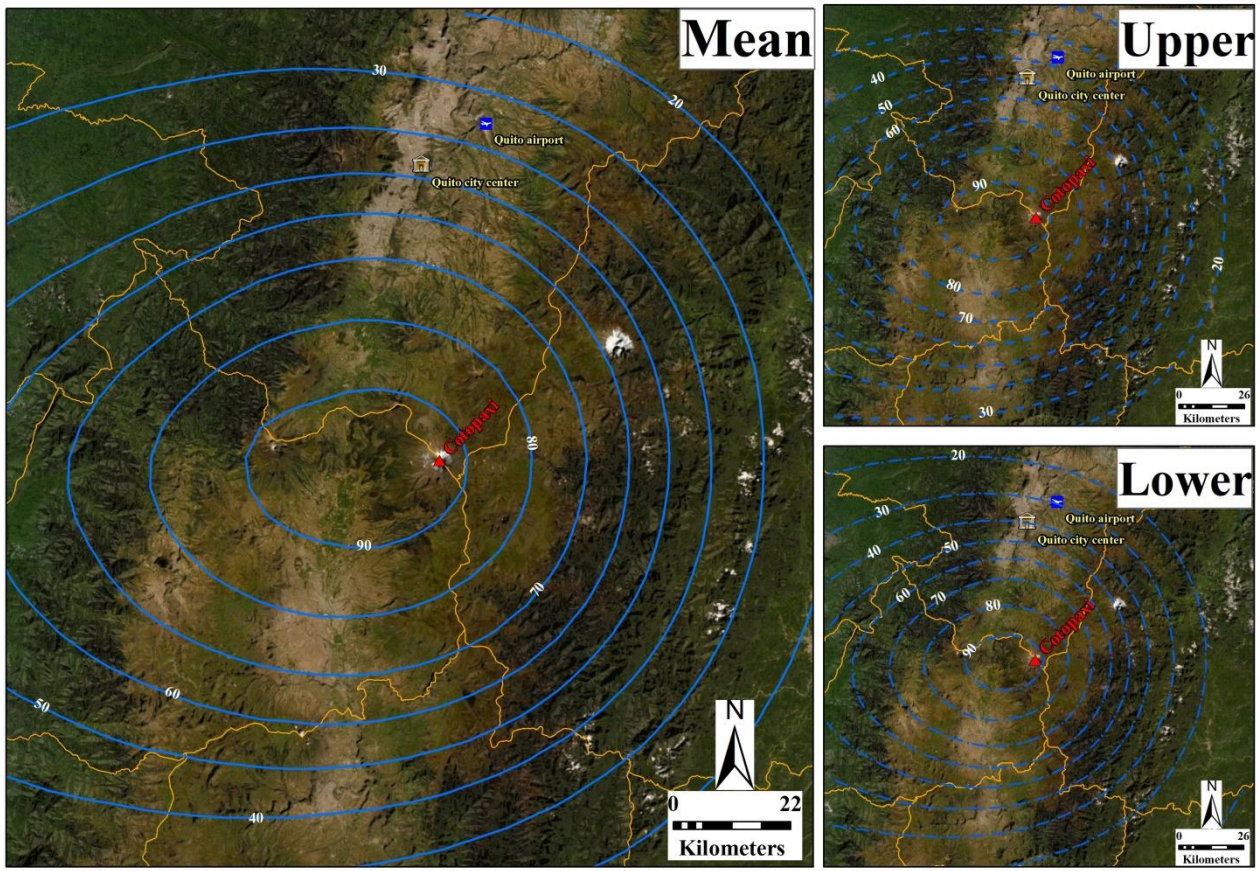
1. pour un seuil d'accumulation de tephra donné (1, 3, 10, 30, 100, 300 mm) et des probabilités différentes;
2. pour une probabilité donnée (10% ou 50%) et différents seuils d'accumulation de tephra;

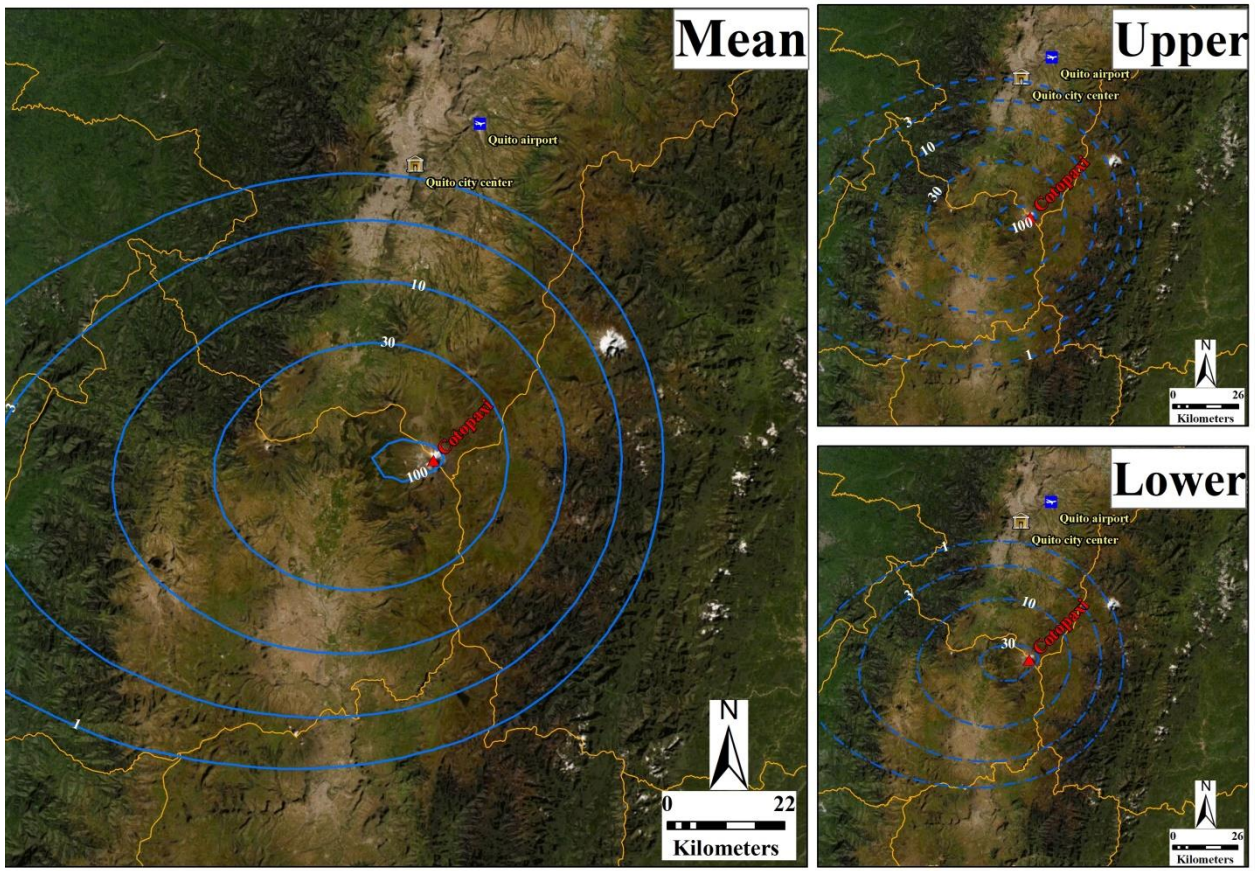
Pour une étude plus détaillée de la ville de Quito:
Courbes d'aléa sur 10 sites sensibles

- Aéroport de Quito
- IGEPN
- Centre ville
- 5 hôpitaux
- 2 usines de traitement des eaux



# *Volcan Cotopaxi*

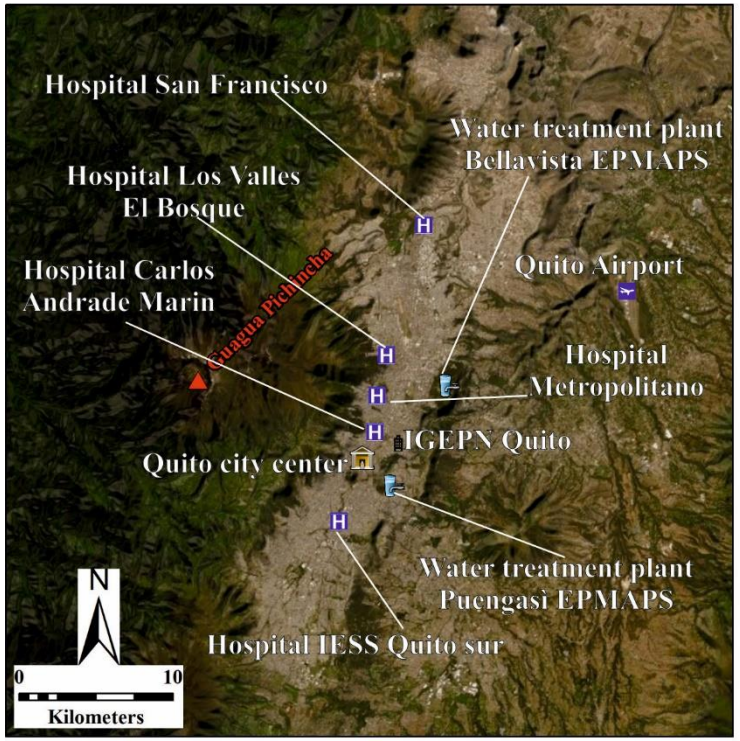


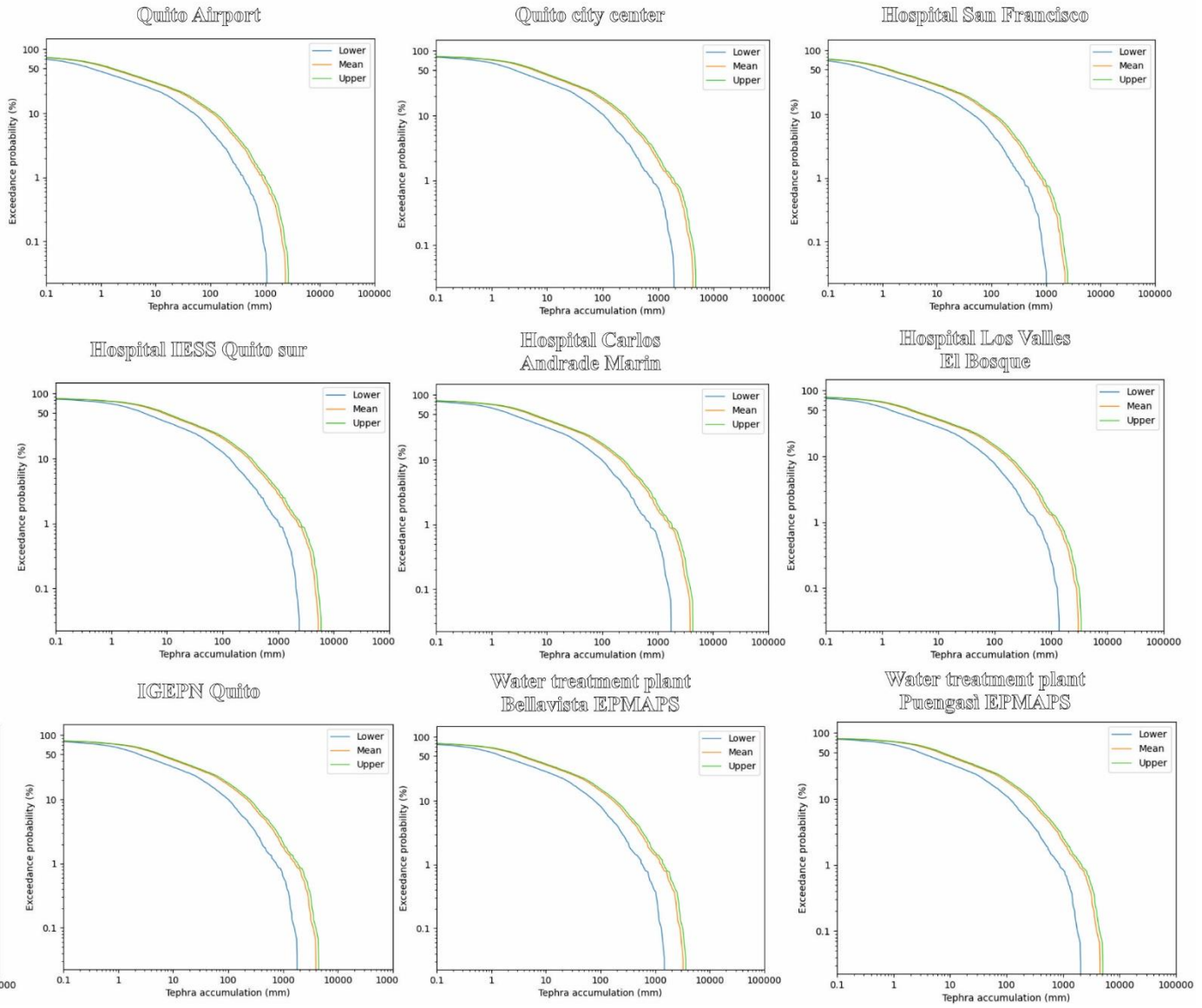



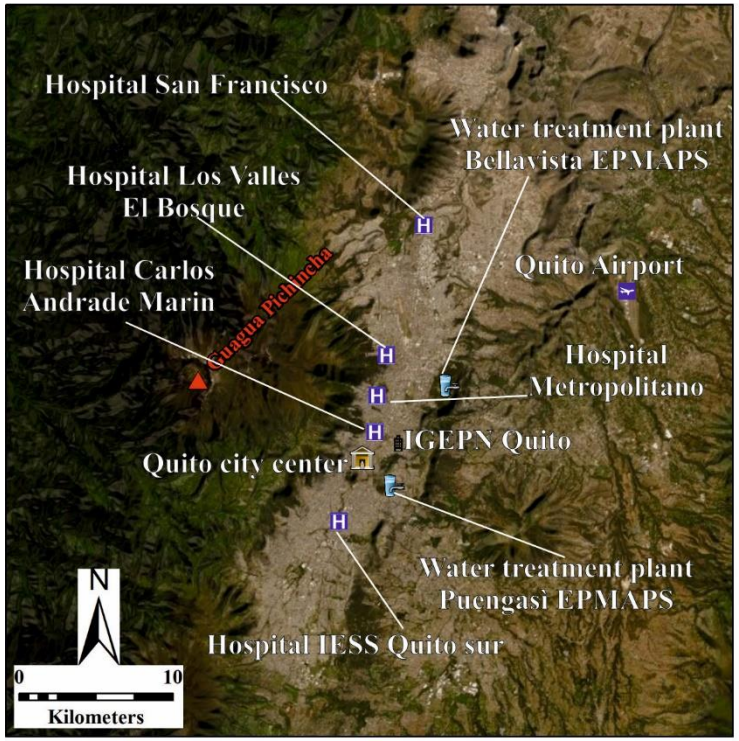

*Contours de probabilité – 1 mm*

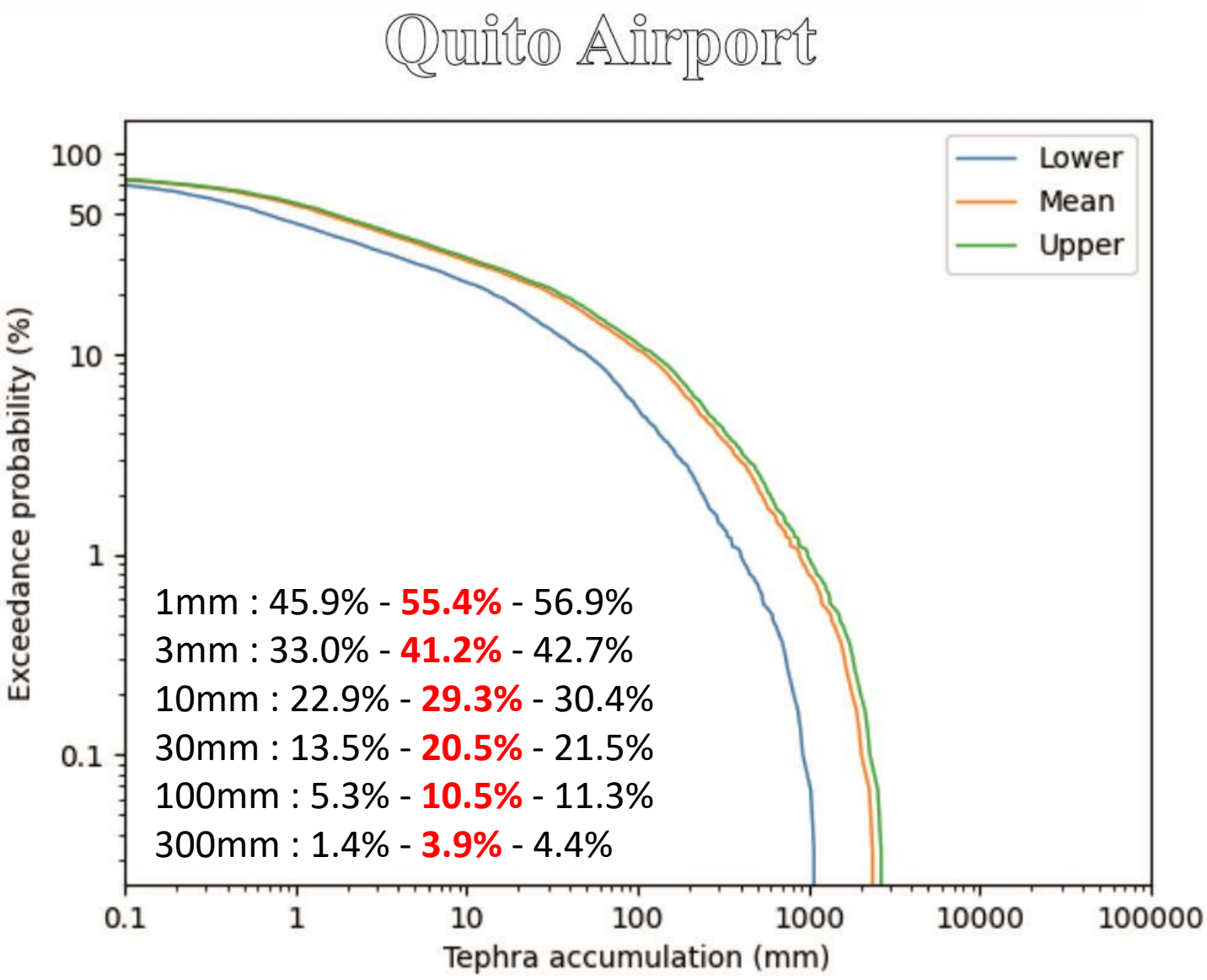
Surface (km$^2$) du 70%: ***4174*** – ***5838*** - ***6128***

*Contours d'épaisseur – 50% probabilité*

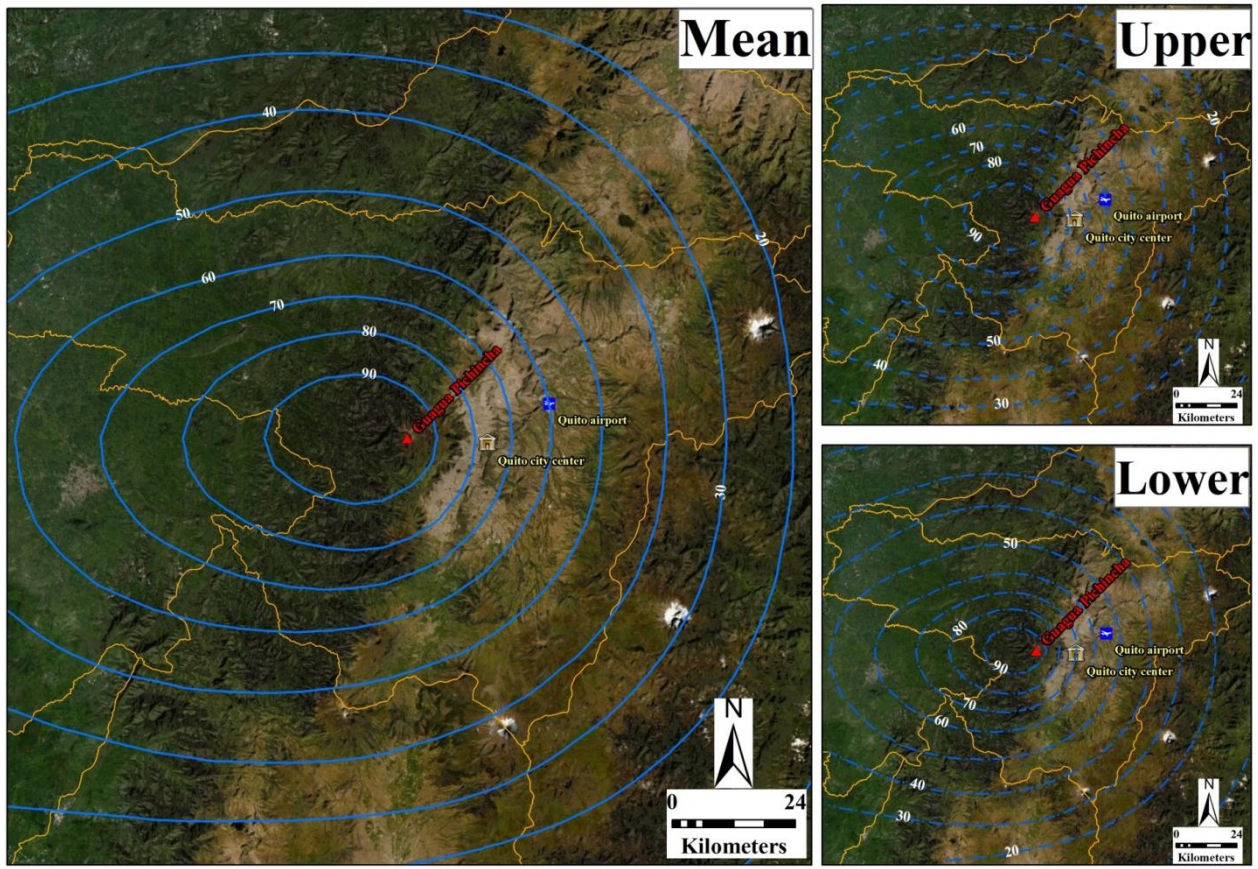

Hospital San Francisco
Water treatment plant Bellavista EPMAPS
Hospital Los Valles El Bosque
Quito Airport
Hospital Carlos Andrade Marin
Guagua Pichincha
Hospital Metropolitano
IGEPN Quito
Quito city center
Water treatment plant Puengasì EPMAPS
Hospital IESS Quito sur
N
0
10
Kilometers


Quito Airport
Quito city center
Hospital San Francisco
Hospital IESS Quito sur
Hospital Carlos Andrade Marin
Hospital Los Valles El Bosque
Hospital Metropolitano
IGEPN Quito
Water treatment plant Bellavista EPMAPS
Water treatment plant Puengasì EPMAPS
Lower
Mean
Upper
Exceedance probability (%)
Tephra accumulation (mm)


Hospital San Francisco
Water treatment plant Bellavista EPMAPS
Hospital Los Valles El Bosque
Quito Airport
Hospital Carlos Andrade Marin
Guagua Pichincha
Hospital Metropolitano
IGEPN Quito
Quito city center
Water treatment plant Puengasi EPMAPS
Hospital IESS Quito sur
N
0
10
Kilometers

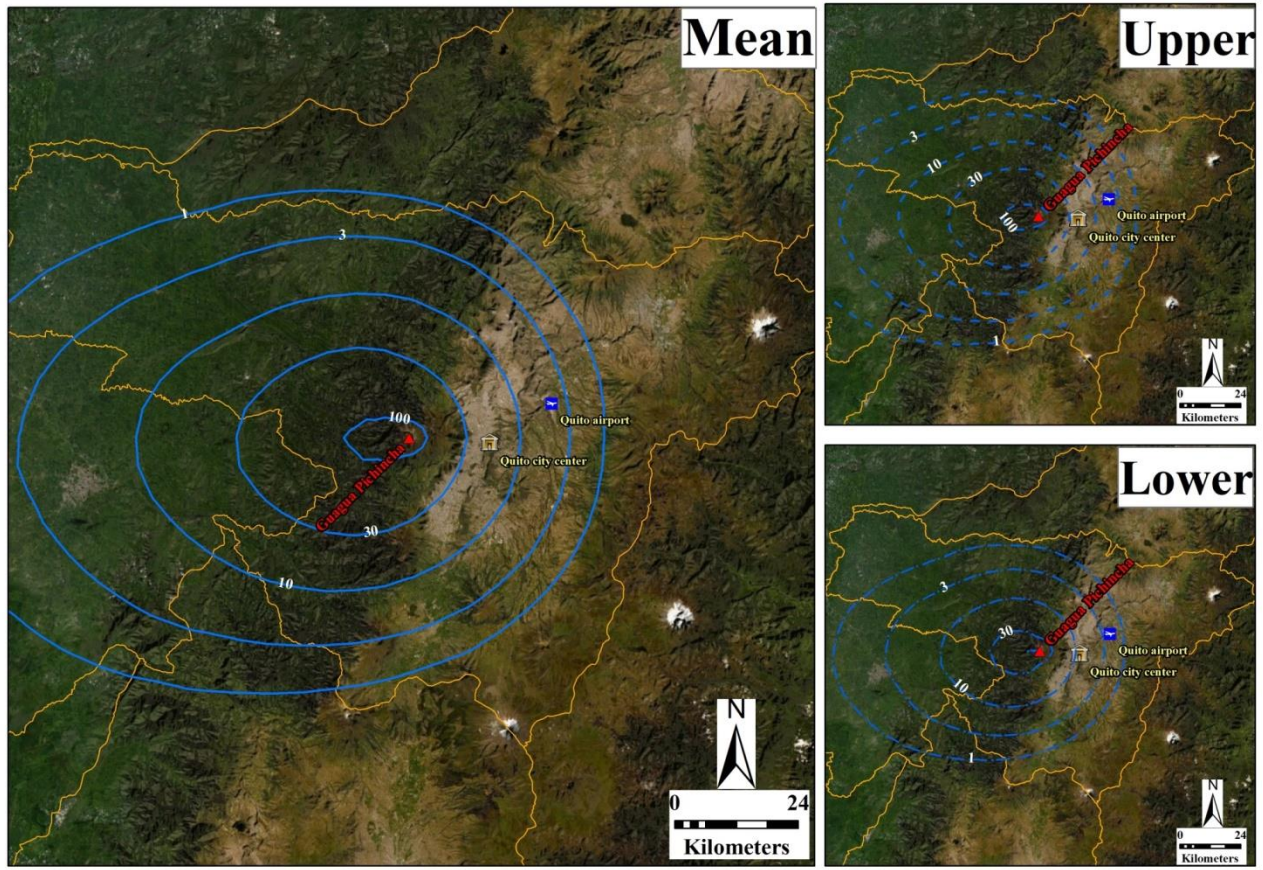

Quito Airport
Lower
Mean
Upper
Exceedance probability (%)
100
50
10
1
0.1
Tephra accumulation (mm)
0.1
1
10
100
1000
10000
100000
1mm : 45.9% - 55.4% - 56.9%
3mm : 33.0% - 41.2% - 42.7%
10mm : 22.9% - 29.3% - 30.4%
30mm : 13.5% - 20.5% - 21.5%
100mm : 5.3% - 10.5% - 11.3%
300mm : 1.4% - 3.9% - 4.4%

# *Volcan Guagua Pichincha*

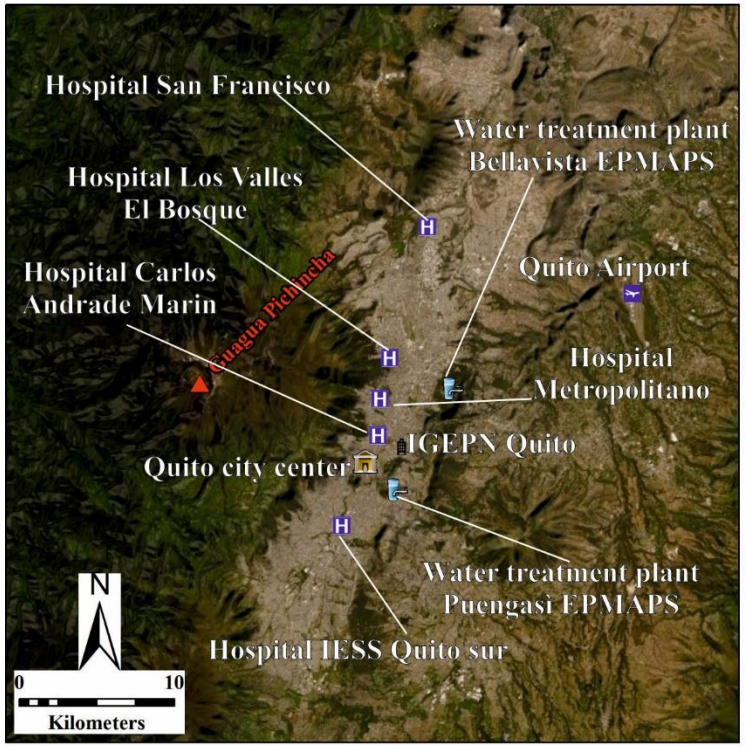


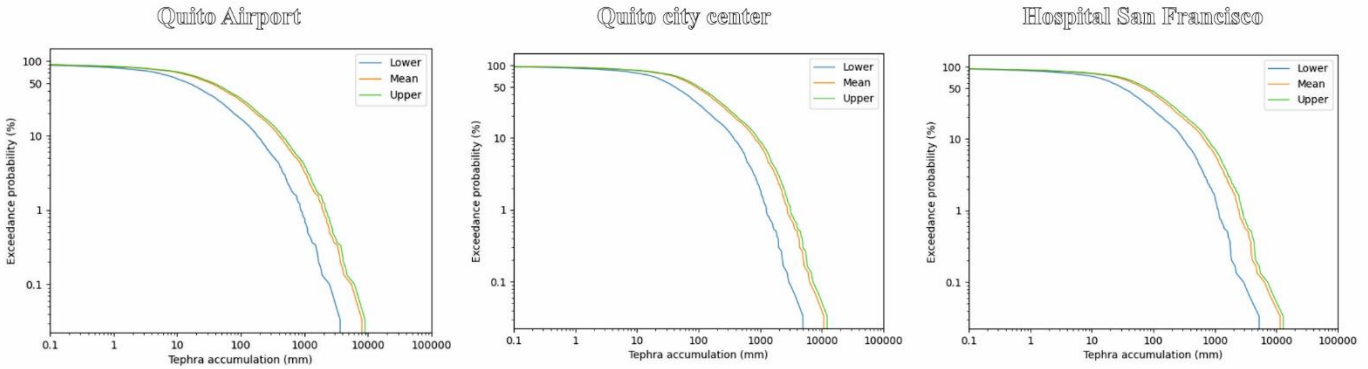

*Contours de probabilité – 1 mm*

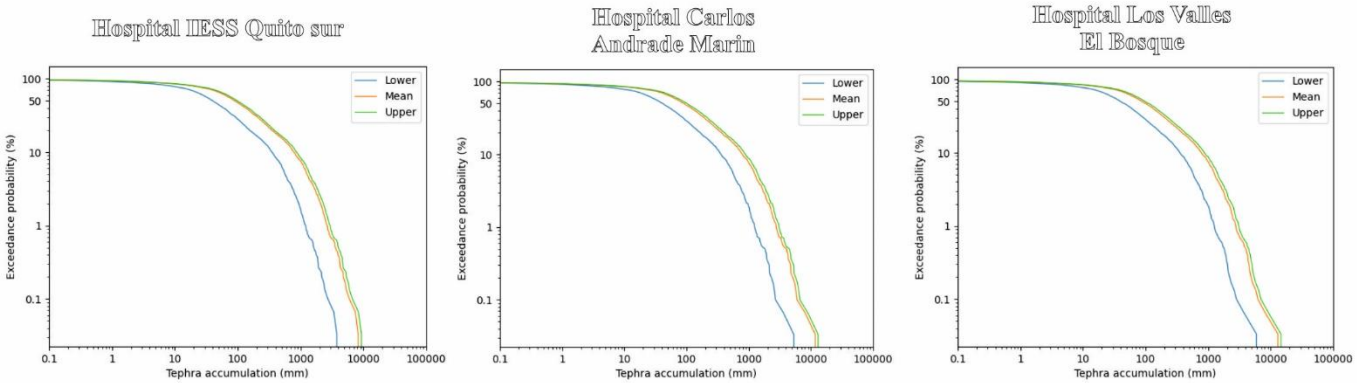
Surface (km$^2$) du 70%: ***2329*** – ***3546*** - ***3729***

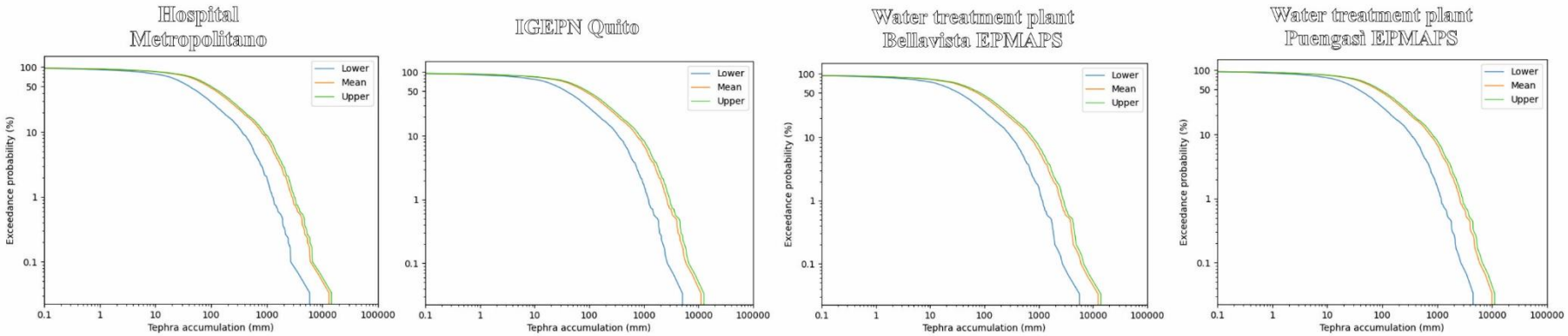


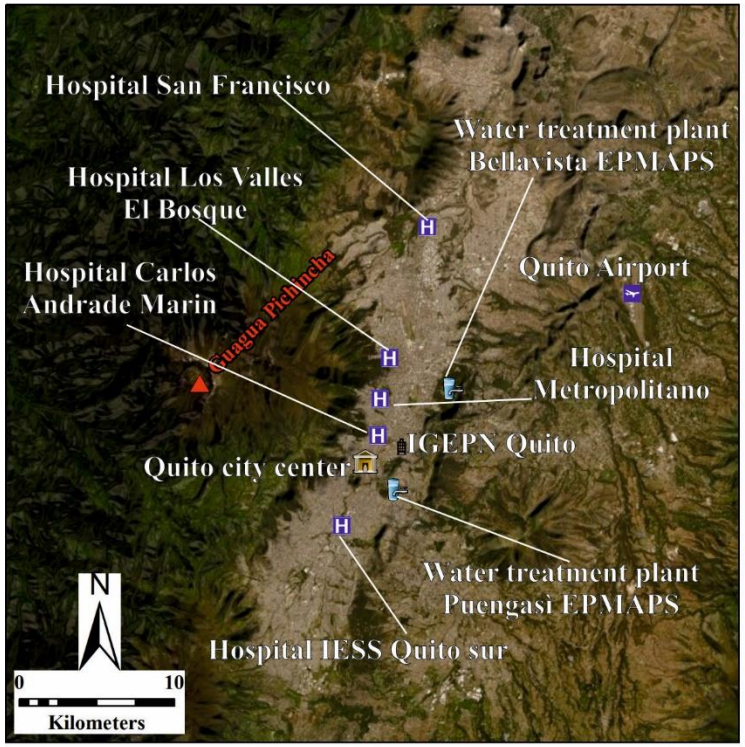

*Contours d'épaisseur – 50% probabilité*


Hospital San Francisco
Water treatment plant Bellavista EPMAPS
Hospital Los Valles El Bosque
Quito Airport
Hospital Carlos Andrade Marin
Guagua Pichincha
Hospital Metropolitano
IGEPN Quito
Quito city center
Water treatment plant Puengasì EPMAPS
Hospital IESS Quito sur
N
0
10
Kilometers

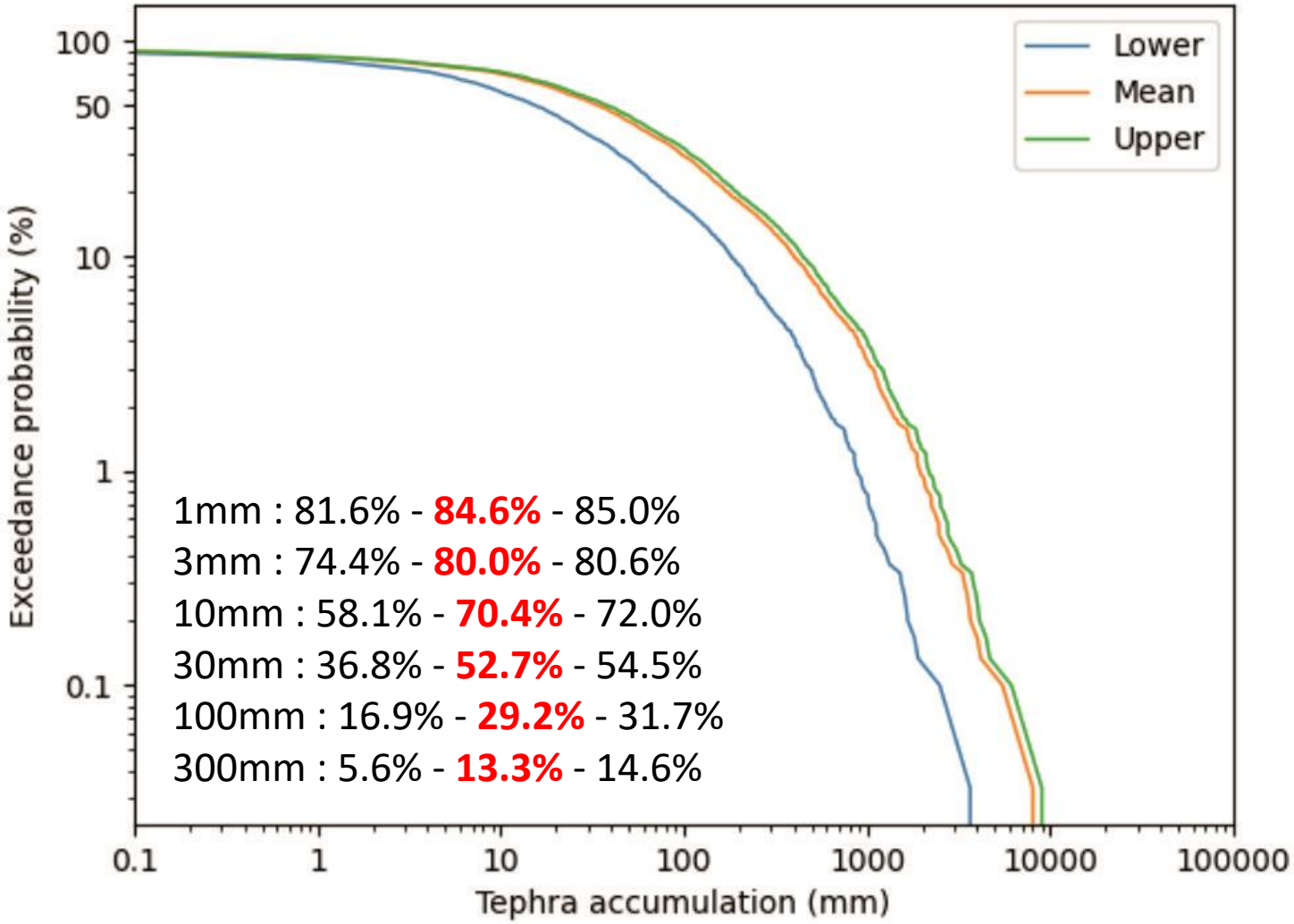

Quito Airport
Quito city center
Hospital San Francisco
Lower
Mean
Upper
Exceedance probability (%)
Tephra accumulation (mm)


Hospital IESS Quito sur
Hospital Carlos Andrade Marin
Hospital Los Valles El Bosque
Lower
Mean
Upper
Exceedance probability (%)
Tephra accumulation (mm)


Hospital Metropolitano
IGEPN Quito
Water treatment plant Bellavista EPMAPS
Water treatment plant Puengasì EPMAPS
Lower
Mean
Upper
Exceedance probability (%)
Tephra accumulation (mm)




# Quito Airport



# Conclusions et perspectives

# Conclusions

- Quantification de l'incertitude du modèle - *définition de coefficients pour surestimation/sous-estimation moyenne du modèle*

- Quantification de l'incertitude pour la probabilité d'occurrence de différents types d'éruption et la plage de variation des paramètres de la source éruptive - *session d'expert elicitation*

- Cartes d'aléa produites pour éruptions pliniennes et sub-pliniennes considérées individuellement et ensemble
  - Cotopaxi (4 types d'éruptions)
  - Guagua Pichincha (2 types d'éruptions)

- Deux types de carte différents:
  1. pour un seuil d'accumulation de tephra donné et différentes probabilités
  2. pour une probabilité donnée et différents seuils d'accumulation de tephra

- Chaque type de carte est présenté comme un ensemble de trois cartes («lower», «mean» et «upper») qui quantifient les trois principales sources d'incertitude.

- Pour une étude plus détaillée de la ville de Quito, des courbes de risque ont été définies pour 10 sites sensibles de la ville

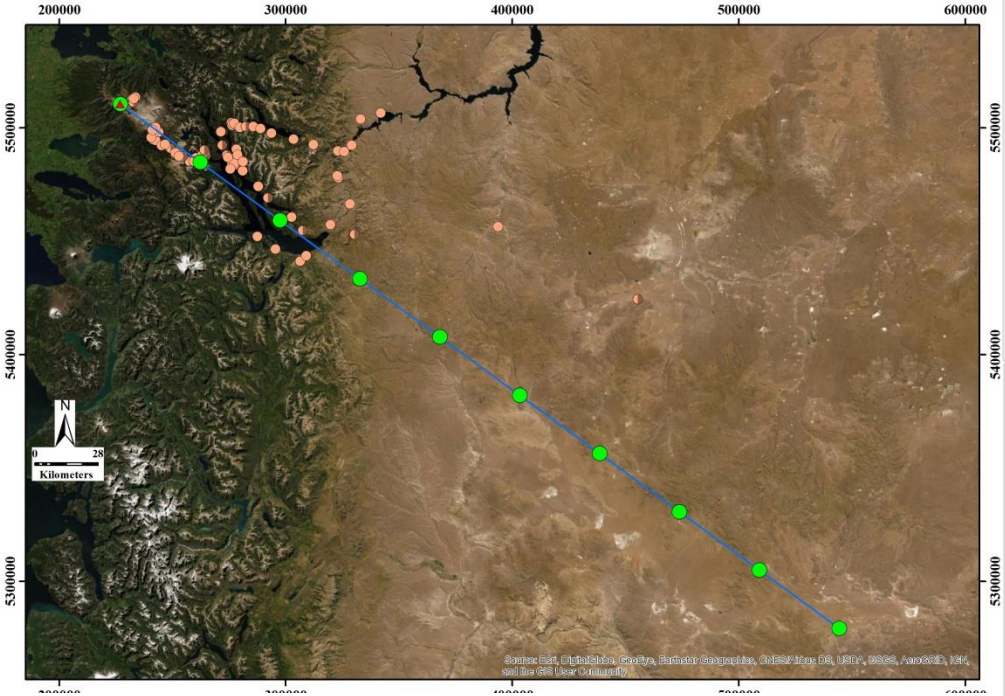
# Perspectives

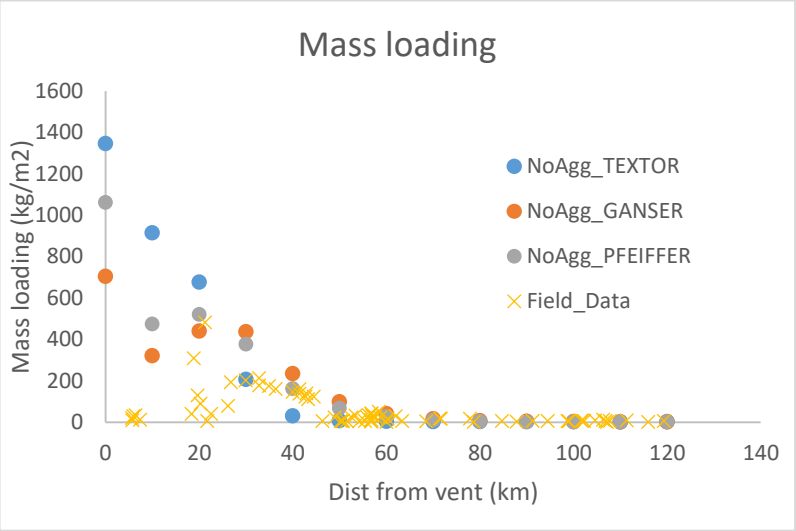
- Éruptions de moindre magnitude - cartes?
- D'autres volcans où cette approche pourrait être testée?
- Améliorer certaines parties du HYSPLIT

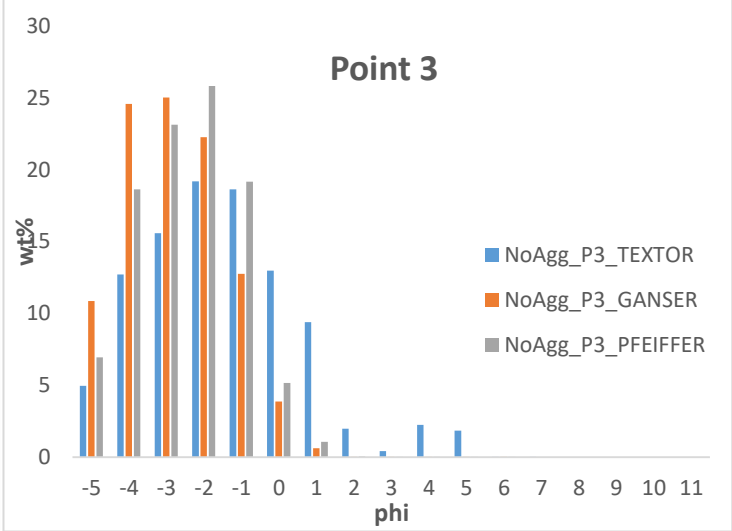
# PROJET CLERVOLC

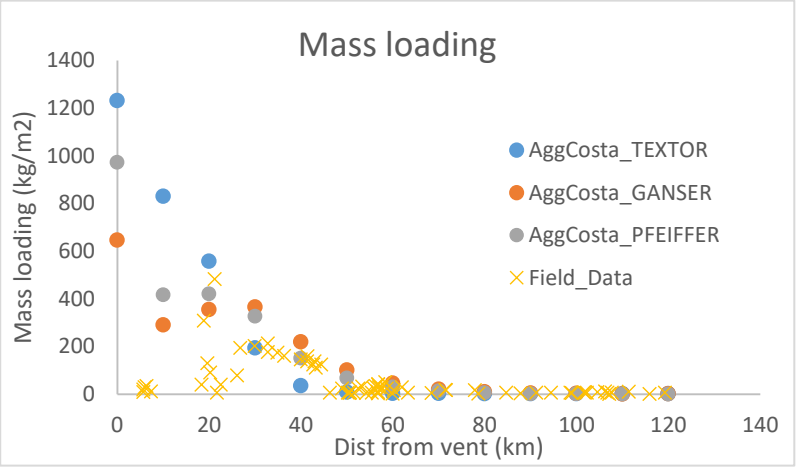
*Modélisation numérique des panaches de cendres volcaniques*

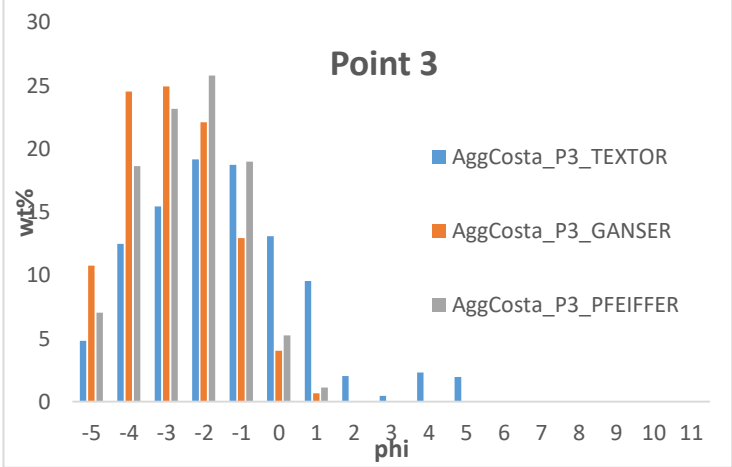
## Puyehue-Cordon Caulle 2011



# Merci pour votre attention