



# Imagerie géoradar (GPR) en milieu hétérogène

Application aux failles actives en Mongolie et aux dépôts pyroclastiques du Tungurahua (Equateur)

Jean-Rémi Dujardin

Superviseur : Maksim Bano

# Plan

- 1- Introduction générale sur le géoradar
- 2- Imagerie géoradar : la migration topographique
- 3- Applications du géoradar :
  - Dans un contexte de paléo-sismologie, Mongolie
  - Sur des dépôts pyroclastiques, Equateur
- 4- Conclusions

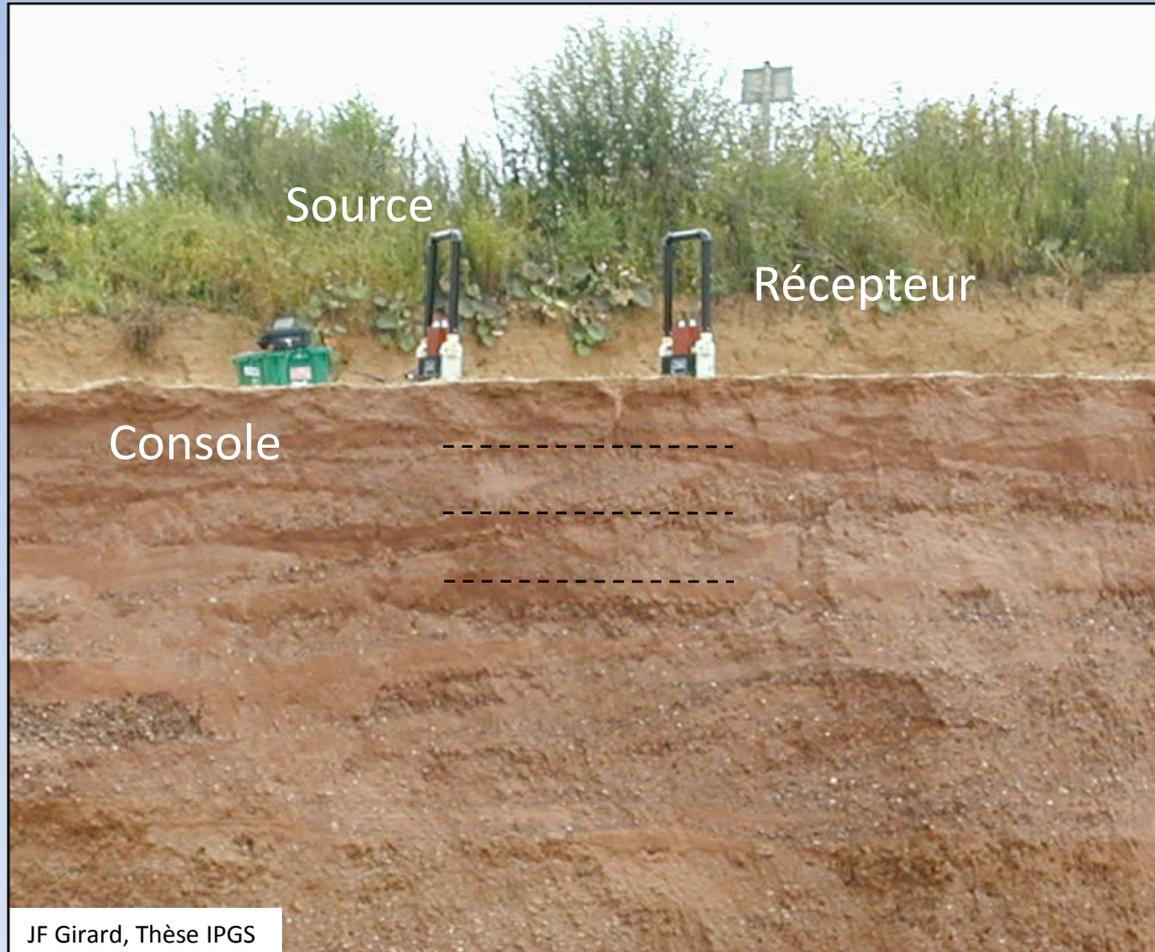
# 1 - Le géoradar – qu'est ce que c'est ?

Géoradar/GPR (Ground Penetrating Radar)/Radar Géologique

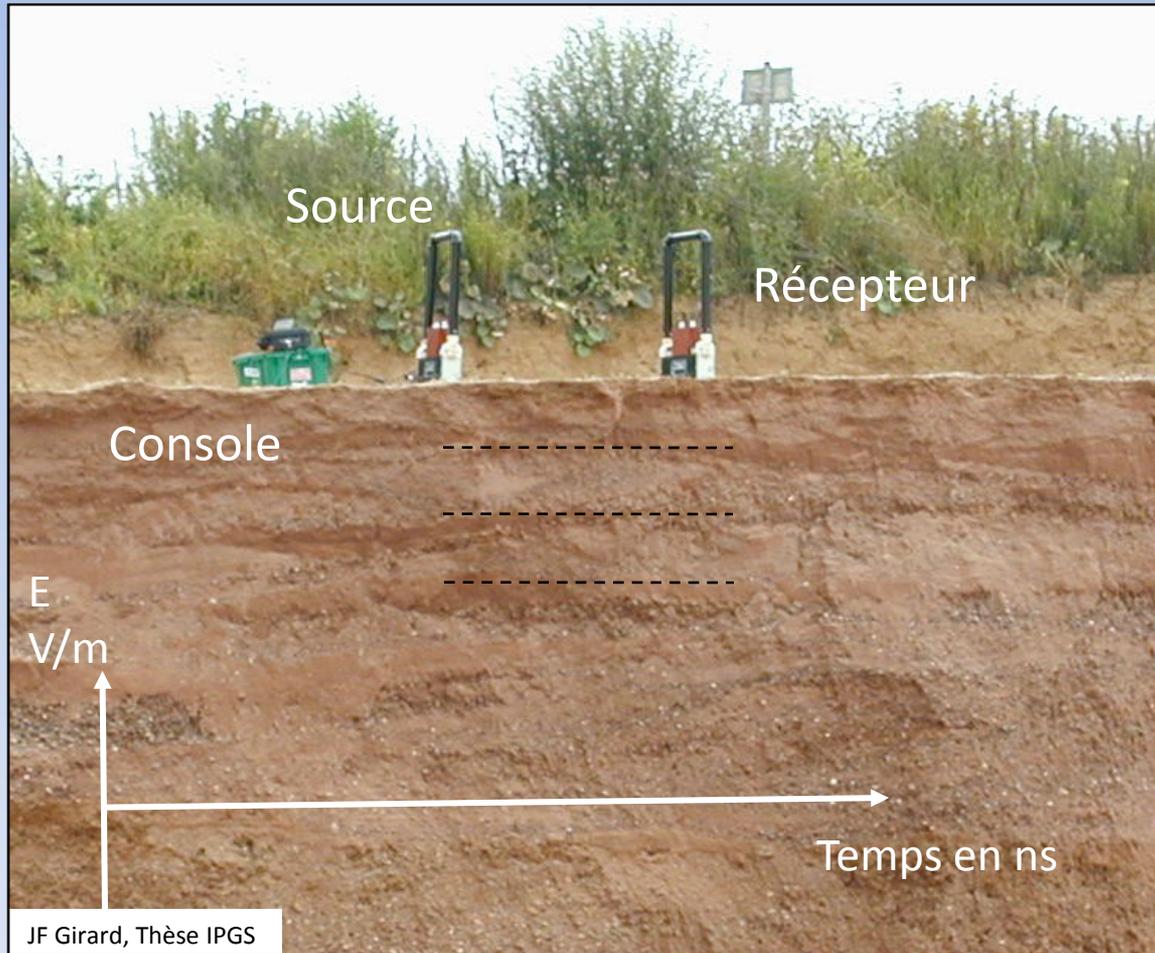
- Méthode Electromagnétique
- Haute fréquence (20 MHz – 2 GHz)
- Mode propagatif ( $\sigma \ll \omega\epsilon$ )



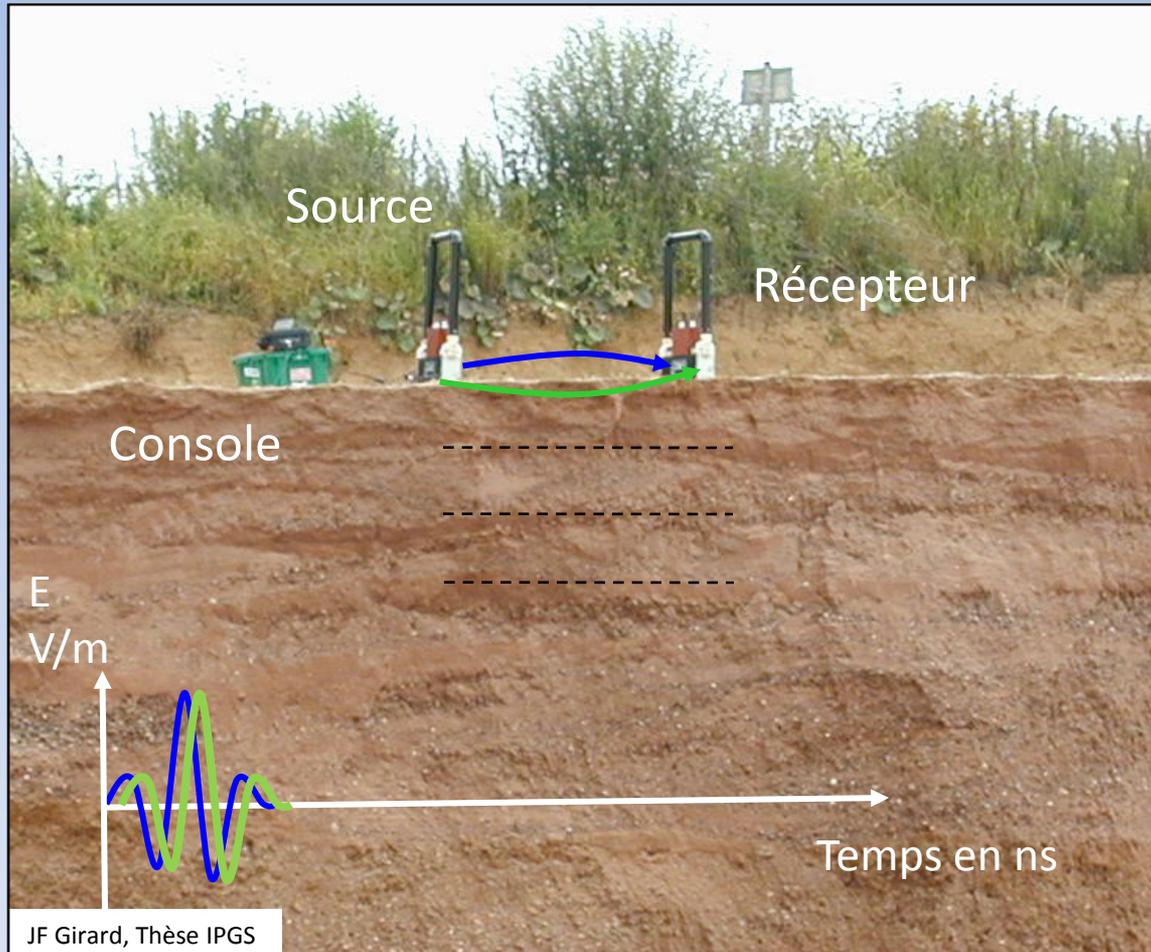
# 1 - Le géoradar - principe



# 1 - Le géoradar - principe



# 1 - Le géoradar - principe

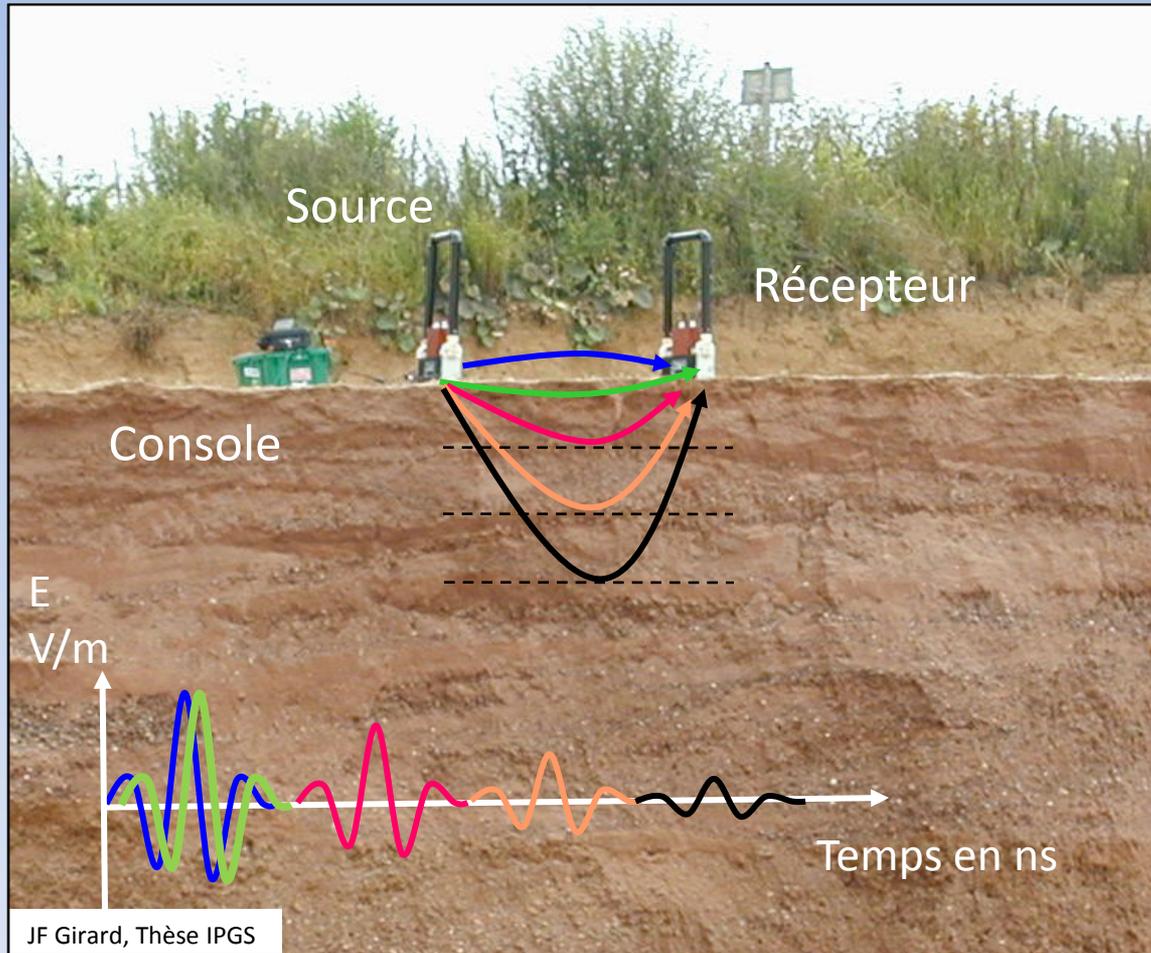


Onde directe aérienne

Onde directe sol

1<sup>ère</sup> arrivée

# 1 - Le géoradar - principe



Onde directe aérienne

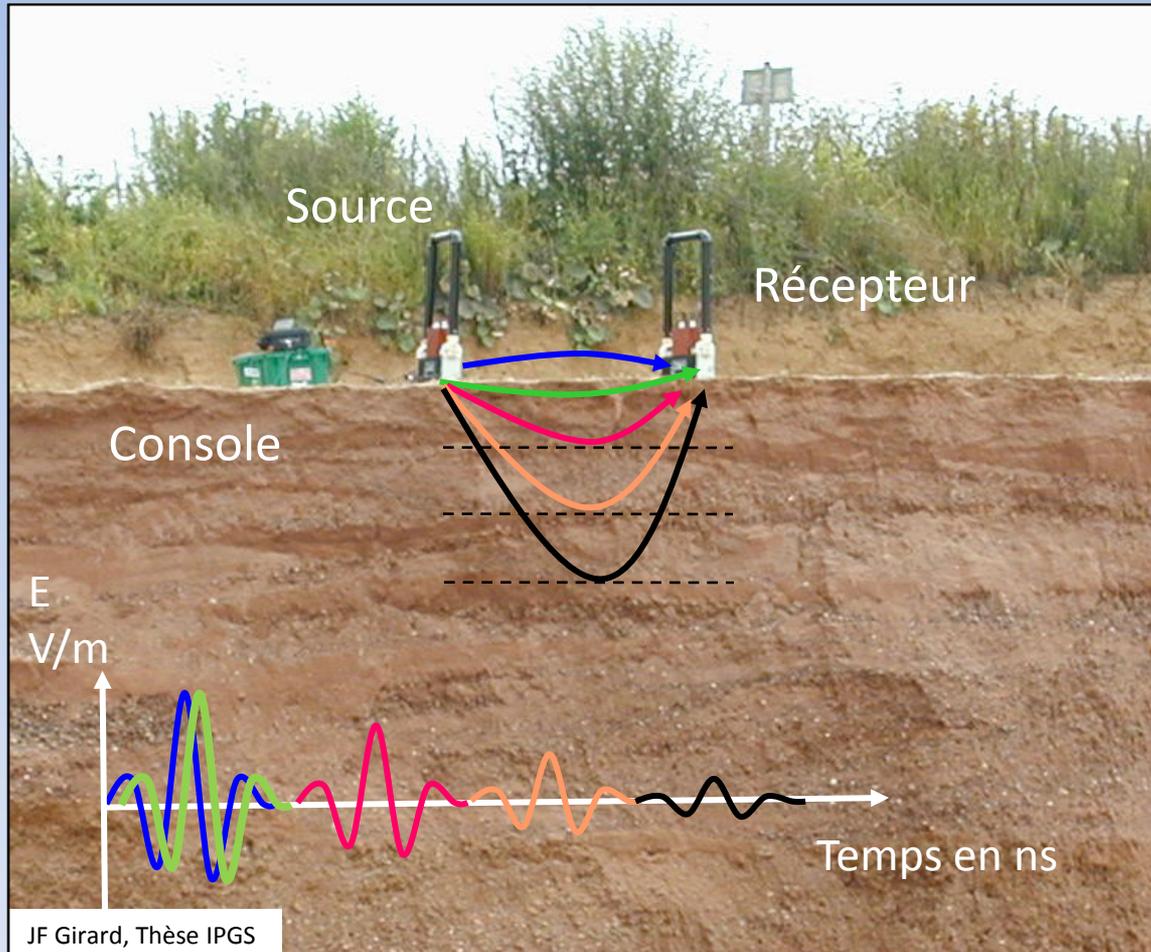
Onde directe sol

1ère Réfléchie

2ème Réfléchie

3ème Réfléchie

# 1 - Le géoradar - principe



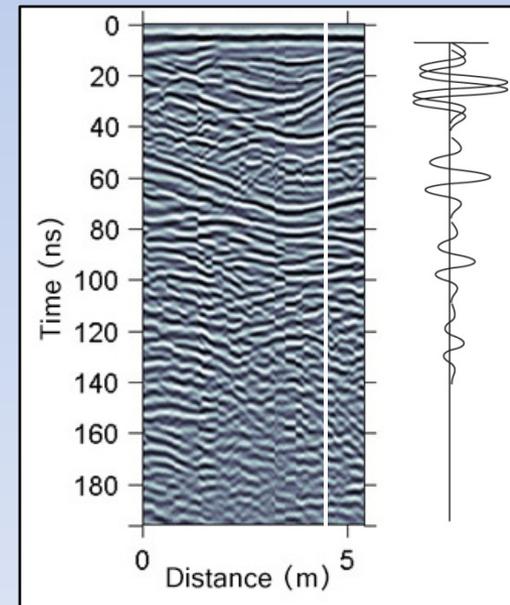
Onde directe aérienne

Onde directe sol

1ère Réfléchie

2ème Réfléchie

3ème Réfléchie



# 1 - Le géoradar - les paramètres du sous-sol

→ Constante diélectrique  $\left(\kappa = \frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)$

- Sans unités

- Capacité d'un milieu à stocker et relacher l'énergie EM

- Reliée à la vitesse des ondes EM

$$V = \frac{c}{\sqrt{\kappa}} \quad C = 0.3 \text{ m/ns}$$

Références : Cassidy, 2009; Conyers & Goodman, 1997; Annan, 2009

# 1 - Le géoradar - les paramètres du sous-sol

→ Constante diélectrique  $(\kappa = \frac{\epsilon}{\epsilon_0})$

- Sans unités

- Capacité d'un milieu à stocker et relacher l'énergie EM

- Reliée à la vitesse des ondes EM

$$V = \frac{c}{\sqrt{\kappa}} \quad C = 0.3 \text{ m/ns}$$

→ Perméabilité magnétique ( $\mu$ )

- En H/m

- Capacité d'un milieu à se magnétiser sous l'effet d'un champ EM

# 1 - Le géoradar - les paramètres du sous-sol

→ Constante diélectrique  $(\kappa = \frac{\epsilon}{\epsilon_0})$

- Sans unités

- Capacité d'un milieu à stocker et relacher l'énergie EM

- Reliée à la vitesse des ondes EM

$$V = \frac{c}{\sqrt{\kappa}} \quad C = 0.3 \text{ m/ns}$$

→ Perméabilité magnétique ( $\mu$ )

- En H/m

- Capacité d'un milieu à se magnétiser sous l'effet d'un champ EM

→ Conductivité électrique ( $\sigma$ )

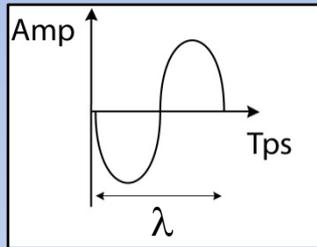
- En S/m

- Capacité d'un milieu à conduire un courant électrique sous l'effet d'un champ EM

Références : Cassidy, 2009; Conyers & Goodman, 1997; Annan, 2009

# 1 - Le géoradar - avantages

→ Résolution

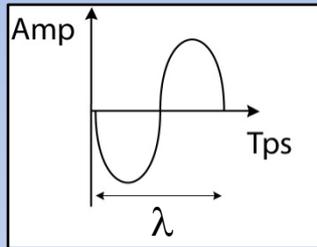


$$v = 0.1 \text{ m/ns} ; f = 20 \text{ MHz} - 2\text{GHz}$$

$$\lambda = v / f = 5 \text{ m} - 5 \text{ cm}$$

# 1 - Le géoradar - avantages

→ Résolution



$$v = 0.1 \text{ m/ns} ; f = 20 \text{ MHz} - 2\text{GHz}$$

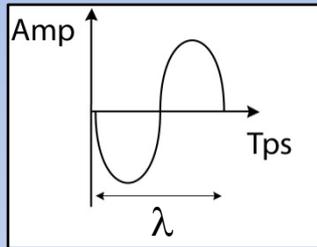
$$\lambda = v / f = 5 \text{ m} - 5 \text{ cm}$$

→ Logistique/ Rapidité



# 1 - Le géoradar - avantages

→ Résolution



$$v = 0.1 \text{ m/ns} ; f = 20 \text{ MHz} - 2\text{GHz}$$

$$\lambda = v / f = 5 \text{ m} - 5 \text{ cm}$$

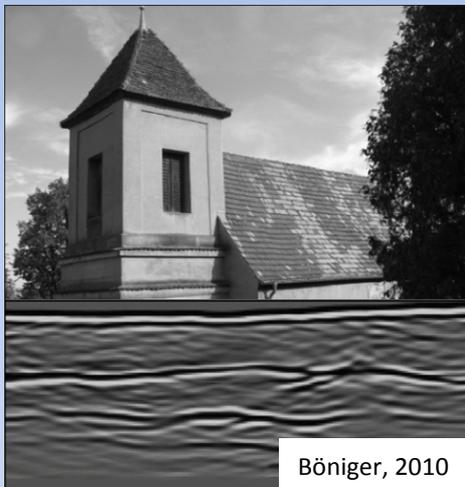
→ Logistique/ Rapidité

→ Coût peu élevé

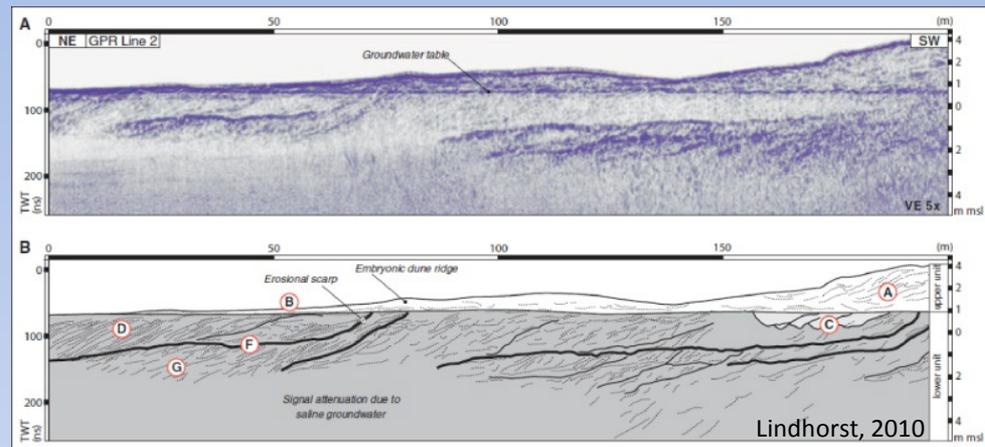


# 1 - Le géoradar - utilisation

## Archéologie



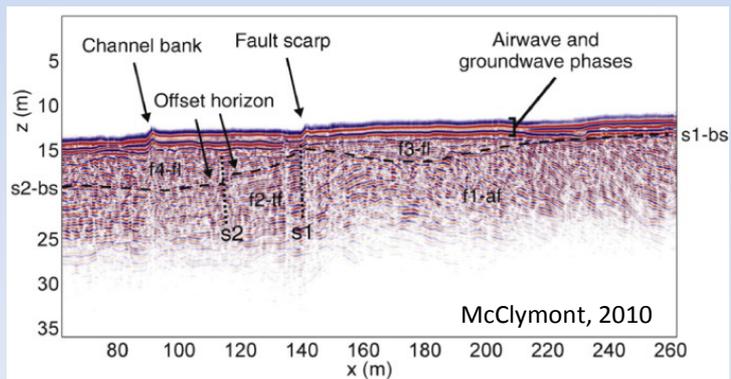
## Sédimentologie



## Glaciologie

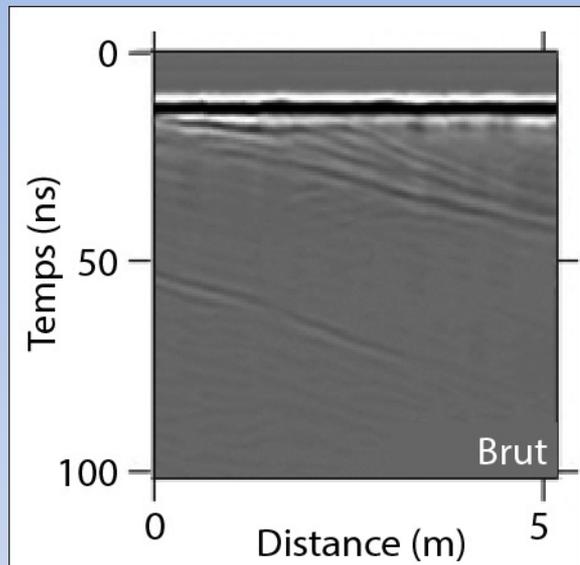


## Paléosismologie

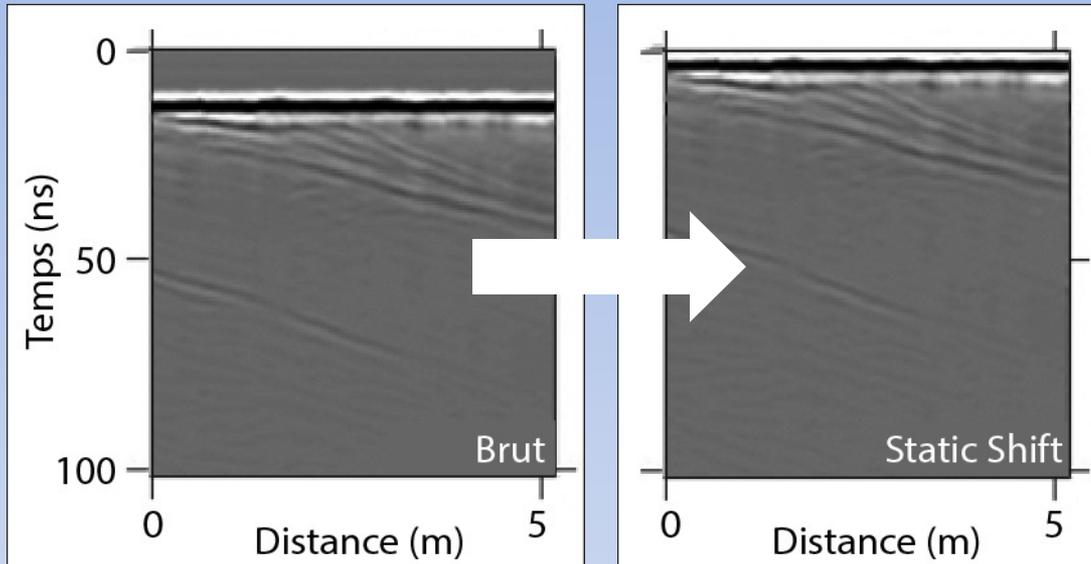


## hydrologie

# 1 - Le géoradar - traitement

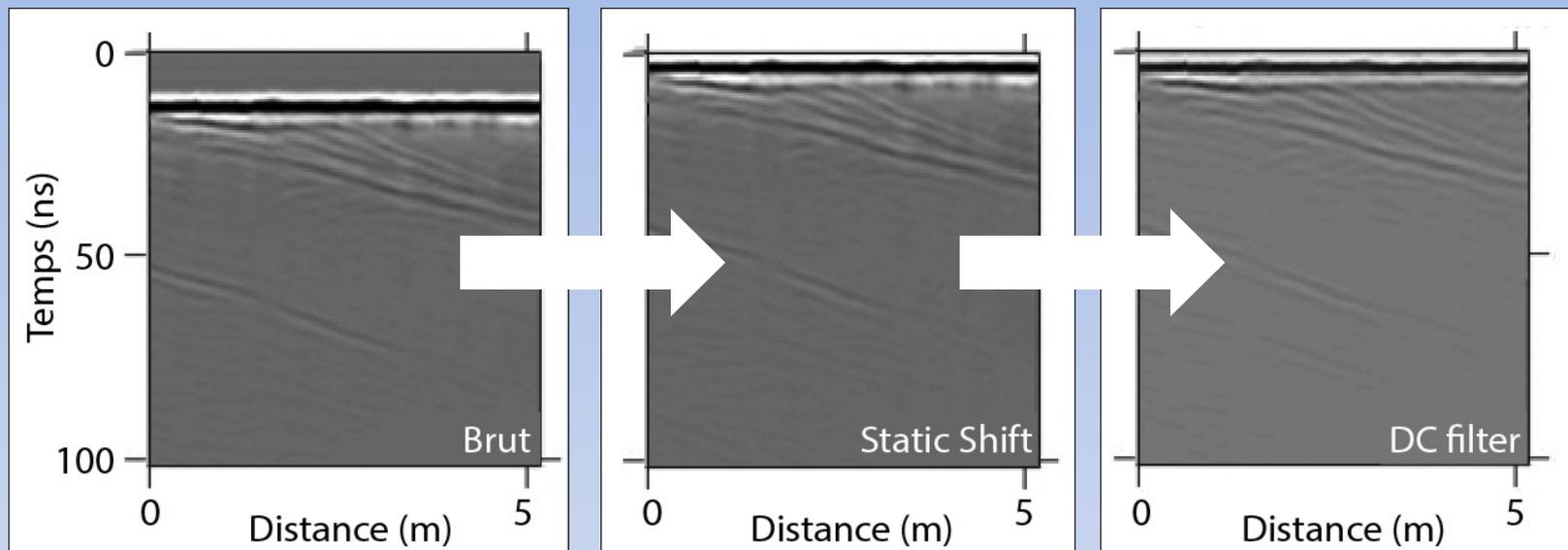


# 1 - Le géoradar - traitement



Static shift : alignement des 1ères arrivées sur zéro

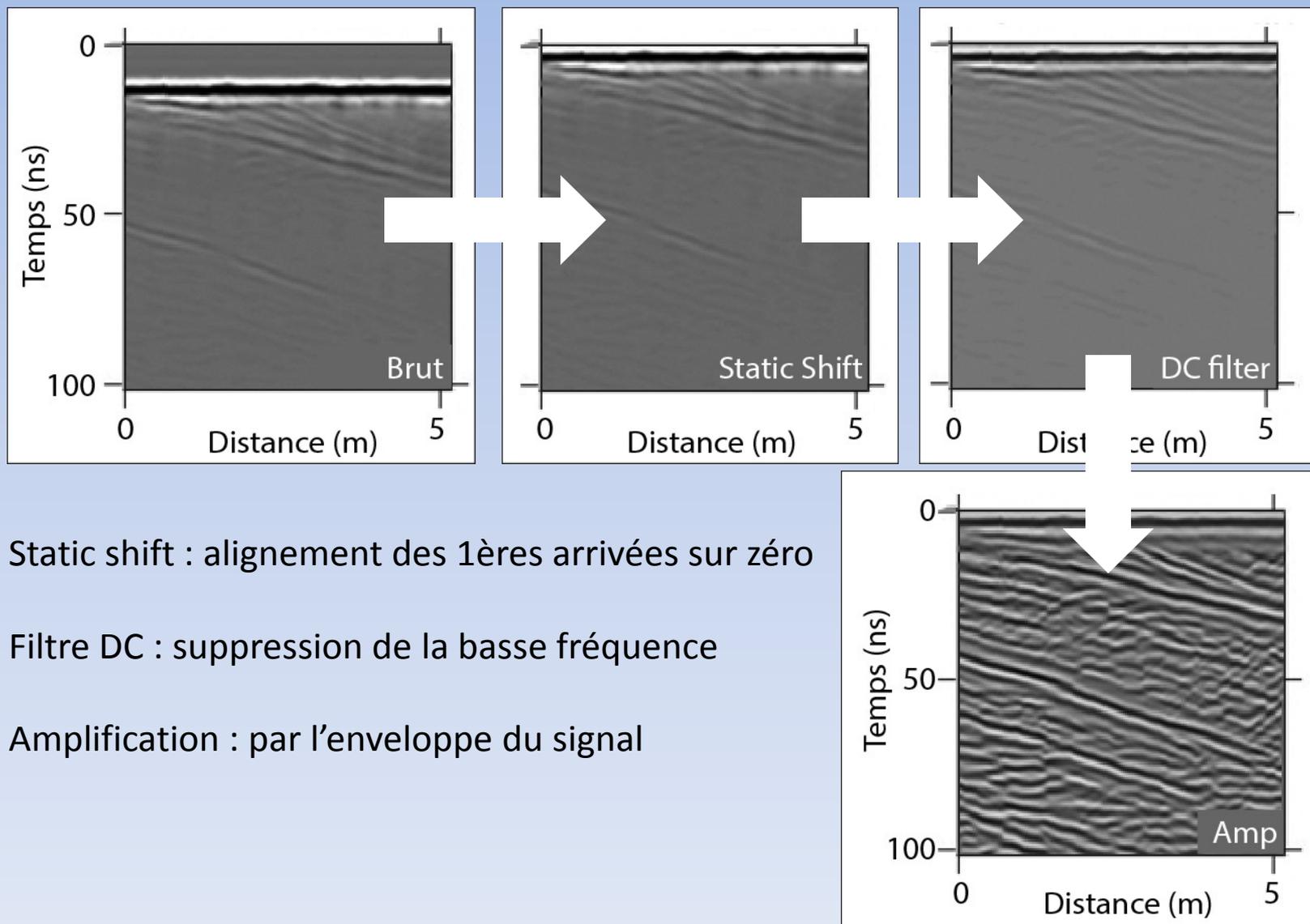
# 1 - Le géoradar - traitement



Static shift : alignement des 1ères arrivées sur zéro

Filtre DC : suppression de la basse fréquence

# 1 - Le géoradar - traitement

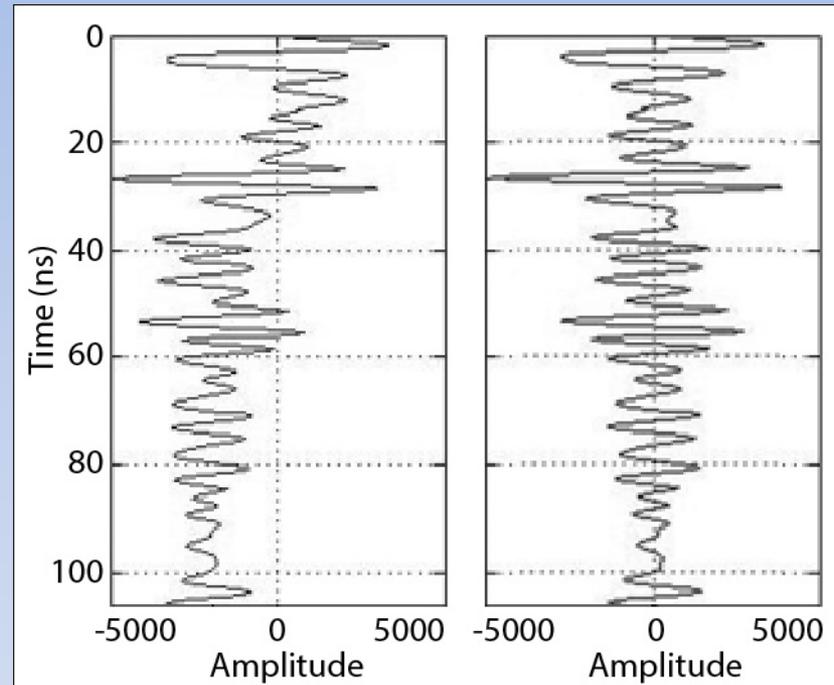
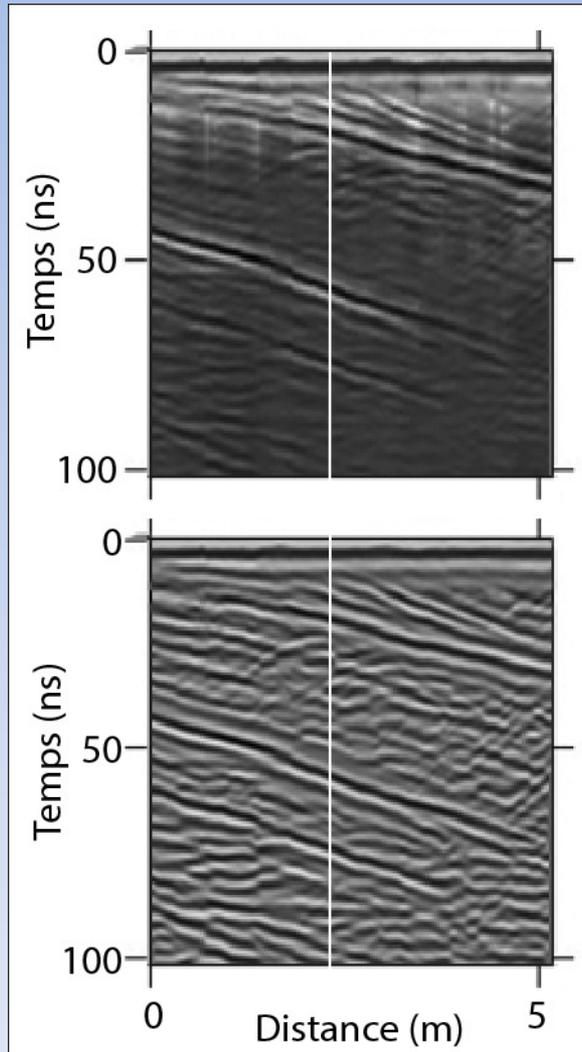


Static shift : alignement des 1ères arrivées sur zéro

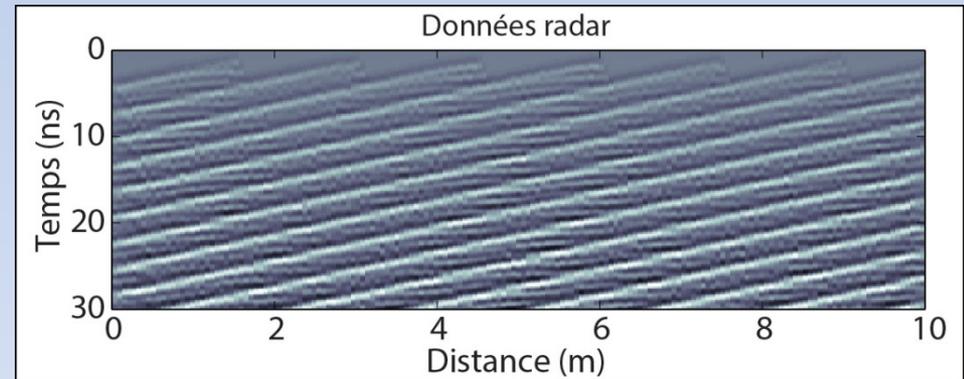
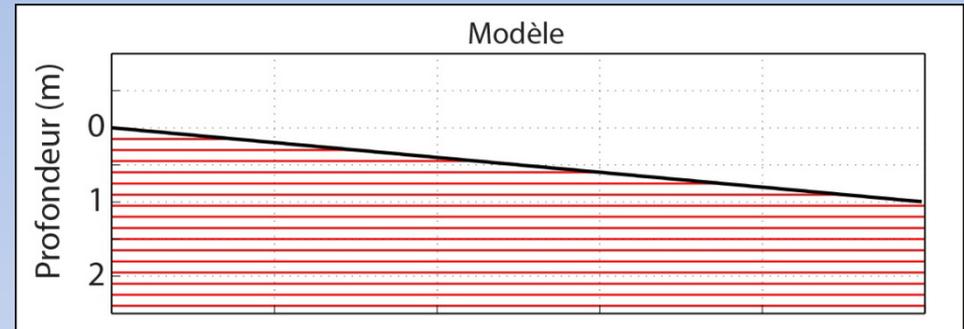
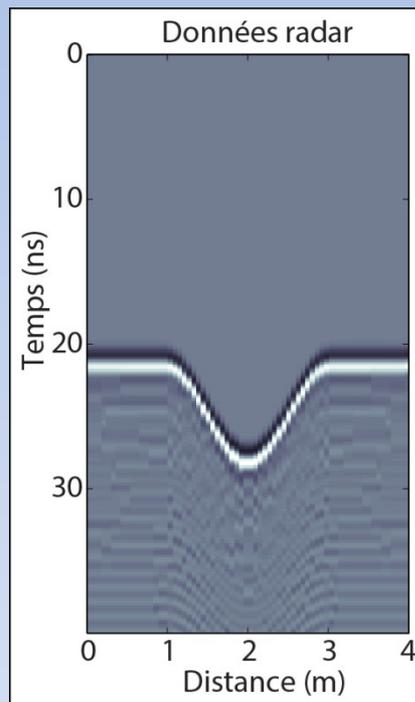
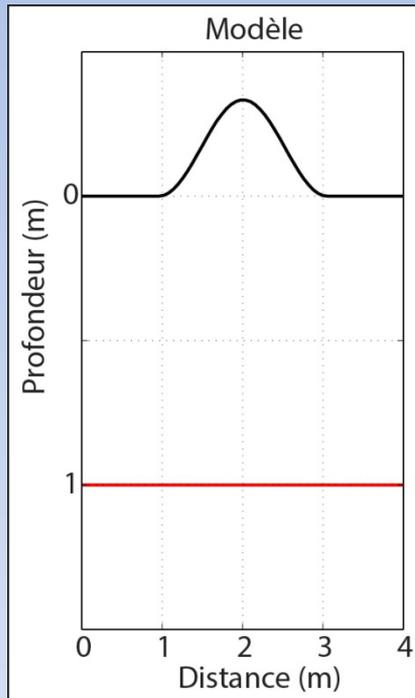
Filtre DC : suppression de la basse fréquence

Amplification : par l'enveloppe du signal

# 1 - Le géoradar - traitement

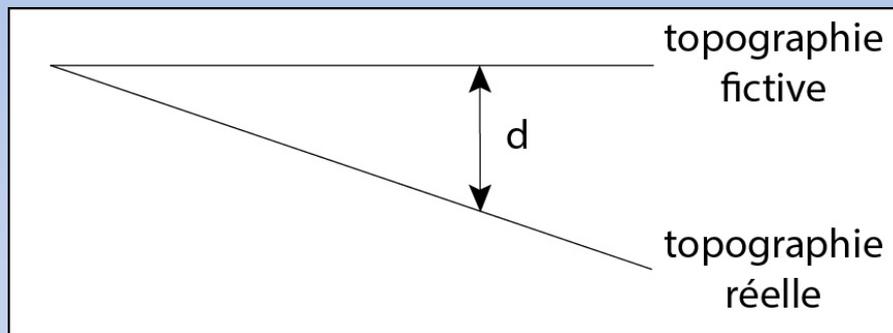


## 2 - La migration topographique - effets de la topo



## 2 - La migration topographique - corrections

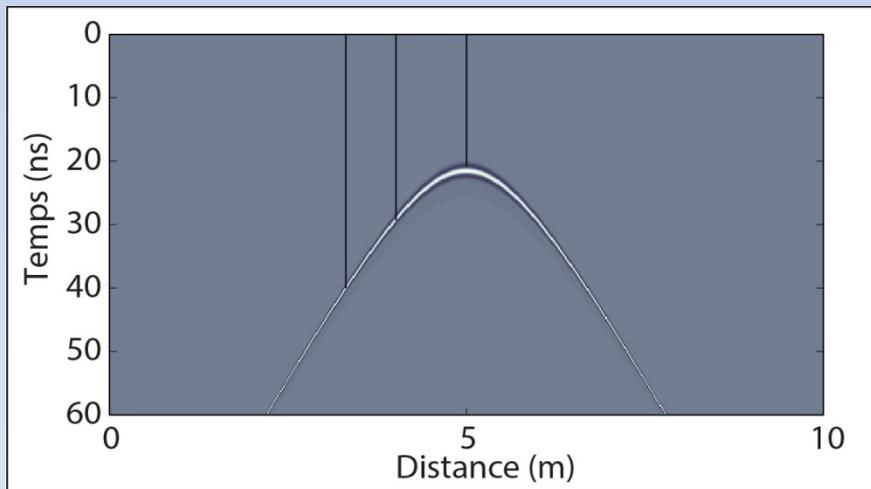
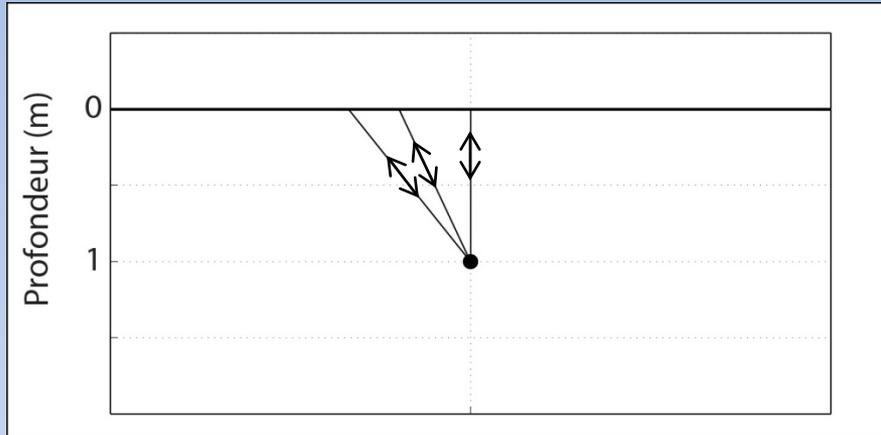
→ Static shift



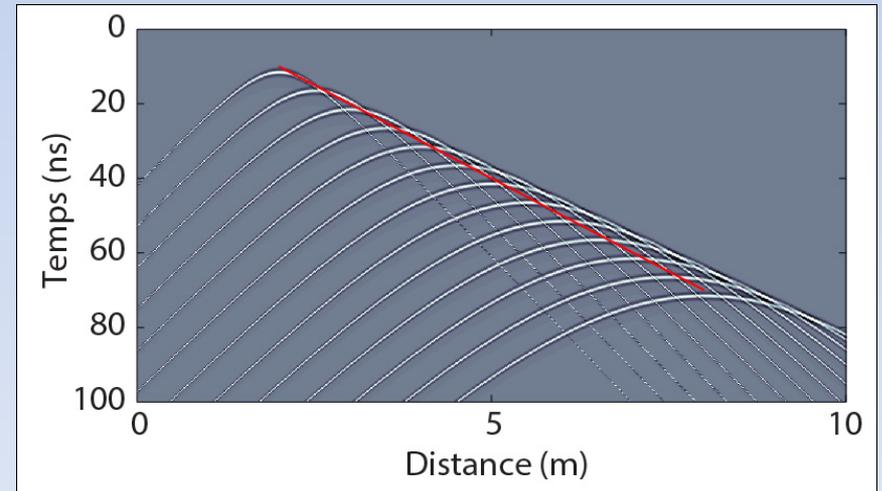
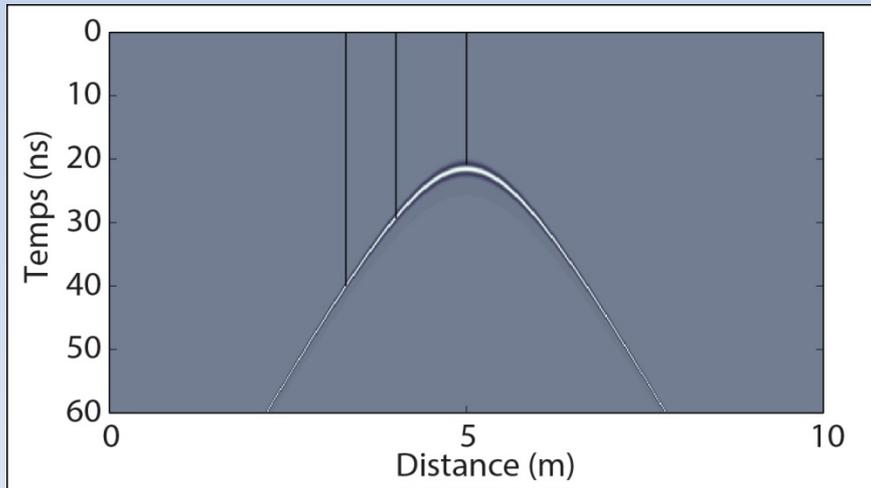
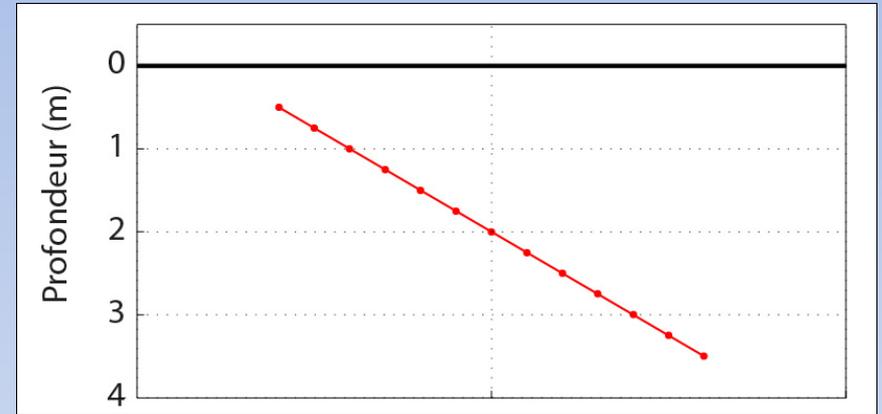
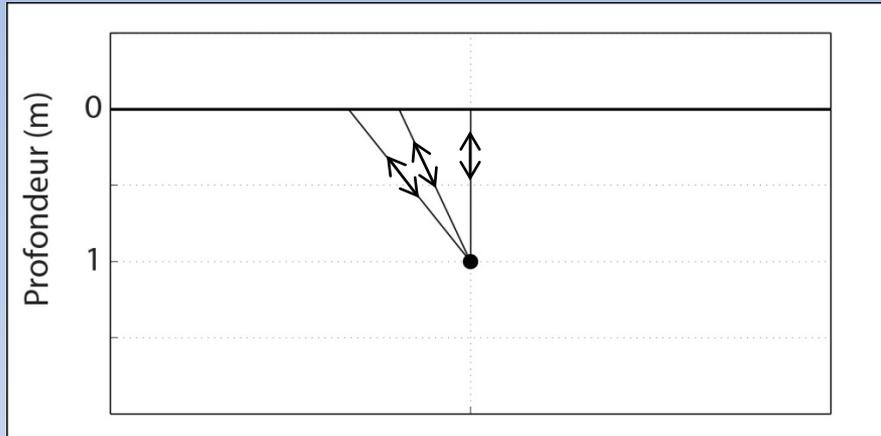
$$\text{temps double} = 2 * d \text{ [m]} / v \text{ [m/ns]}$$

→ Migration topographique (Lehmann and Green 2000; Wiggins 1984)

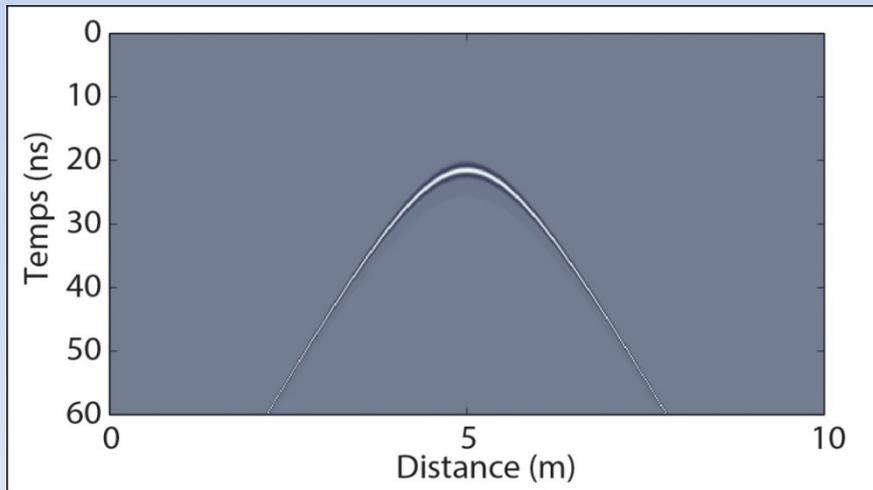
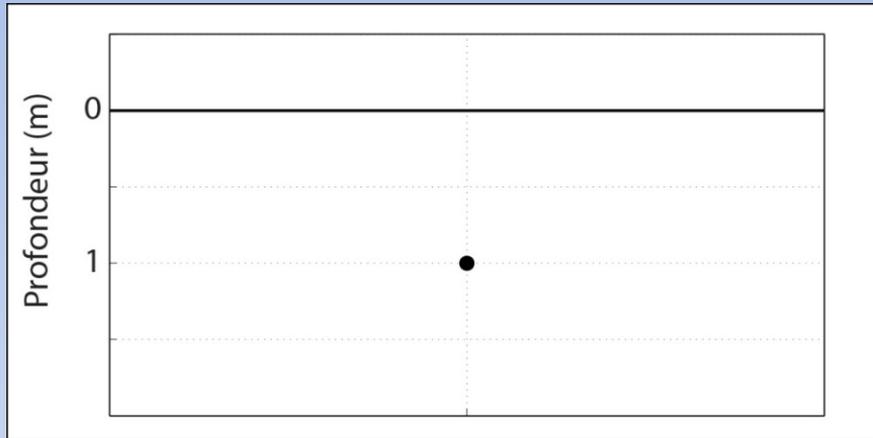
## 2 - La migration topographique - la migration



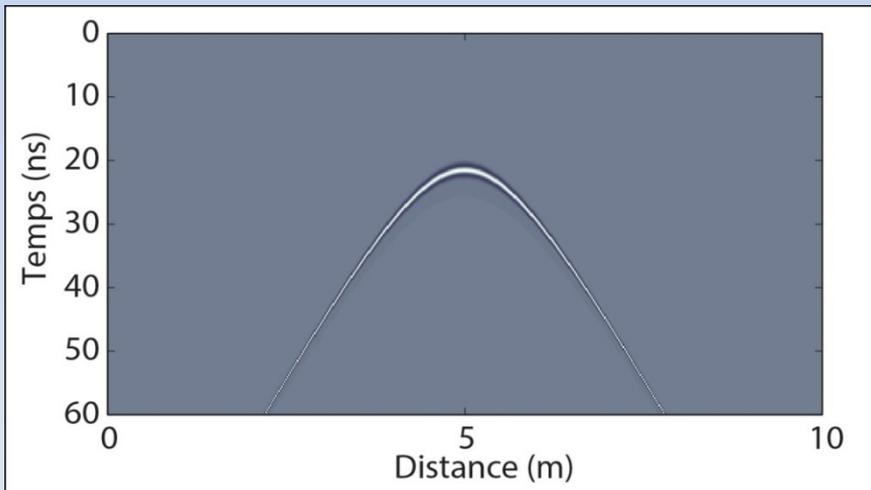
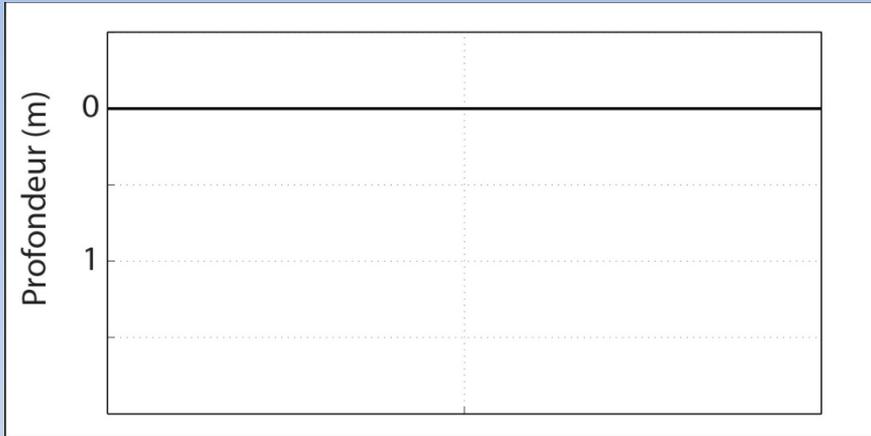
## 2 - La migration topographique - la migration



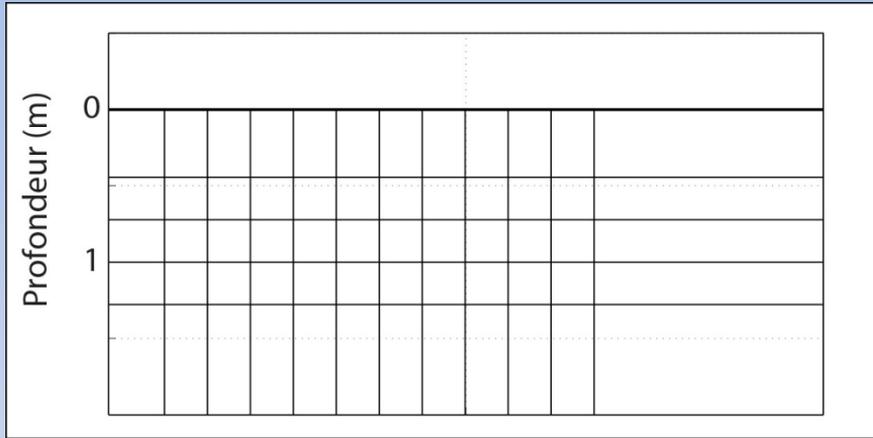
## 2 - La migration topographique - Kirchhoff



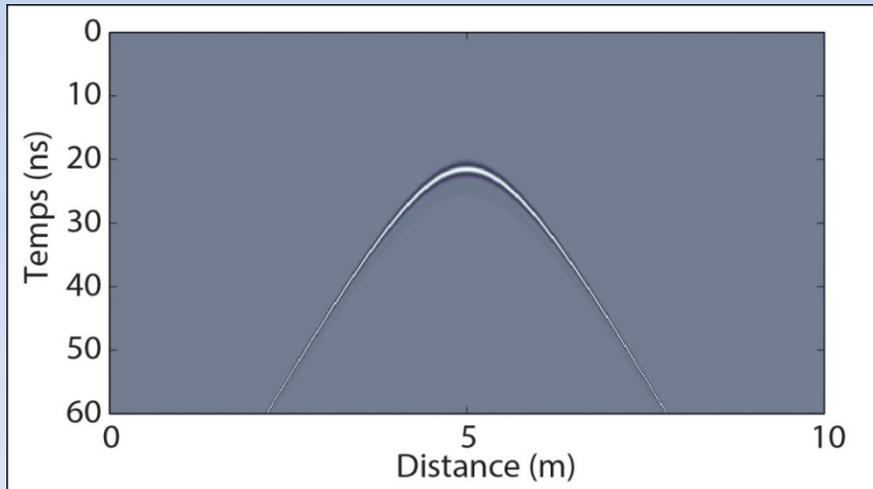
## 2 - La migration topographique - Kirchhoff



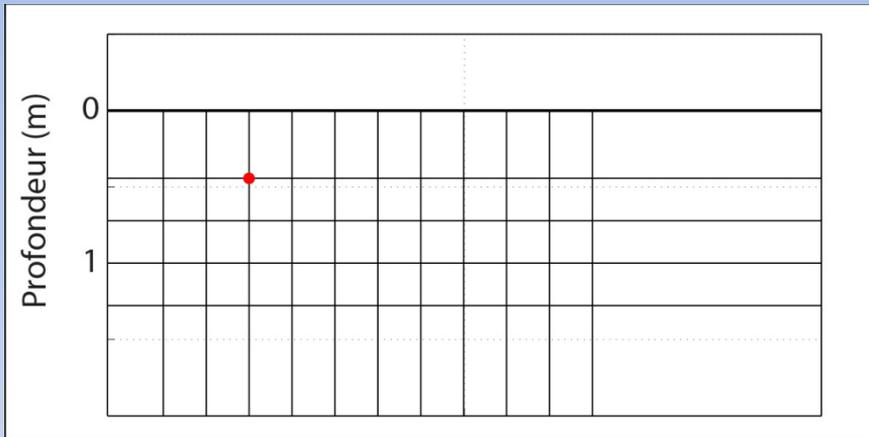
## 2 - La migration topographique - Kirchhoff



Subdiviser le modèle en grille

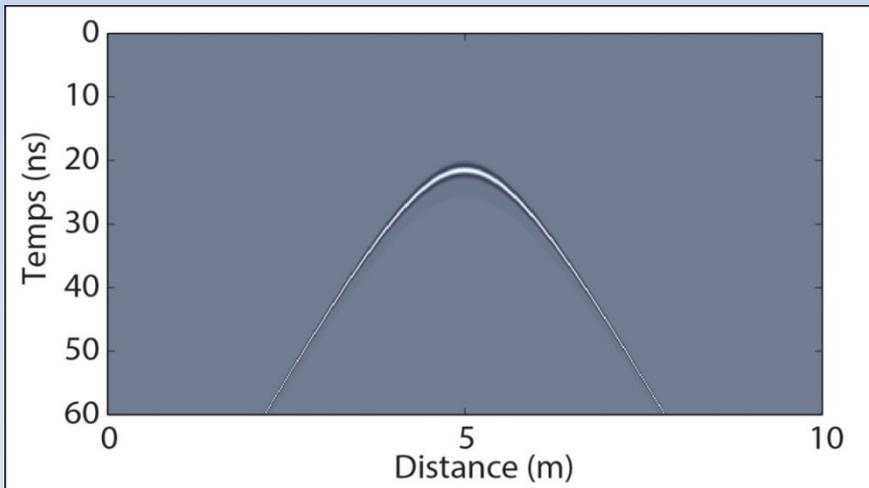


## 2 - La migration topographique - Kirchhoff

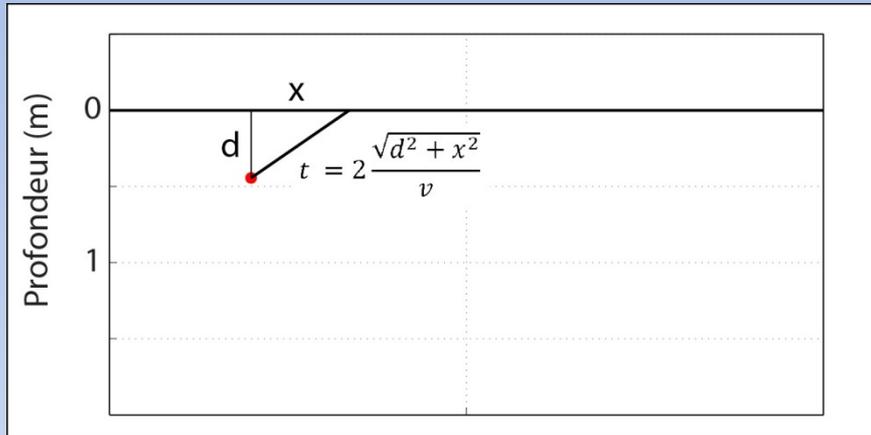


Subdiviser le modèle en grille

Pour chaque point :



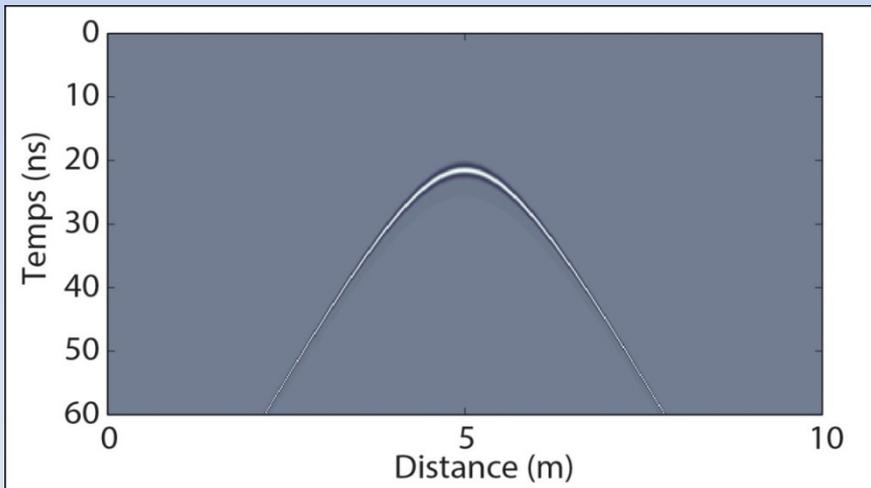
## 2 - La migration topographique - Kirchhoff



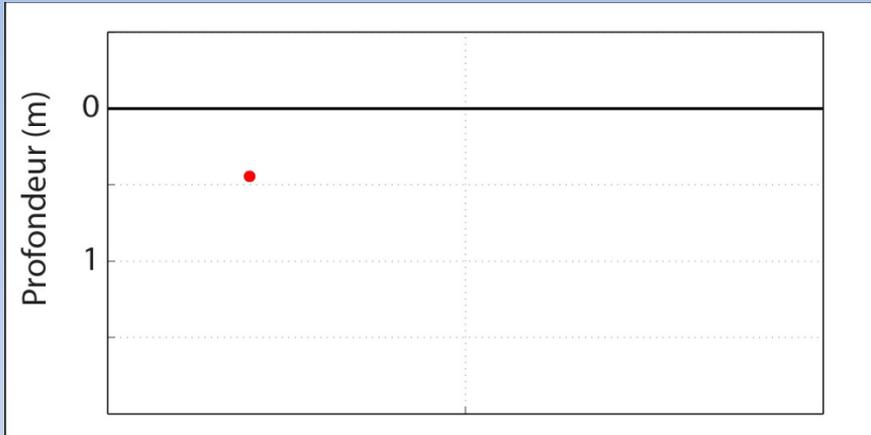
Subdiviser le modèle en grille

Pour chaque point :

Calcul du template correspondant



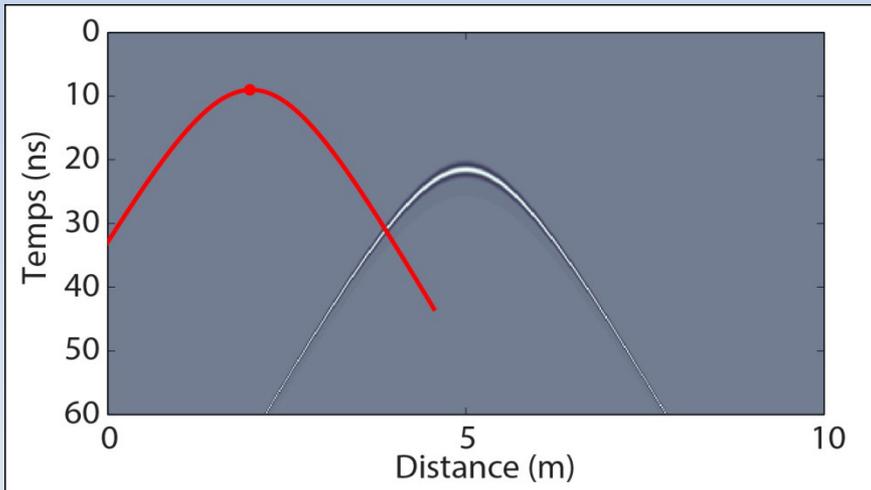
## 2 - La migration topographique - Kirchhoff



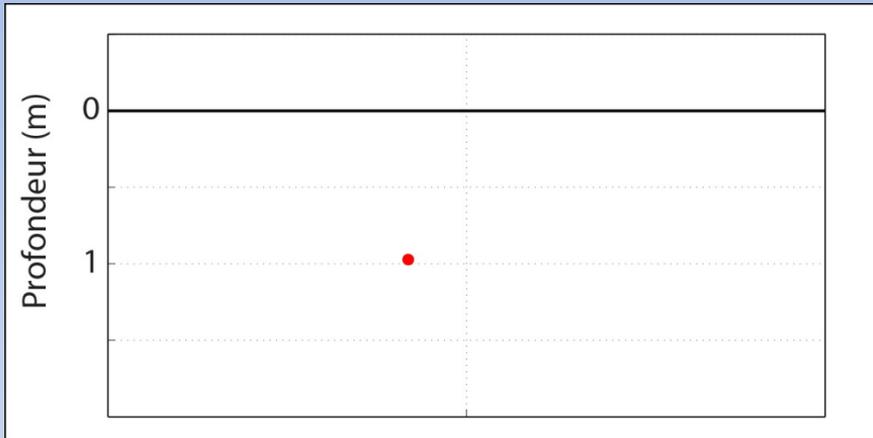
Subdiviser le modèle en grille

Pour chaque point :

- Calcul du template correspondant
- Sommation des données le long du template



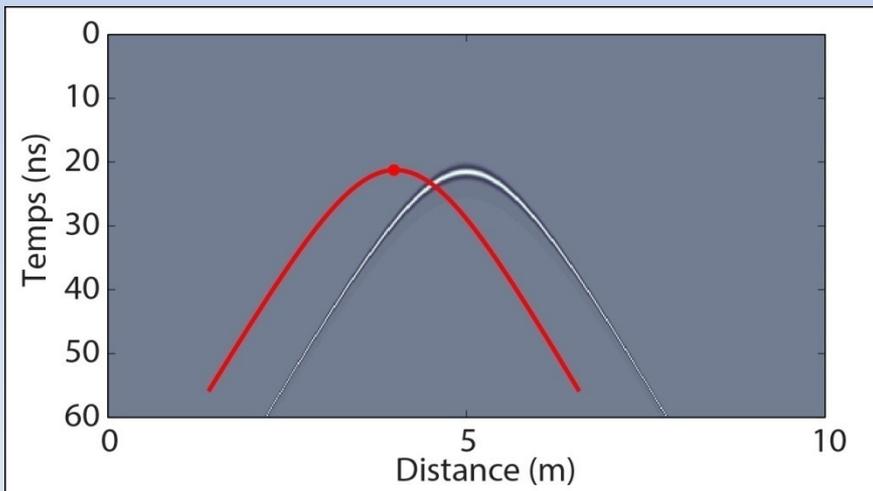
## 2 - La migration topographique - Kirchhoff



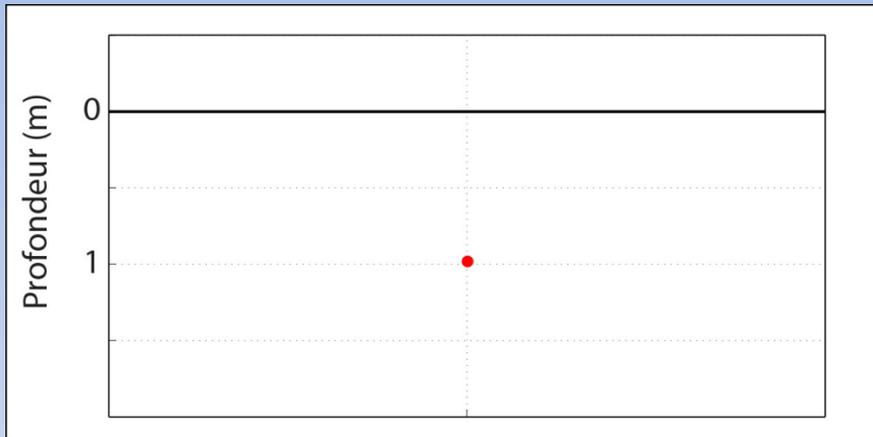
Subdiviser le modèle en grille

Pour chaque point :

- Calcul du template correspondant
- Sommation des données le long du template



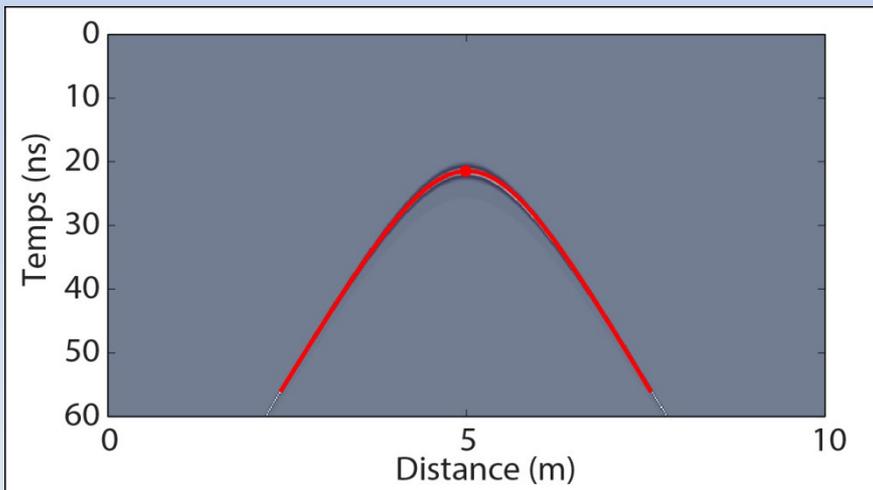
## 2 - La migration topographique - Kirchhoff



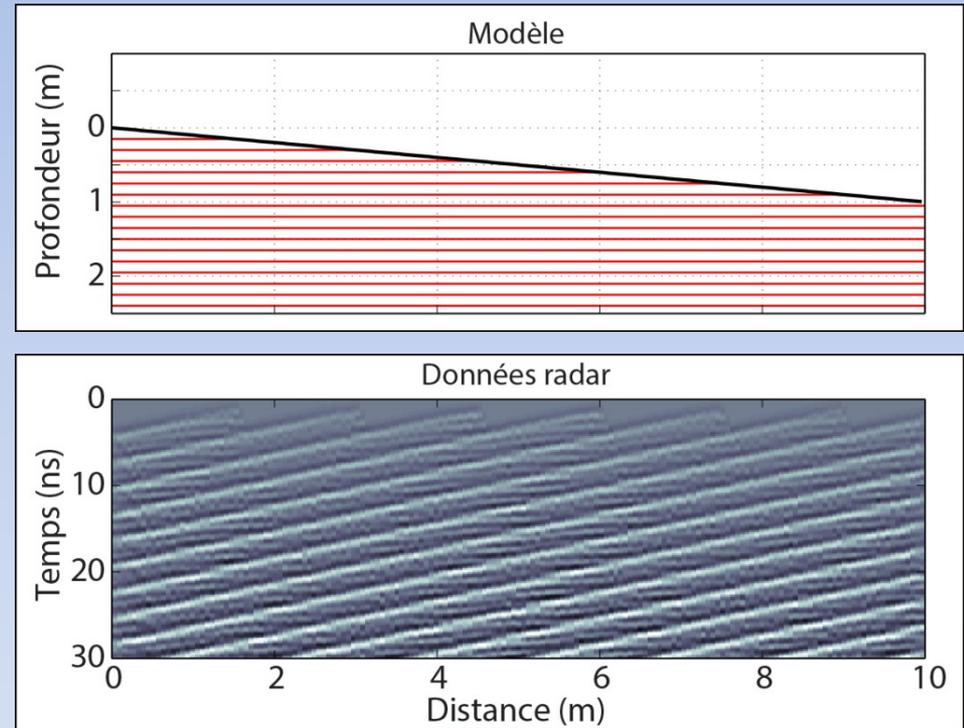
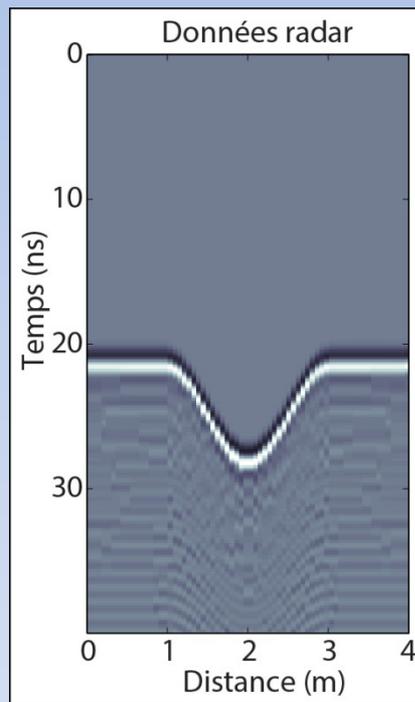
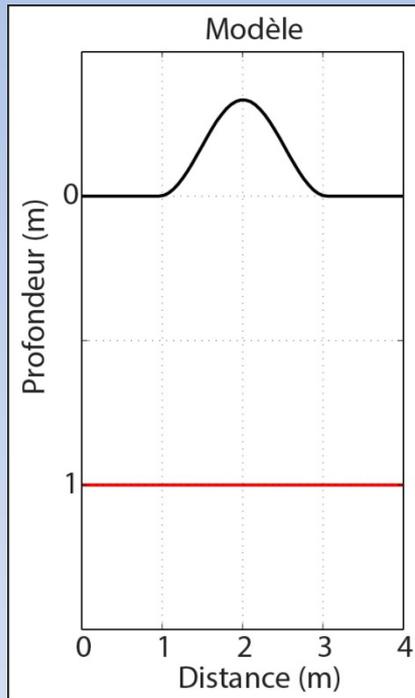
Subdiviser le modèle en grille

Pour chaque point :

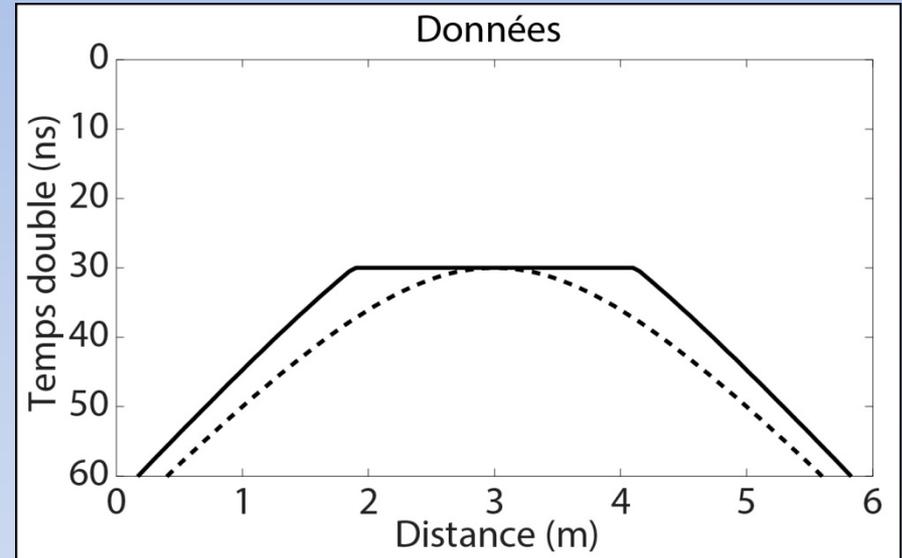
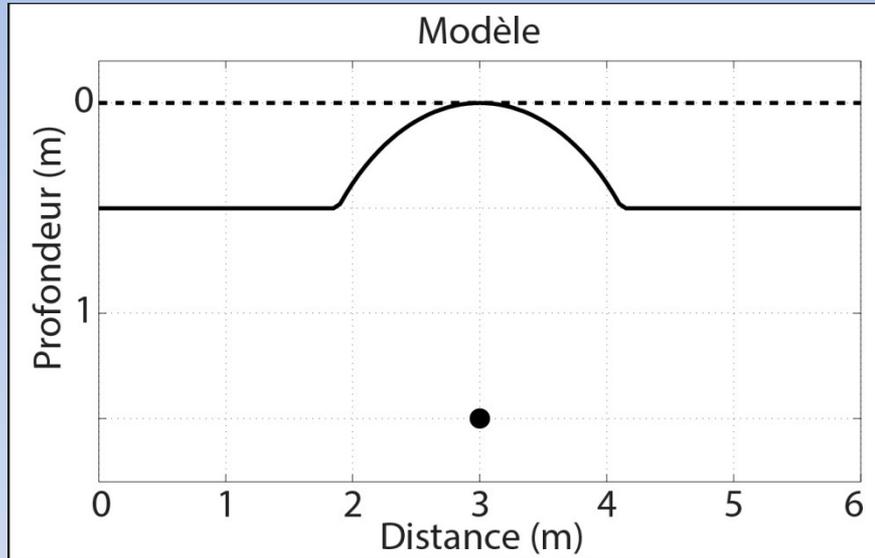
- Calcul du template correspondant
- Sommation des données le long du template



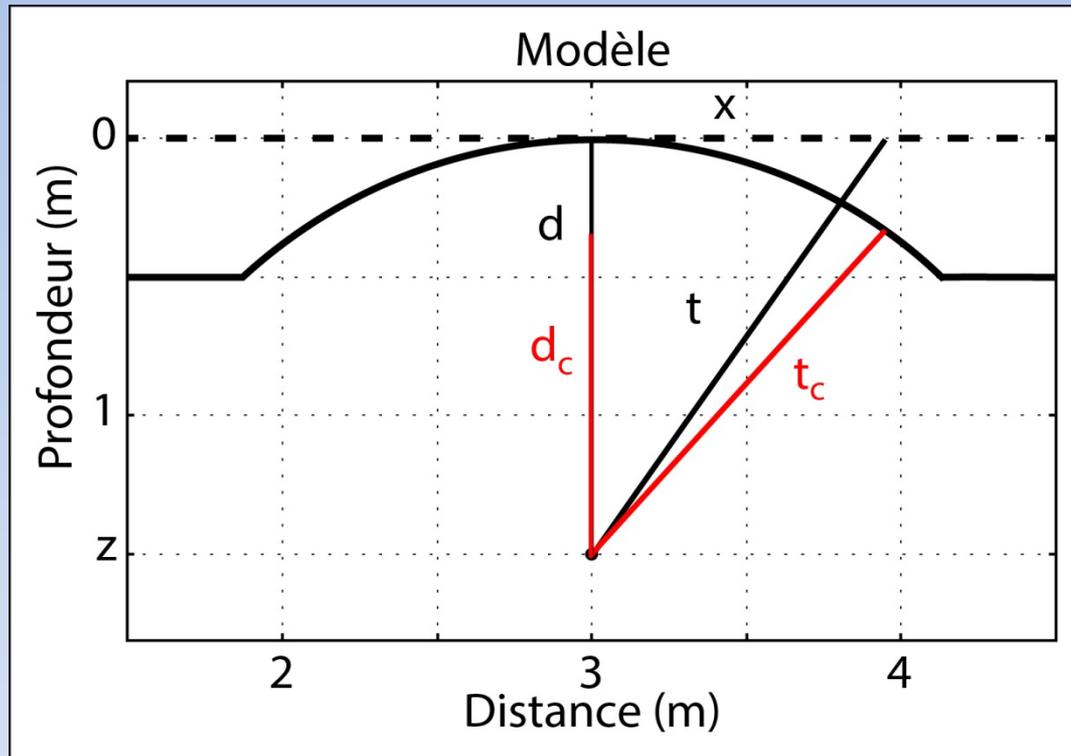
## 2 - La migration topographique - et la topo ?



## 2 - La migration topographique - et la topo ?



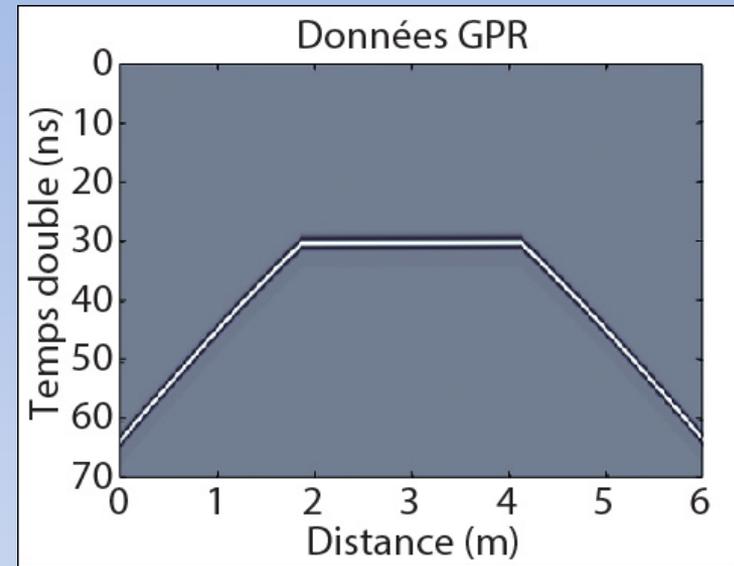
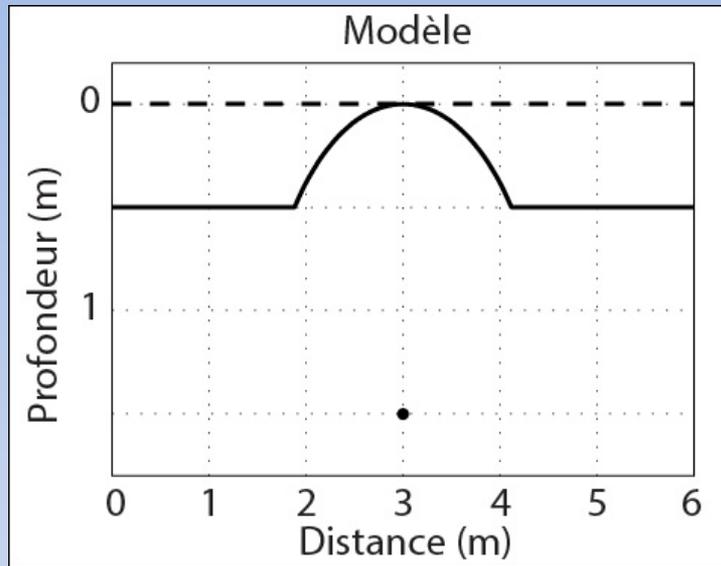
## 2 - La migration topographique - et la topo ?



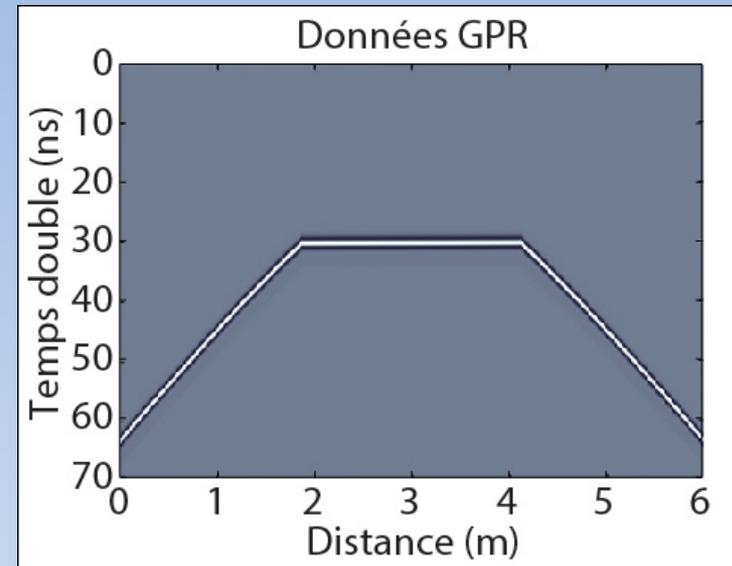
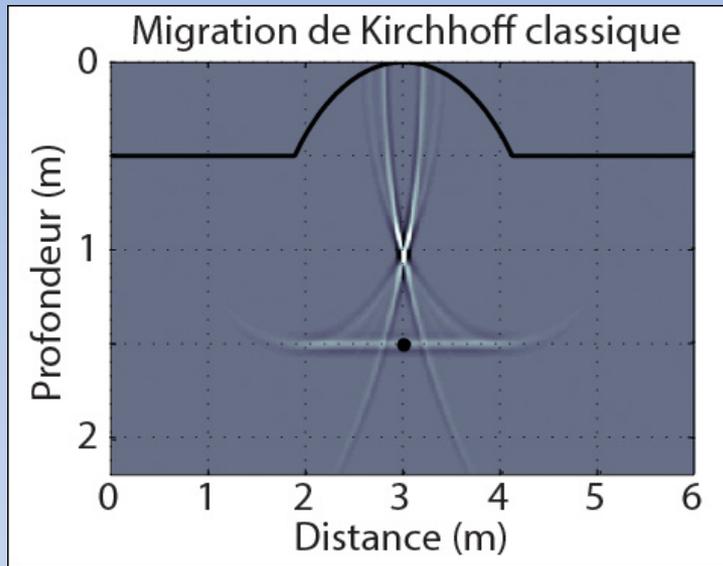
$$t = 2 \frac{\sqrt{d^2 + x^2}}{v}$$

$$t_c = 2 \frac{\sqrt{d_c^2 + x^2}}{v}$$

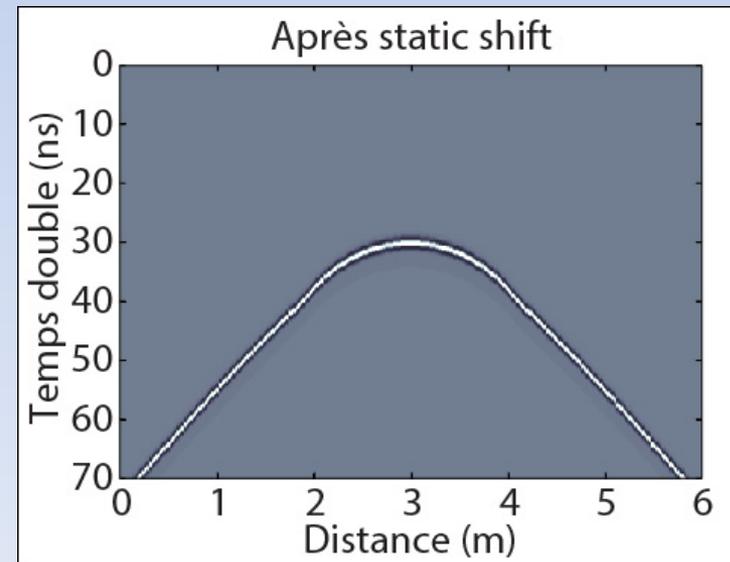
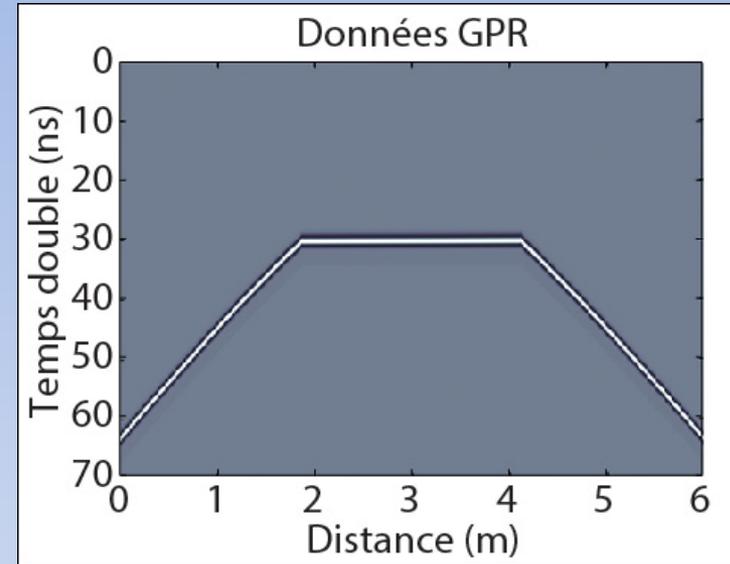
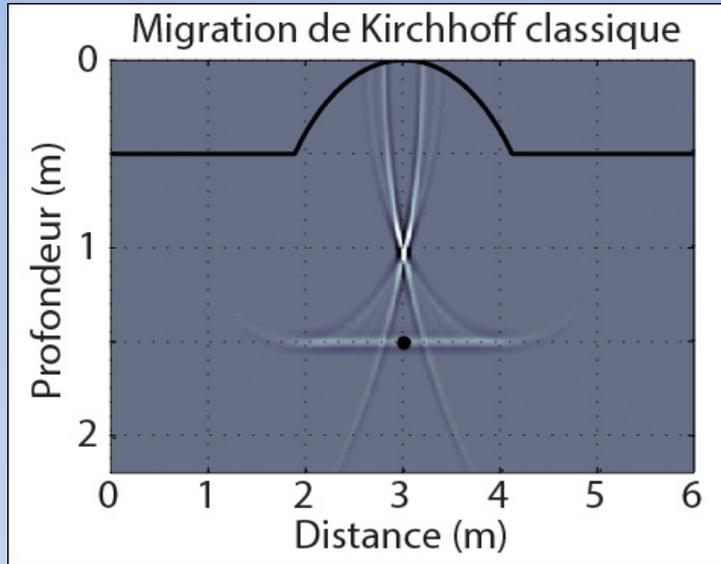
## 2 - La migration topographique - résultats



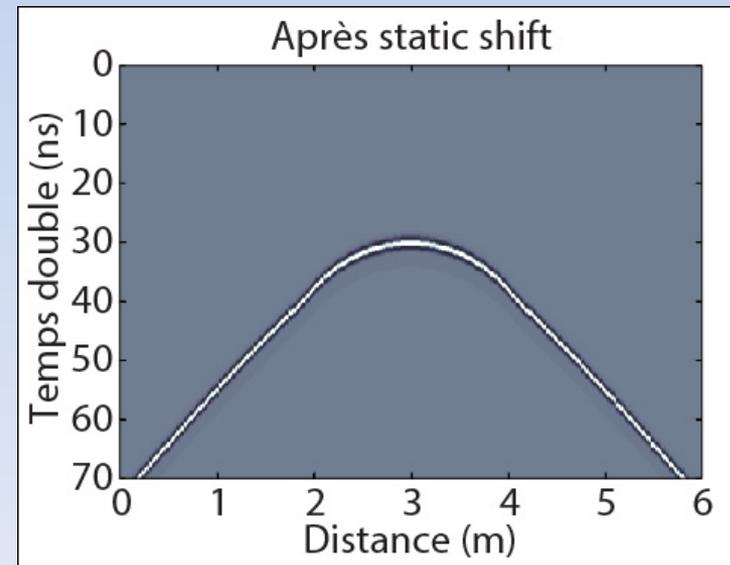
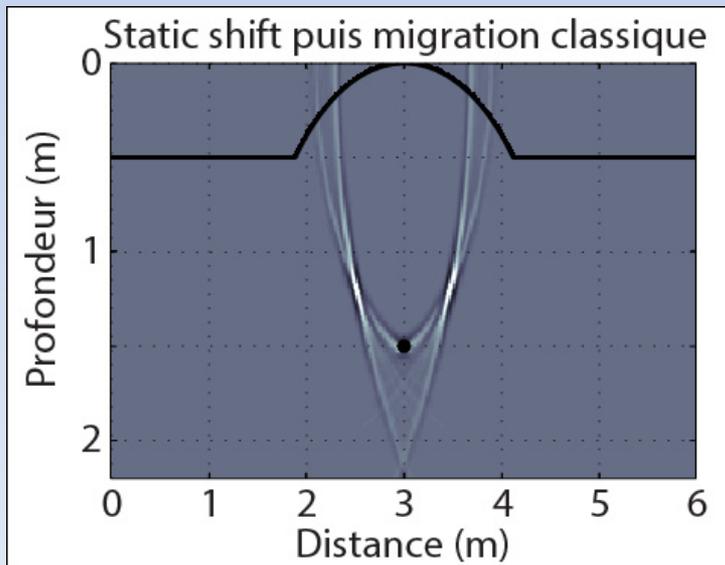
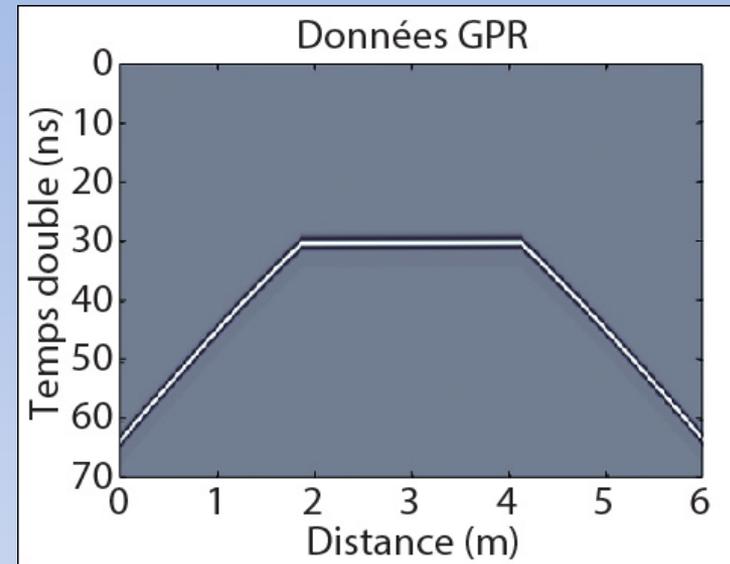
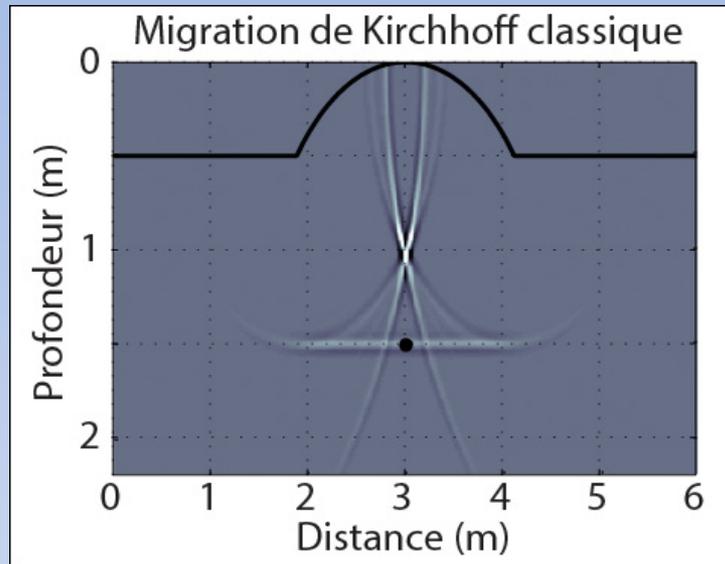
## 2 - La migration topographique - résultats



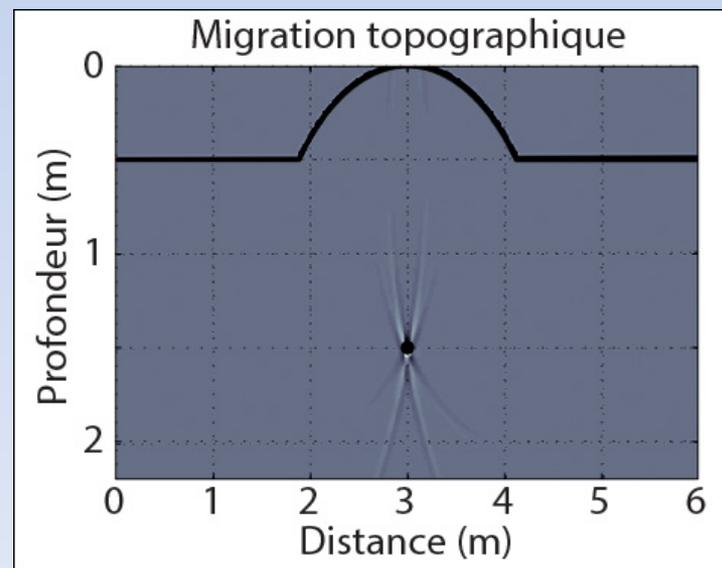
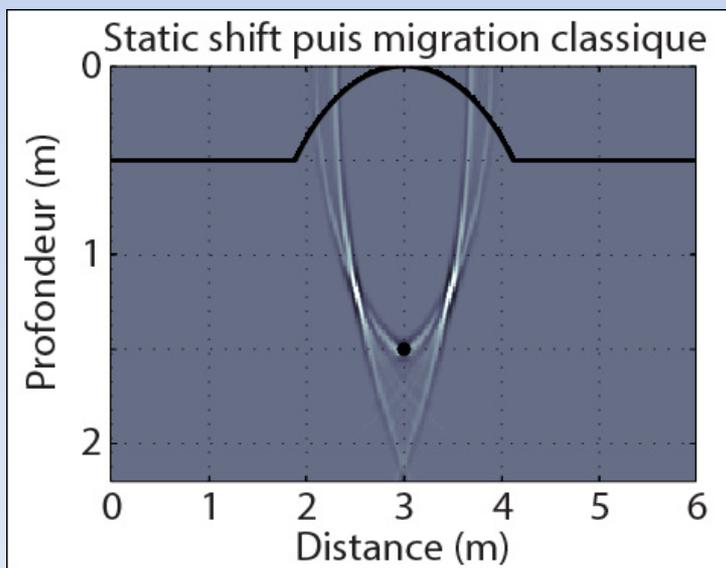
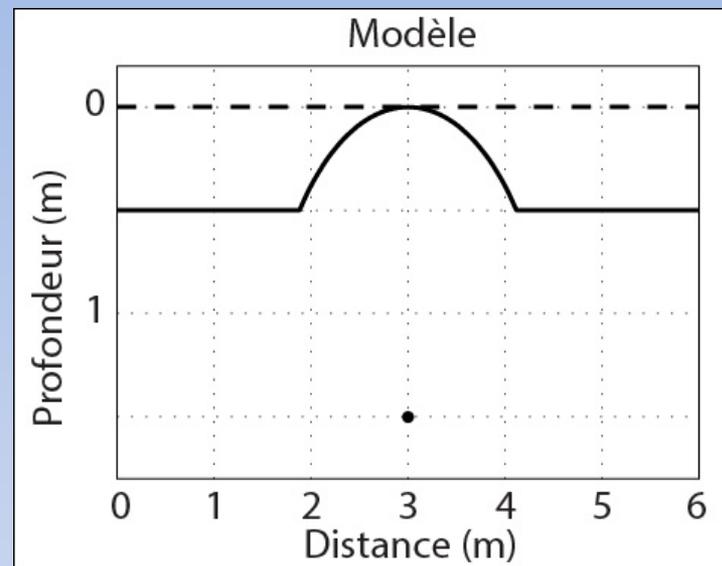
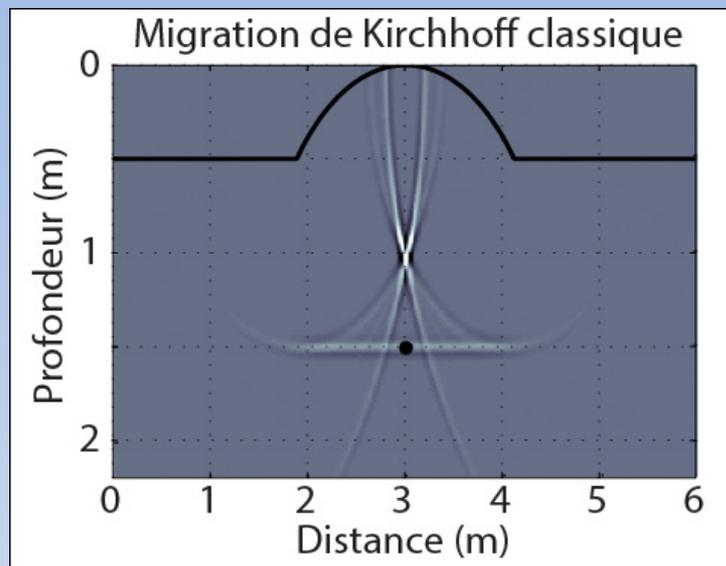
## 2 - La migration topographique - résultats



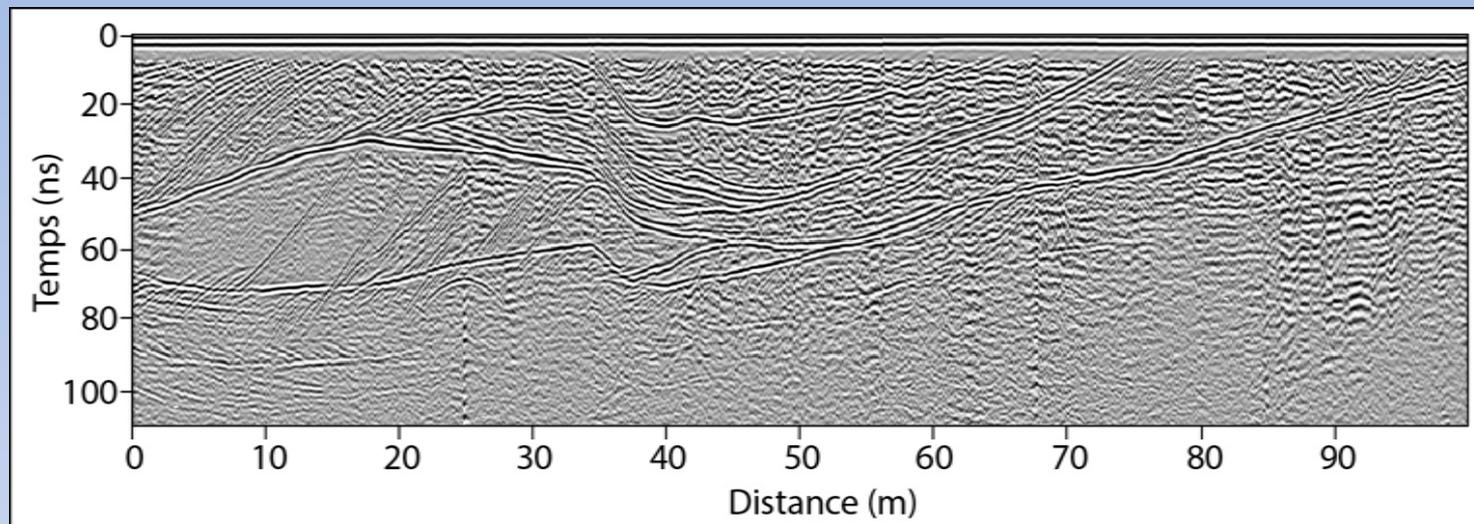
## 2 - La migration topographique - résultats



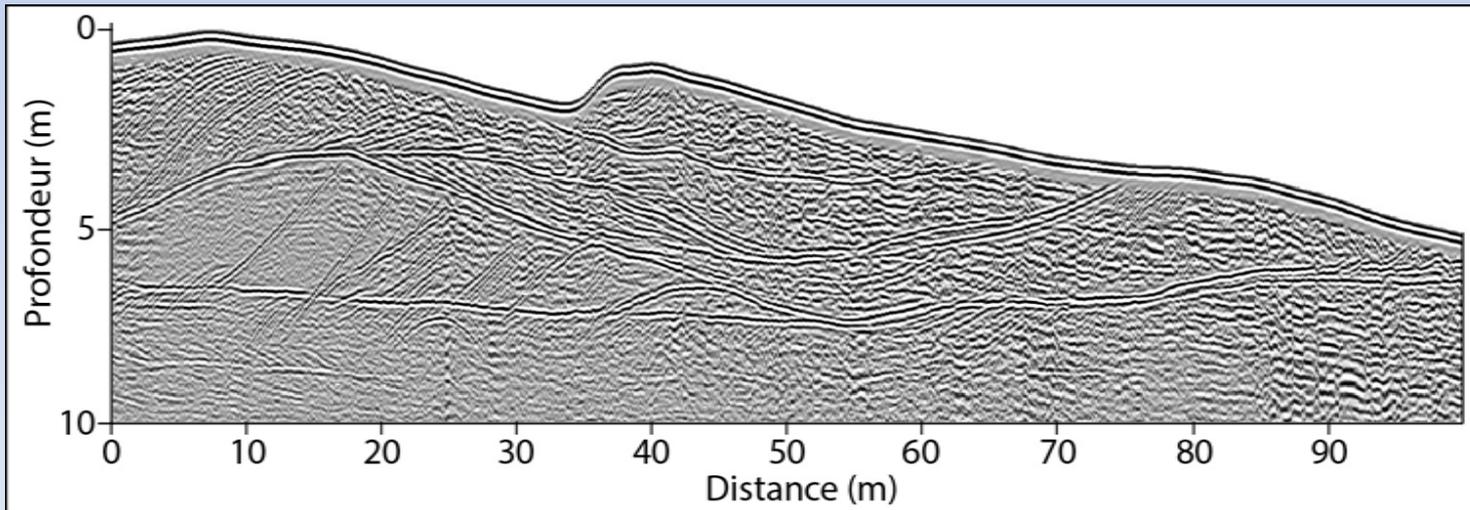
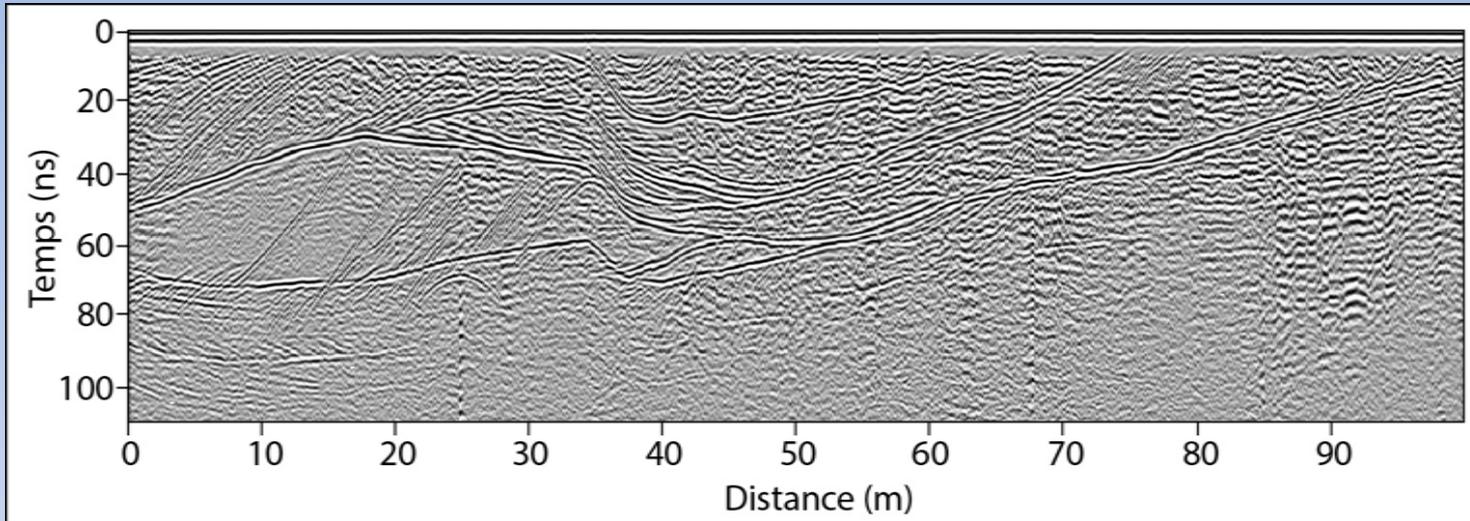
## 2 - La migration topographique - résultats



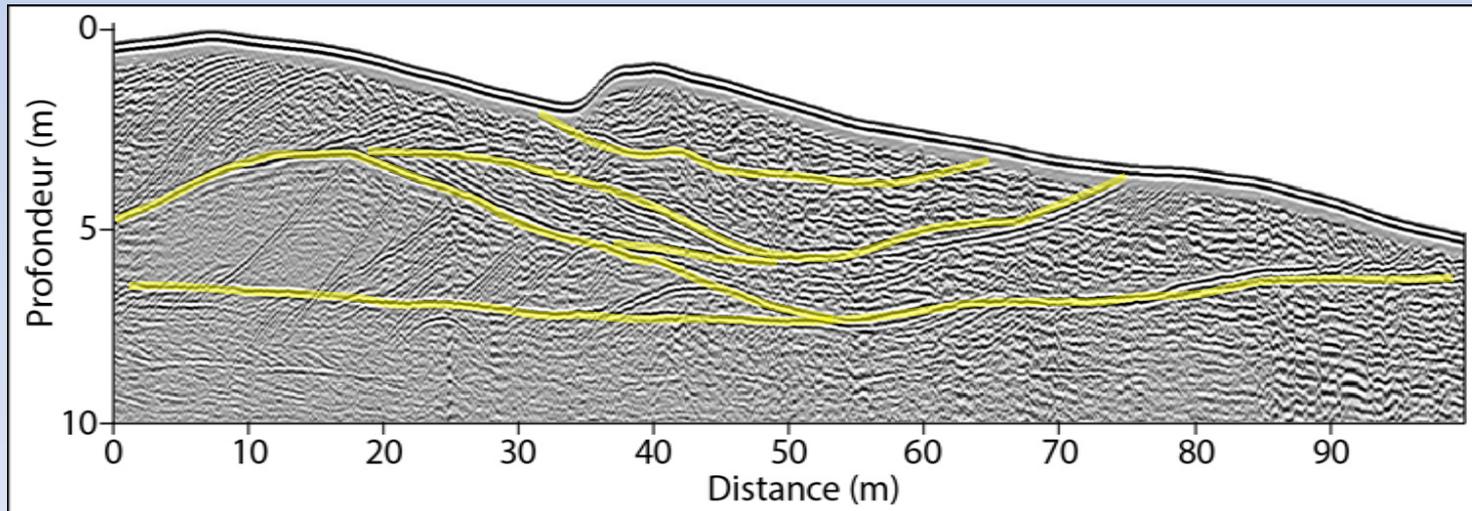
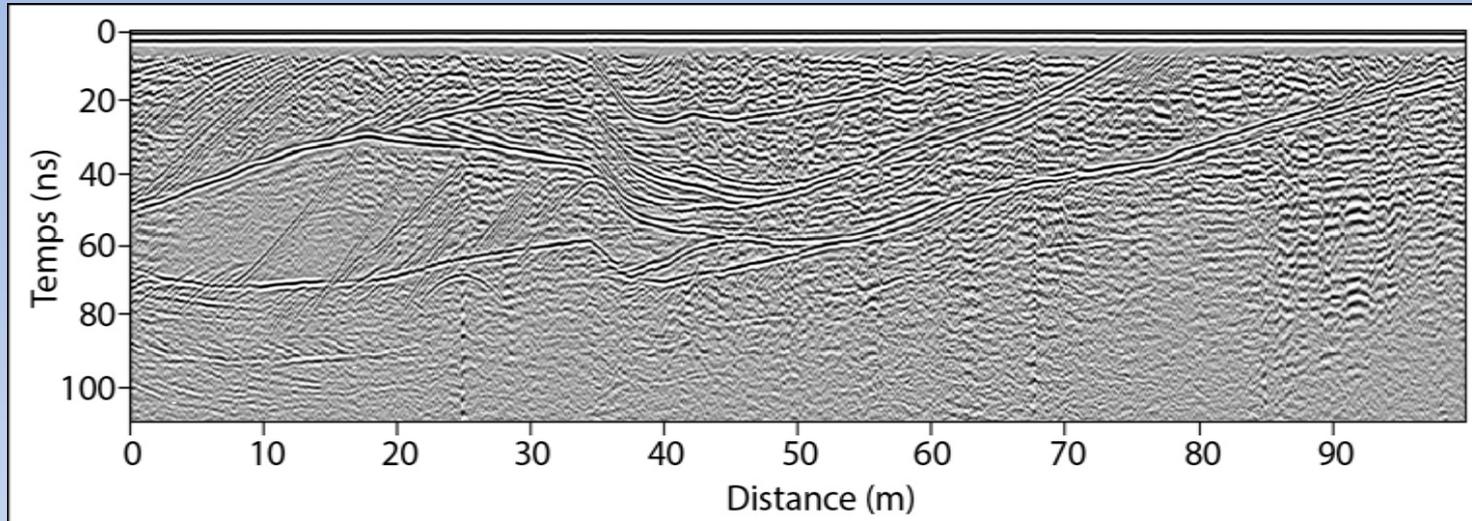
## 2 - La migration topographique - résultats



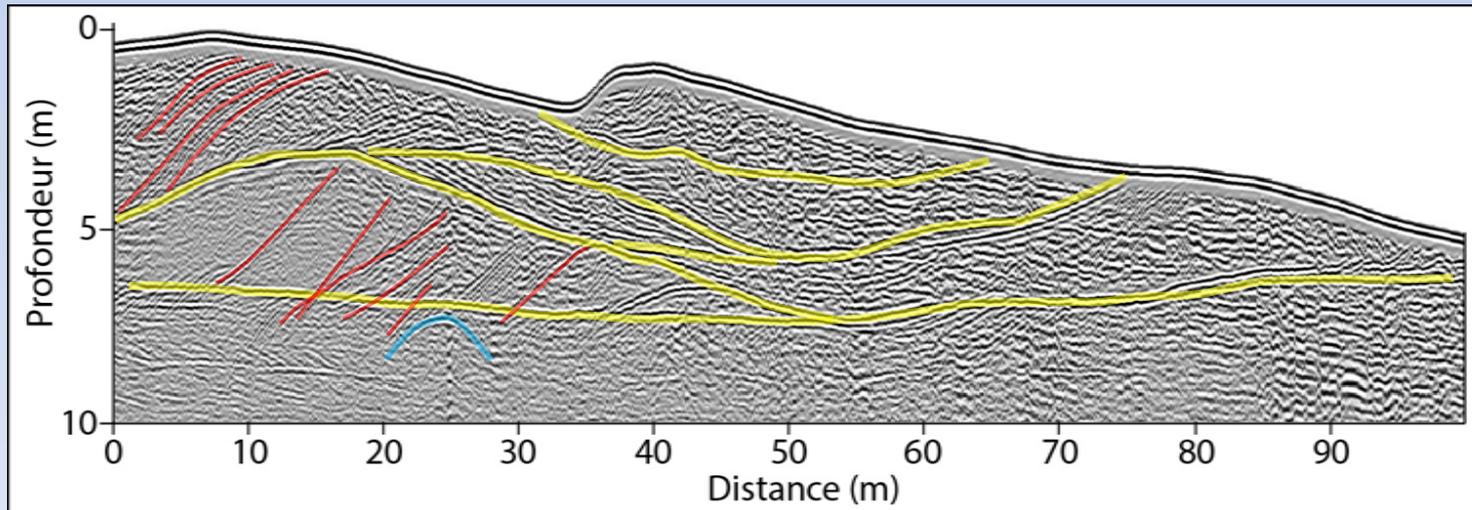
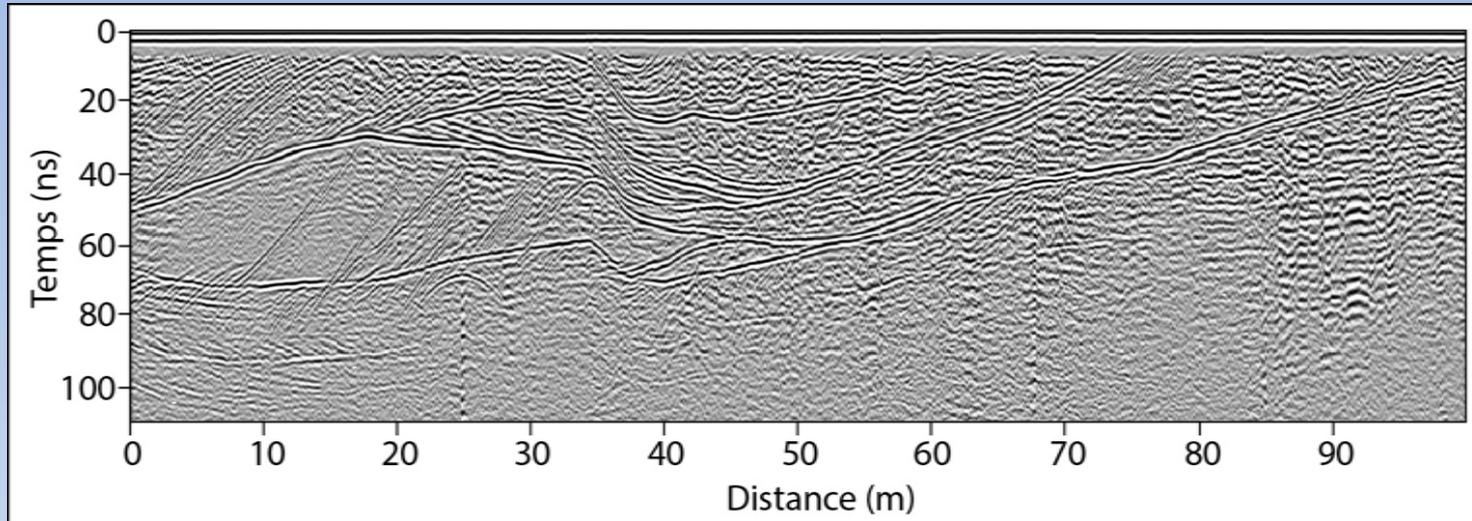
## 2 - La migration topographique - résultats



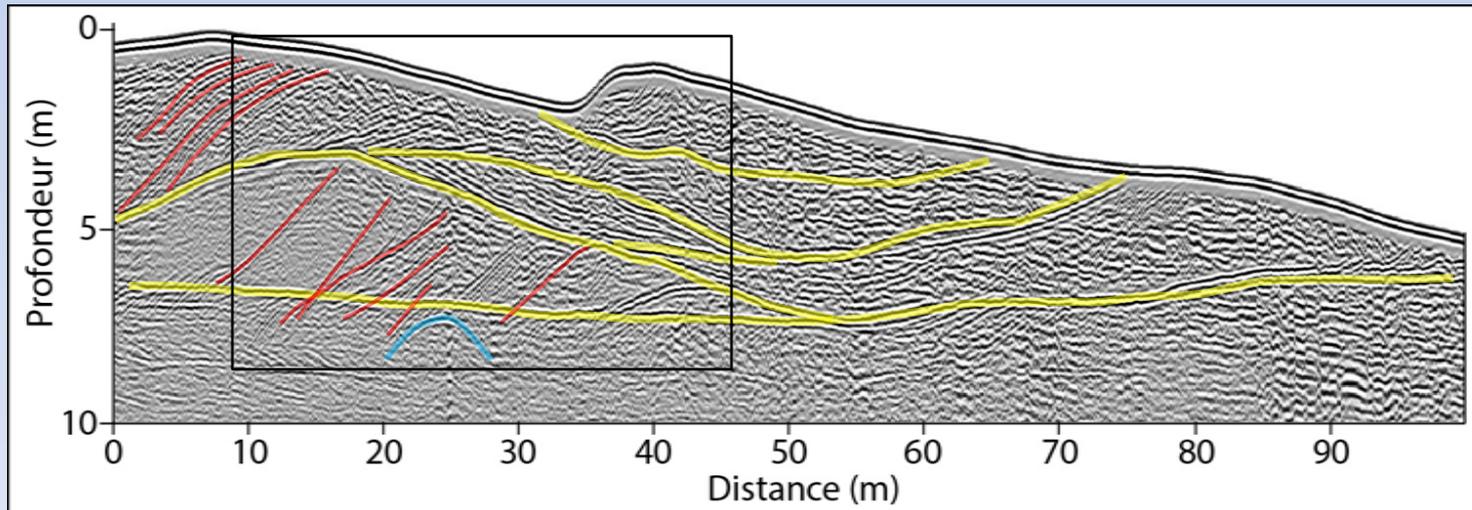
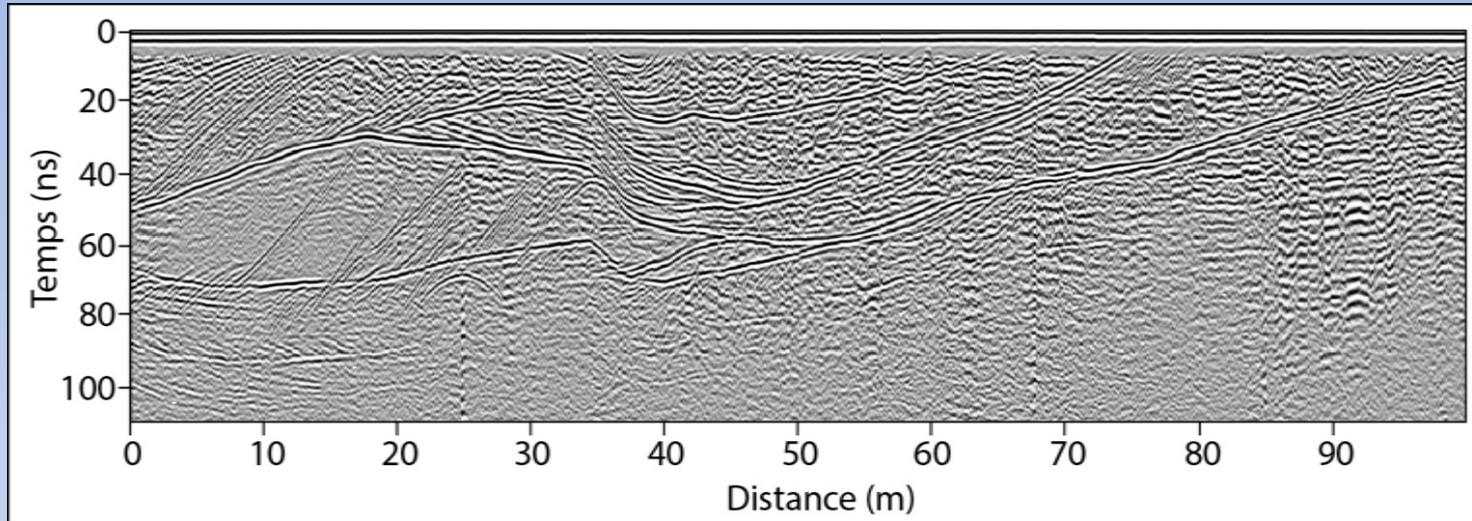
## 2 - La migration topographique - résultats



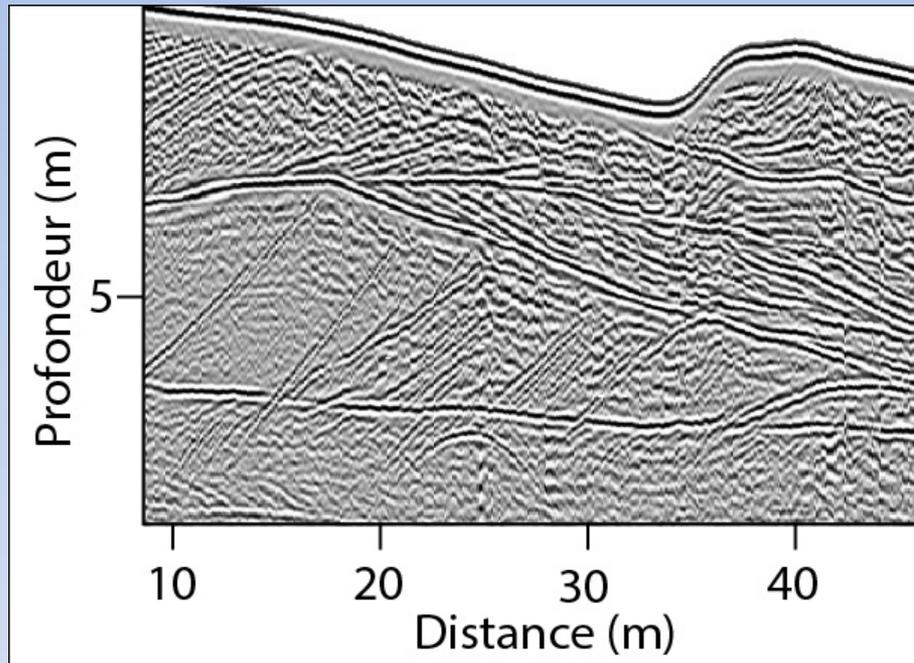
## 2 - La migration topographique - résultats



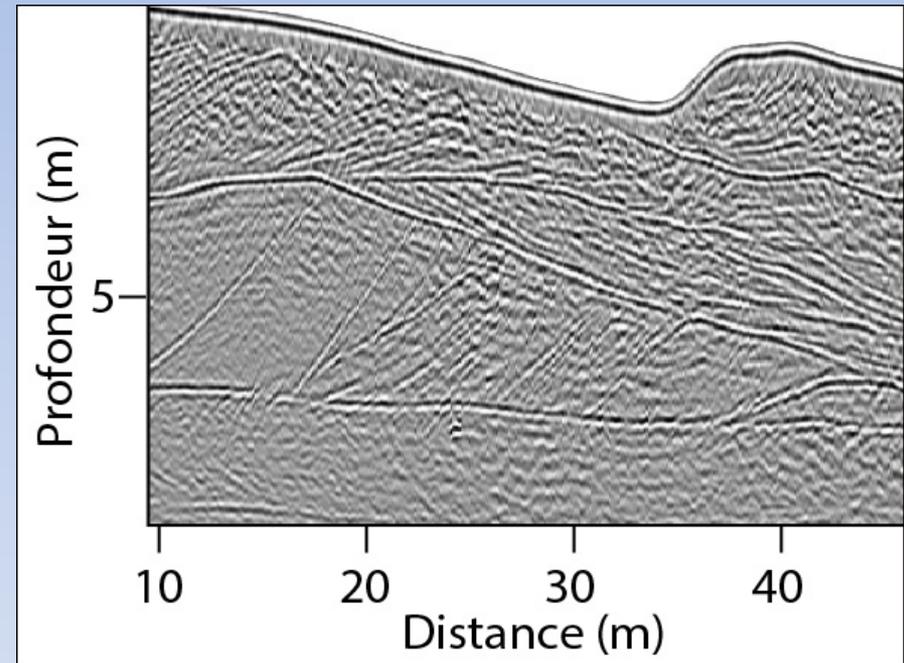
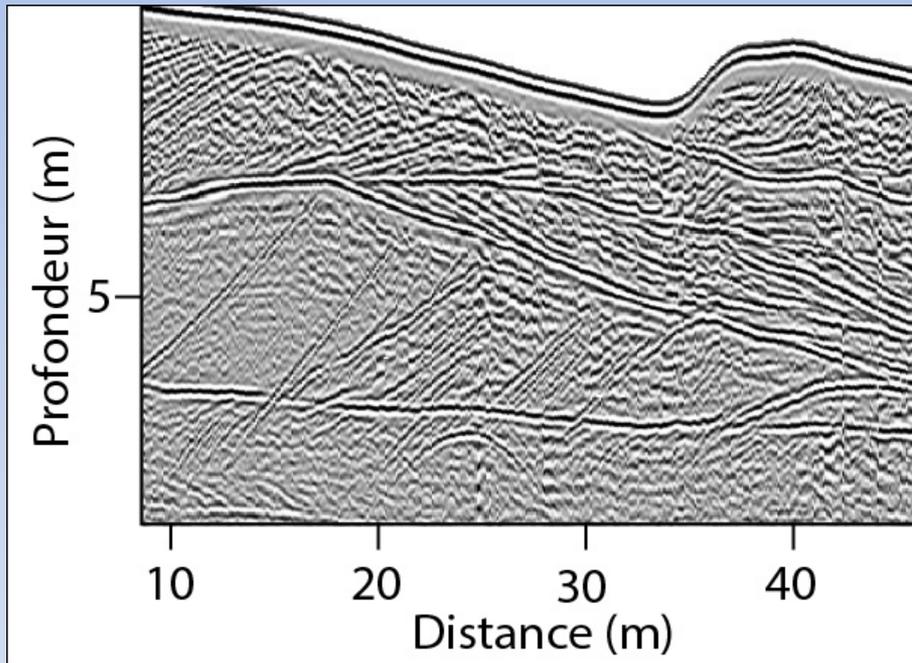
## 2 - La migration topographique - résultats



## 2 - La migration topographique - résultats



## 2 - La migration topographique - résultats



## 2 - La migration topographique - conclusions

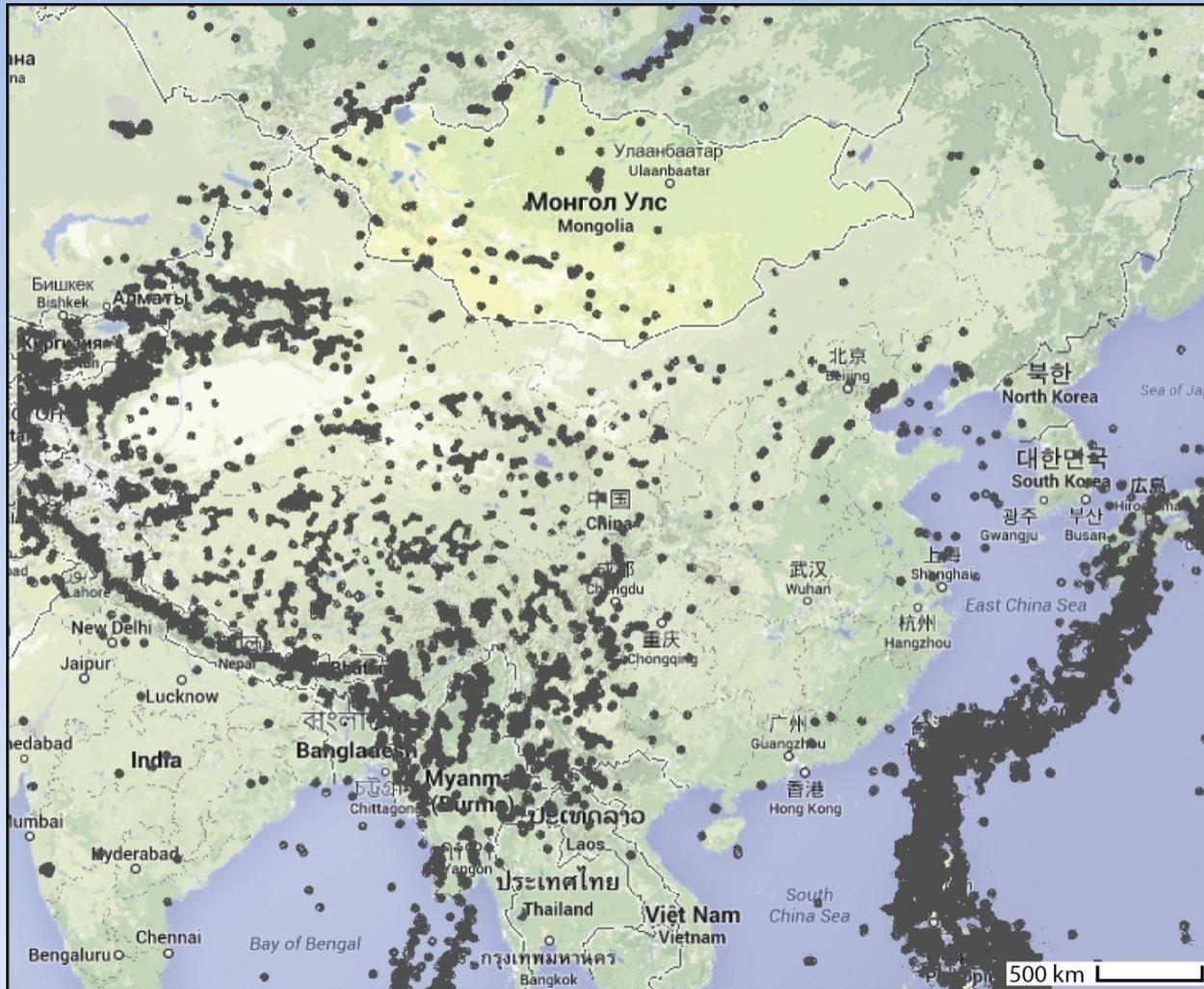
- Modification de la migration de Kirchhoff
- Reconstruit le modèle avec une meilleure précision
- Améliore la qualité des interprétations

# 3 - En Mongolie - Contexte

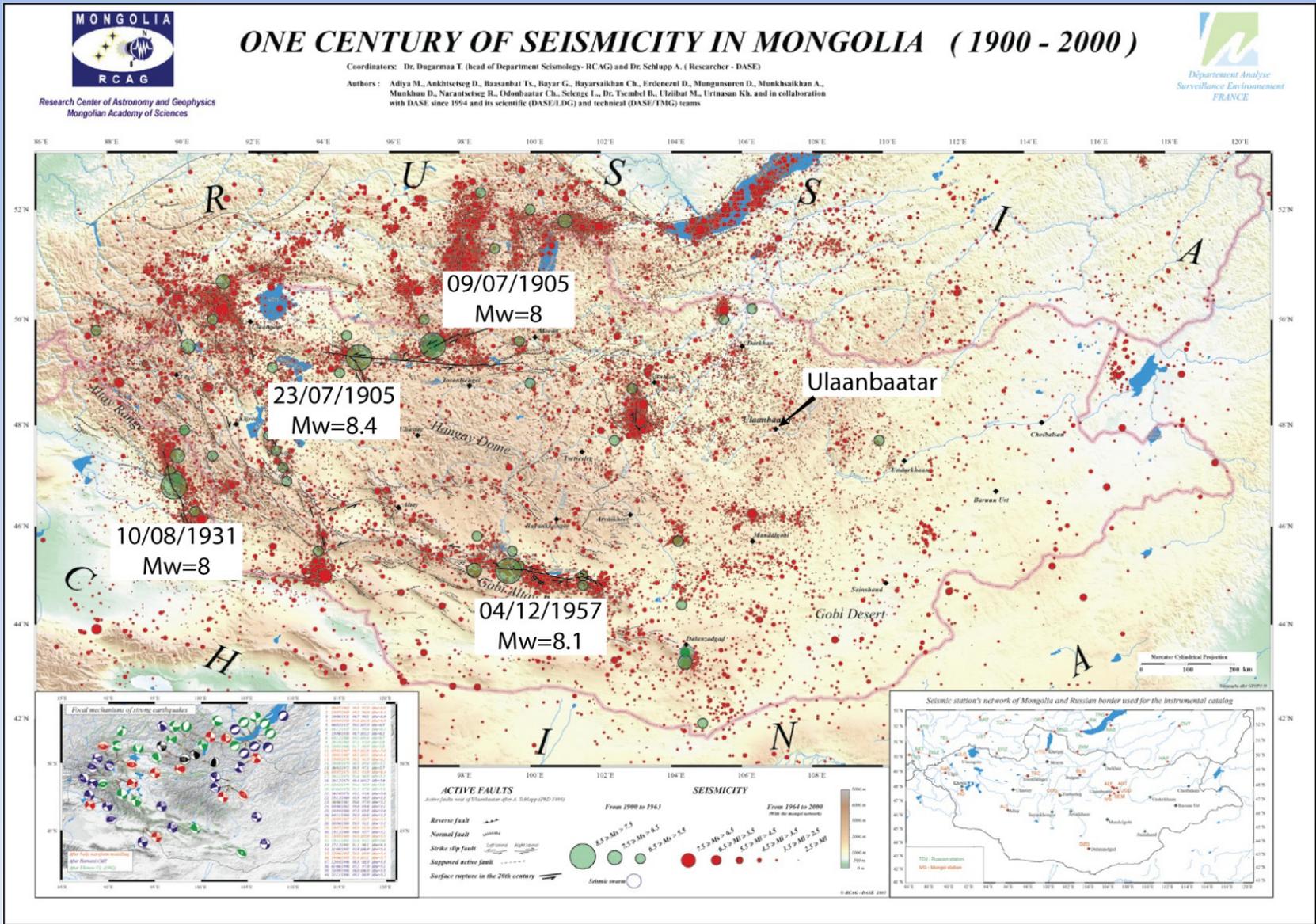
Apport du géoradar dans l'étude des séismes passés ?



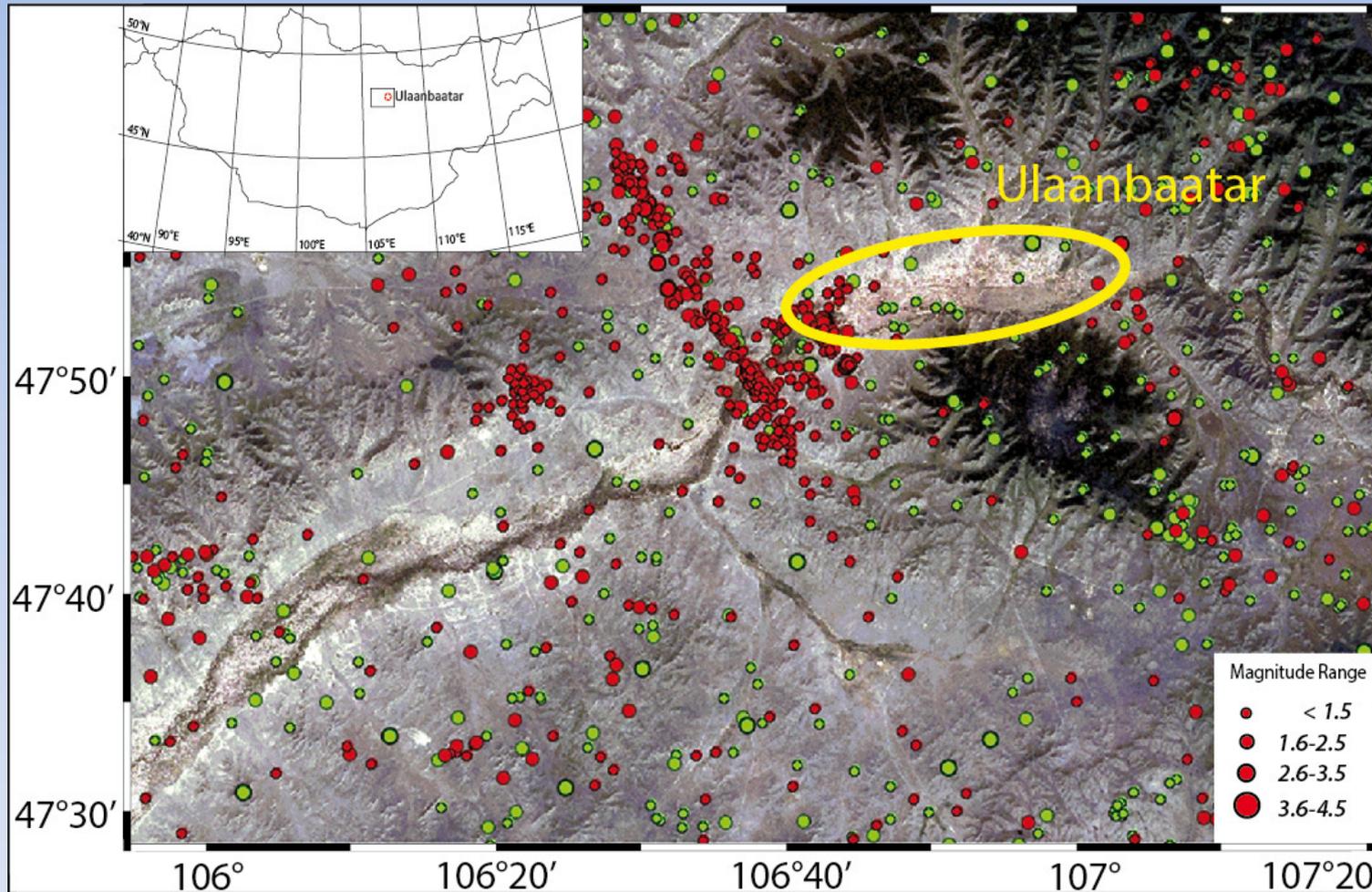
# 3 - En Mongolie - Contexte



# 3 - En Mongolie - Contexte



### 3 - En Mongolie - Contexte



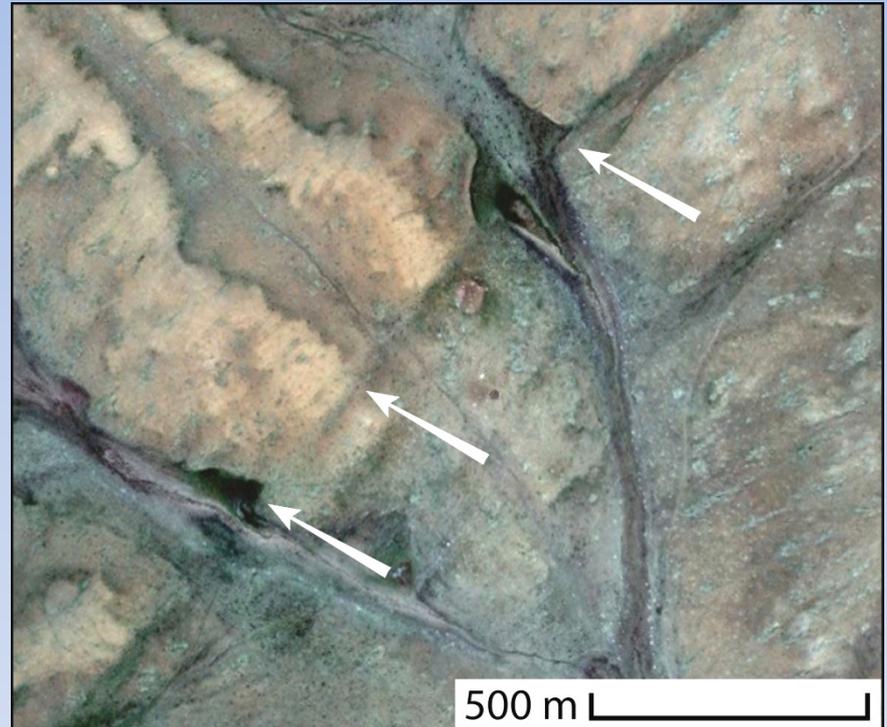
### 3 - En Mongolie - le projet

- Collaboration entre EOST et RCAG (Research Center of Astronomy and Geophysics)
- Coordonné par Antoine Schlupp
- Dans ce cadre, plusieurs études :
  - localiser les failles
  - les caractériser



### 3 - En Mongolie - plusieurs méthodes

- Imagerie aérienne ou satellite



## 3 - En Mongolie - plusieurs méthodes

- Imagerie aérienne ou satellite
- Observation géomorphologie de terrain

Mogod, 1967  
M = 7.1



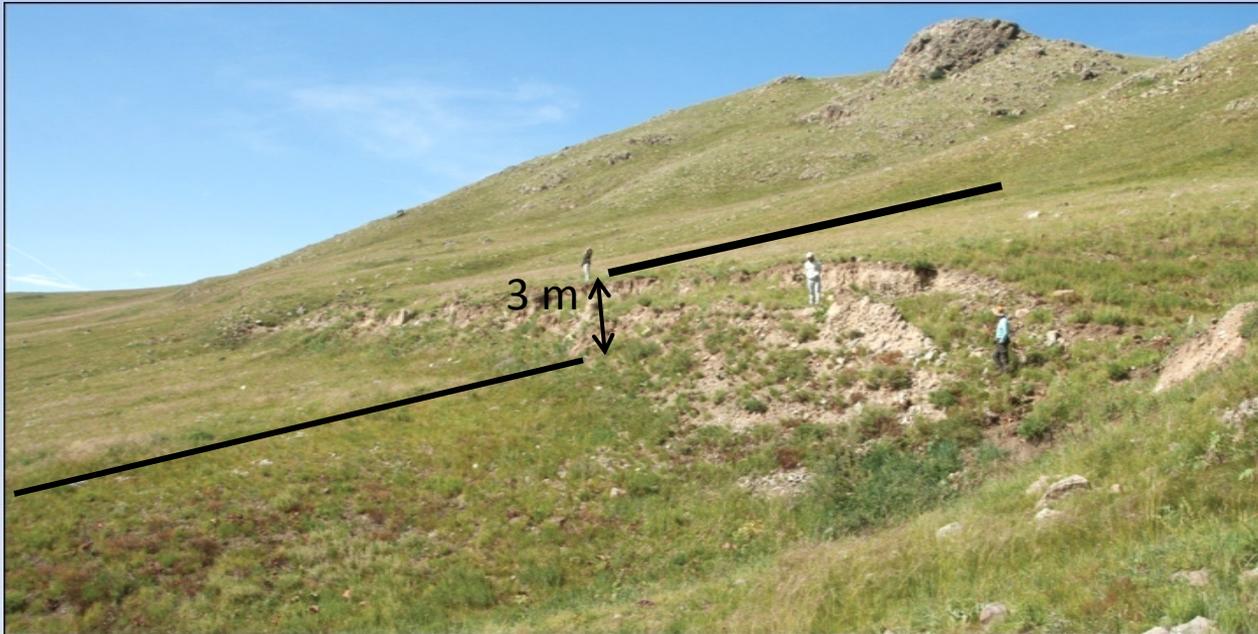
## 3 - En Mongolie - plusieurs méthodes

- Imagerie aérienne ou satellite
- Observation géomorphologie de terrain

Mogod, 1967

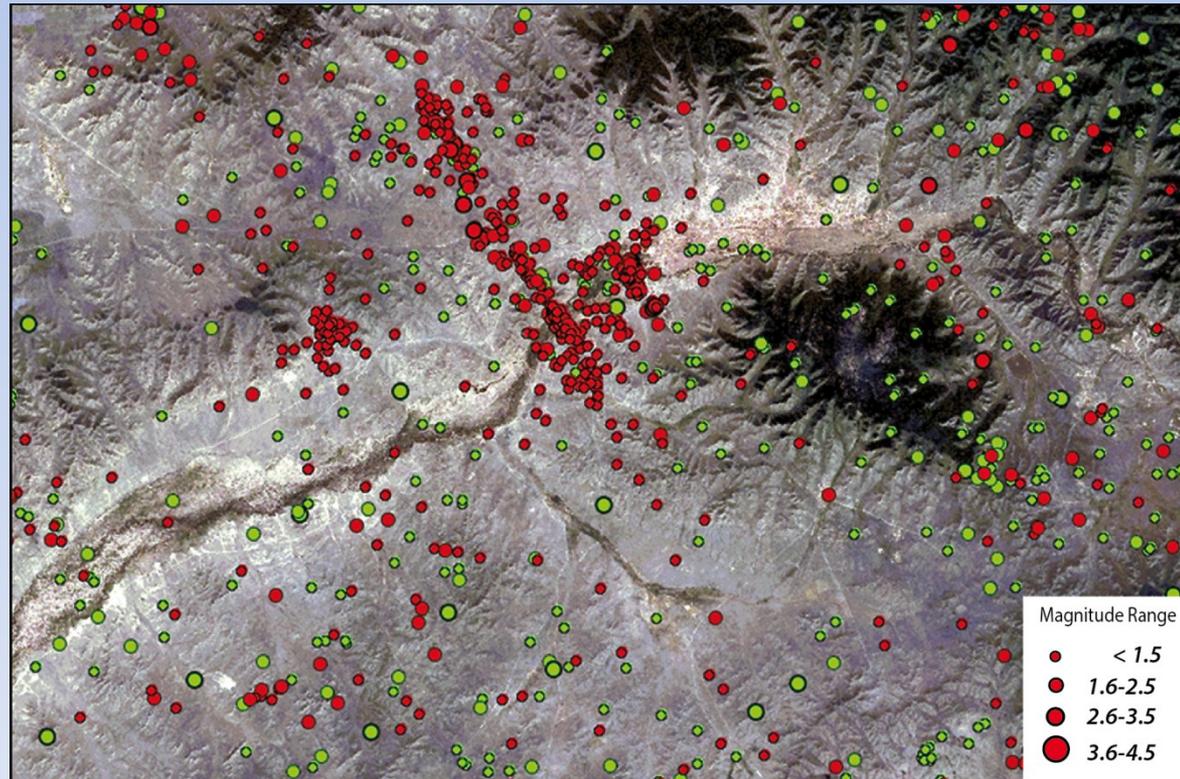
M = 7.1

Rejet vertical : 3 m



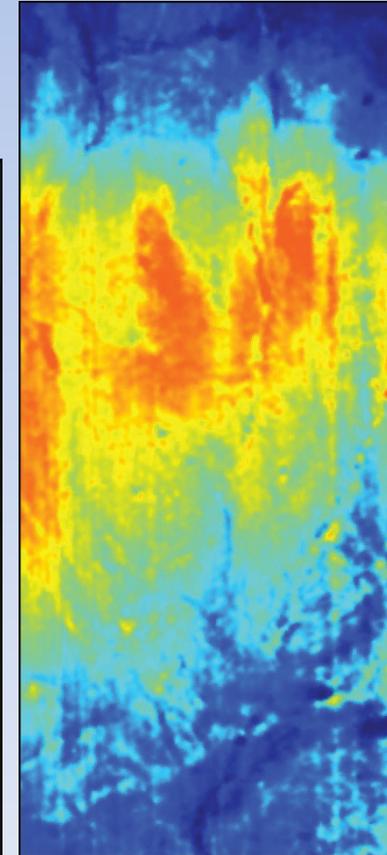
## 3 - En Mongolie - plusieurs méthodes

- Imagerie aérienne ou satellite
- Observation geomorphologie de terrain
- Sismicité



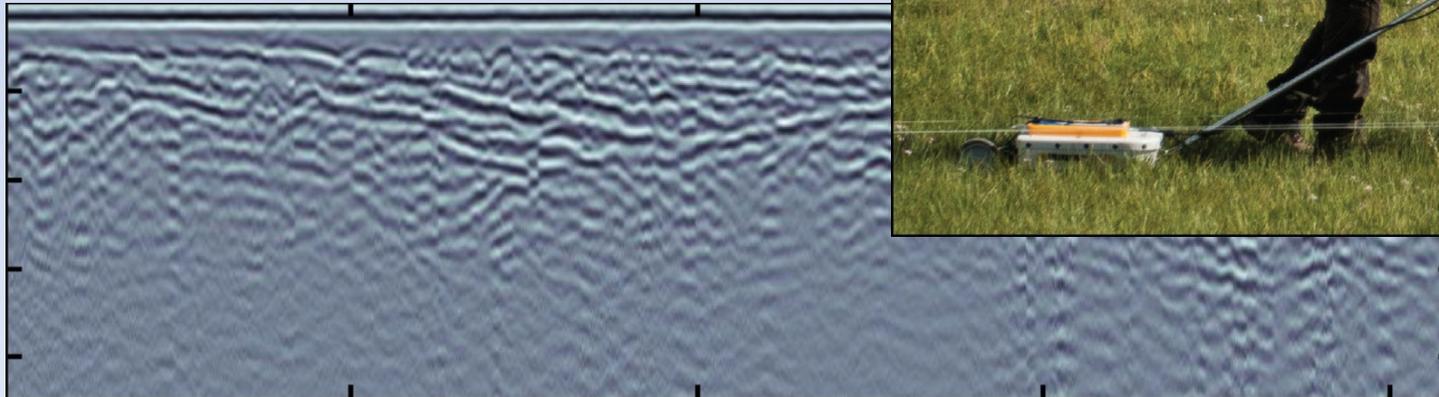
### 3 - En Mongolie - plusieurs méthodes

- Imagerie aérienne ou satellite
- Observation geomorphologie de terrain
- Sismicité
- Cartographie magnétique



### 3 - En Mongolie - plusieurs méthodes

- Imagerie aérienne ou satellite
- Observation geomorphologie de terrain
- Sismicité
- Cartographie magnétique
- Géoradar



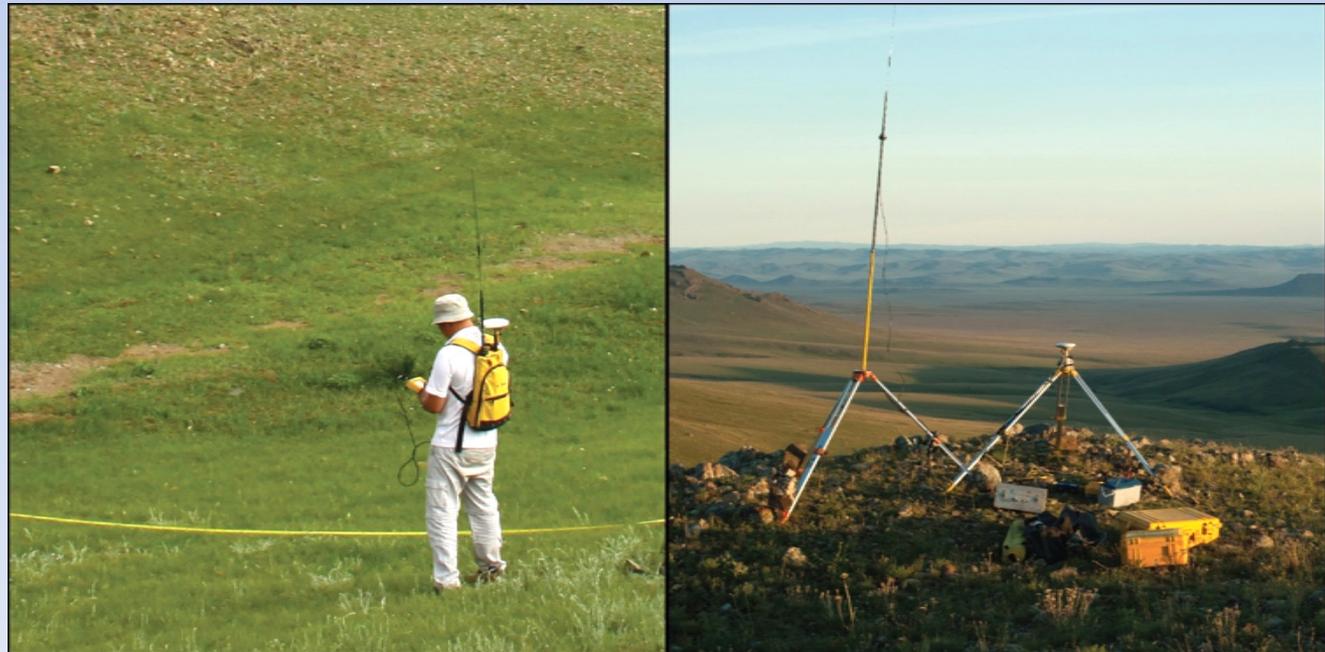
## 3 - En Mongolie - plusieurs méthodes

- Imagerie aérienne ou satellite
- Observation geomorphologie de terrain
- Sismicité
- Cartographie magnétique
- Géoradar
- Tranchées

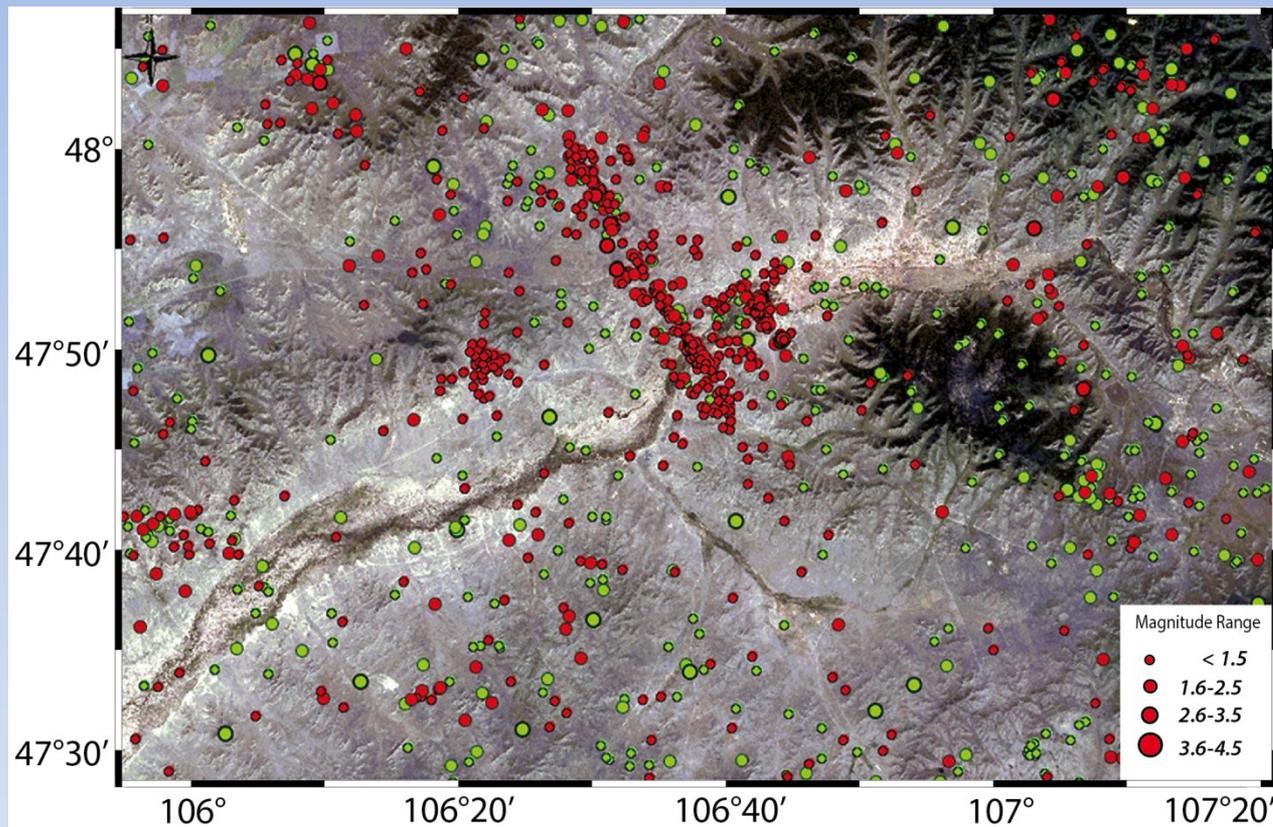


### 3 - En Mongolie - plusieurs méthodes

- Imagerie aérienne ou satellite
- Observation geomorphologie de terrain
- Sismicité
- Cartographie magnétique
- Géoradar
- Tranchées
- GPS différentiel

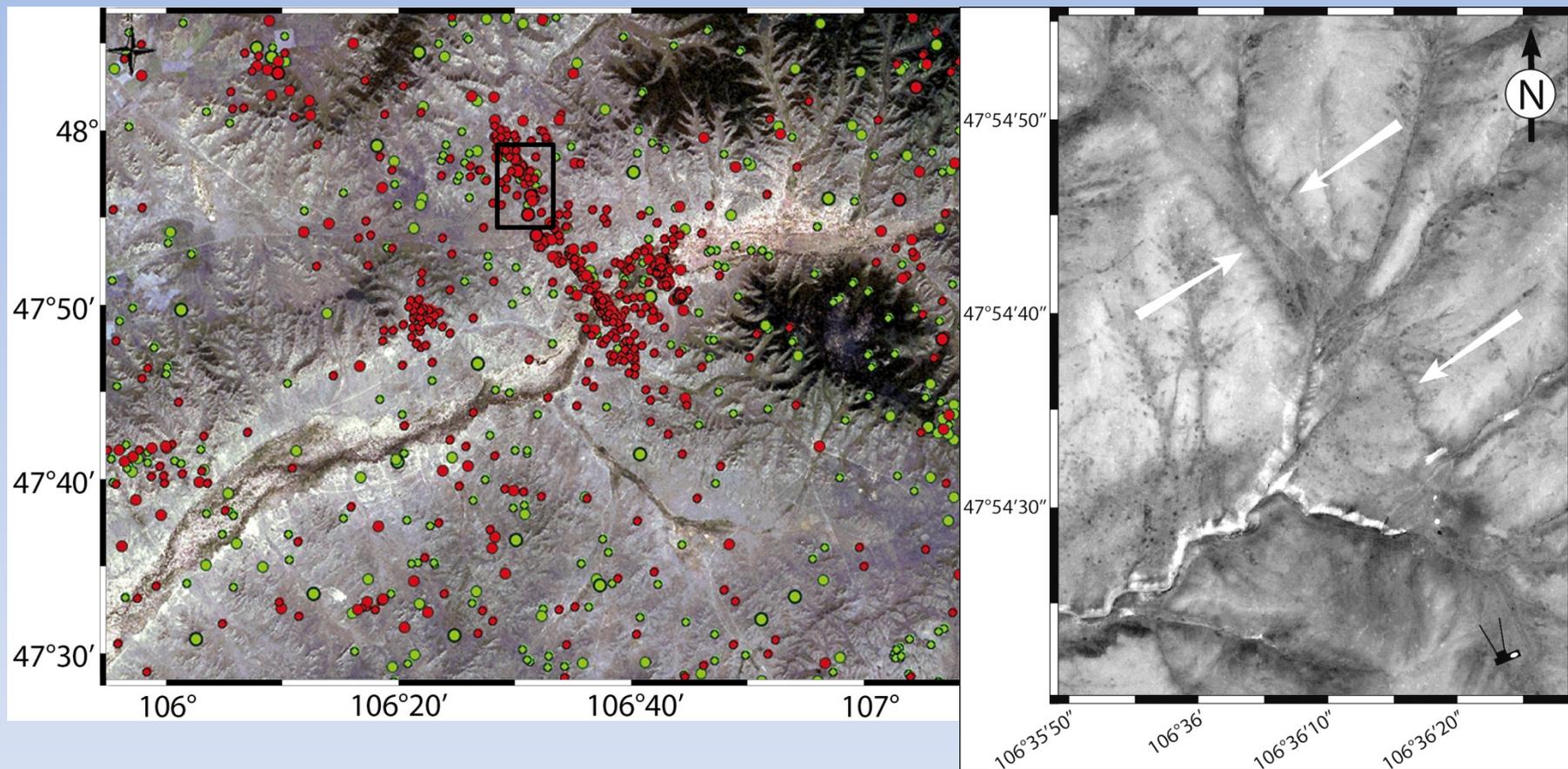


### 3 - En Mongolie - études préliminaires

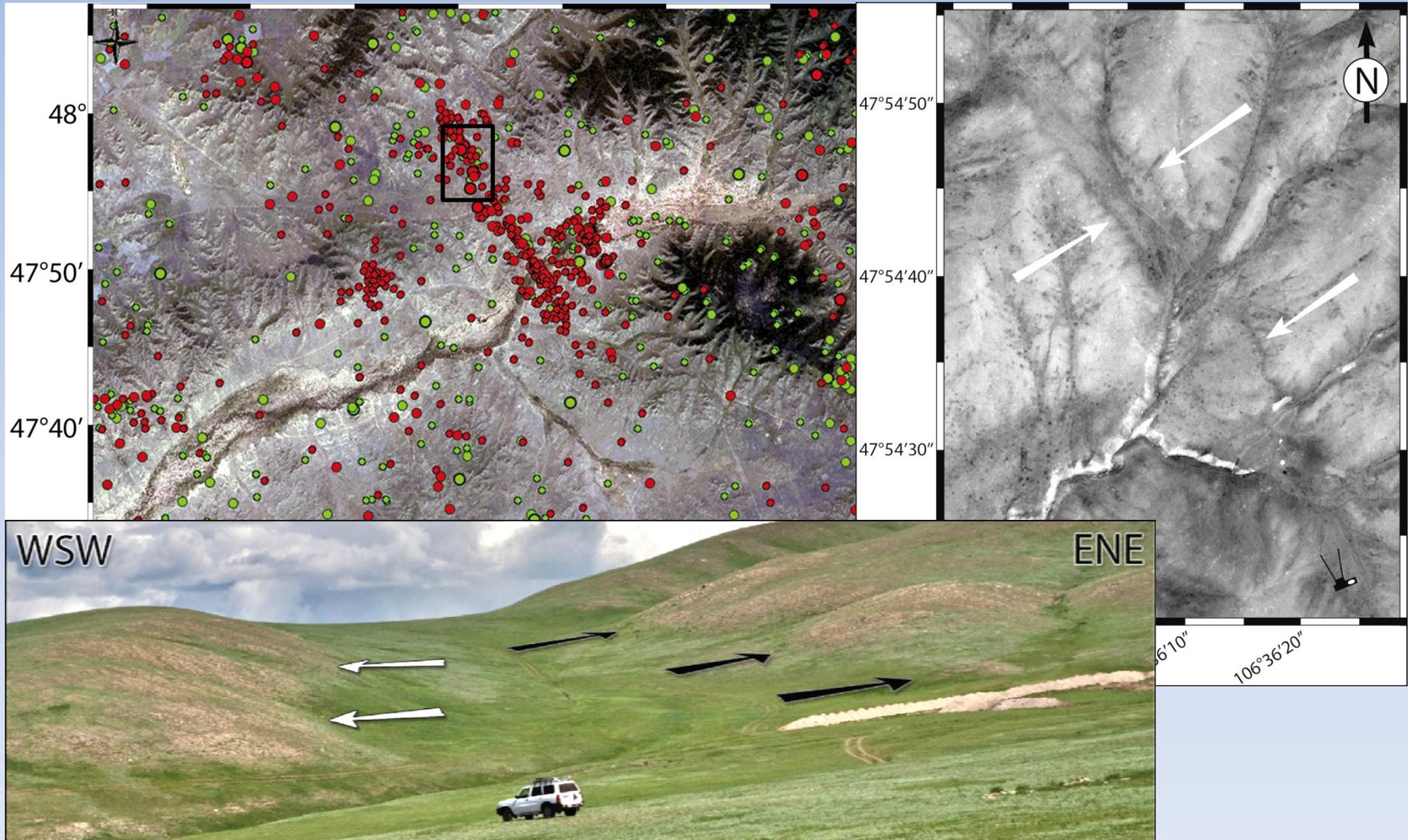


Faille de Emeelt  
Découverte en 2008

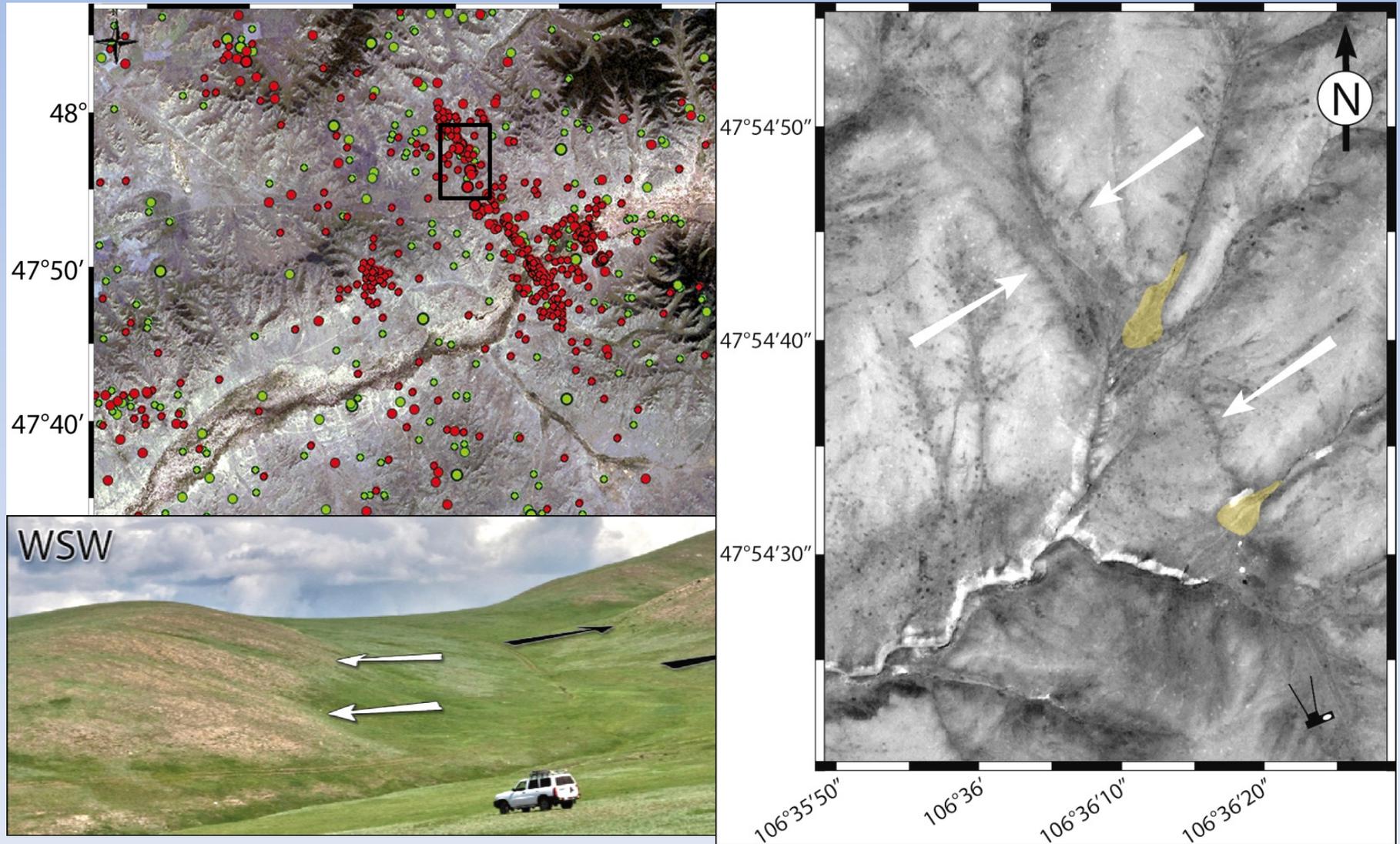
### 3 - En Mongolie - études préliminaires



### 3 - En Mongolie - études préliminaires



### 3 - En Mongolie - études préliminaires



### 3 - En Mongolie - méthodologie

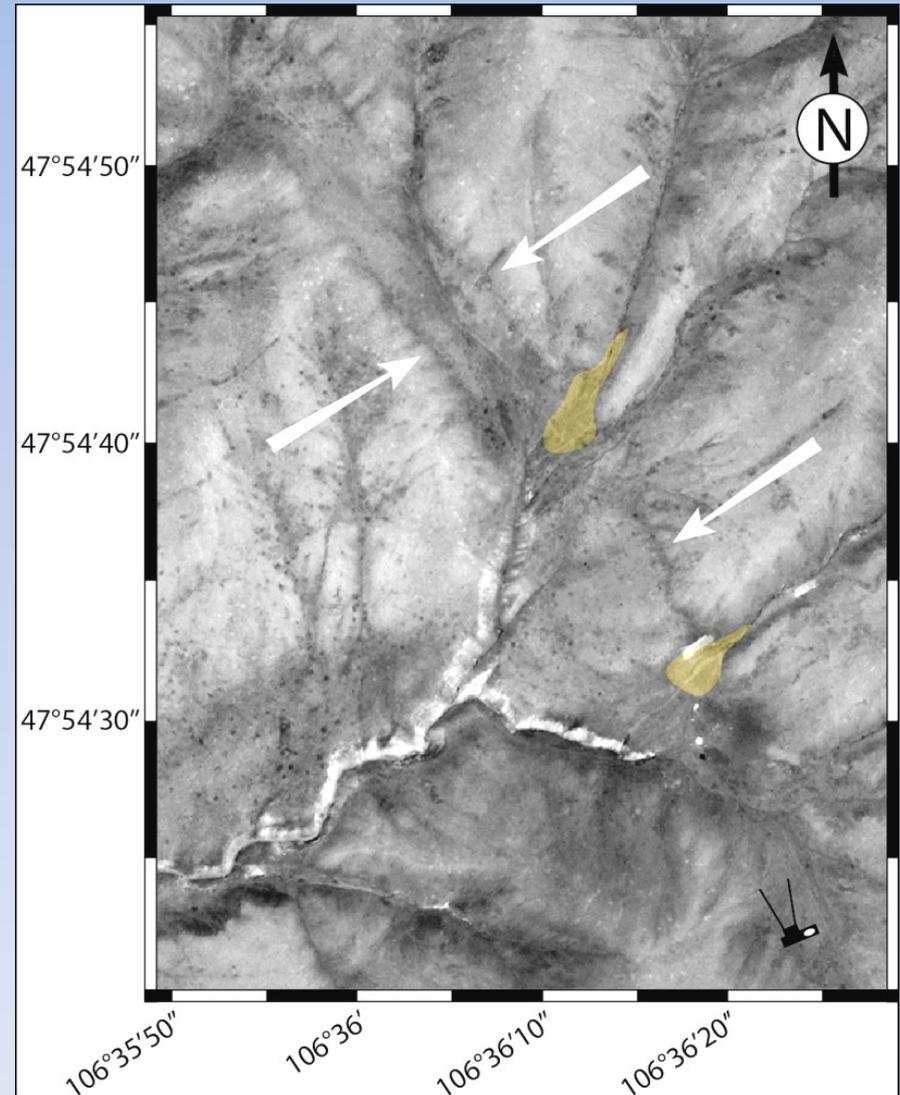
Deux fréquences :

- 500 MHz

- imager les objets en pseudo 3D

Pseudo-3D :

- Série de profils parallèles
- Visualisation 3D



### 3 - En Mongolie - méthodologie

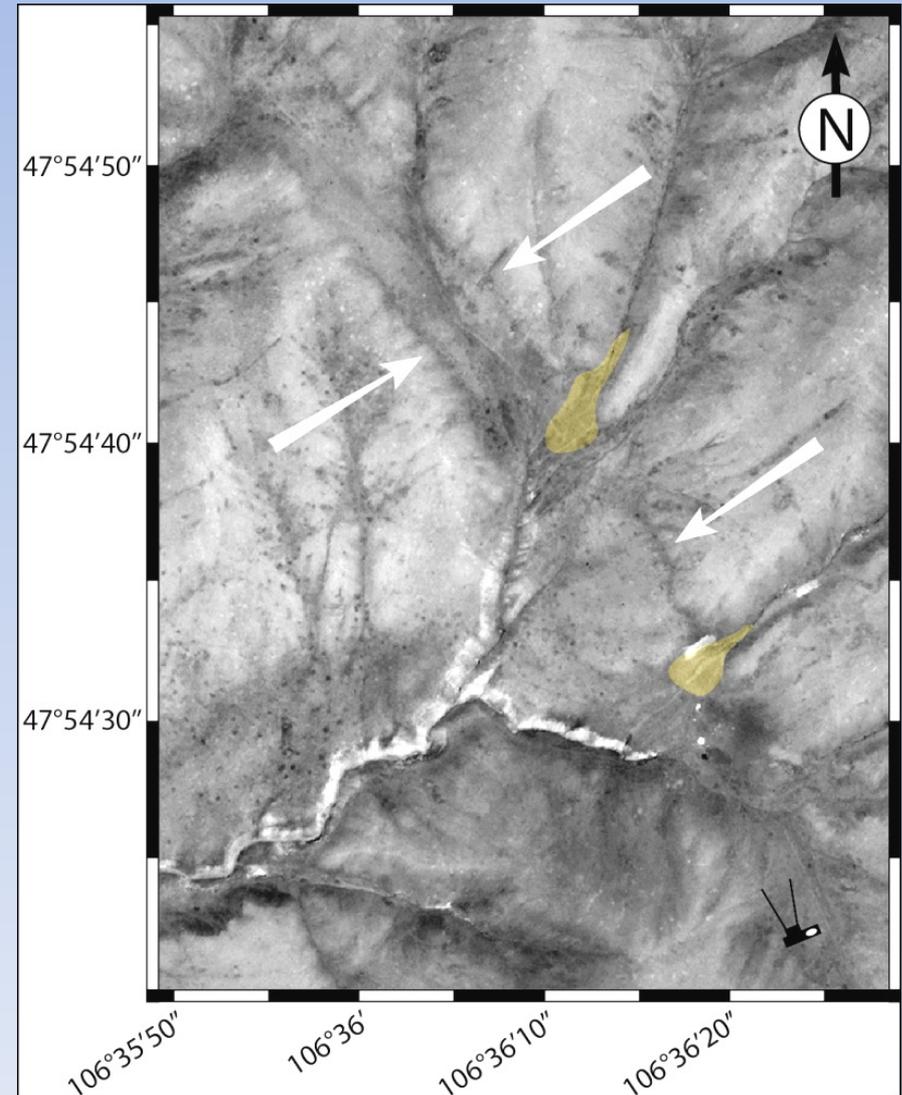
Deux fréquences :

- 500 MHz

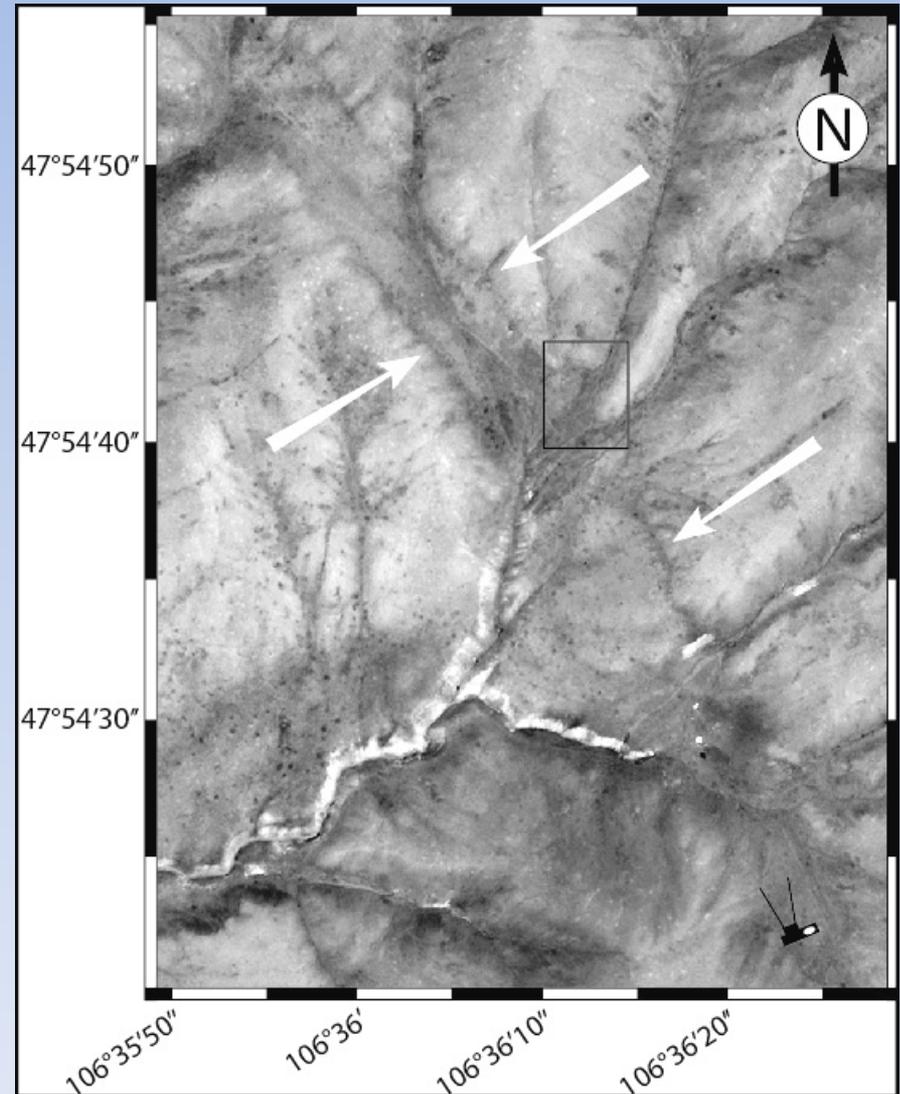
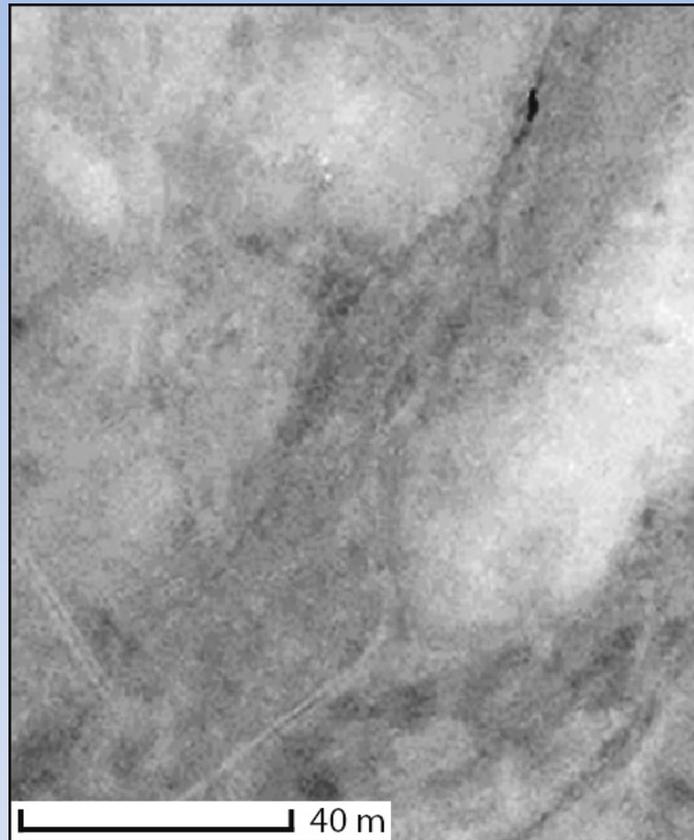
  - imager les objets en pseudo 3D

- 50 MHz

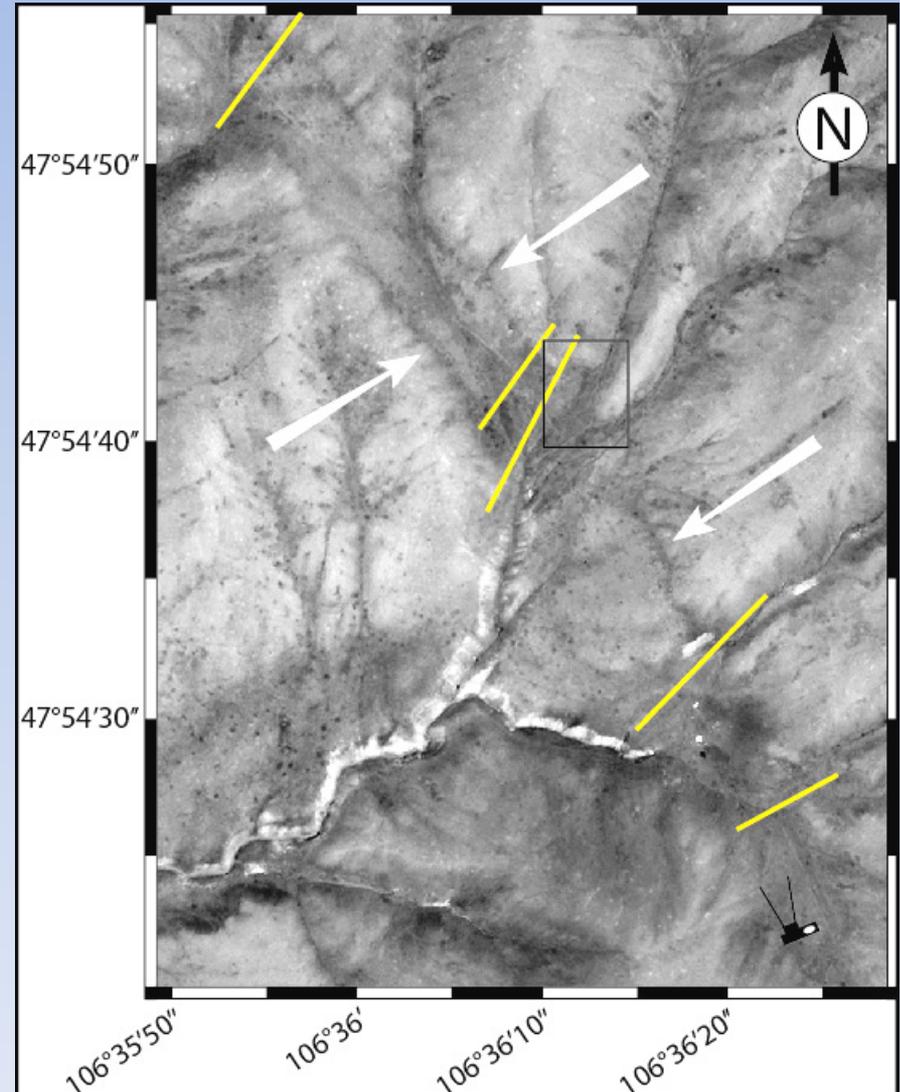
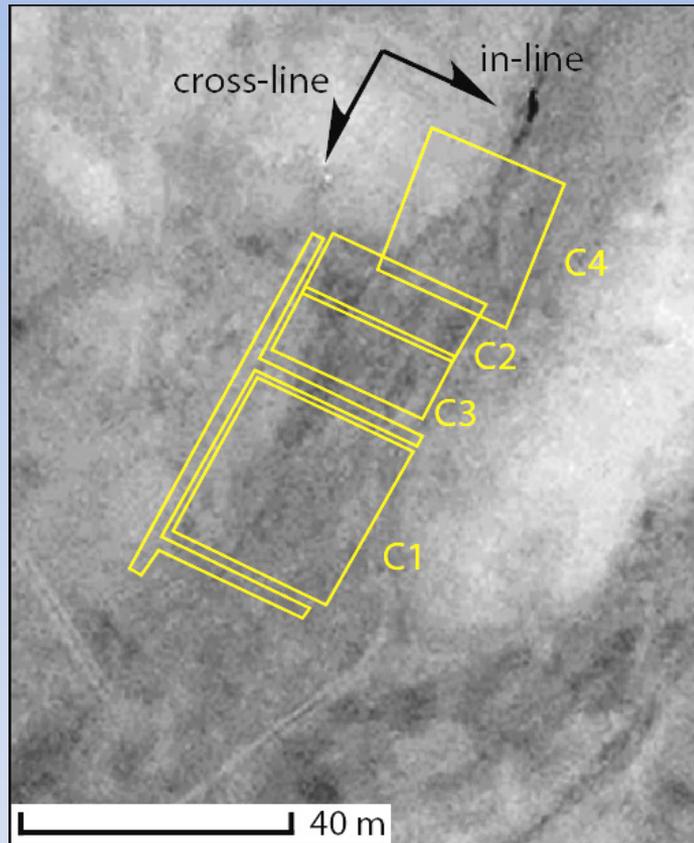
  - observer les extensions latérales et en profondeur



### 3 - En Mongolie - méthodologie



### 3 - En Mongolie - méthodologie

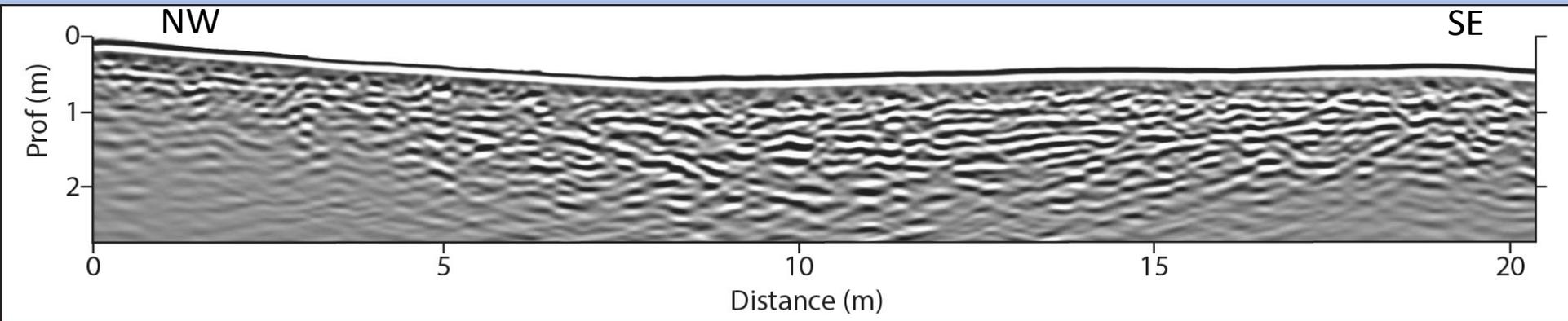


Tranchées en 2010

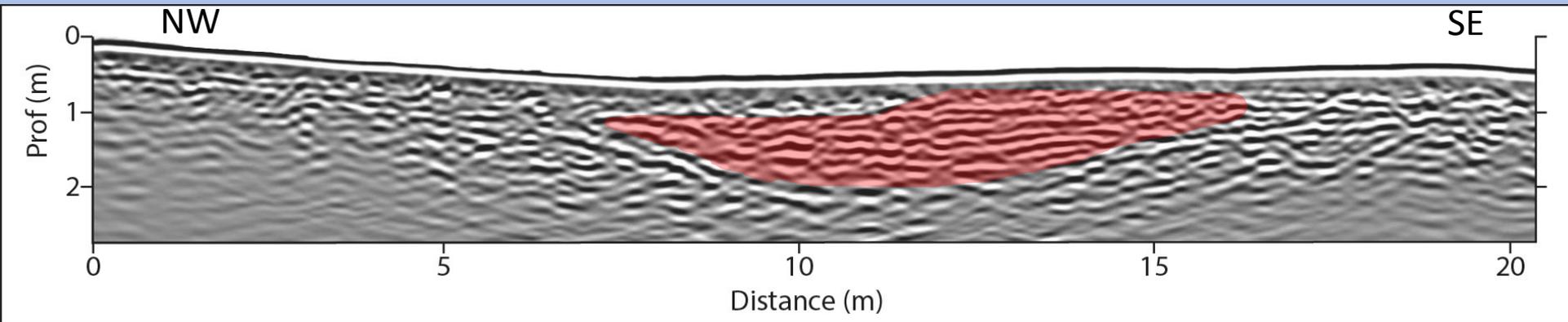
C1 et C2 : en 2010

C3 et C4 : en 2011

### 3 - En Mongolie – interprétation – 500 MHz

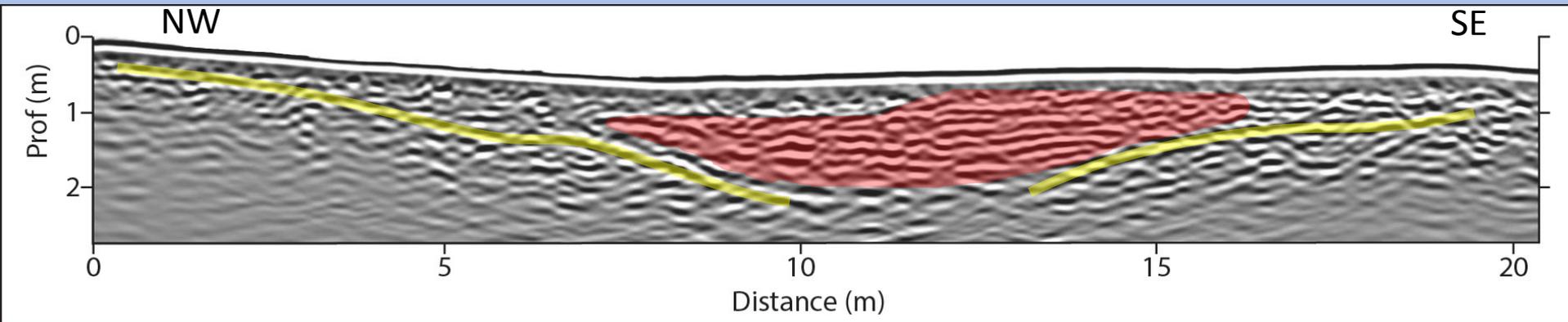


### 3 - En Mongolie – interprétation – 500 MHz



Réflexions sub-horizontales : remplissage sédimentaire

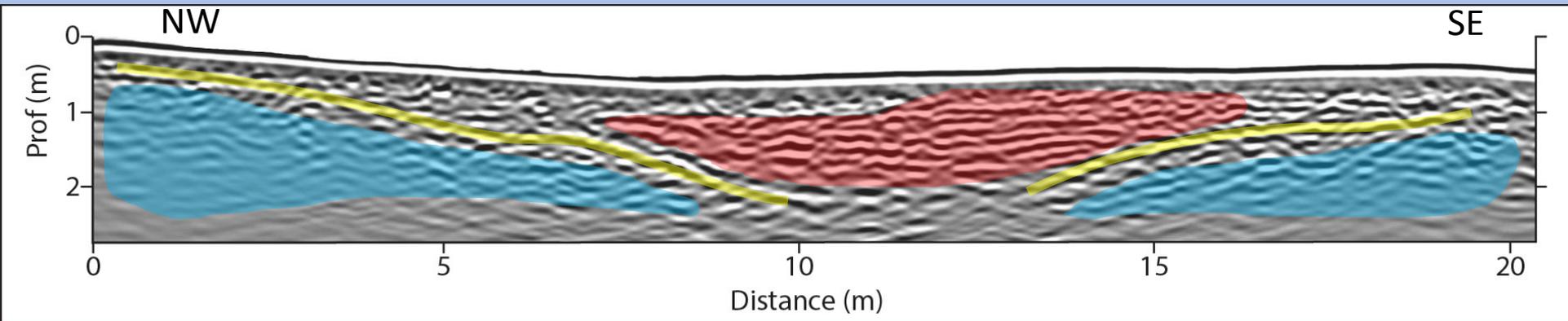
### 3 - En Mongolie – interprétation – 500 MHz



Réflexions sub-horizontales : remplissage sédimentaire

Réflexions plongeantes : flancs du chenal

### 3 - En Mongolie – interprétation – 500 MHz

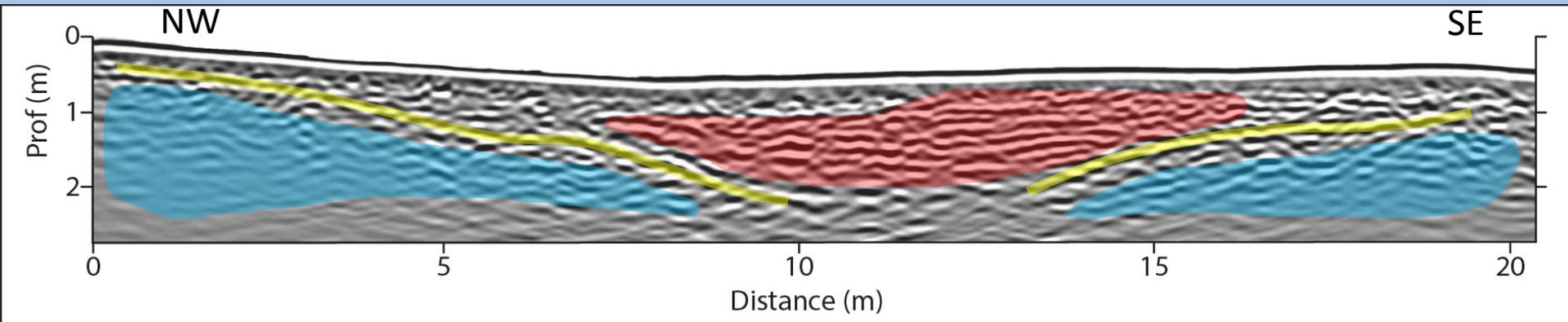


Réflexions sub-horizontales : remplissage sédimentaire

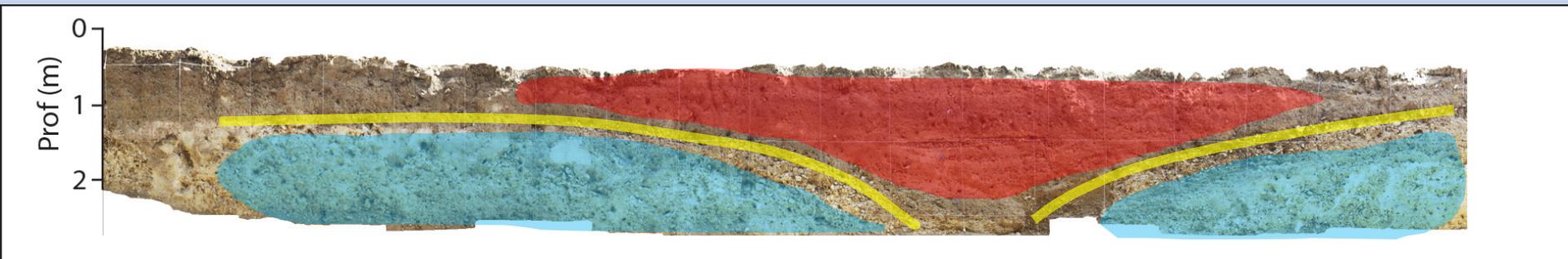
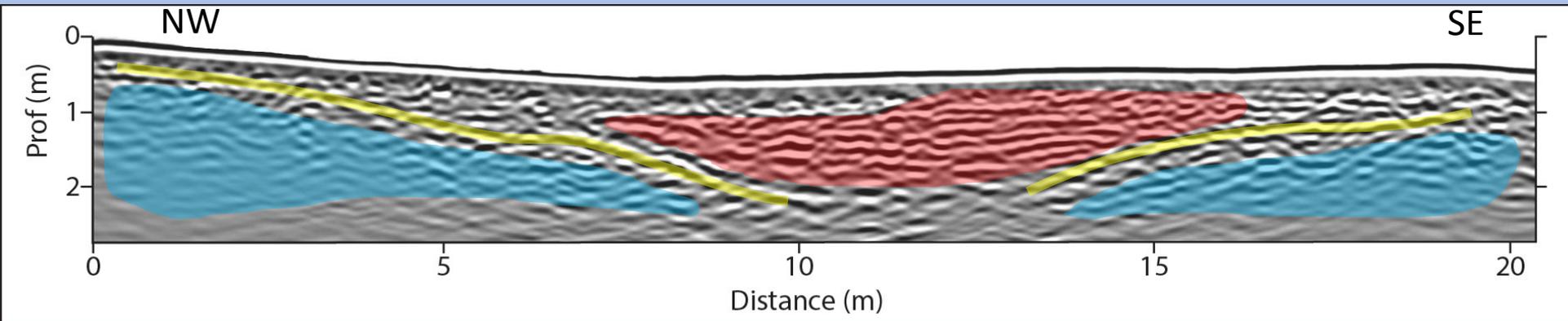
Réflexions plongeantes : flancs du chenal

Zone de signal atténué : roche encaissante

### 3 - En Mongolie – interprétation – 500 MHz



### 3 - En Mongolie – interprétation – 500 MHz

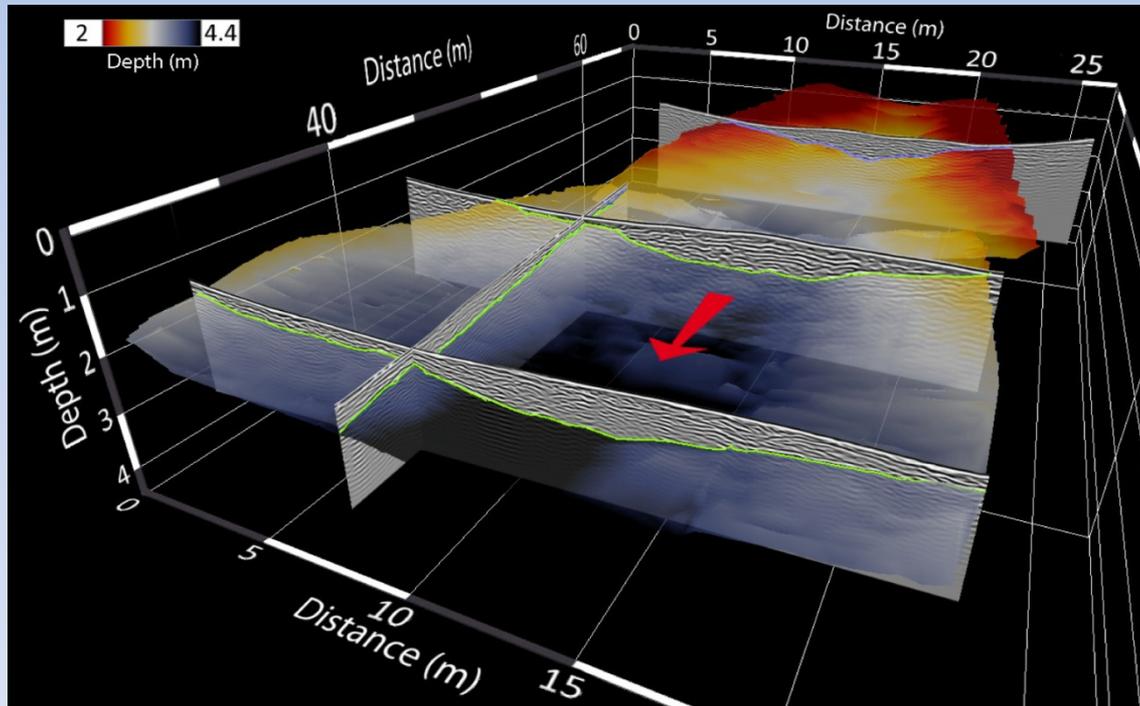


## 3 - En Mongolie – interprétation – 500 MHz

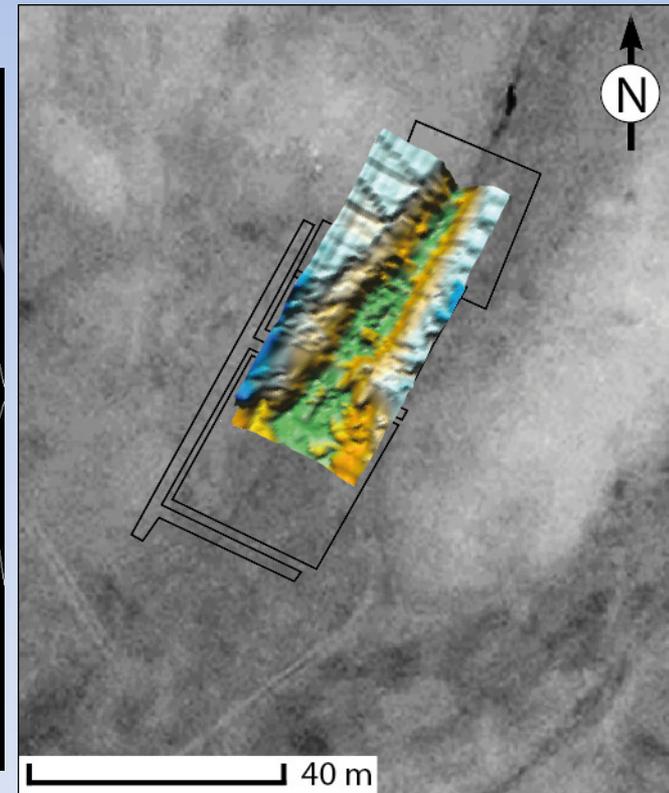
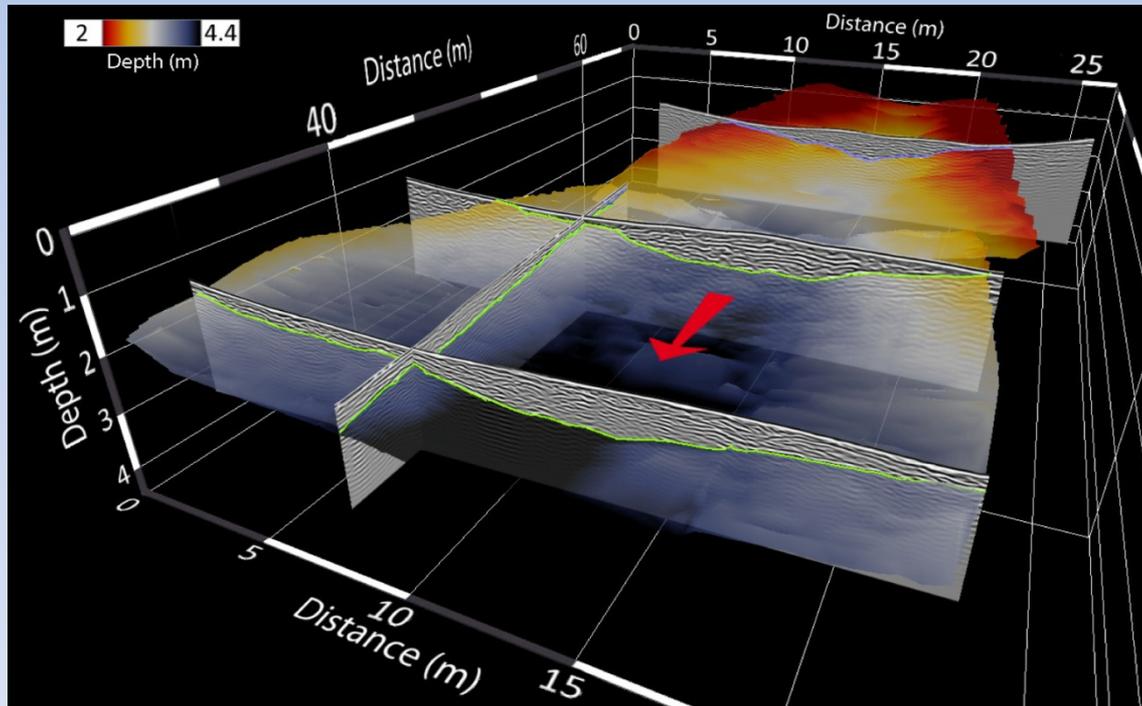
Chargement des profils dans le logiciel opendtect

Visualisation 3D

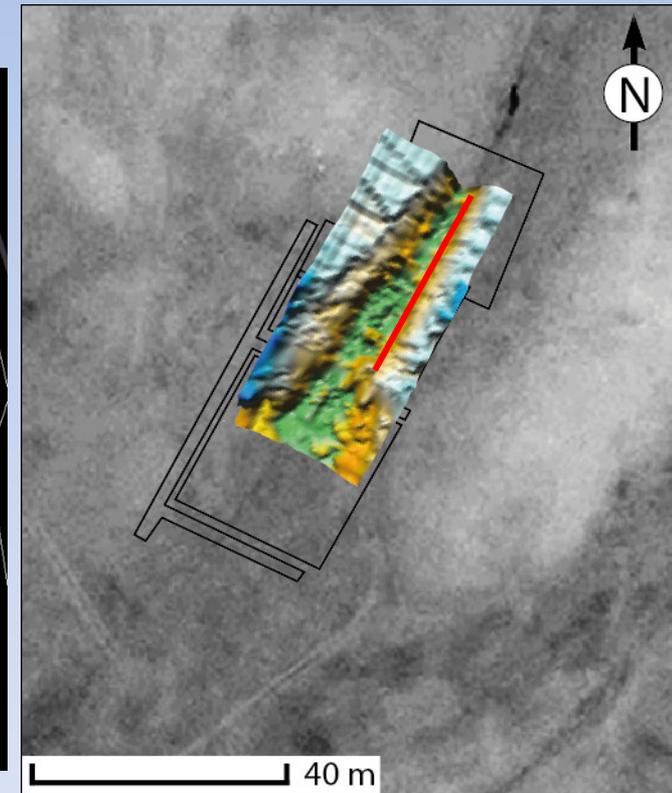
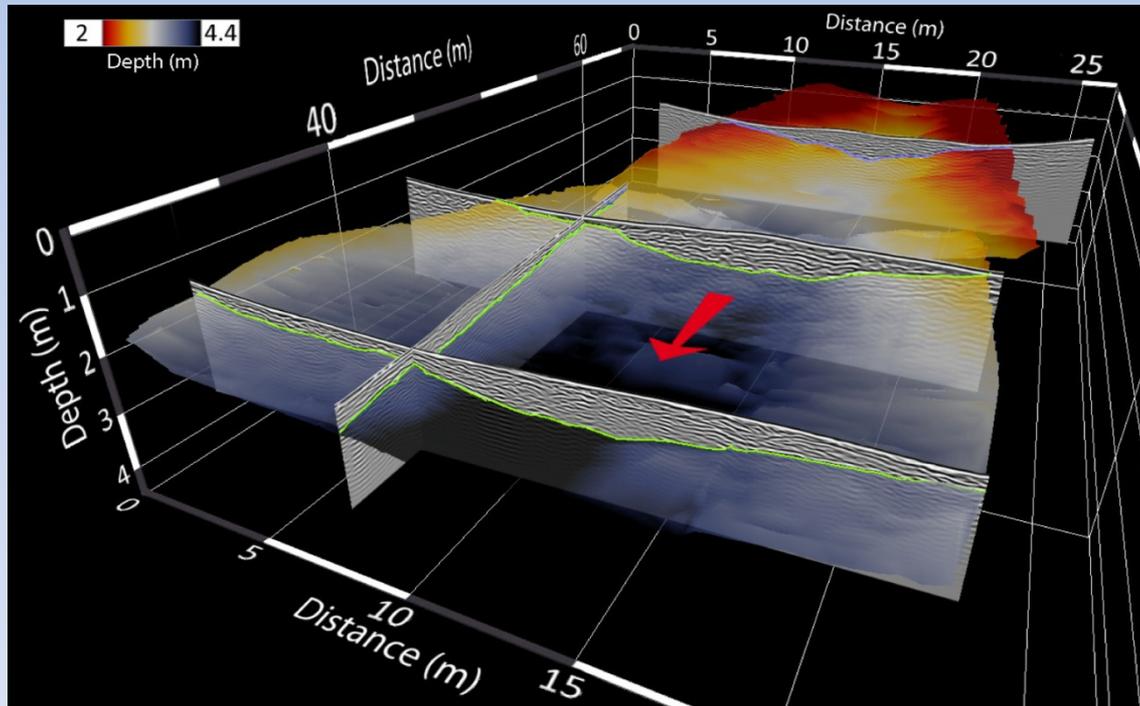
Interprétation



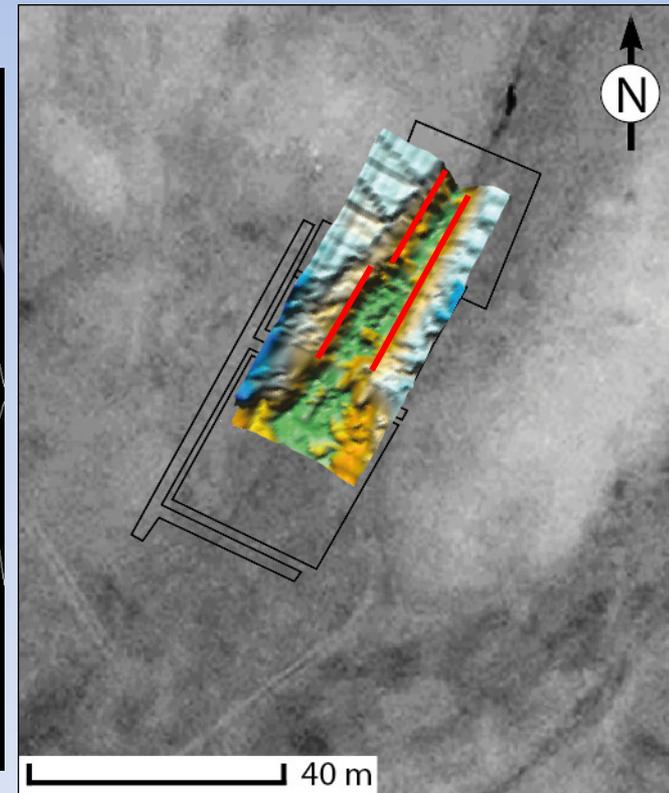
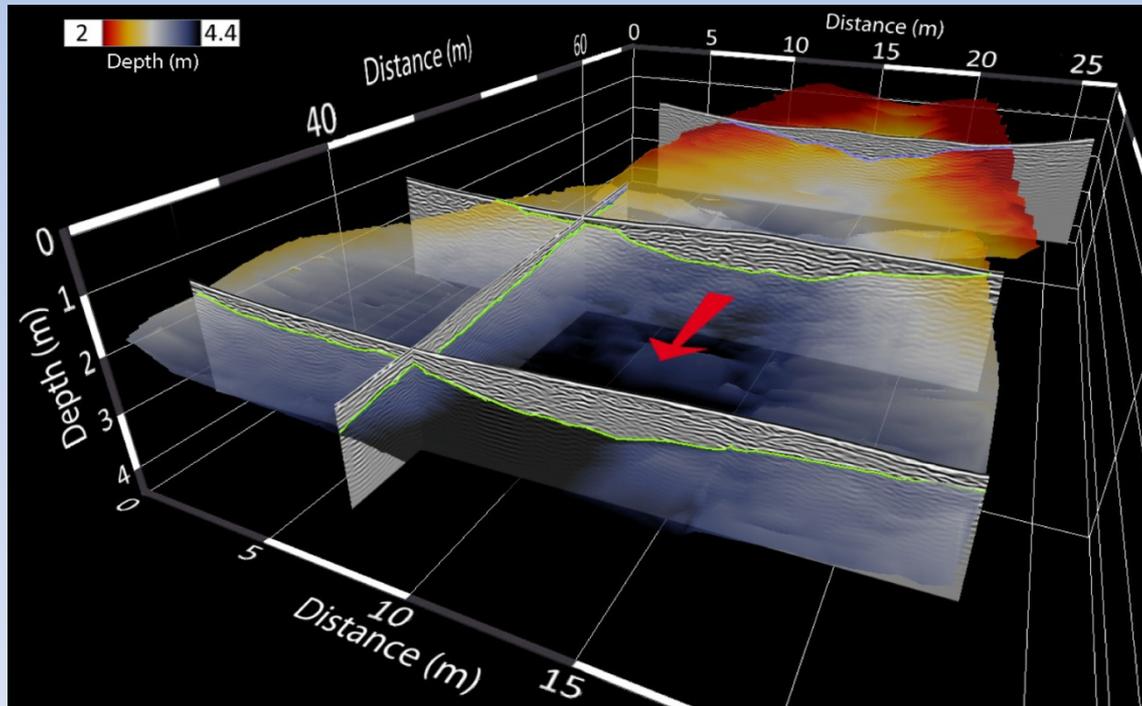
### 3 - En Mongolie – interprétation – 500 MHz



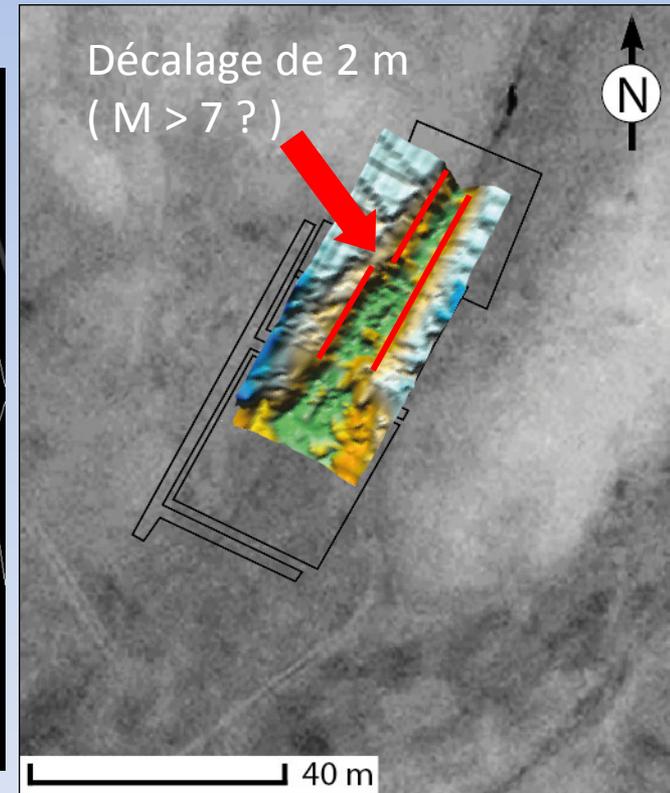
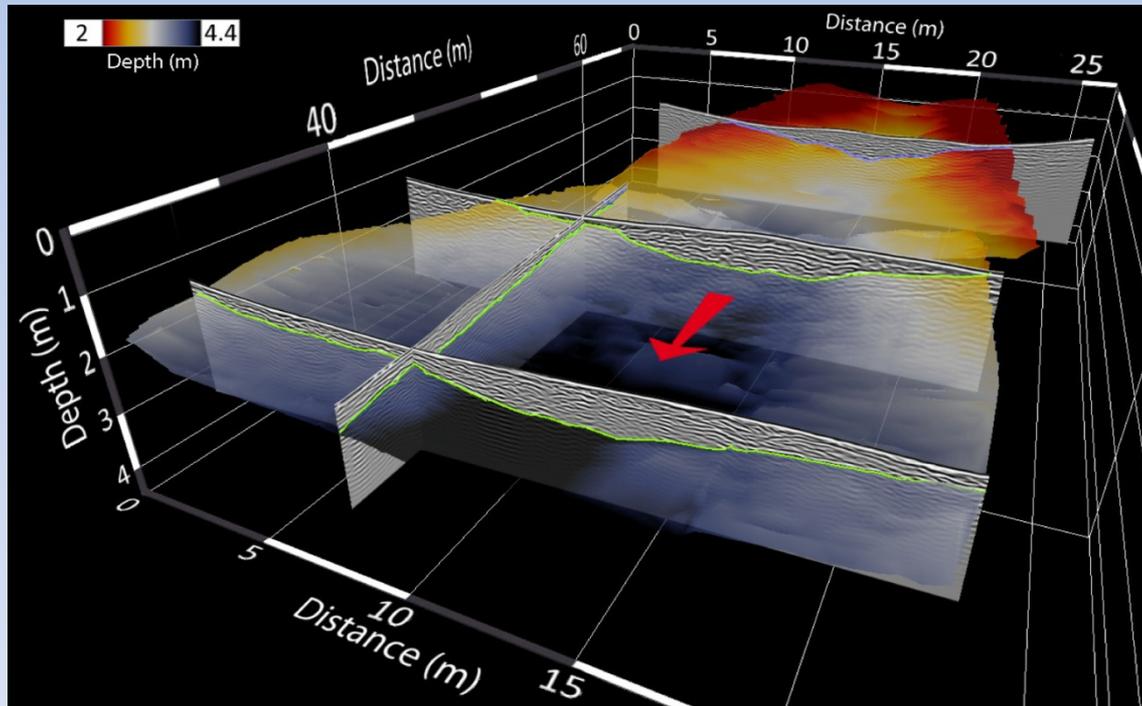
### 3 - En Mongolie – interprétation – 500 MHz



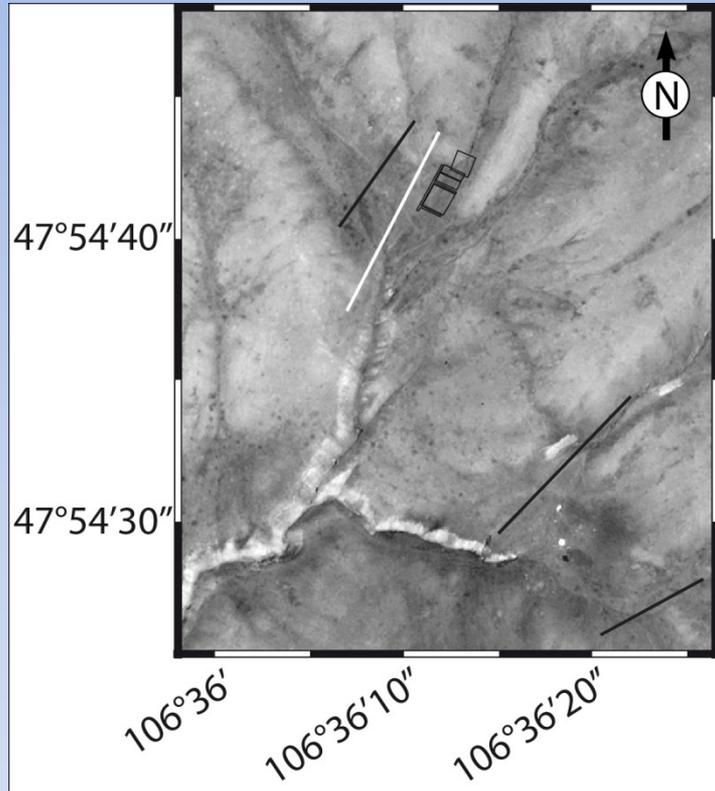
### 3 - En Mongolie – interprétation – 500 MHz



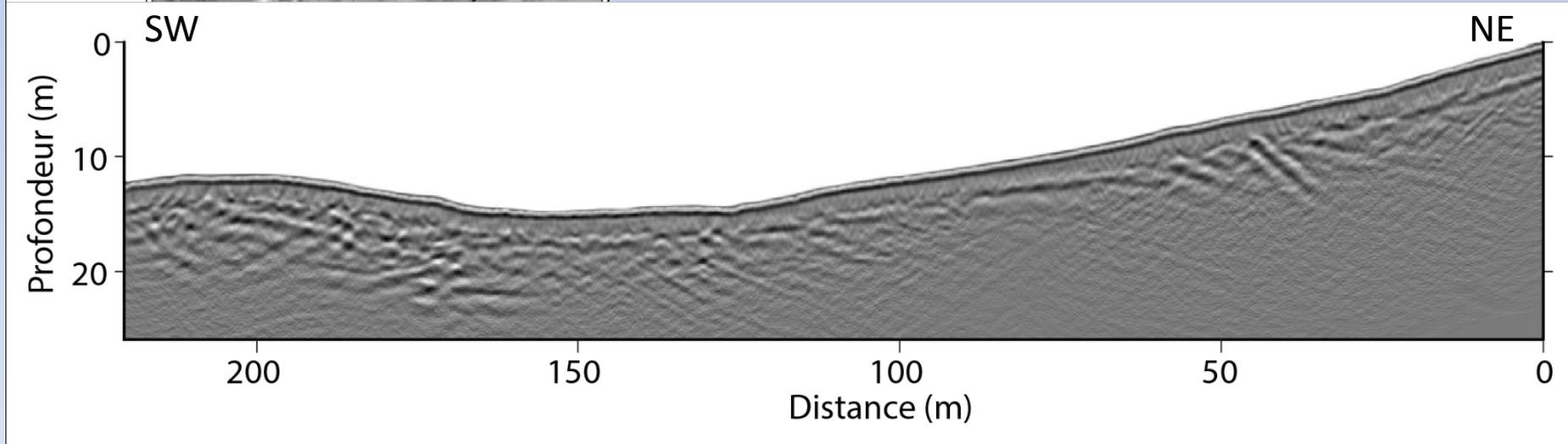
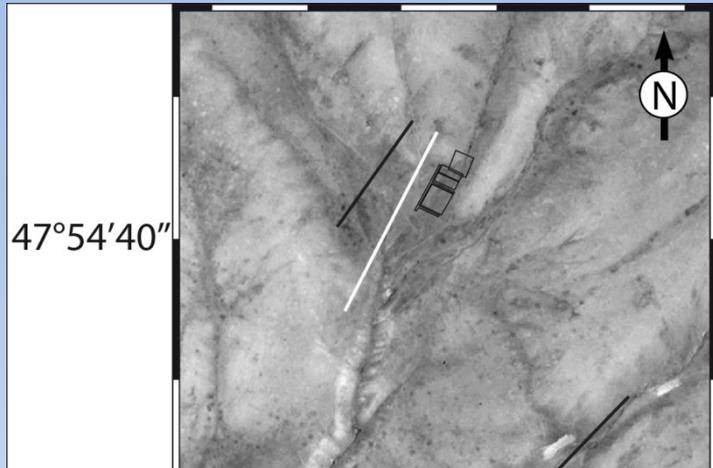
### 3 - En Mongolie – interprétation – 500 MHz



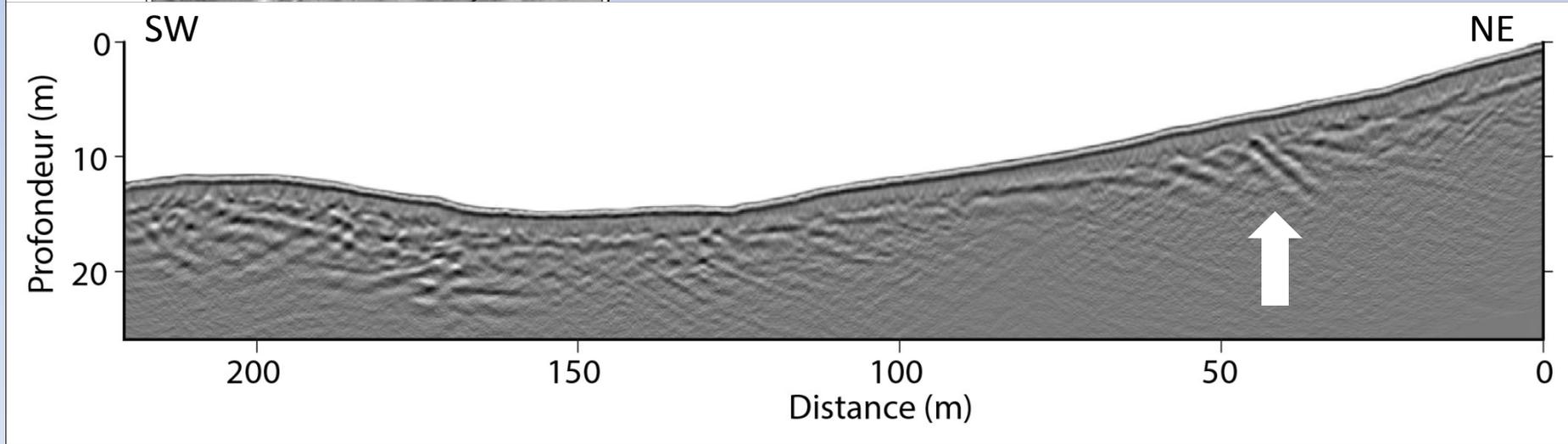
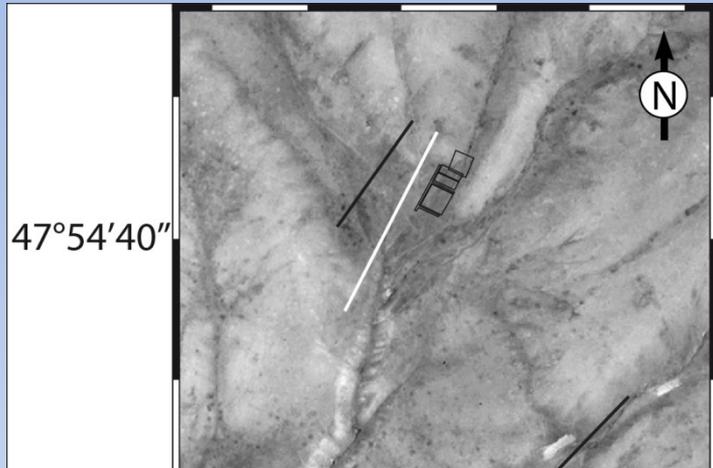
### 3 - En Mongolie – interprétation – 50 MHz



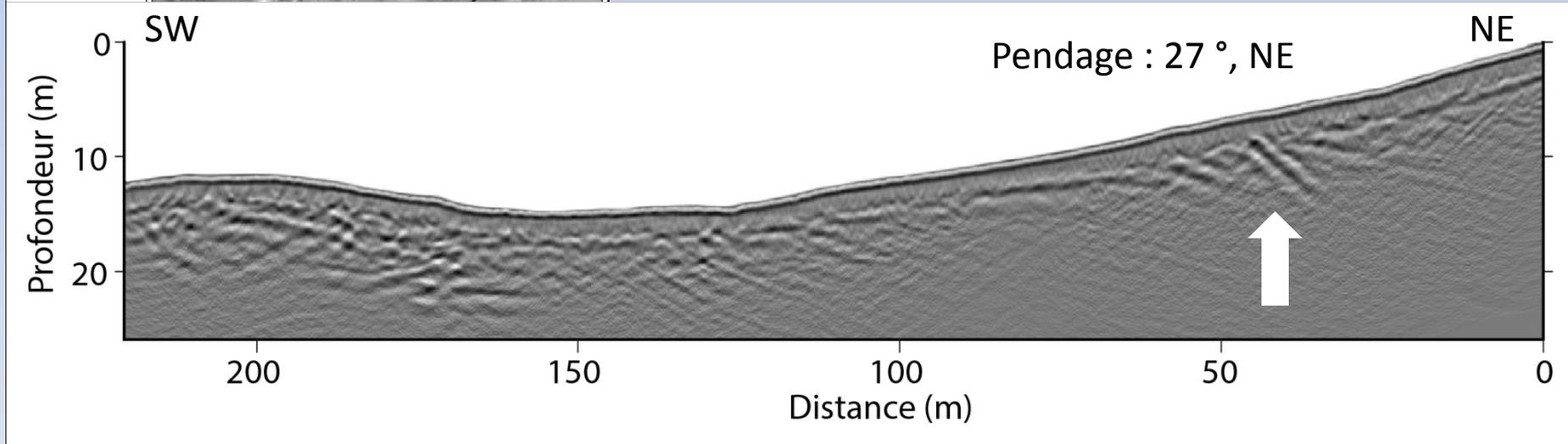
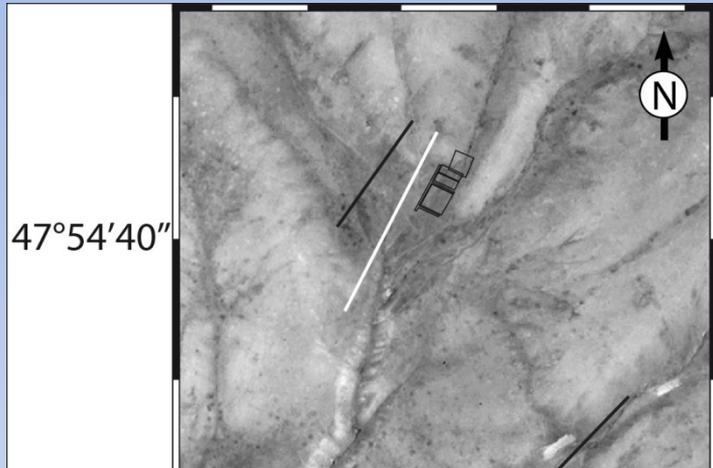
### 3 - En Mongolie – interprétation – 50 MHz



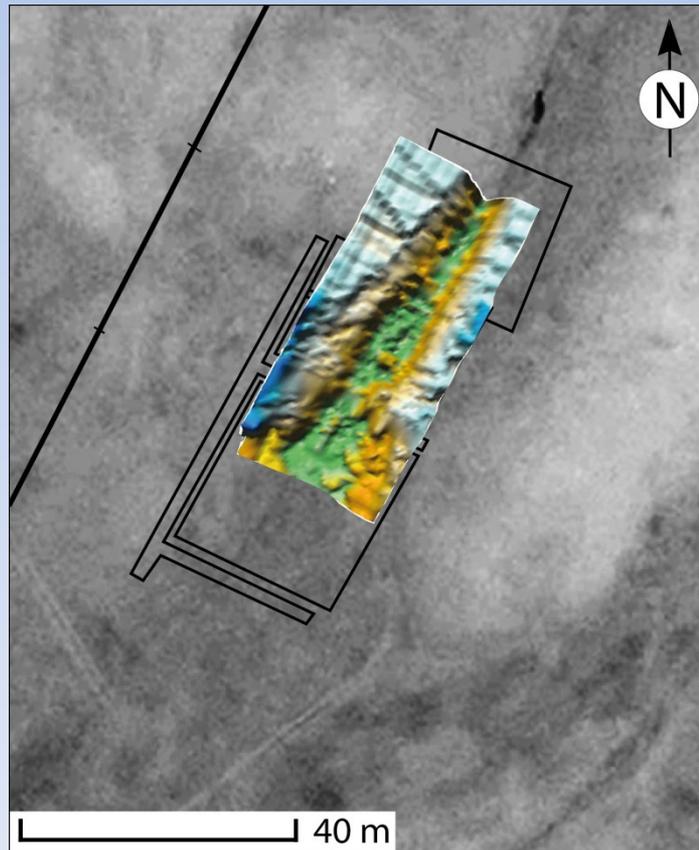
### 3 - En Mongolie – interprétation – 50 MHz



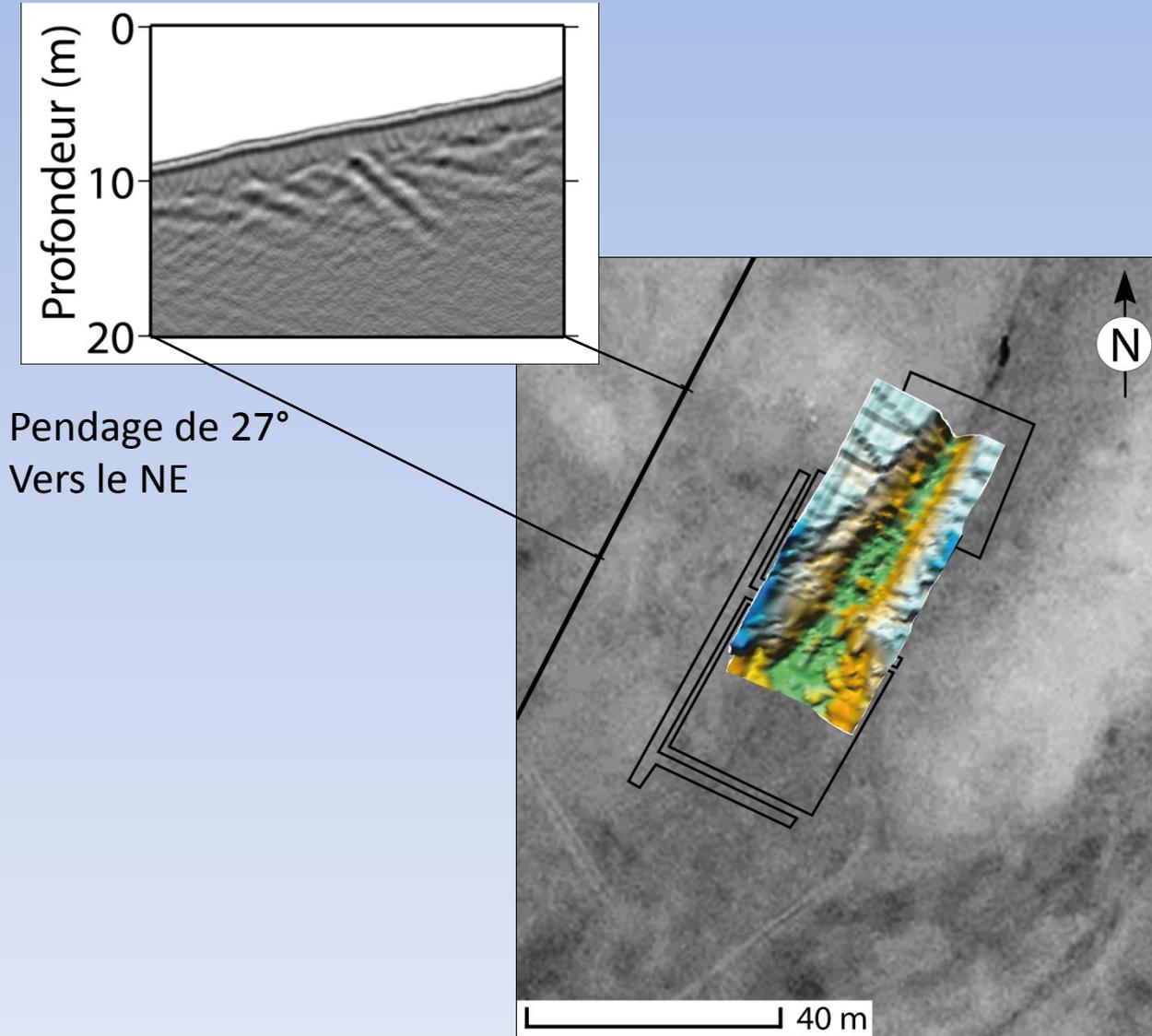
### 3 - En Mongolie – interprétation – 50 MHz



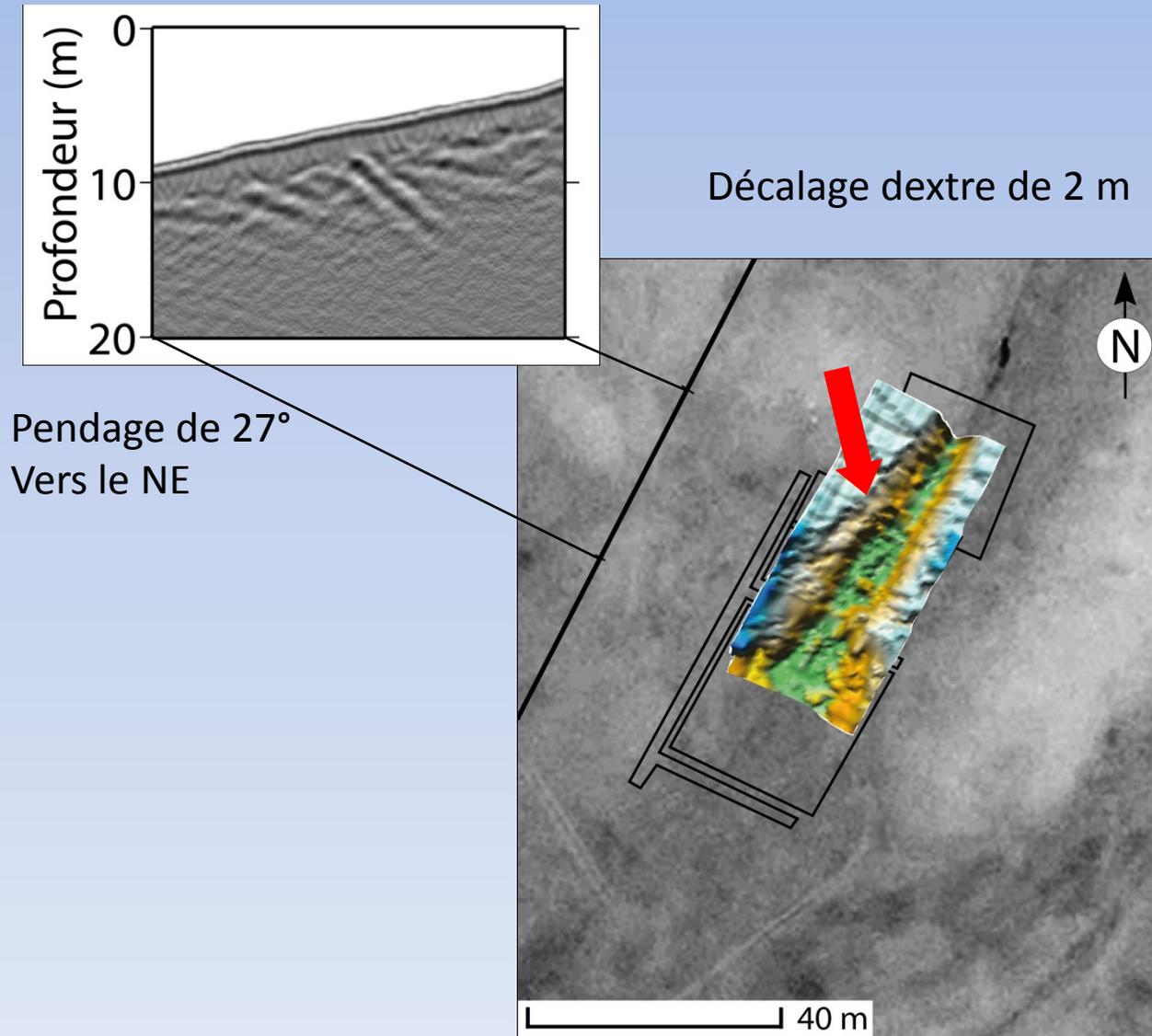
### 3 - En Mongolie – récapitulation



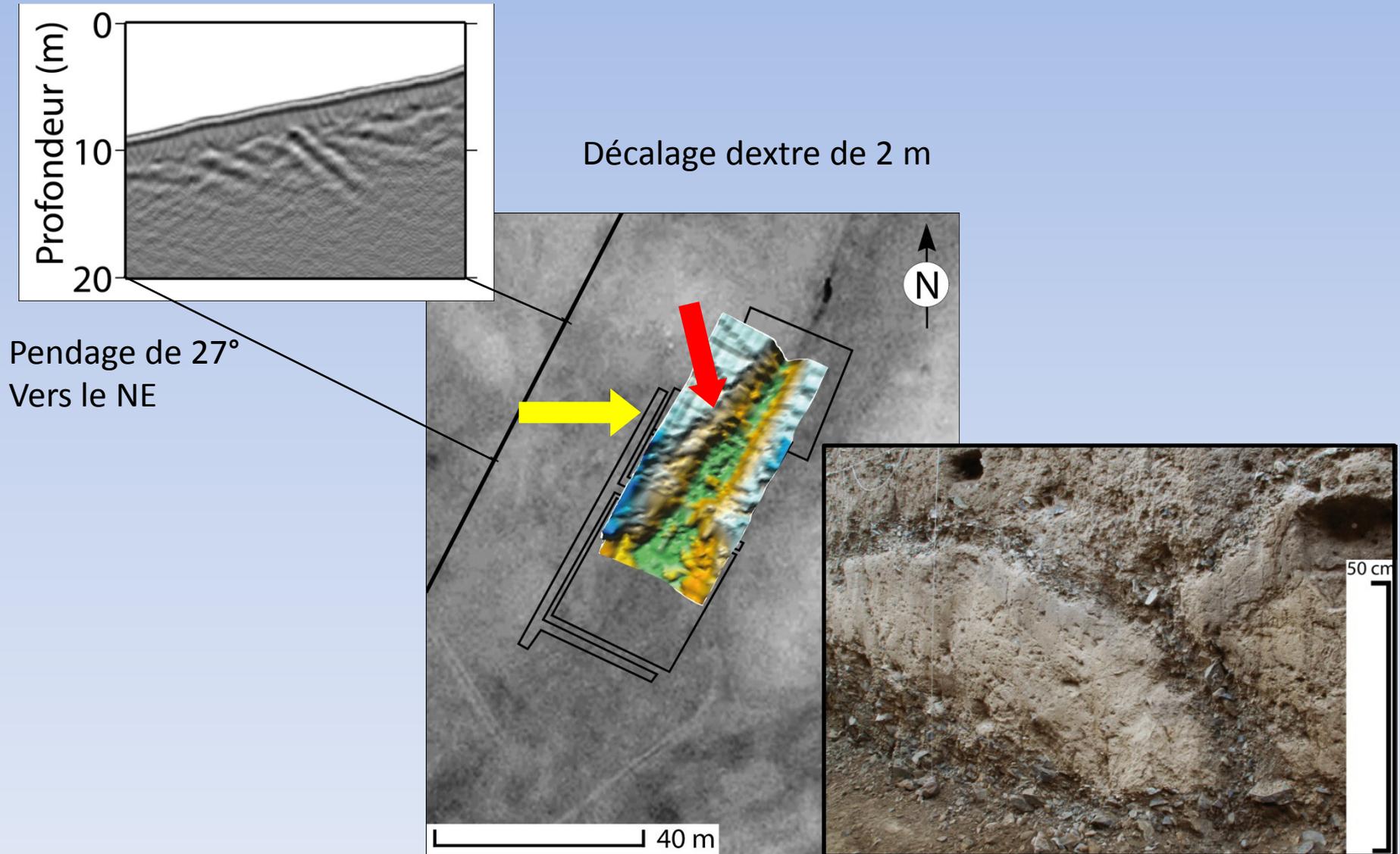
### 3 - En Mongolie – récapitulation



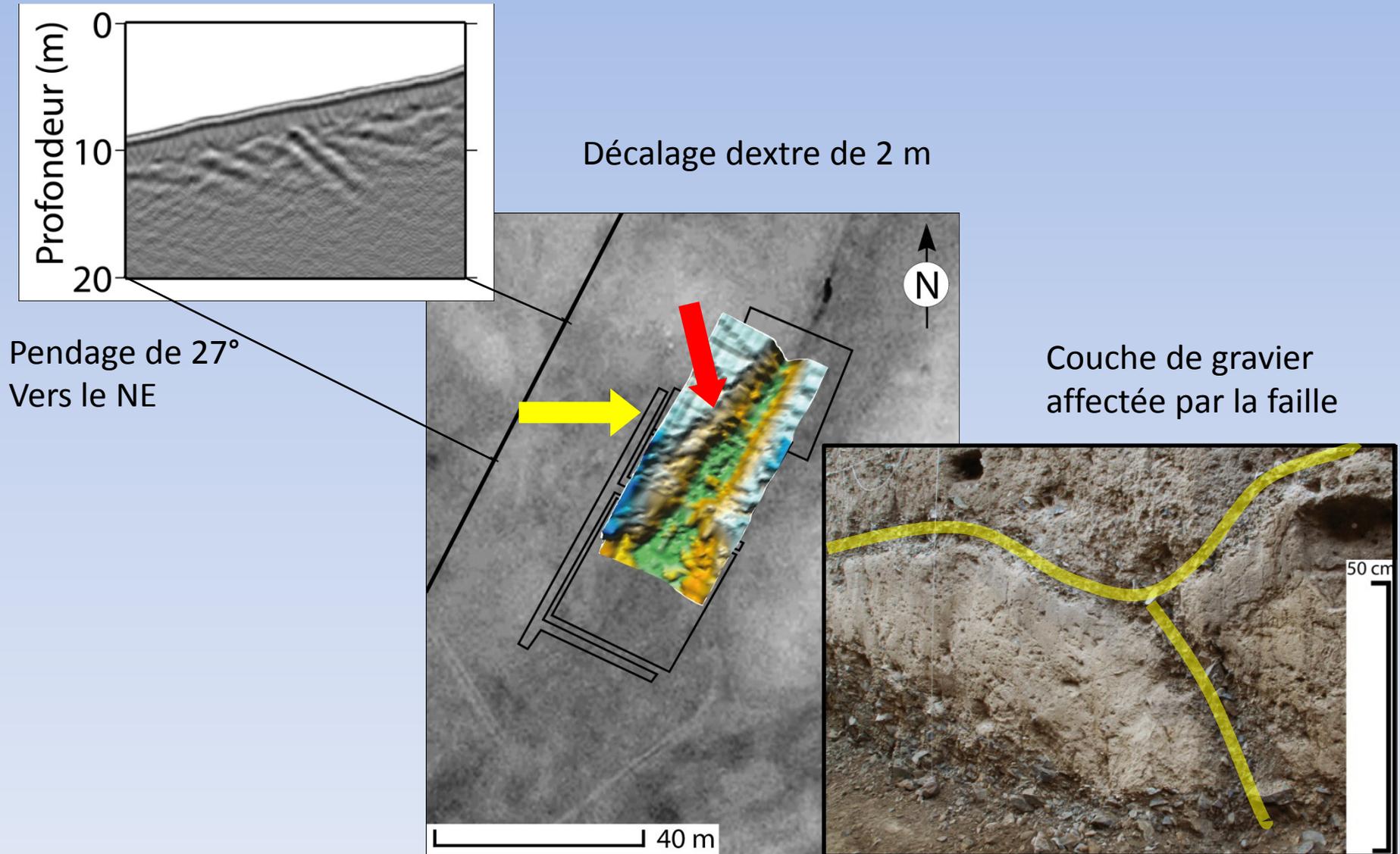
### 3 - En Mongolie – récapitulation



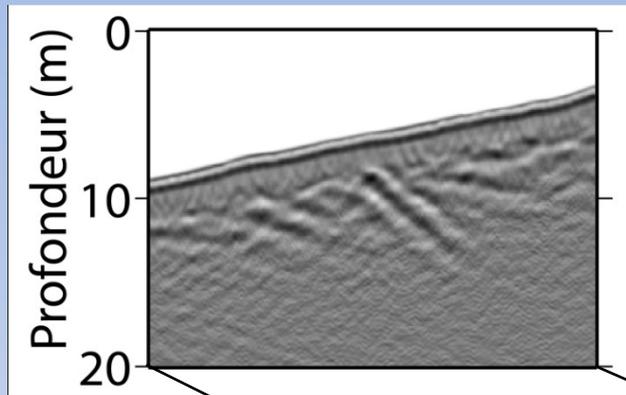
### 3 - En Mongolie – récapitulation



### 3 - En Mongolie – récapitulation

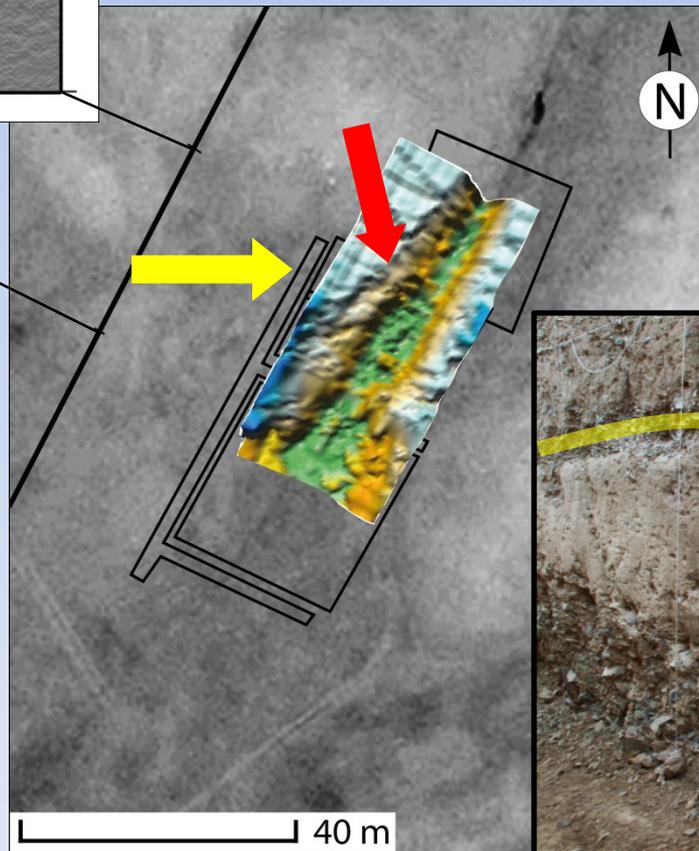


### 3 - En Mongolie – récapitulation

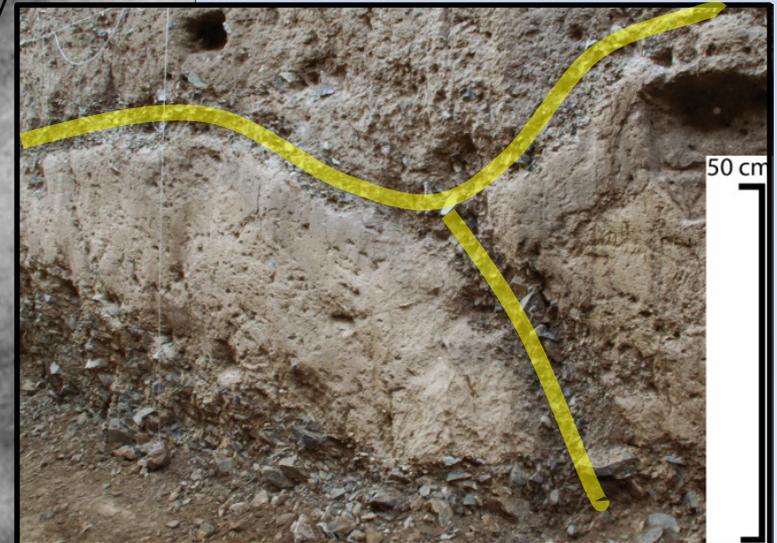
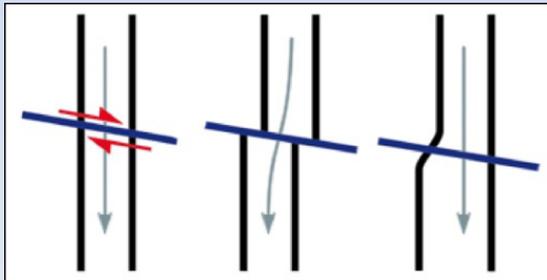


Décalage dextre de 2 m

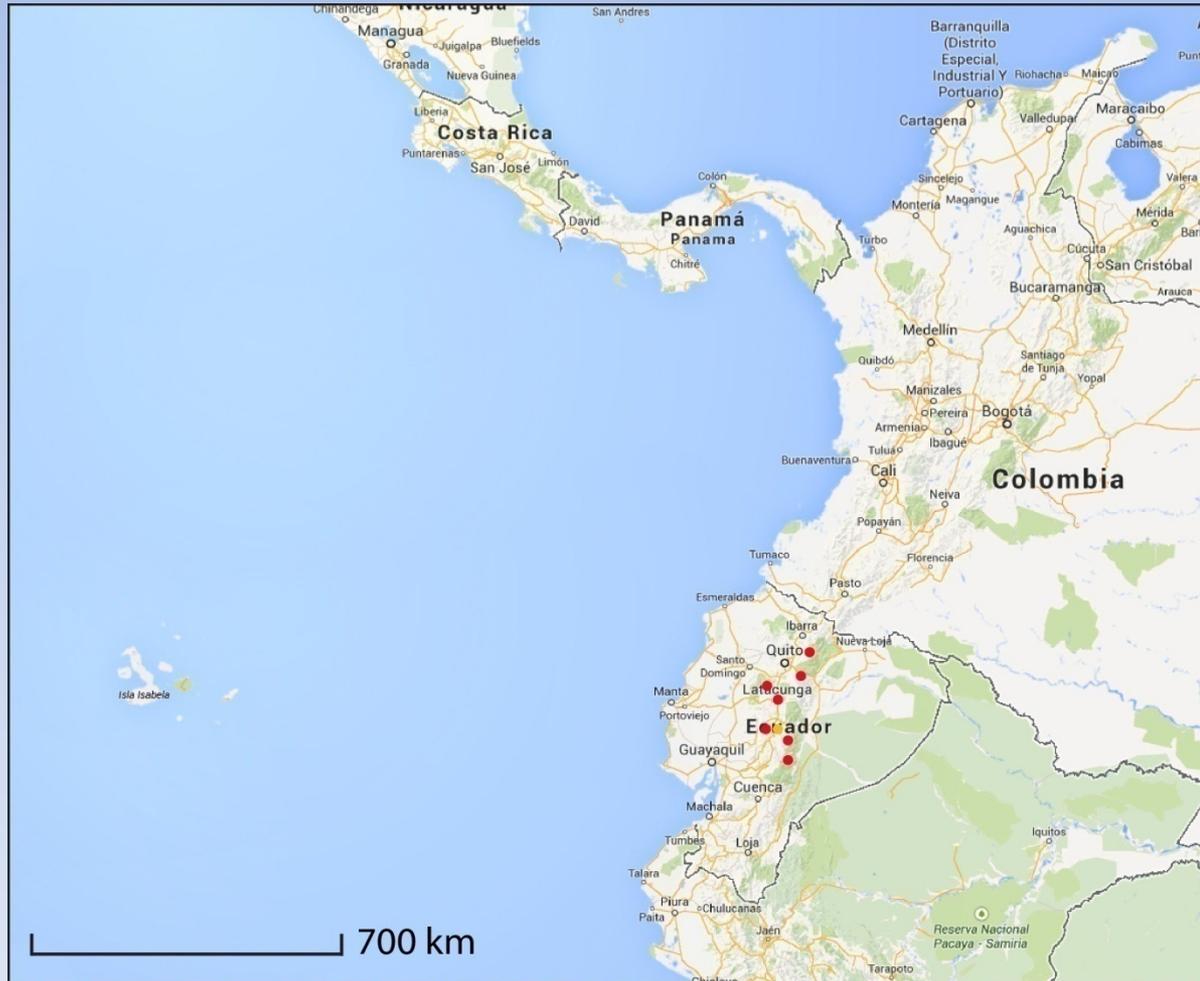
Pendage de  $27^\circ$   
Vers le NE



Couche de gravier affectée par la faille



## 4 - En Equateur – contexte



-Application du GPR sur des dépôts pyroclastiques

-Collaboration avec l'université Ludwig Maximilians, Munich



## 4 - En Equateur – contexte



-Volcan Tungurahua

-Début d'éruption : 1999

-En 2006, phase intense :  
donne lieu à des  
Pyroclastic Dense  
Currents (PDCs)

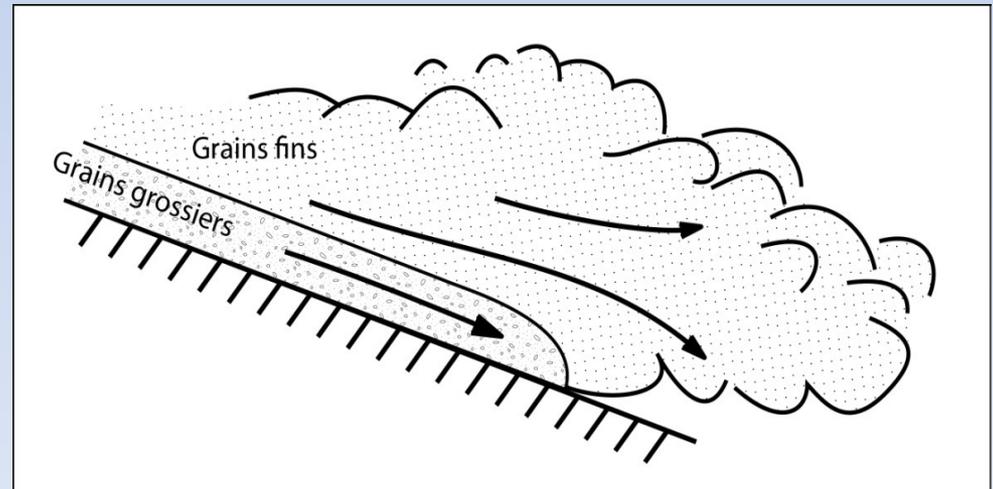
## 4 - En Equateur - Pyroclastic Dense Currents (PDCs)

Coulées pyroclastiques ou nuées ardentes



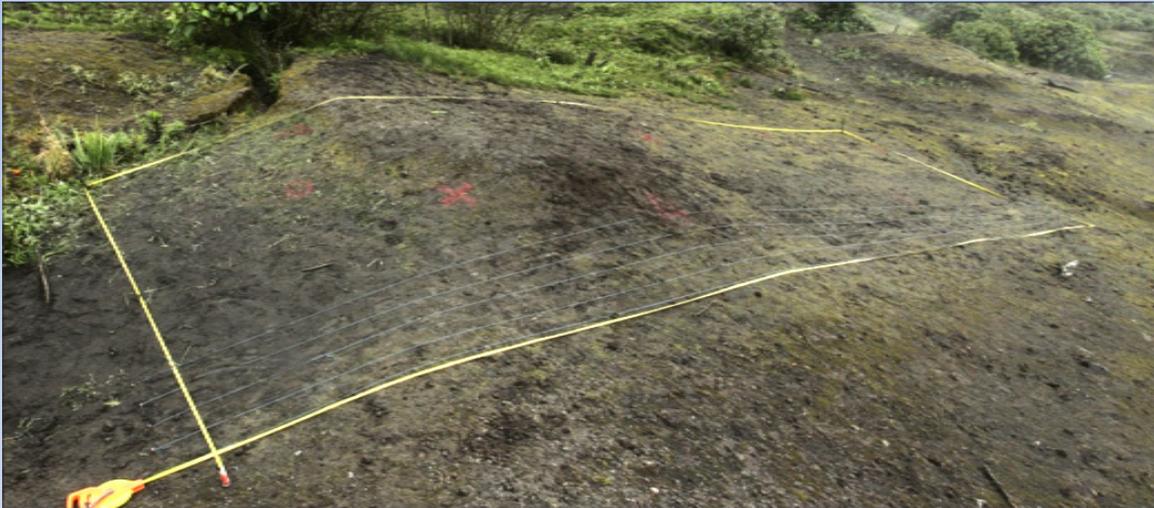
Deux phases :

- 1) Une dense proche du sol
- 2) Une légère qui surnage



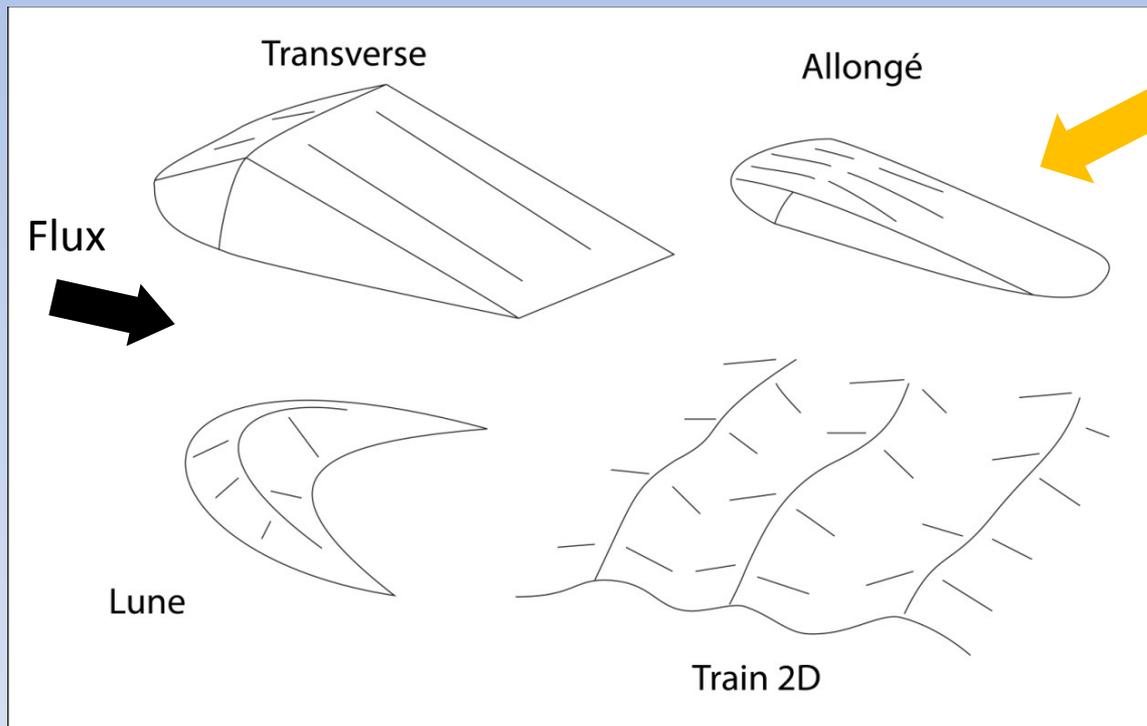
## 4 - En Equateur – Les PDCs du Tungurahua

Formation de dunes sur les dépôts



## 4 - En Equateur – Les PDCs du Tungurahua

### Différentes morphologies



Répertoriées  
Douillet, 2013

→ Transverse : crête  
perpendiculaire au flux

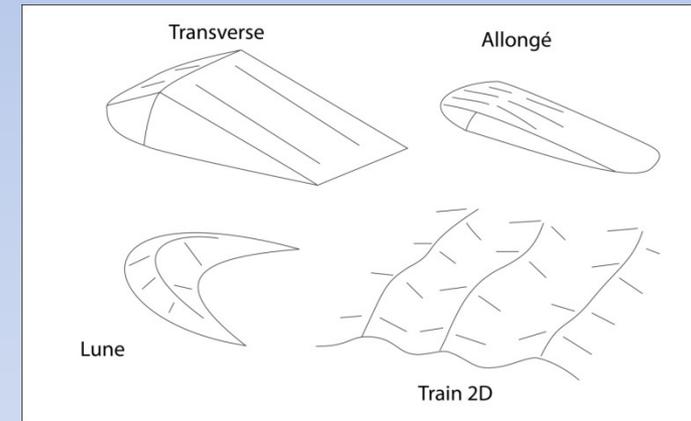
→ Allongé : dune plate et en  
longueur

→ Lune : crête en demi-lune

→ Train 2D : Succession de dunes

## 4 - En Equateur – Les PDCs du Tungurahua

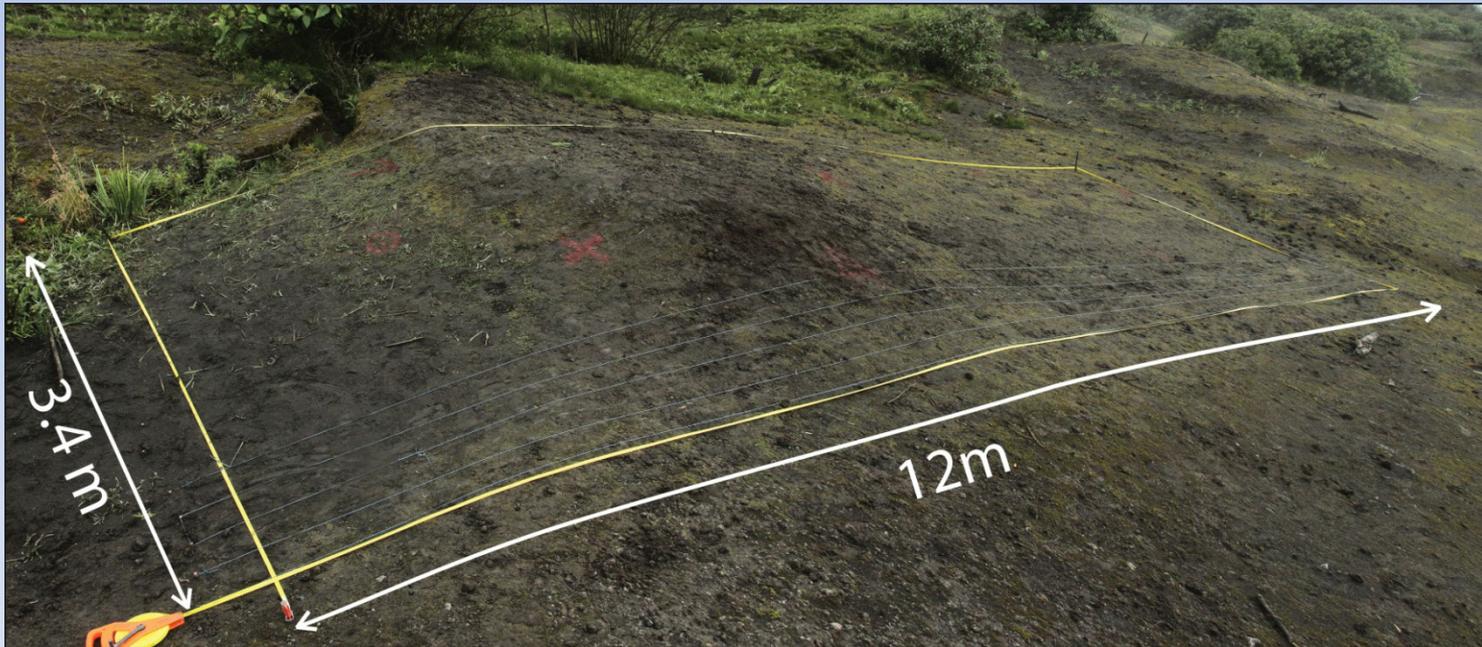
Ouverture des dunes pour observer les structures sédimentaires → travail 2D



## 4 - En Equateur – Méthodologie

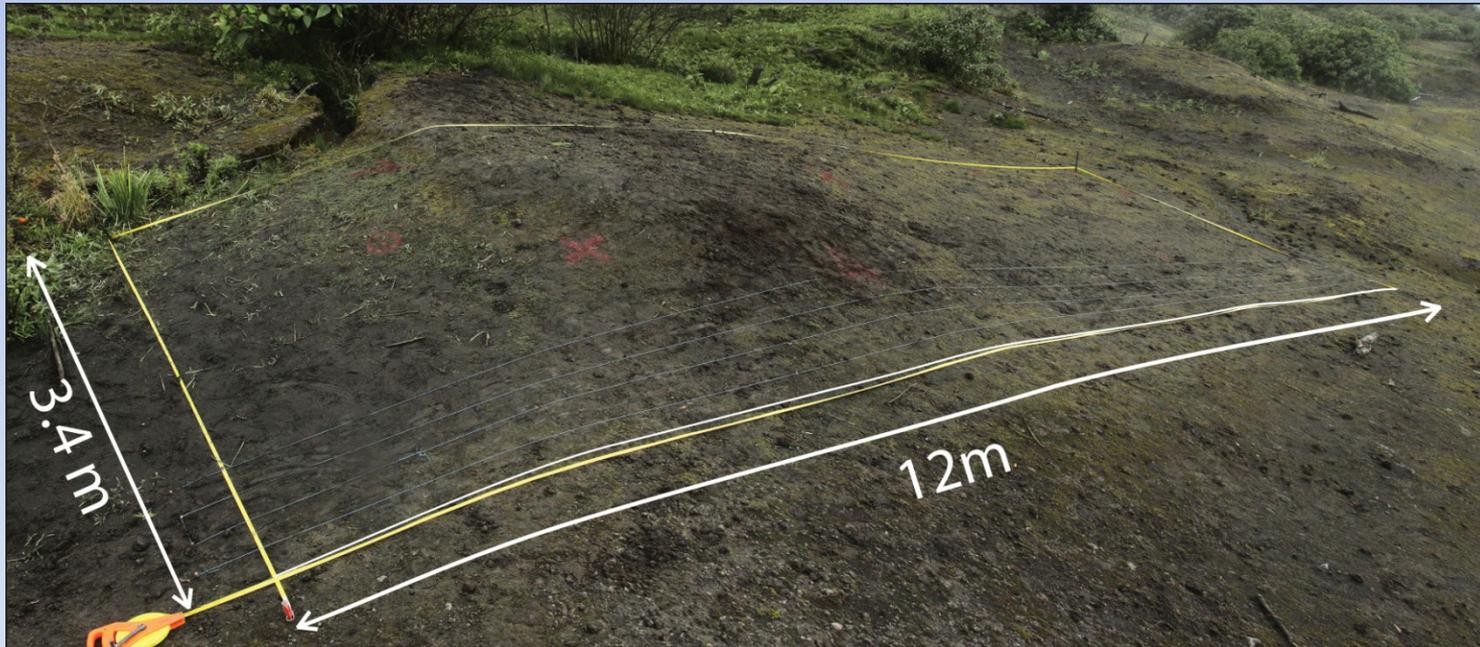
Méthodologie pseudo 3D

Observation en 3D



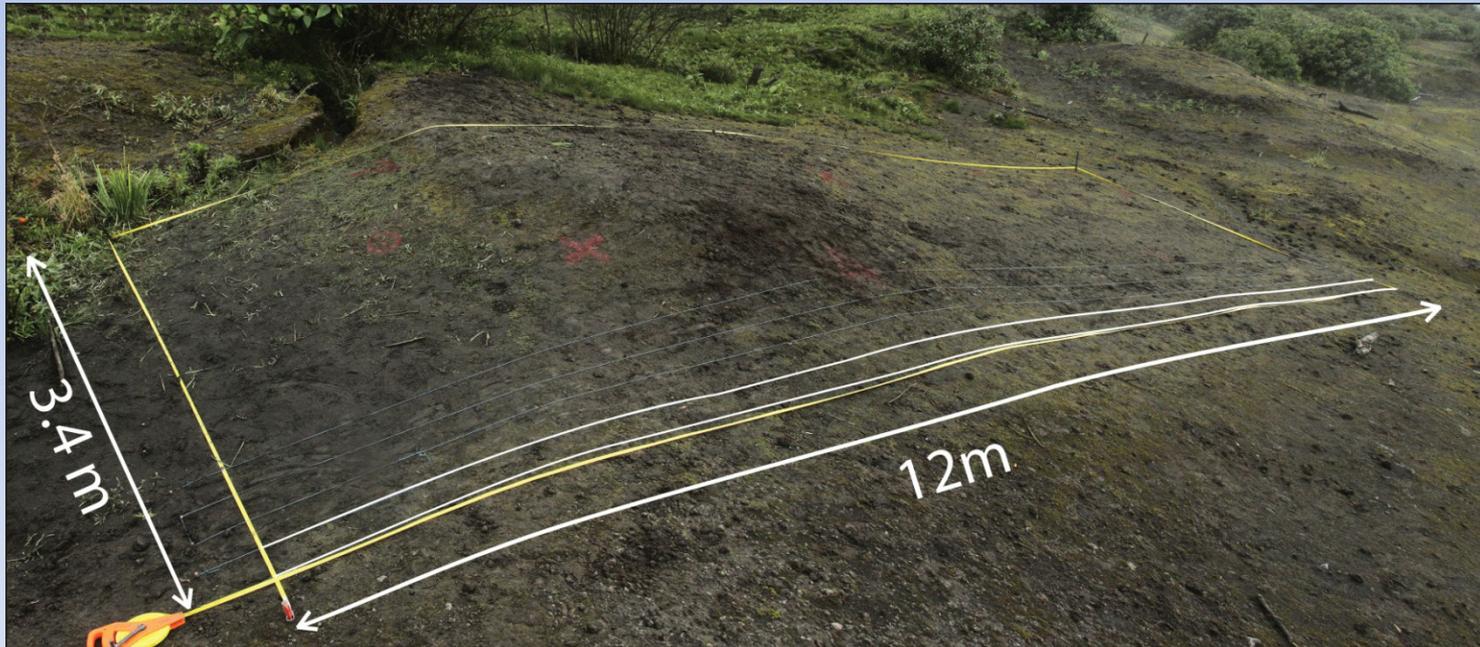
## 4 - En Equateur – Méthodologie

Approche pseudo 3D : Profils parallèles espacés de 10 cm



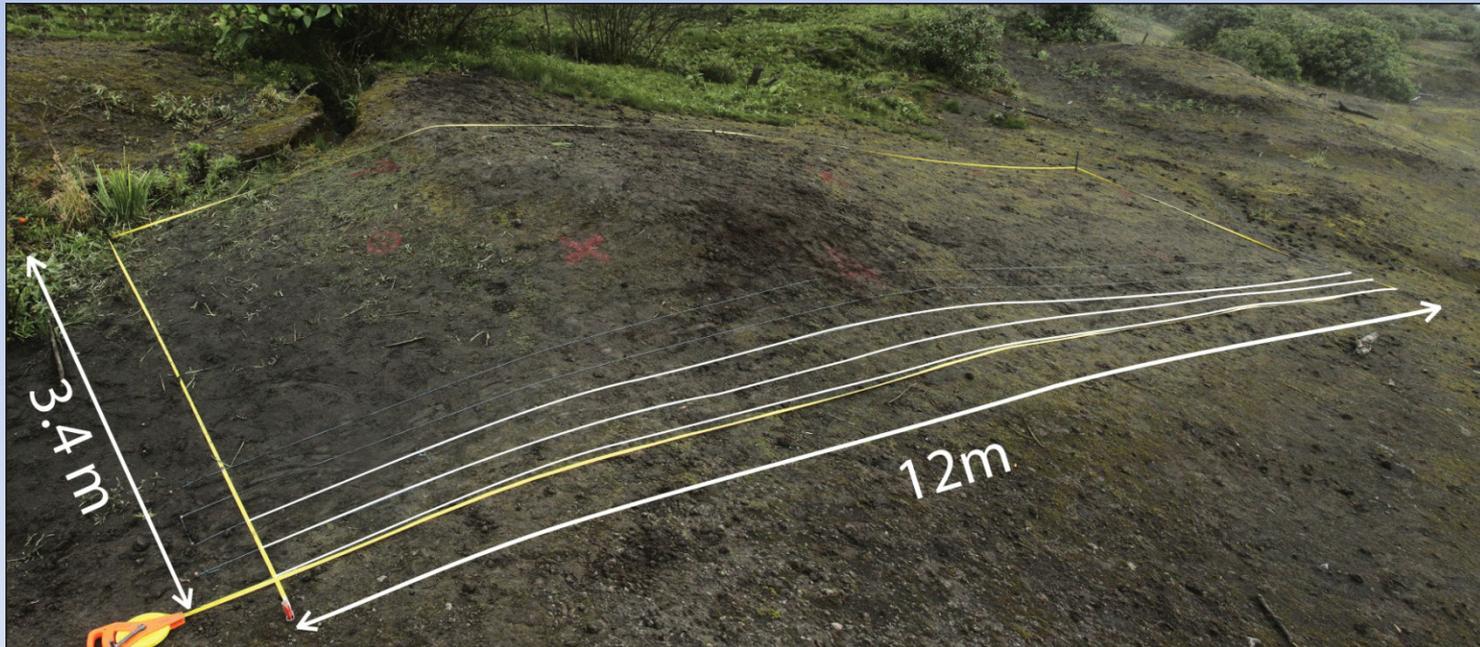
## 4 - En Equateur – Méthodologie

Approche pseudo 3D : Profils parallèles espacés de 10 cm



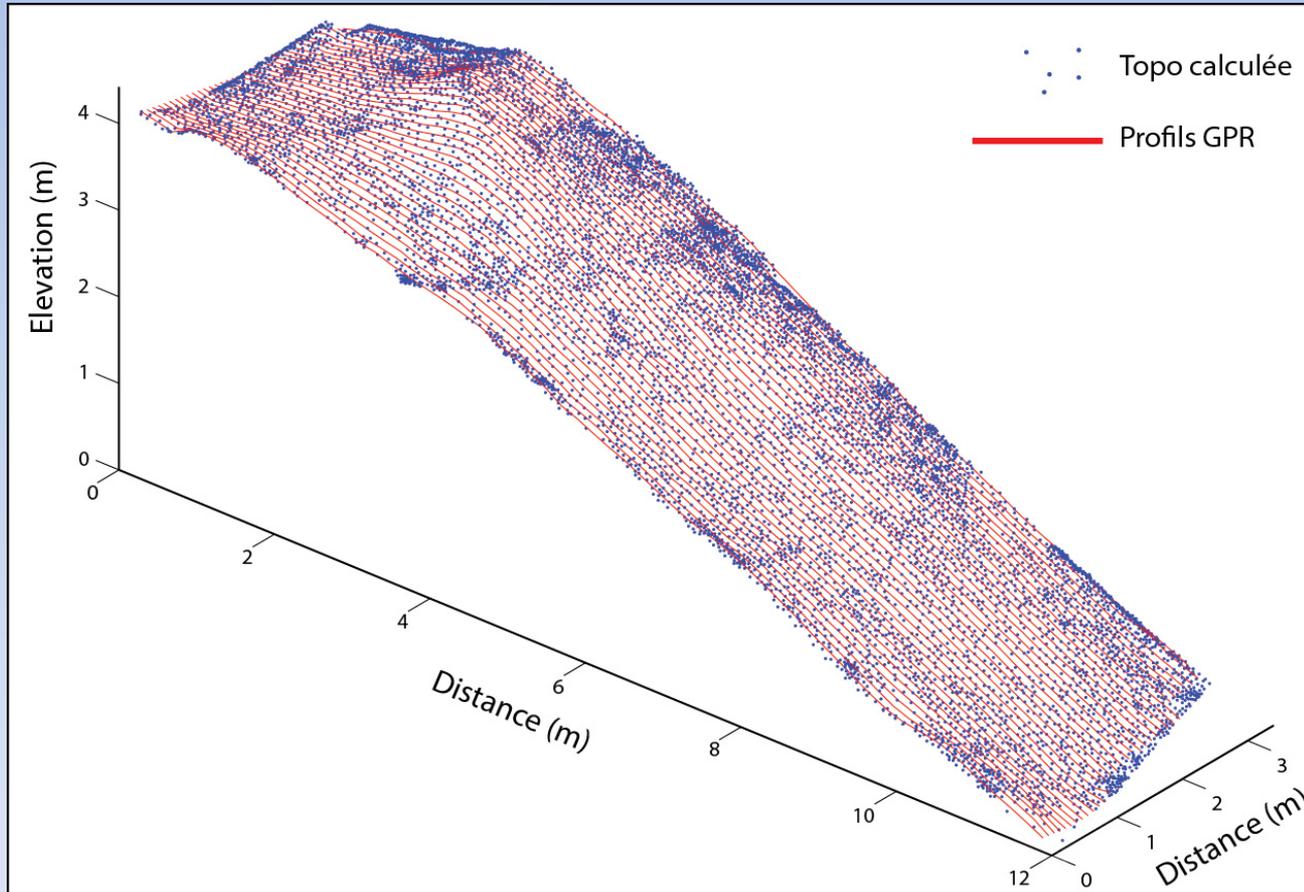
## 4 - En Equateur – Méthodologie

Approche pseudo 3D : Profils parallèles espacés de 10 cm



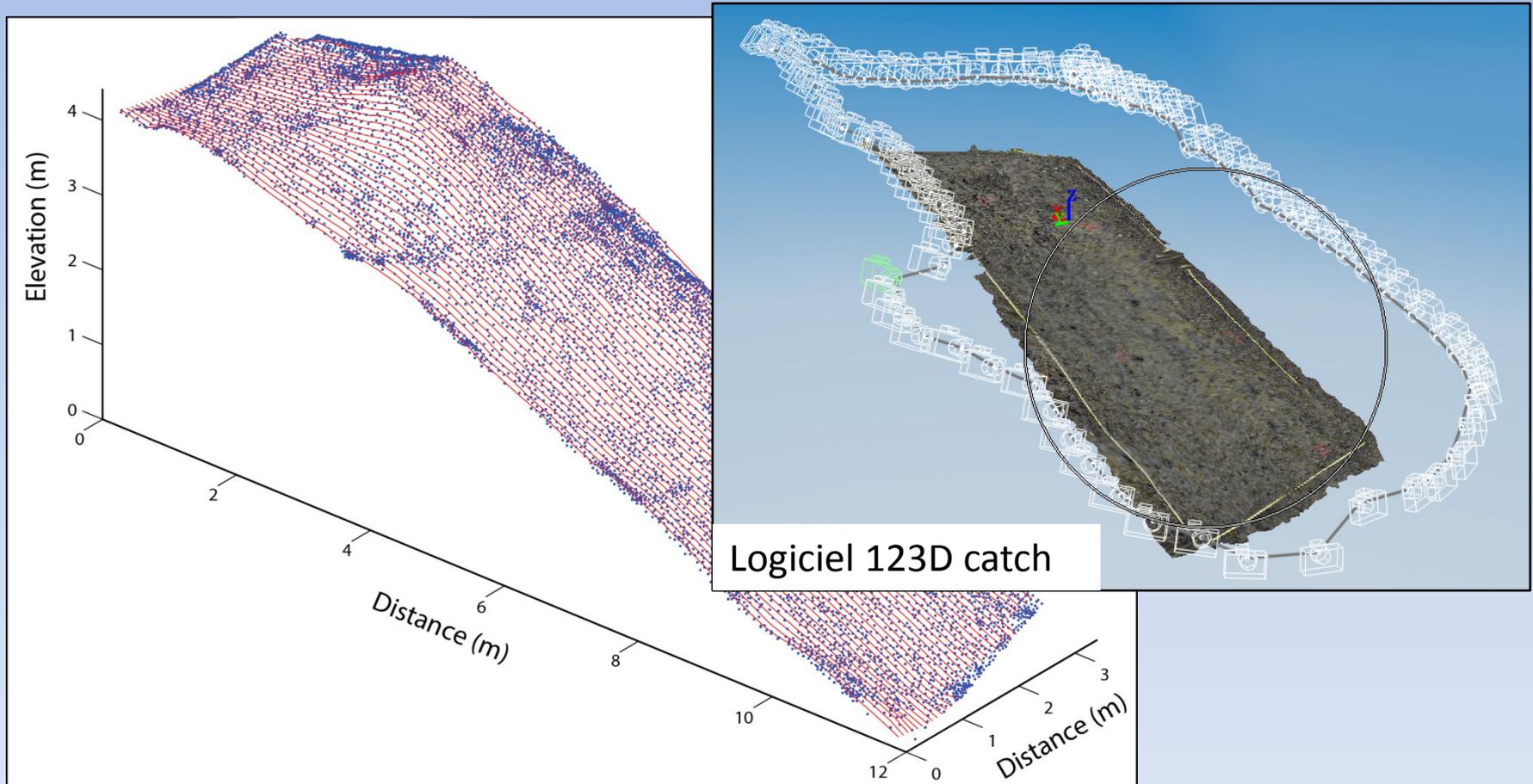
# 4 - En Equateur – Méthodologie

Topographie mesurée par photogrammétrie

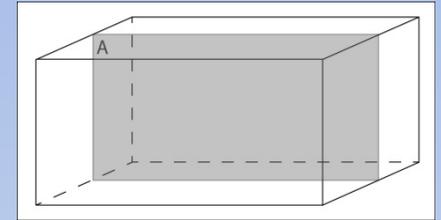
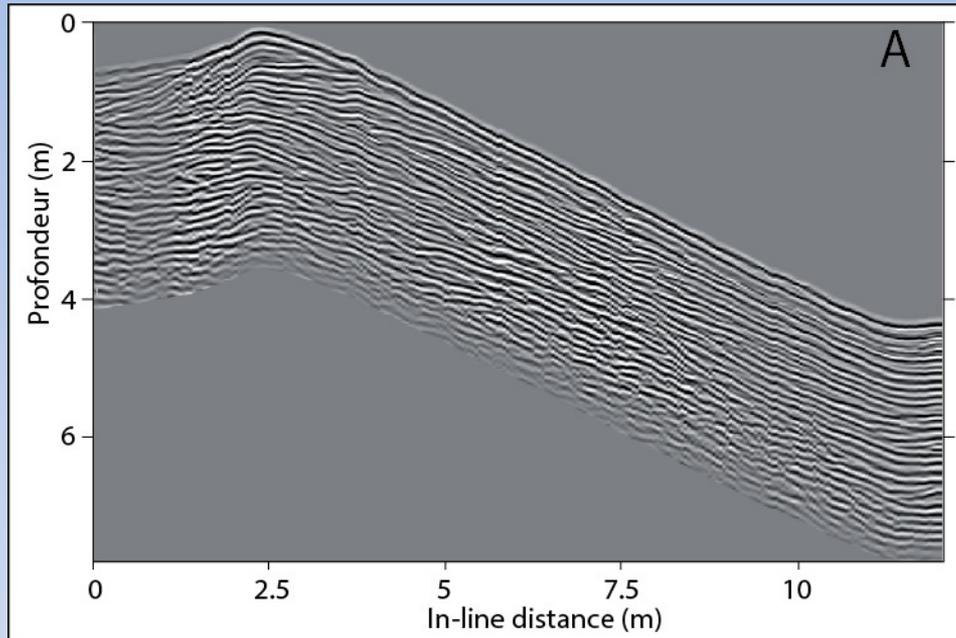


# 4 - En Equateur – Méthodologie

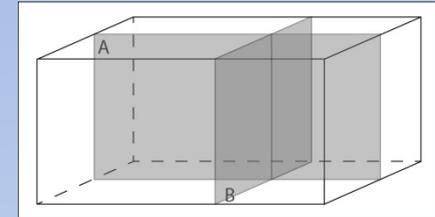
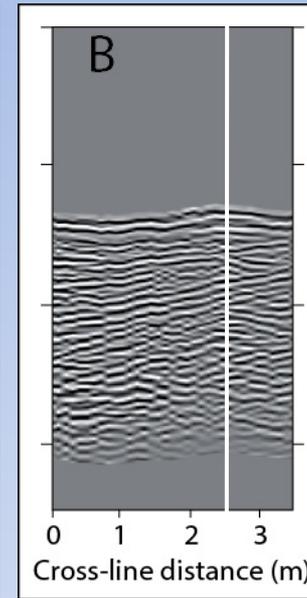
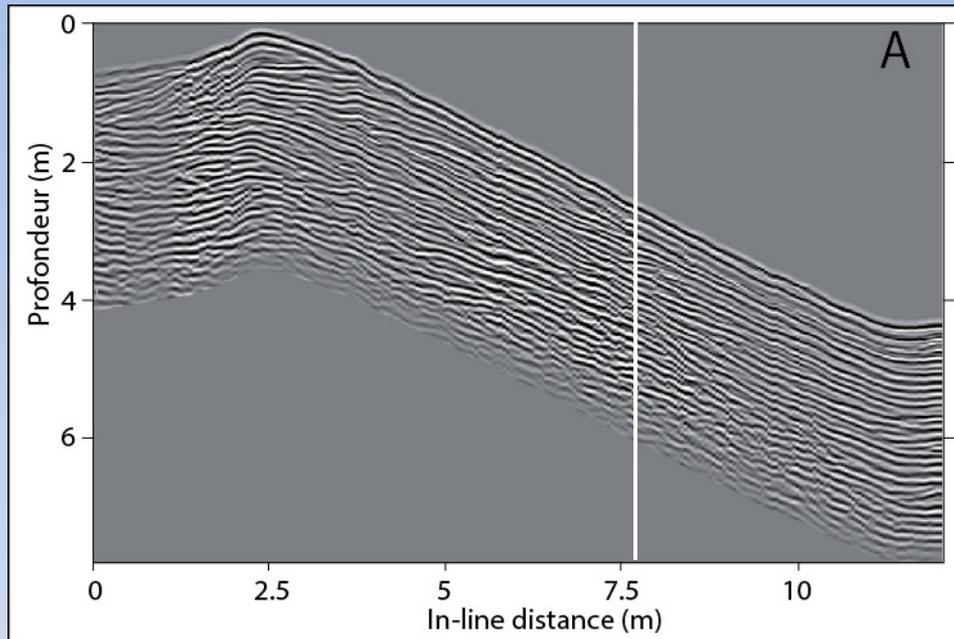
Topographie mesurée par photogrammétrie



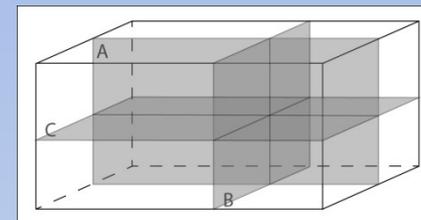
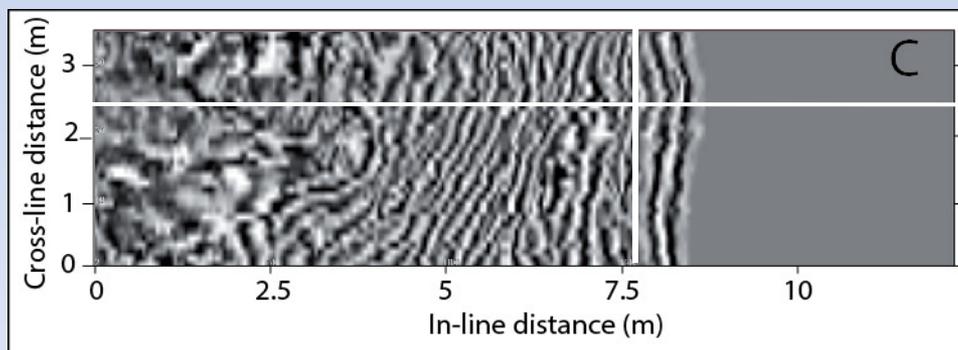
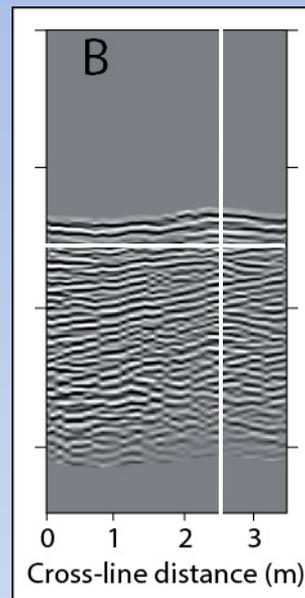
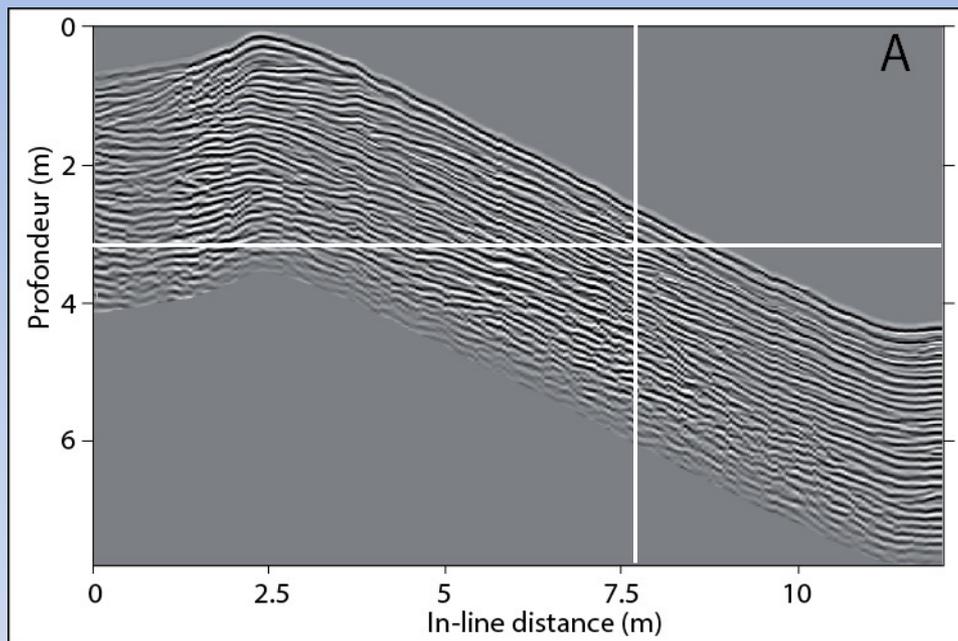
## 4 - En Equateur – Résultats



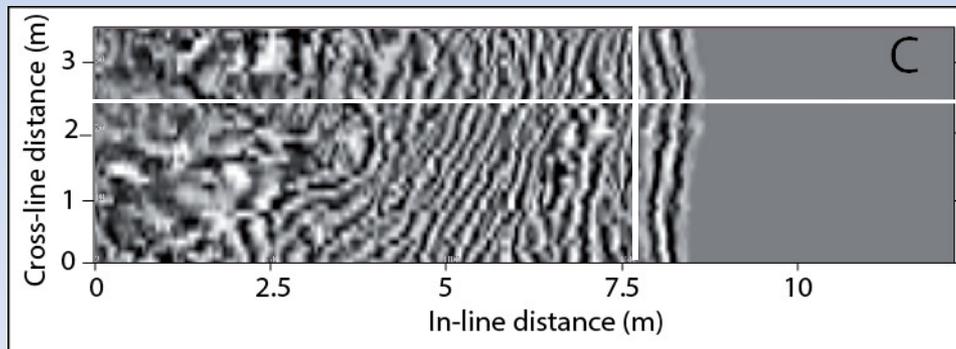
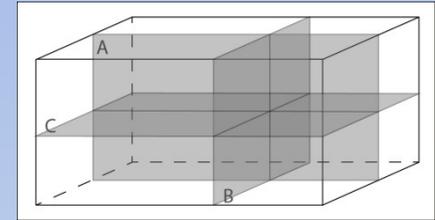
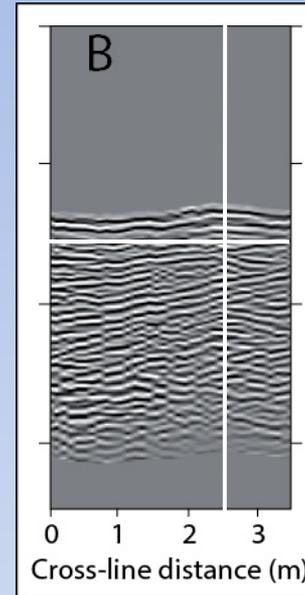
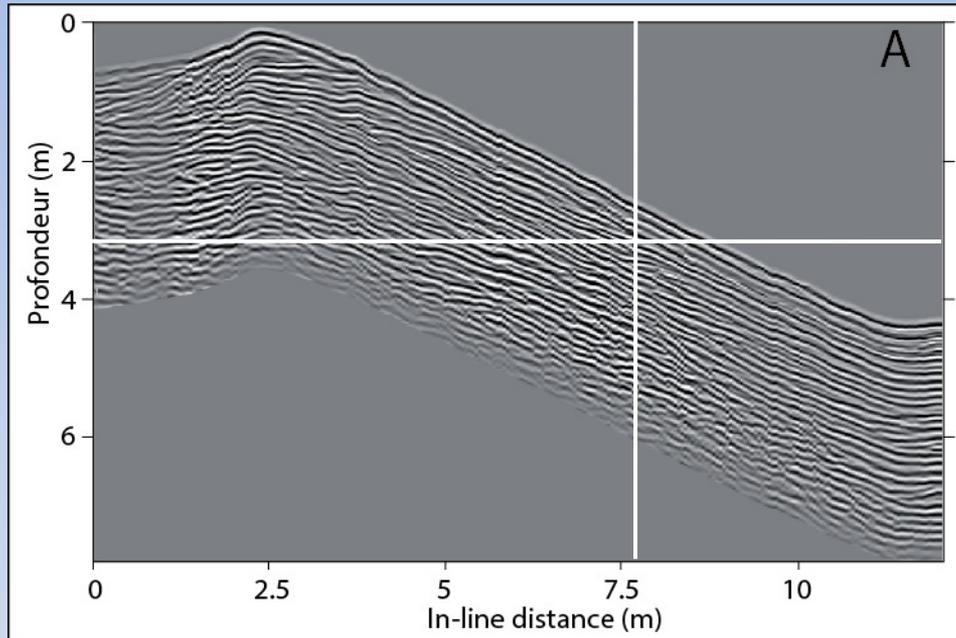
## 4 - En Equateur – Résultats



## 4 - En Equateur – Résultats

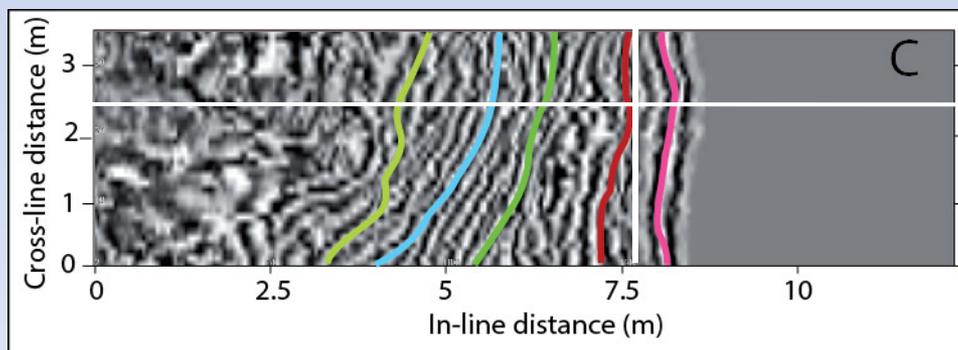
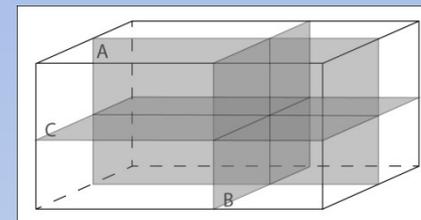
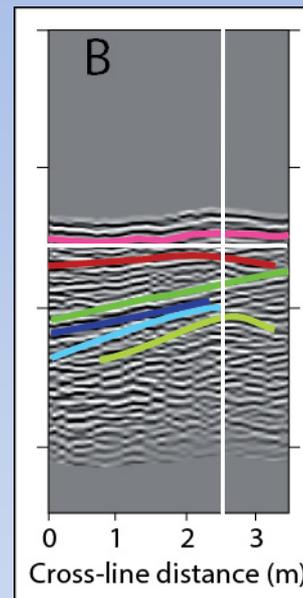
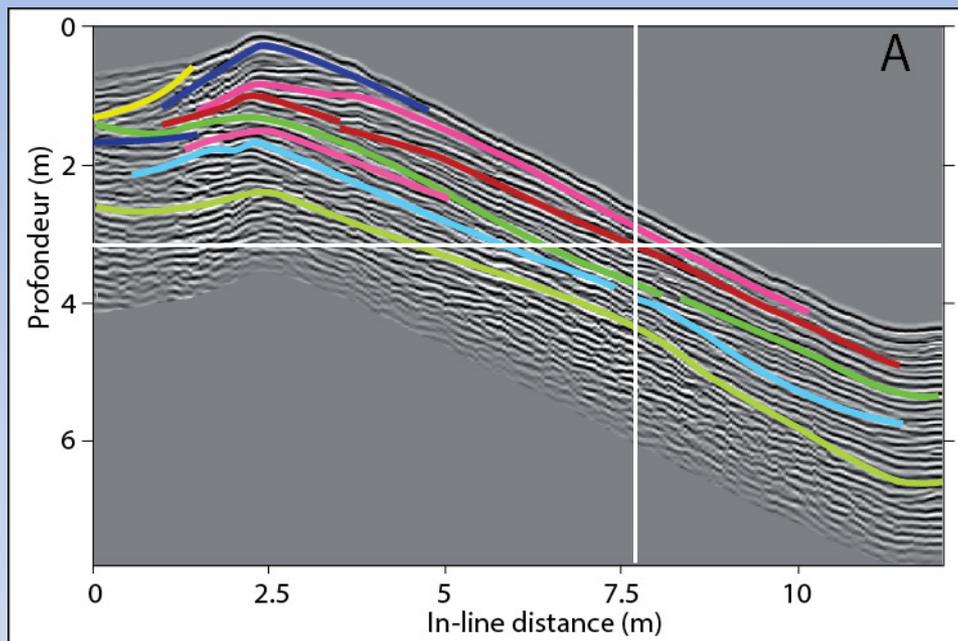


## 4 - En Equateur – Résultats



Interprétation :  
 Recherche des unités sédimentaires  
 Pointage des limites d'unités

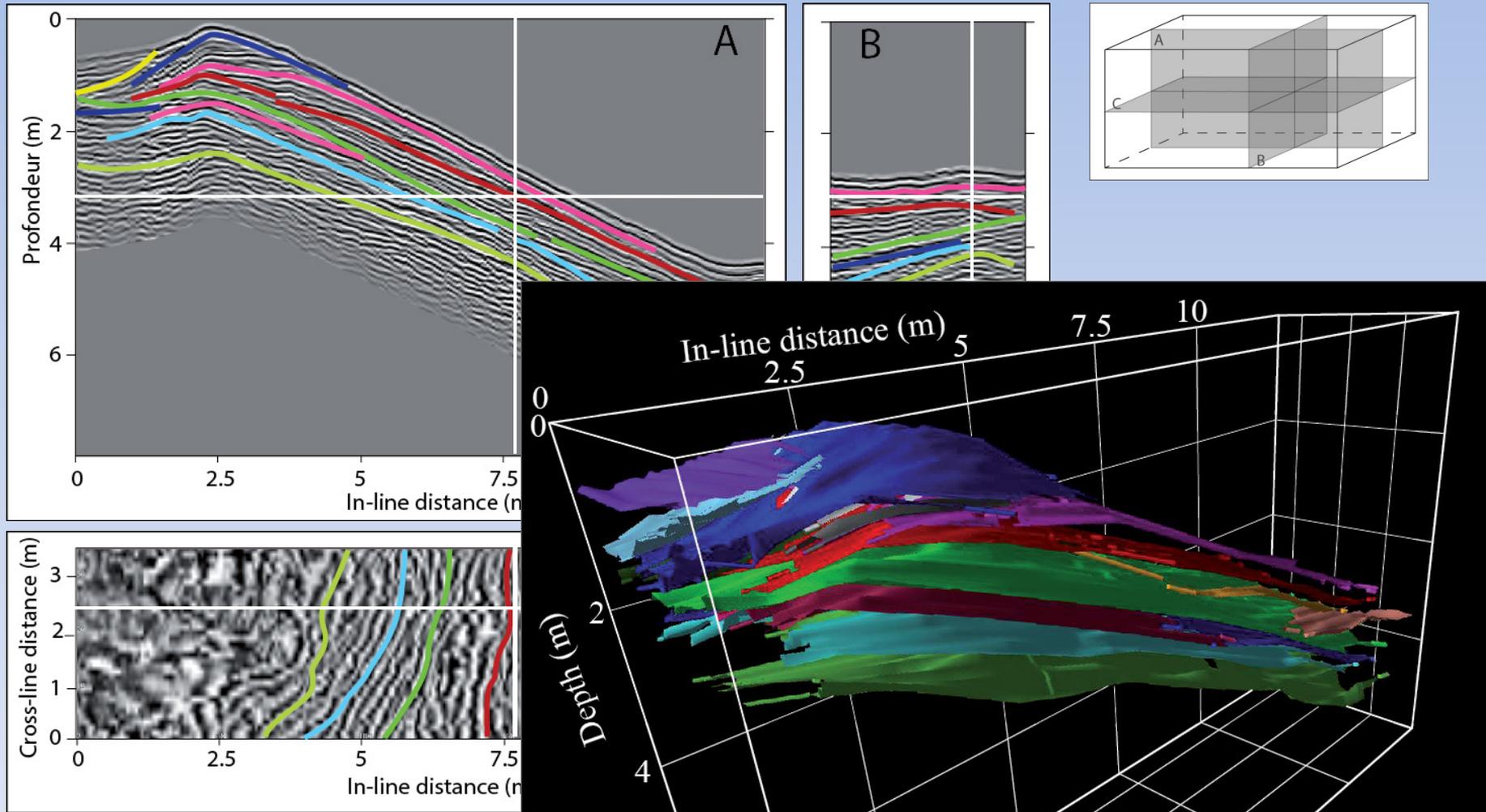
# 4 - En Equateur – Résultats



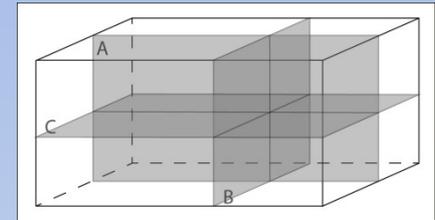
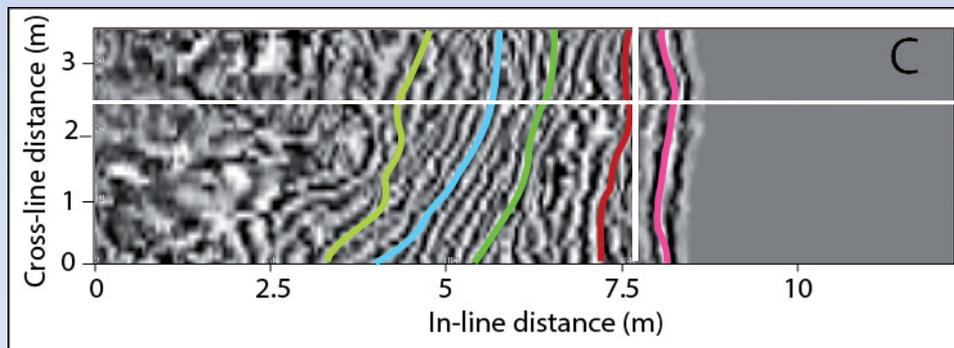
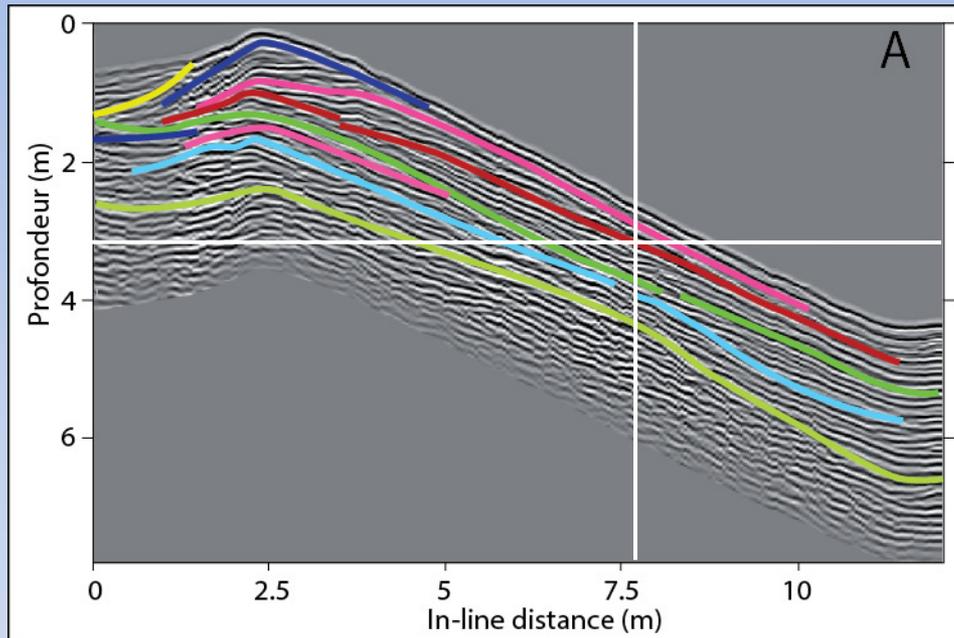
Marked structural boundaries

- L1
- L2
- L3
- L3b
- L4
- L5
- L6
- L7
- L8

## 4 - En Equateur – Résultats



## 4 - En Equateur – Résultats



Interprétations :

Symétrie de surface non retrouvée  
en profondeur

Existence d'une dune en profondeur

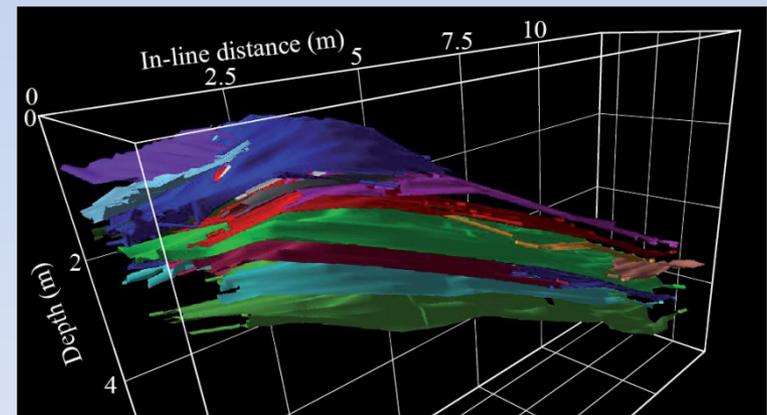
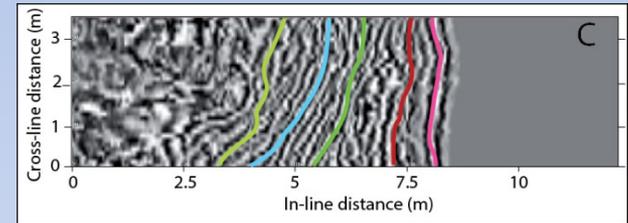
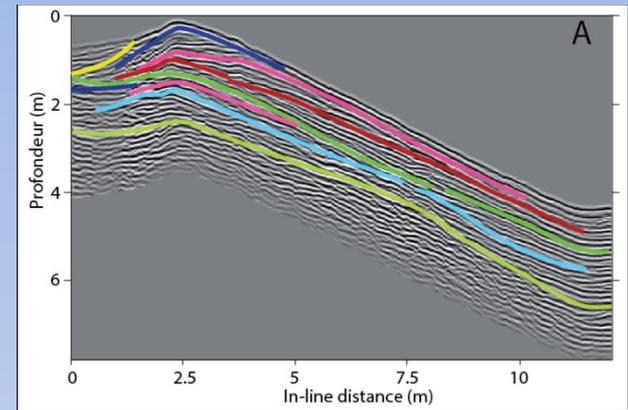
Plusieurs phases de construction

## 4 - En Equateur – récapitulation

→ Géoradar nous donne accès aux structures en 3D

→ Accès à des profondeurs plus importante qu'avec des coupes

→ Permet de reconstruire l'histoire de la formation des dunes



## 4 - Conclusion

→Géoradar efficace dans différents contextes

→En Mongolie :

- Géométrie de la faille
- Amplitude de déplacement

→En Equateur :

- Géométrie 3D
- Observation à des profondeurs élevées

→Méthodologie:

- Importance du travail multi-fréquentiel
- Importance du travail pluri-disciplinaire

Merci de votre attention