



CONTRÔLE NON DESTRUCTIF DE FONDATIONS DE PYLÔNES ÉLECTRIQUES



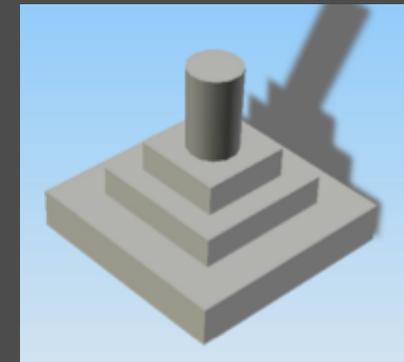
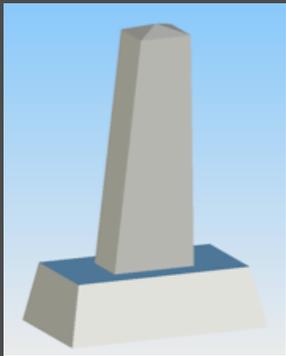
*Denis Vautrin (J. Idier)
Aurélien Roques (J. Mars, J. Virieux)*

PLAN

1. Cadre
 2. Modélisation
 3. Inversion
- Perspectives

1. Cadre

But du projet EDF-RTE



...

→ Caractérisation géométrique de fondations de pylônes THT

Démarches envisagées initialement → impact echo, GPR

Démarche retenue → Imagerie sismique

1. Cadre

L'imagerie sismique

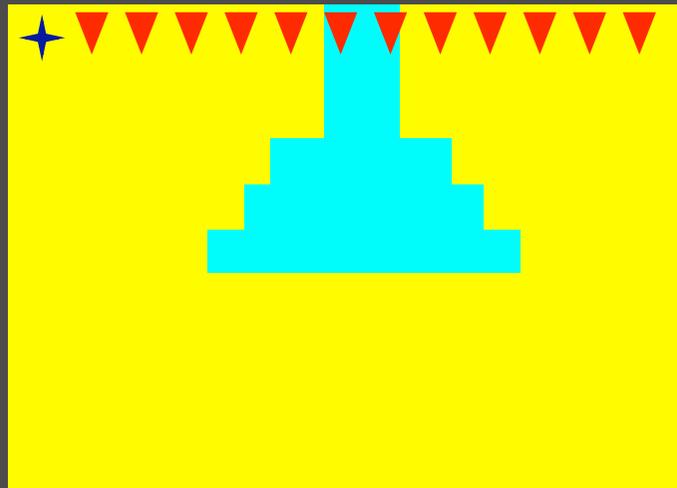
Propriétés du milieu

$$v_p(r)$$

$$v_s(r)$$

$$\rho(r)$$

...



SOL

$$v_p = 300 \text{ m/s}$$

$$v_s = 150 \text{ m/s}$$

...

BETON

$$v_p = 4000 \text{ m/s}$$

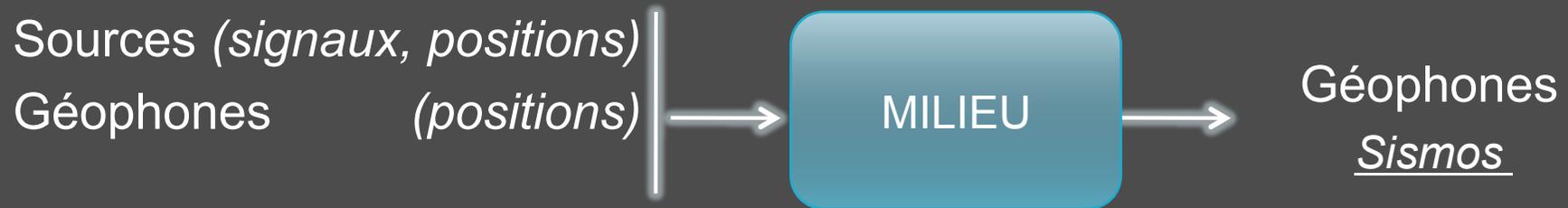
$$v_s = 2200 \text{ m/s}$$

...

1. Cadre

L'imagerie sismique

- Approche Physique :



- Approche Numérique :

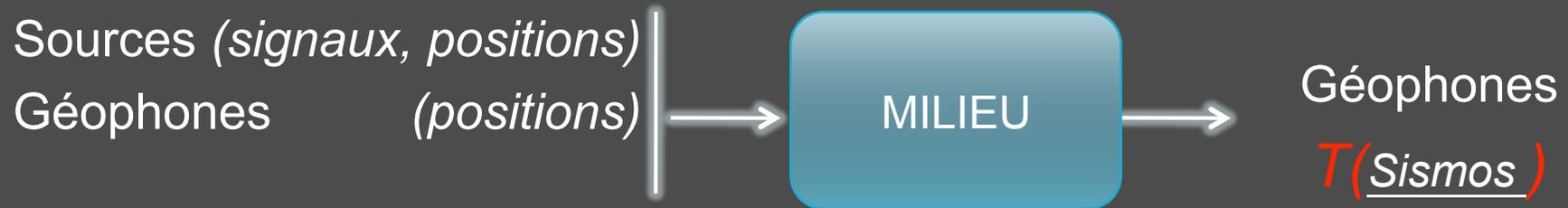


PROBLEME DIRECT

1. Cadre

L'imagerie sismique

- Approche Physique :



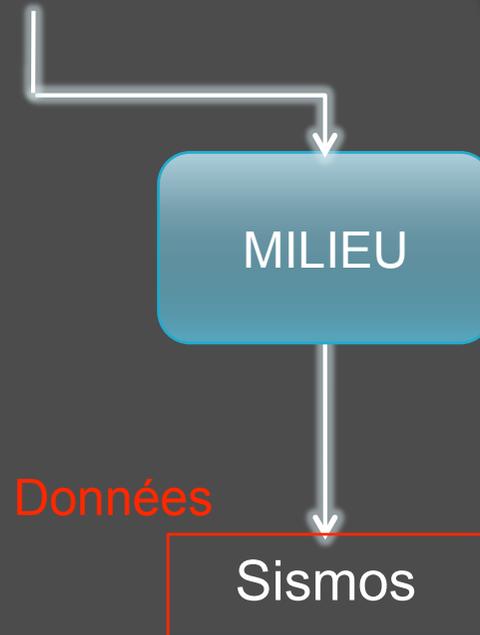
- Approche Numérique :



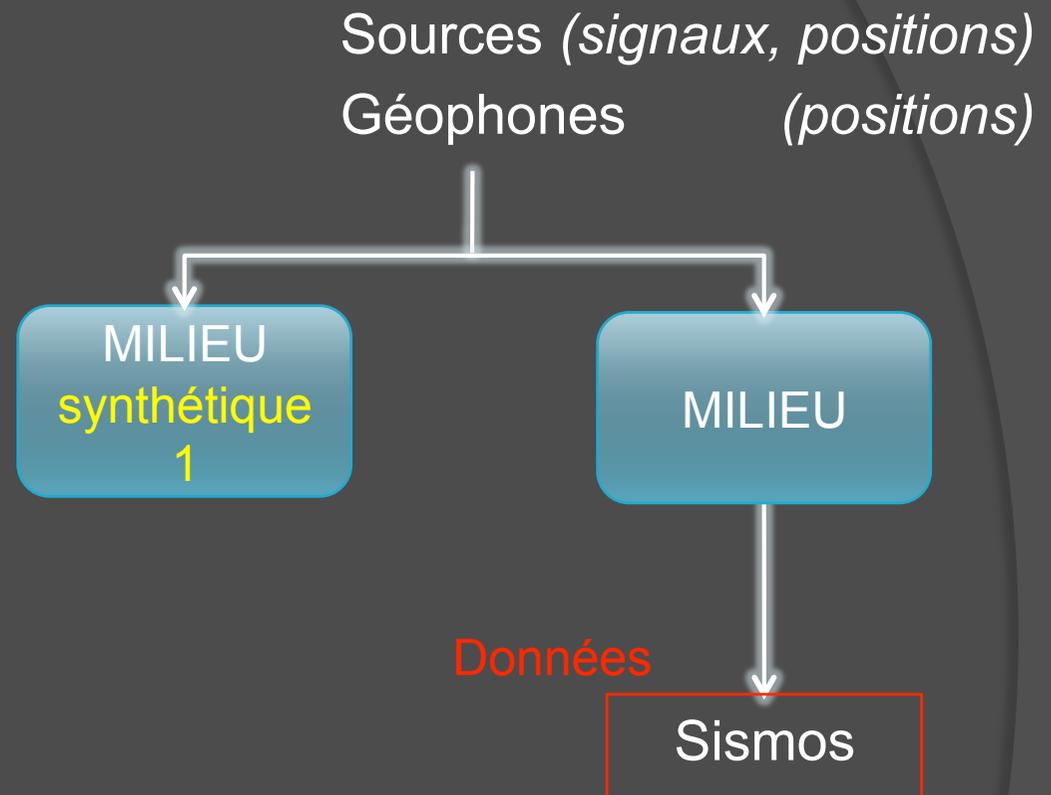
PROBLEME DIRECT

1. Cadre

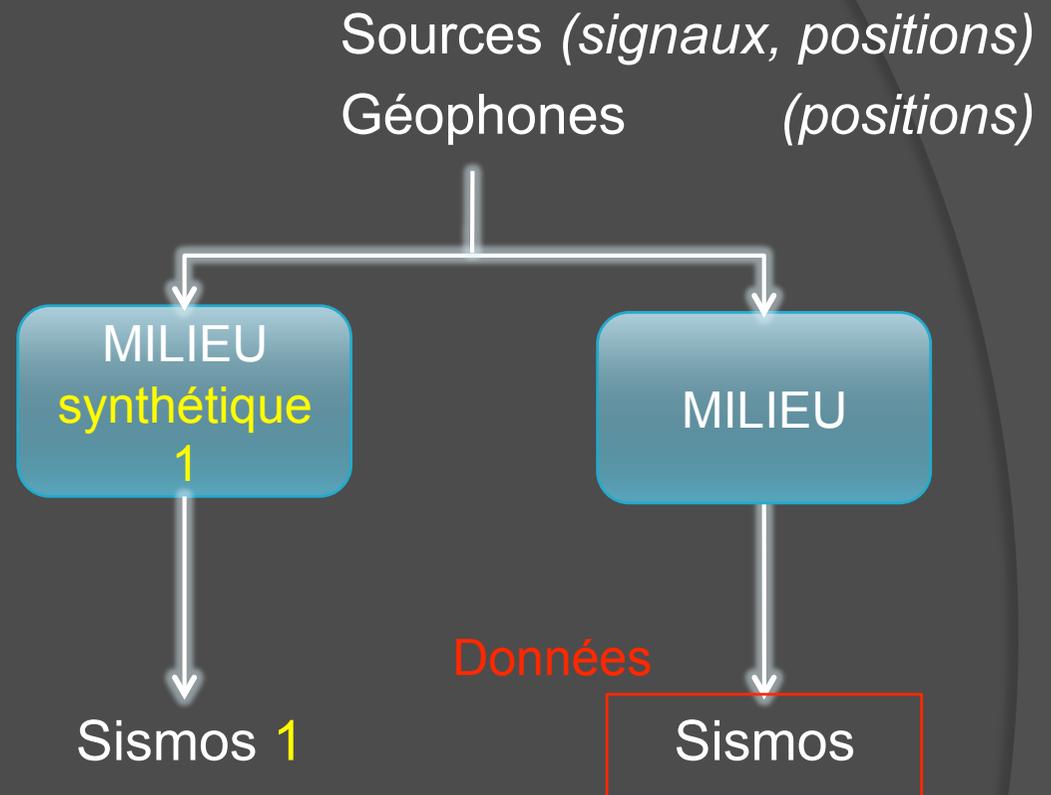
Sources (*signaux, positions*)
Géophones (*positions*)



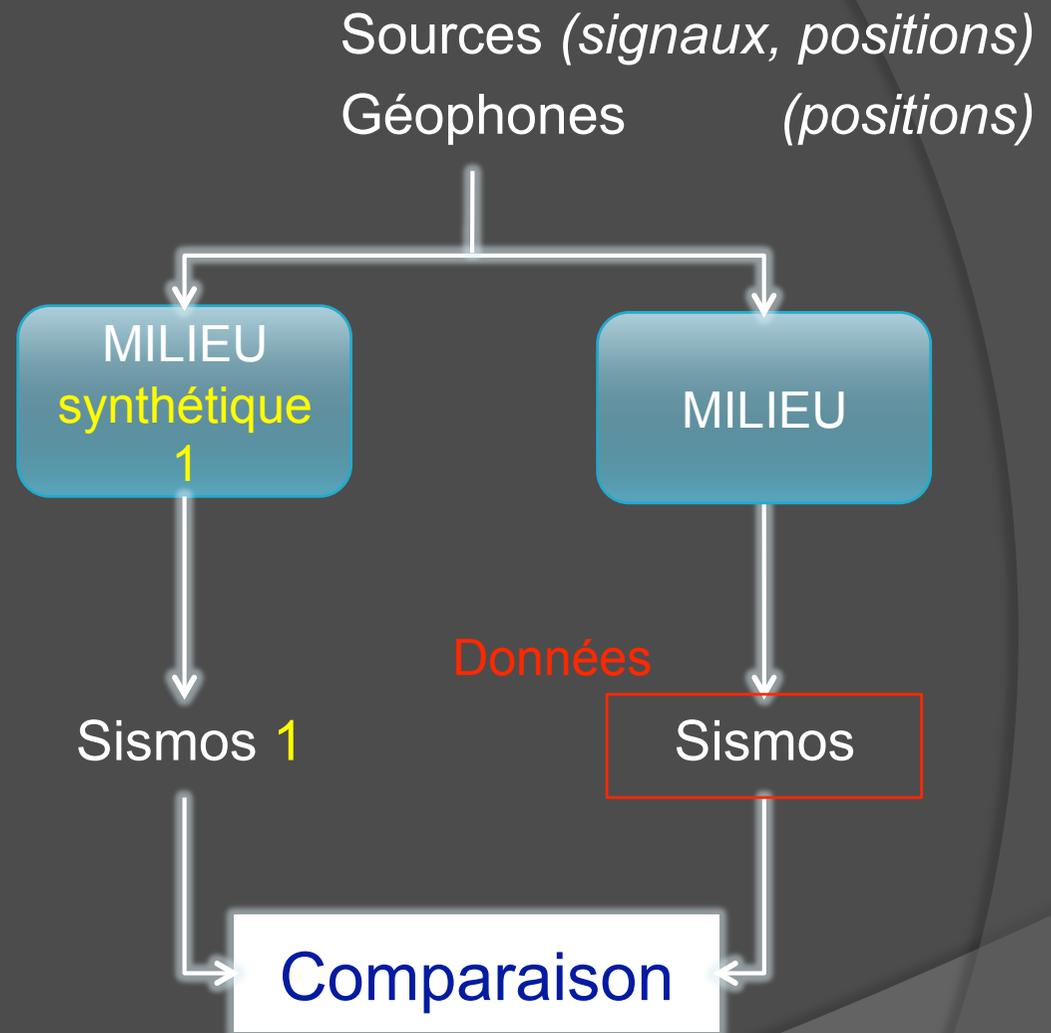
1. Cadre



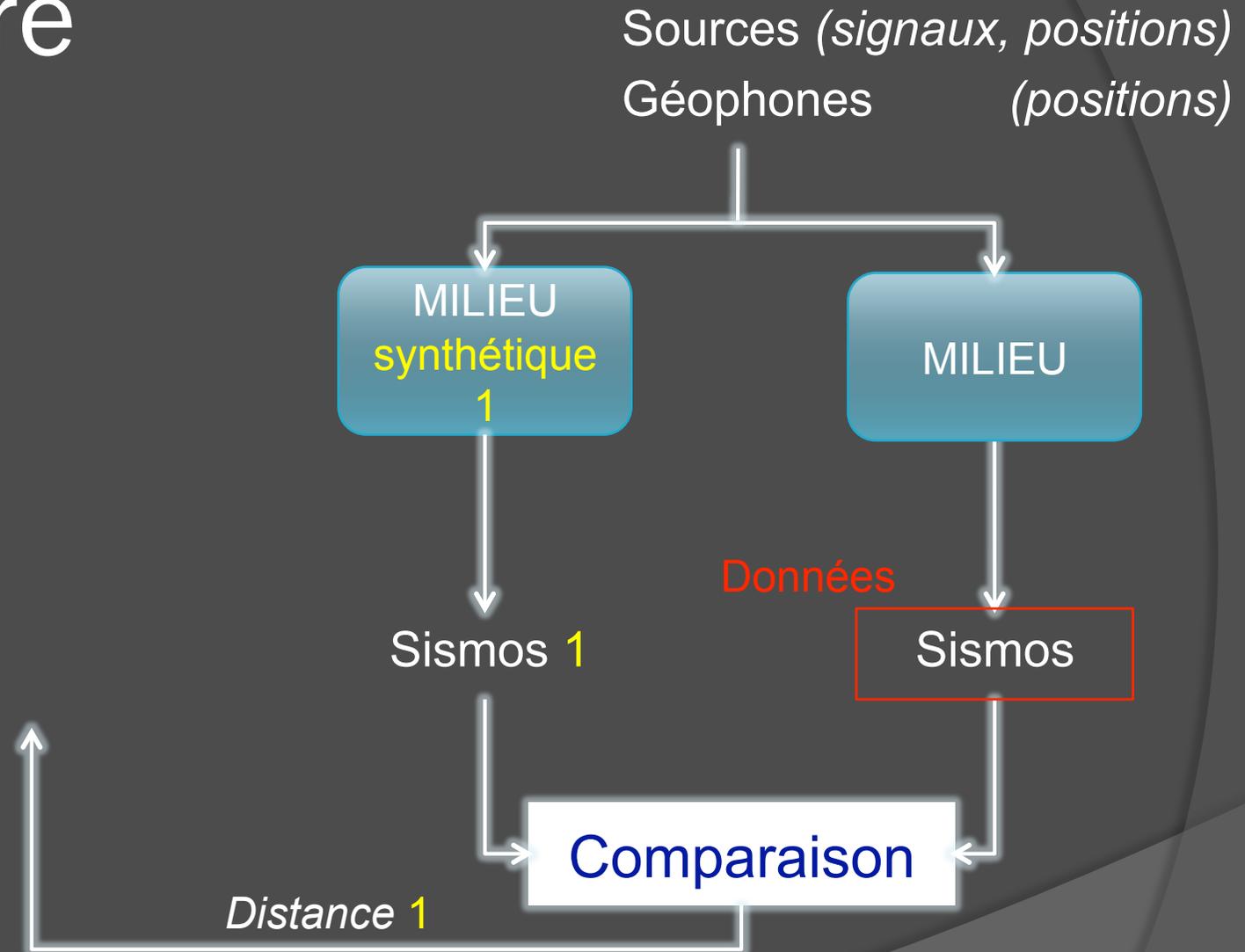
1. Cadre



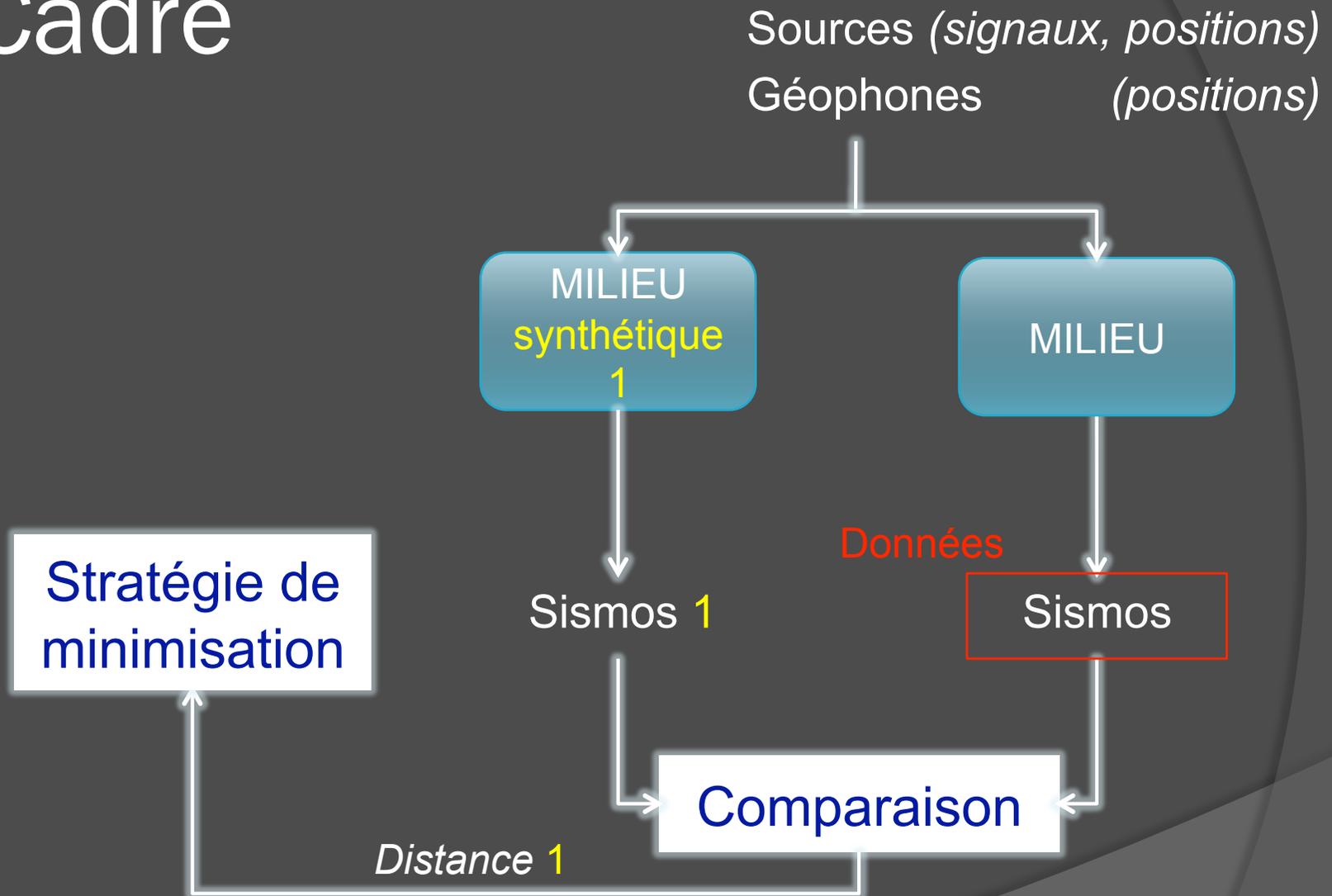
1. Cadre



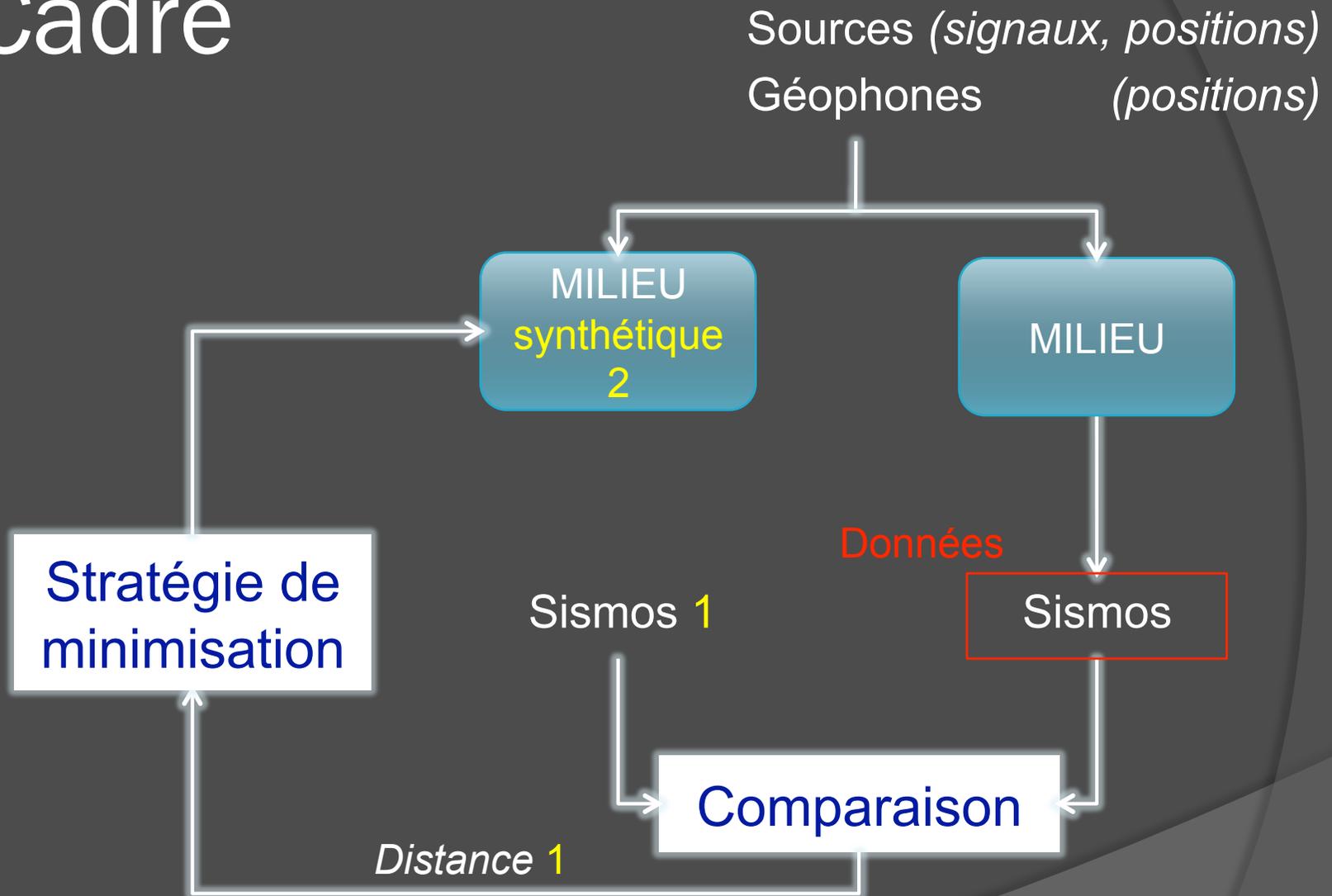
1. Cadre



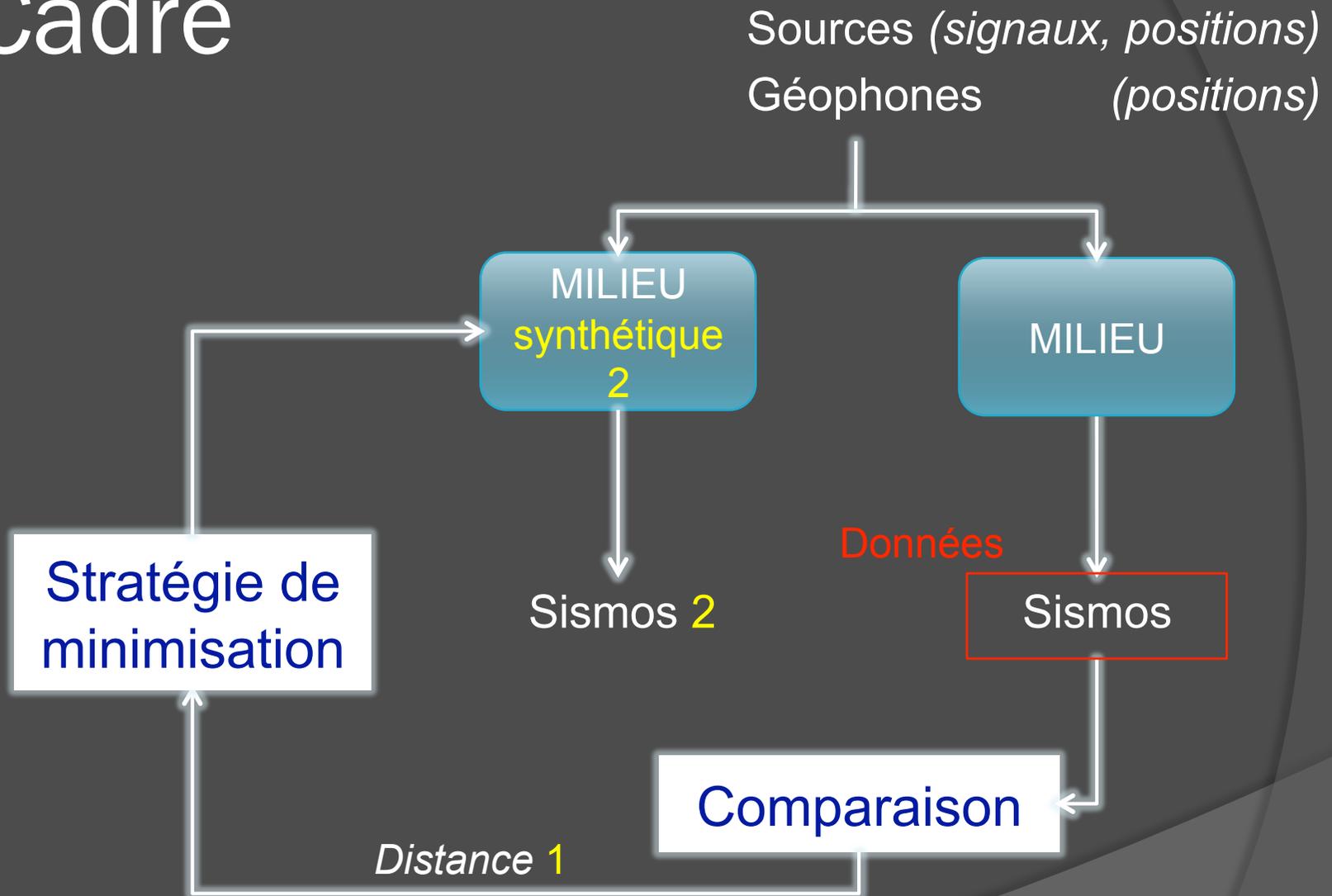
1. Cadre



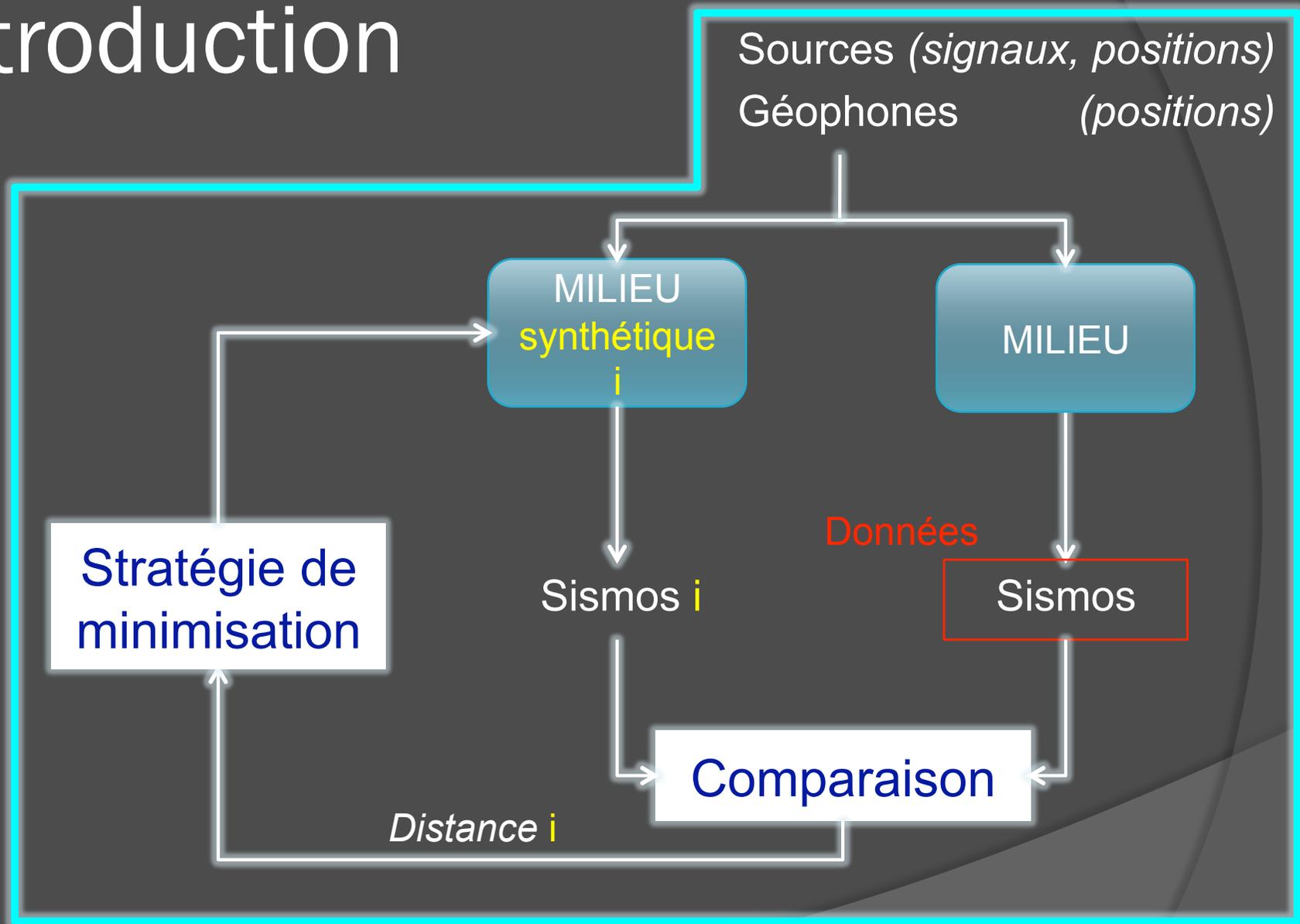
1. Cadre



1. Cadre



Introduction



PROBLEME INVERSE

PLAN

1. Cadre

2. Modélisation

a. Equations de propagation 2D

b. Méthode de discrétisation

c. Conditions PML

d. Application

3. Inversion

Perspectives

2.a Equations de propagation 2D

Cadre: milieu | - élastique
| - invariant suivant une direction horizontale y

Formulation: domaine fréquentiel

$$\begin{aligned} -\omega^2 \rho(\mathbf{r}) V_x(\mathbf{r}, \omega) &= F_x(\mathbf{r}, \omega) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho(\mathbf{r}) v_p(\mathbf{r})^2 \frac{\partial}{\partial x} V_x(\mathbf{r}, \omega) + \rho(\mathbf{r}) (v_p(\mathbf{r})^2 - 2v_s(\mathbf{r})^2) \frac{\partial}{\partial z} V_z(\mathbf{r}, \omega) \right] \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho(\mathbf{r}) v_s(\mathbf{r})^2 \left(\frac{\partial}{\partial x} V_z(\mathbf{r}, \omega) + \frac{\partial}{\partial z} V_x(\mathbf{r}, \omega) \right) \right] \\ -\omega^2 \rho(\mathbf{r}) V_z(\mathbf{r}, \omega) &= F_z(\mathbf{r}, \omega) + \frac{\partial}{\partial z} \left[\rho(\mathbf{r}) v_p(\mathbf{r})^2 \frac{\partial}{\partial z} V_z(\mathbf{r}, \omega) + \rho(\mathbf{r}) (v_p(\mathbf{r})^2 - 2v_s(\mathbf{r})^2) \frac{\partial}{\partial x} V_x(\mathbf{r}, \omega) \right] \\ &\quad + \frac{\partial}{\partial x} \left[\rho(\mathbf{r}) v_s(\mathbf{r})^2 \left(\frac{\partial}{\partial x} V_z(\mathbf{r}, \omega) + \frac{\partial}{\partial z} V_x(\mathbf{r}, \omega) \right) \right] \end{aligned}$$

V_x : vitesse particulaire horizontale

V_z : vitesse particulaire verticale

PLAN

1. Cadre
 2. Modélisation
 - a. Equations de propagation 2D
 - b. Méthode de discrétisation
 - c. Conditions PML
 - d. Application
 3. Inversion
- Perspectives

2.b Méthode de discrétisation

Milieux complexes \rightarrow Méthode numérique

Choix d'une méthode

Différences Finies

Elements Finis

Volumes Finis

Galerkin-discontinu

+ rapide que GD

Topo – coûteuse qu'en DF

Formulation résultante

\rightarrow système linéaire (flux centré) : $\mathbf{A} \cdot \mathbf{v} = \mathbf{f}$

- matrice d'impédance creuse \mathbf{A}
- \mathbf{v} vitesses particulières du milieu
- vecteur d'excitation \mathbf{f}

PLAN

1. Cadre

2. Modélisation

a. Equations de propagation 2D

b. Méthode de discrétisation

c. Conditions PML

d. Application

3. Inversion

Perspectives

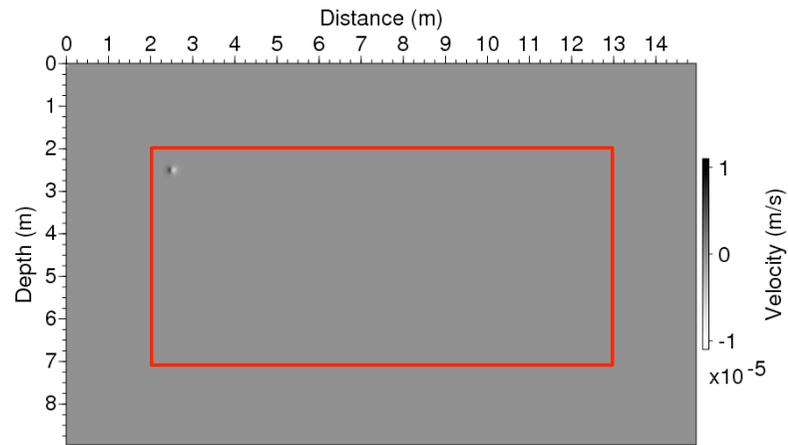
2.c Conditions PML

Milieu de propagation

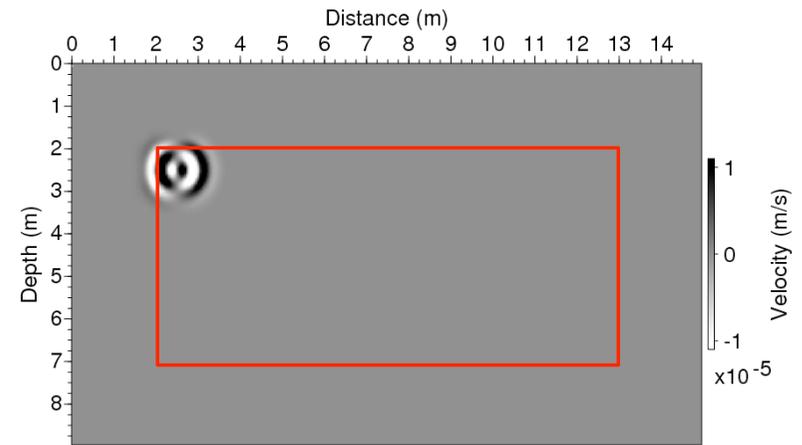


Zone absorbante

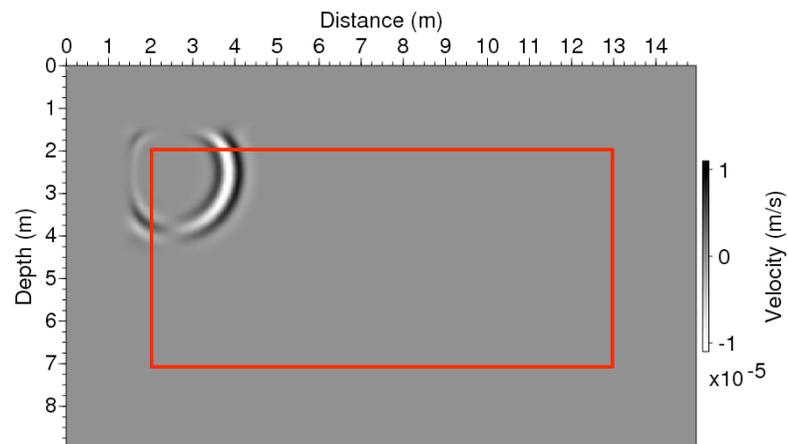
2.c Conditions PML



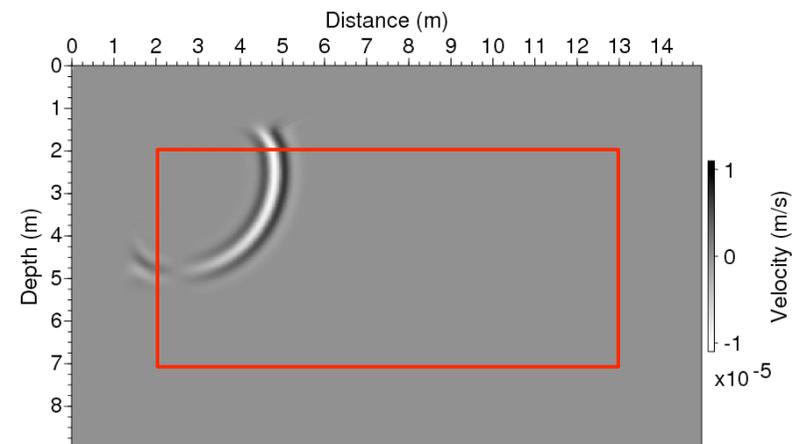
T = 1.2 ms



T = 4.4 ms

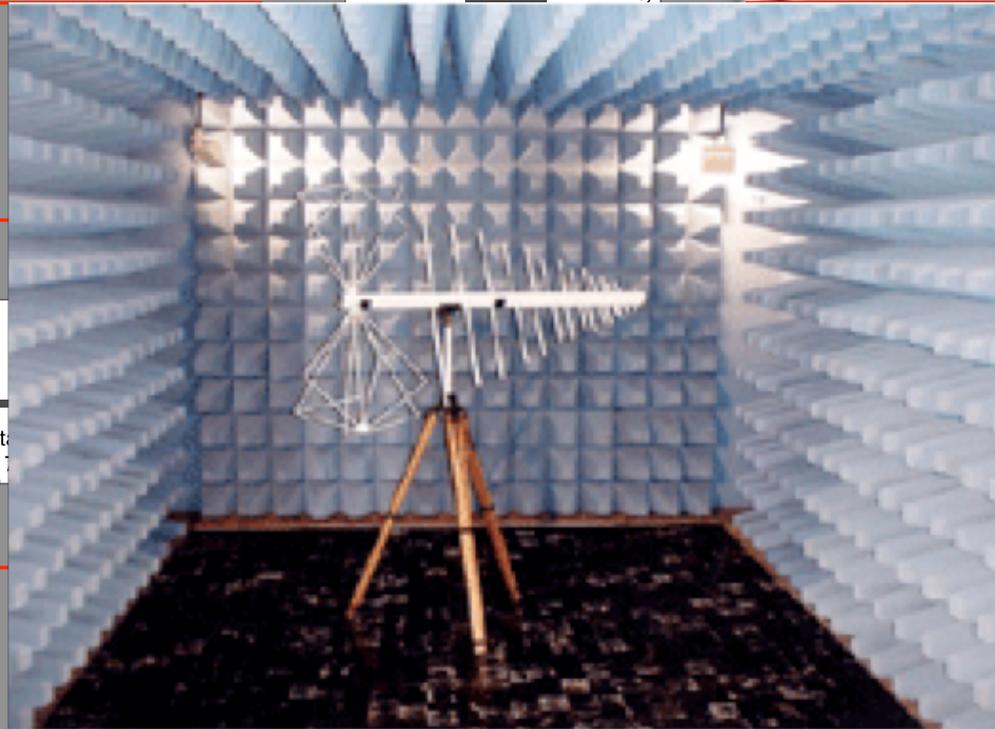
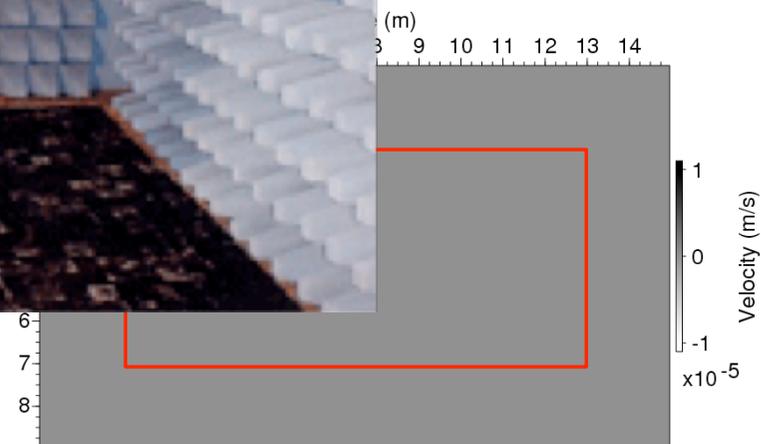
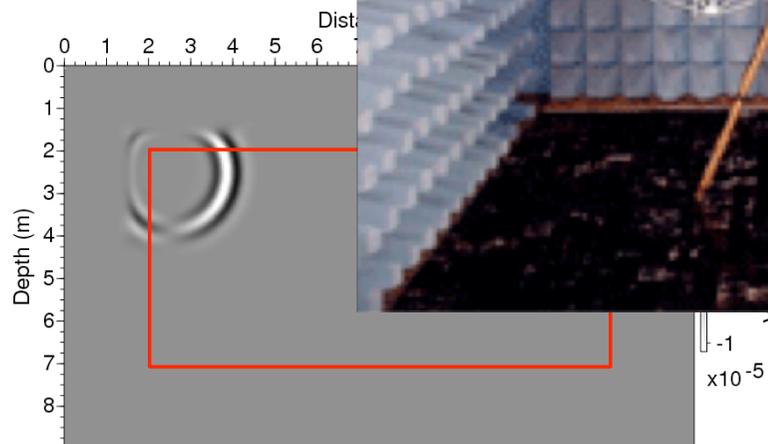
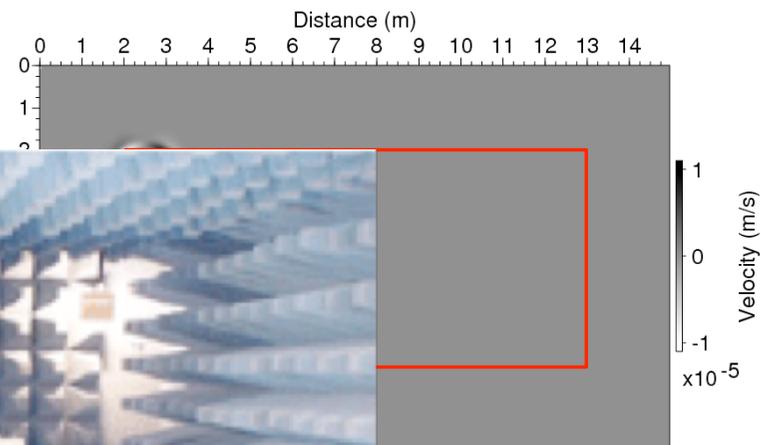
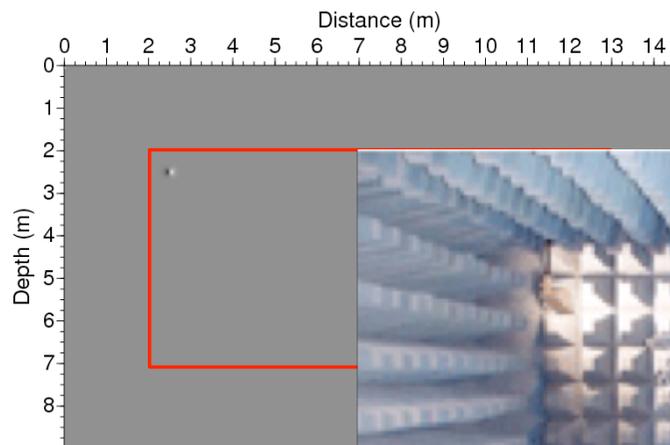


T = 7.6 ms



T = 10.8 ms

2.c Conditions PML



PLAN

1. Cadre

2. Modélisation

a. Equations de propagation 2D

b. Méthode de discrétisation

c. Conditions PML

d. Application

3. Inversion

Perspectives

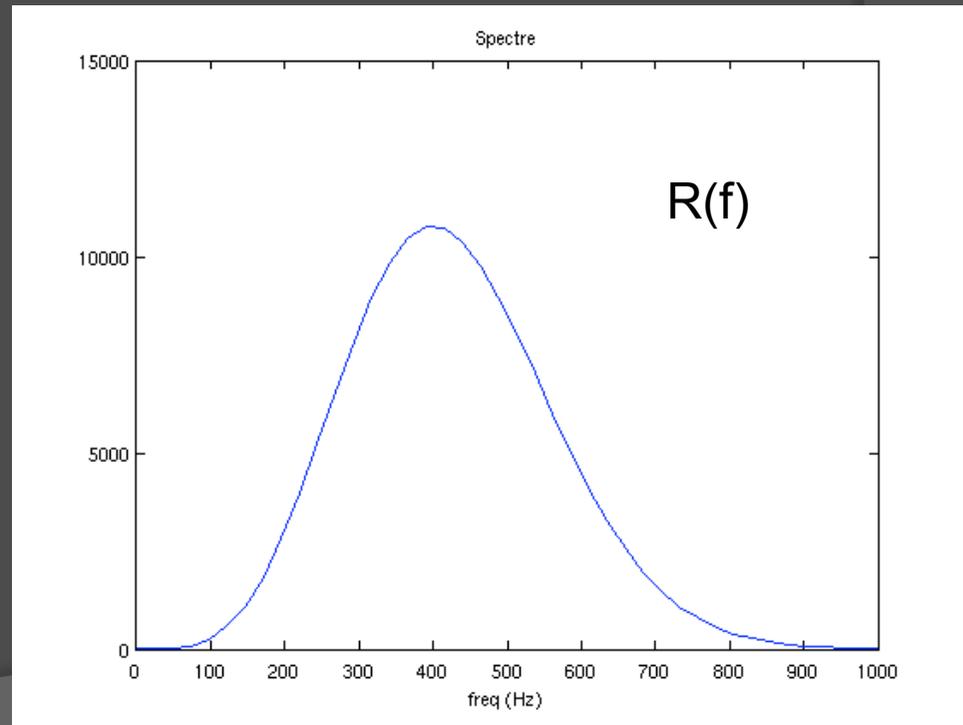
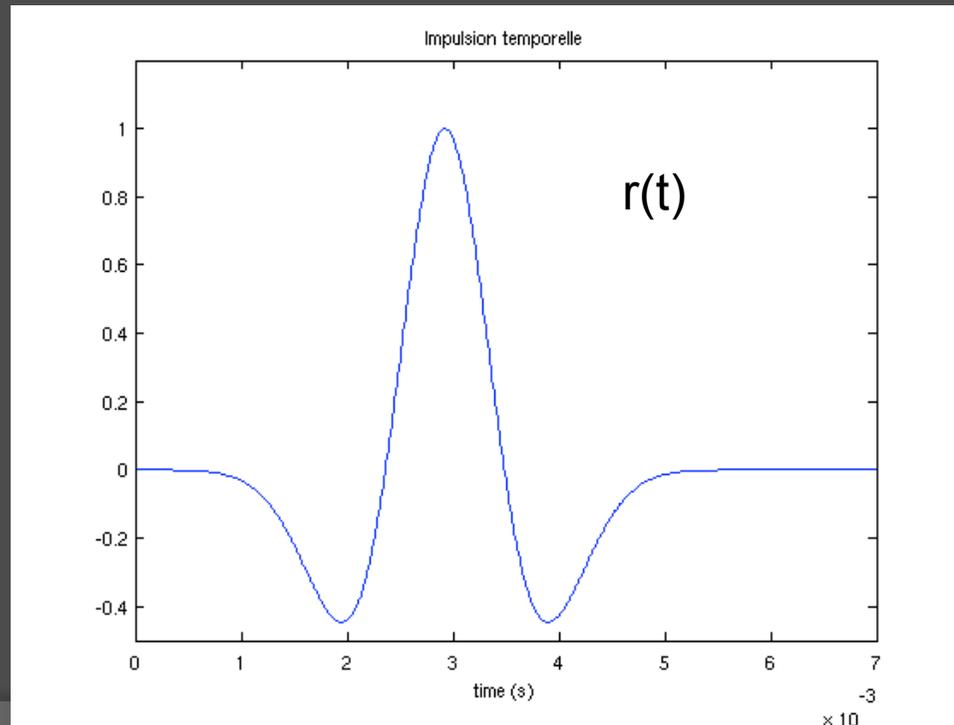
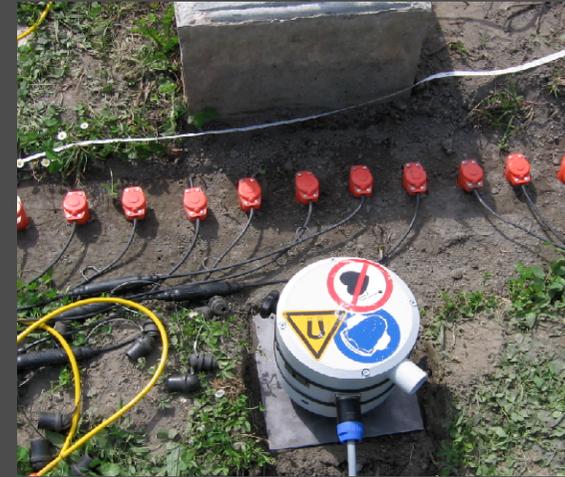
2.d Cadre

Source

$$r(t) = (1 - 2(\pi \cdot f_c \cdot (t - \tau))^2) e^{-(\pi \cdot f_c \cdot (t - \tau))}$$

$$f_c = 400 \text{ Hz}$$

$$\tau = 3 \text{ ms}$$



2.d Cadre

Milieu

SOL

$$V_p = 300 \text{ m/s}$$

$$V_s = 150 \text{ m/s}$$

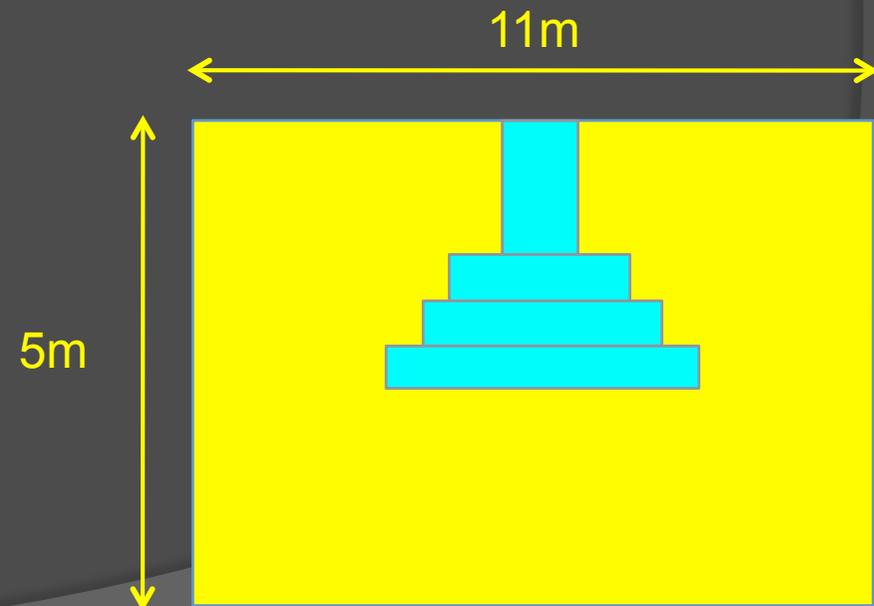
$$\rho = 1500 \text{ kg/m}^3$$

BETON

$$V_p = 4000 \text{ m/s}$$

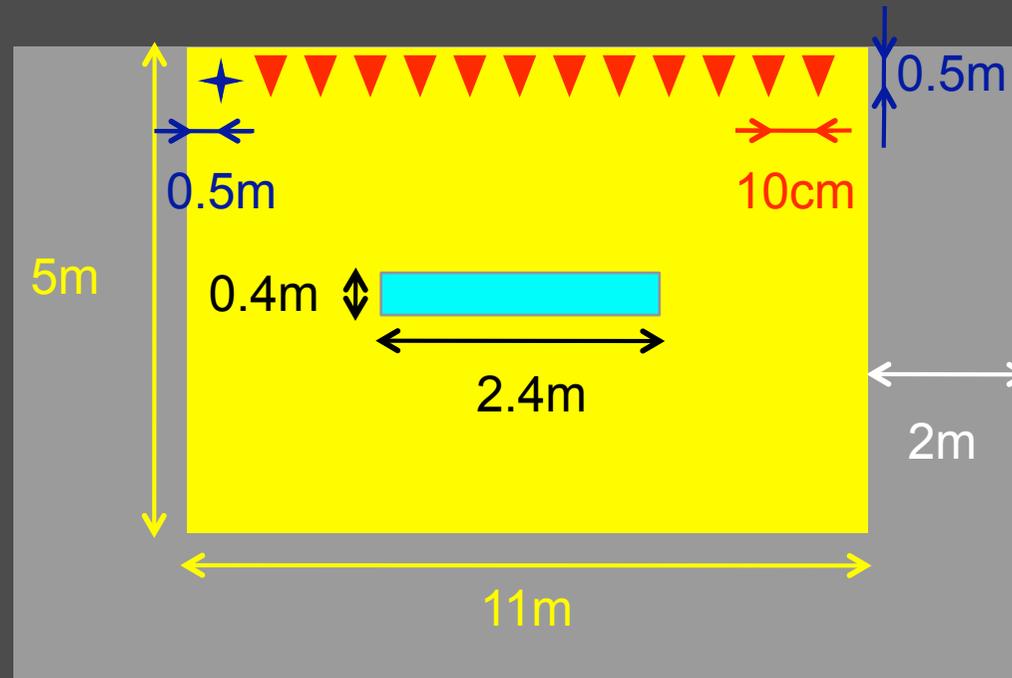
$$V_s = 2200 \text{ m/s}$$

$$\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$$



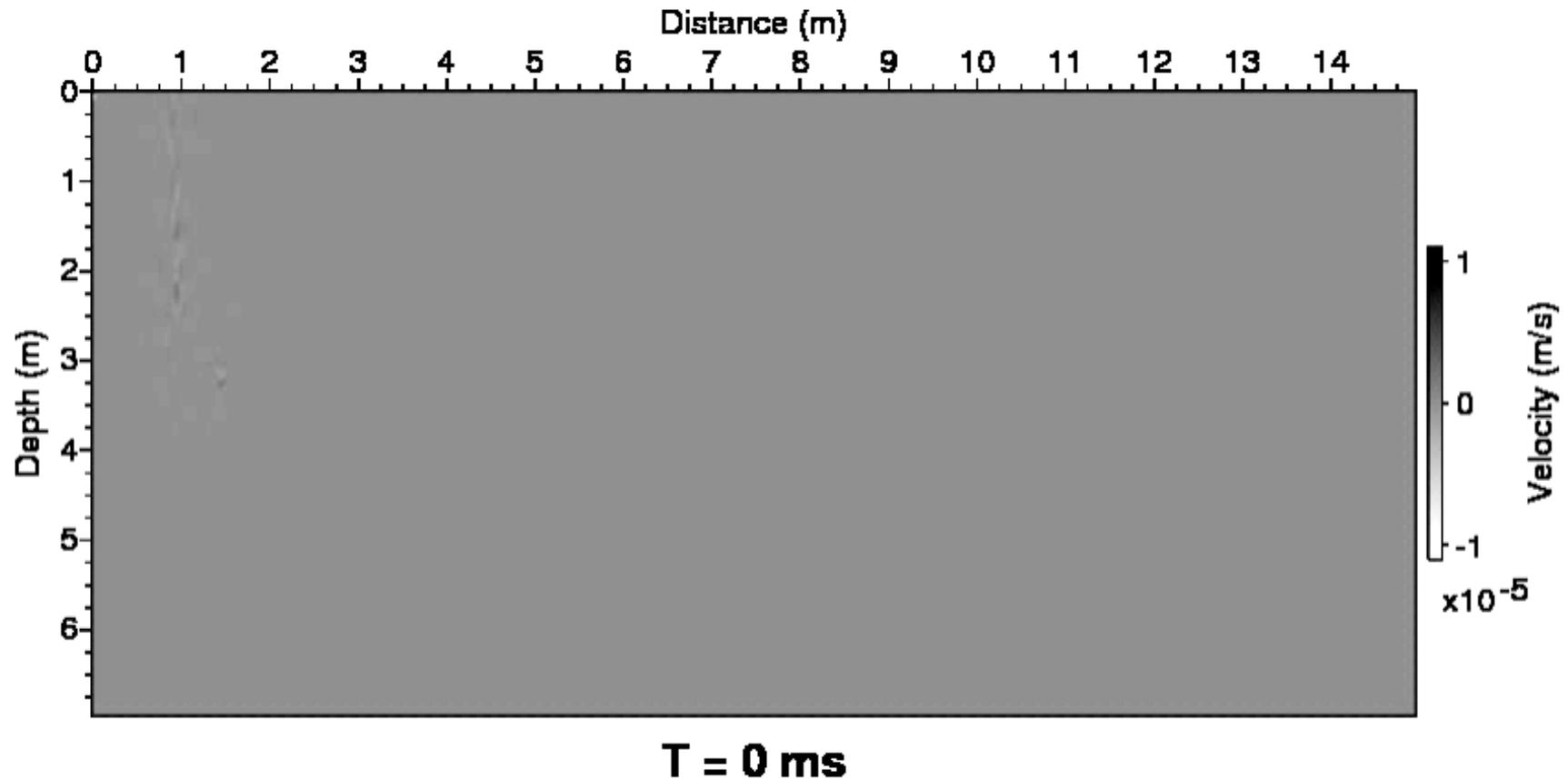
2.d Dalle seule avec surface libre

Milieu & Géométrie d'acquisition

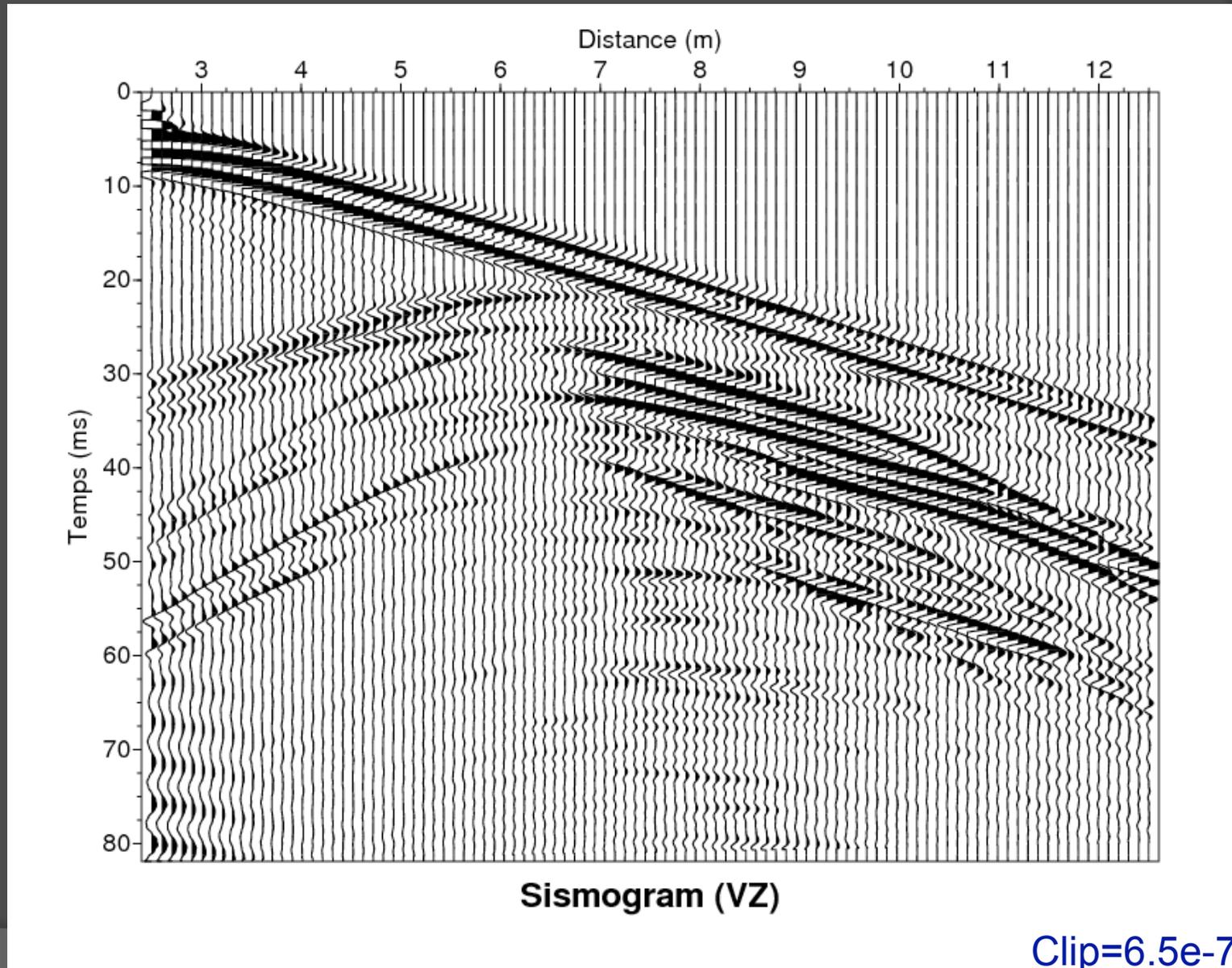


2.d Dalle seule avec surface libre

Video Vz

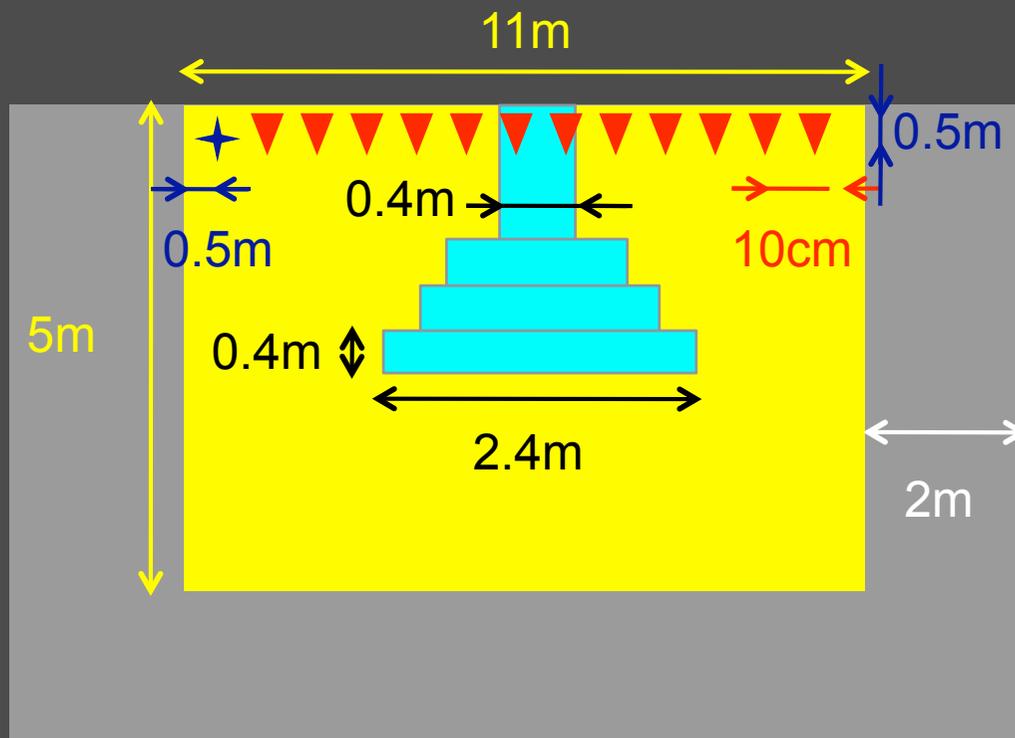


2.d Dalle seule avec surface libre



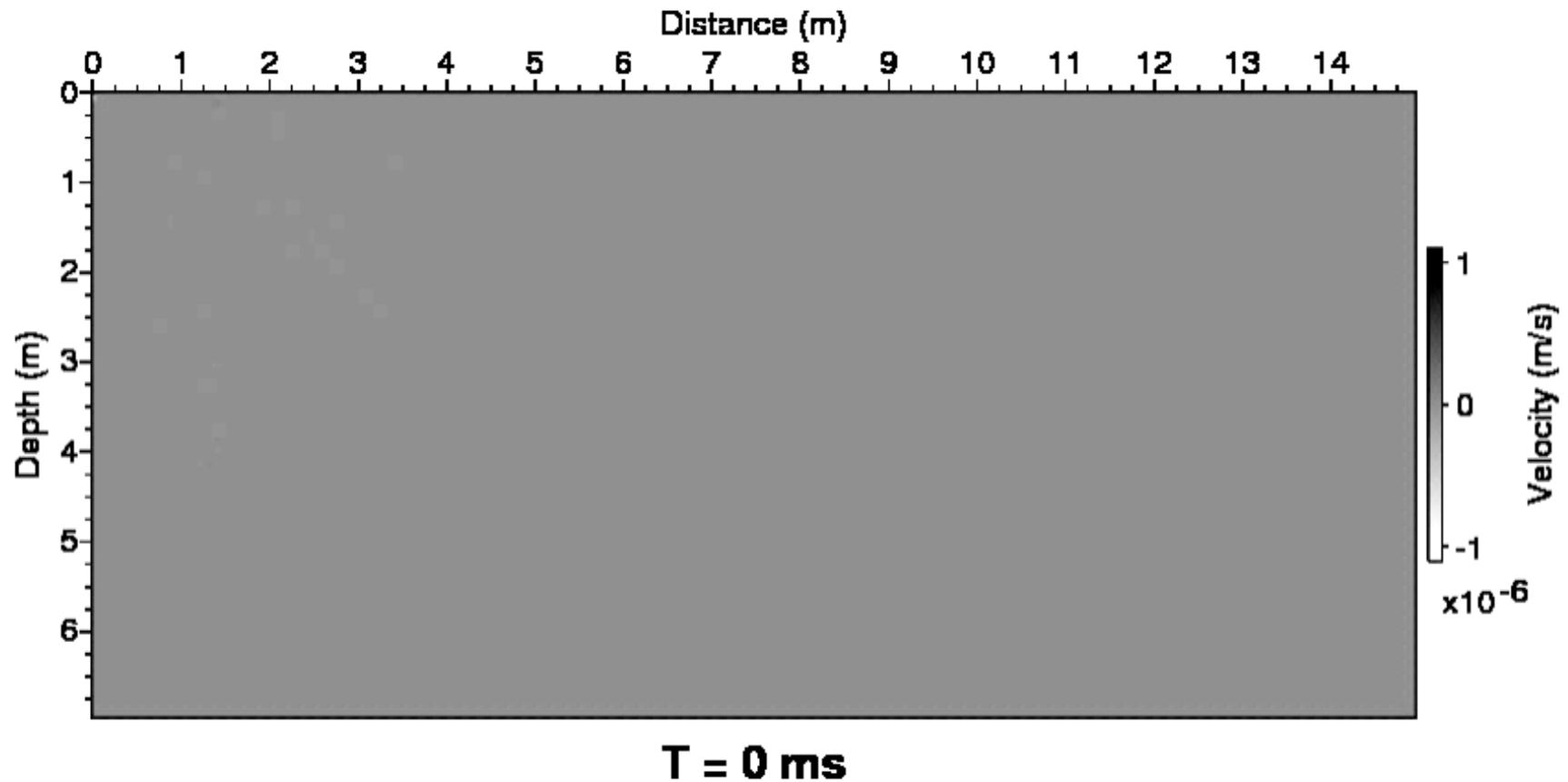
2.d Fondation avec surface libre

Milieu & Géométrie d'acquisition

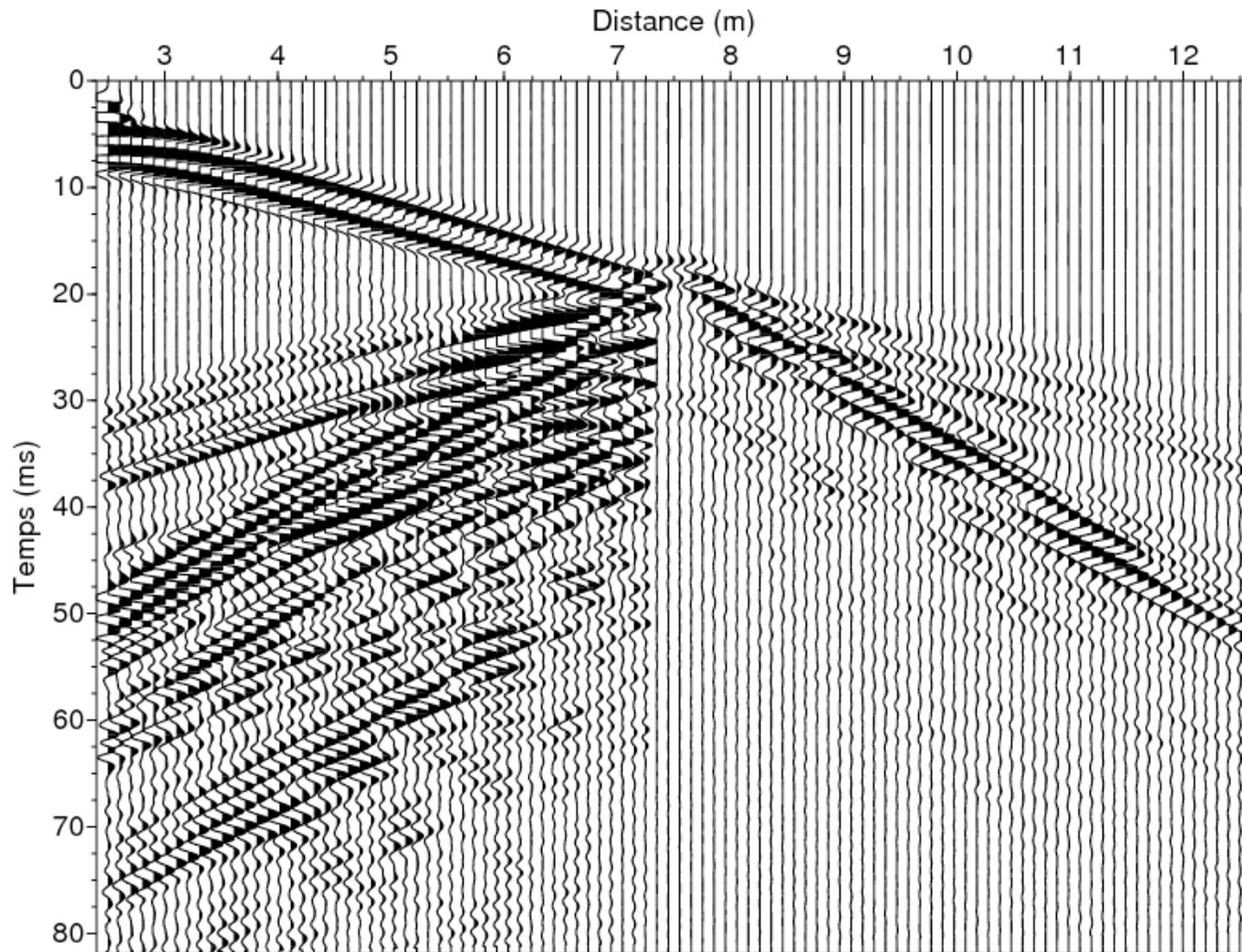


2.d Fondation avec surface libre

Video Vz



2.d Fondation avec surface libre



Sismogram (VZ)

Clip=9.9e-7

PLAN

1. Cadre
2. Modélisation
3. Inversion
 - a. Approche cartographie
 - b. Grandeurs recherchées
 - c. Formulations possibles
 - d. Méthode CSI
 - e. Autres méthodes en cartographie

Perspectives

3.a Approche cartographique

SOL

$$v_p = 300 \text{ m/s}$$

$$v_s = 150 \text{ m/s}$$

$$\rho = 1500 \text{ kg/m}^3$$

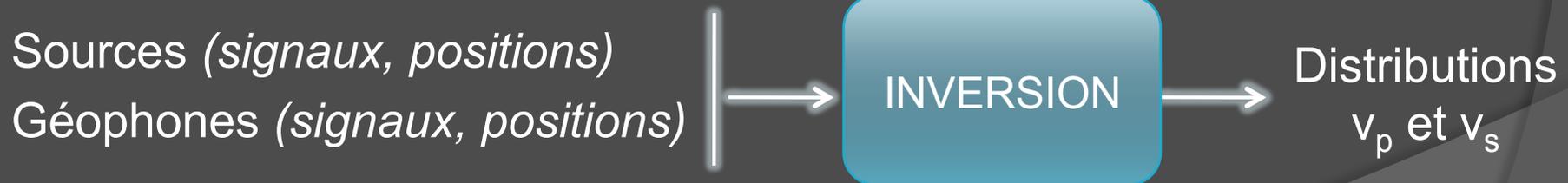
BETON

$$v_p = 4000 \text{ m/s}$$

$$v_s = 2200 \text{ m/s}$$

$$\rho = 2300 \text{ kg/m}^3$$

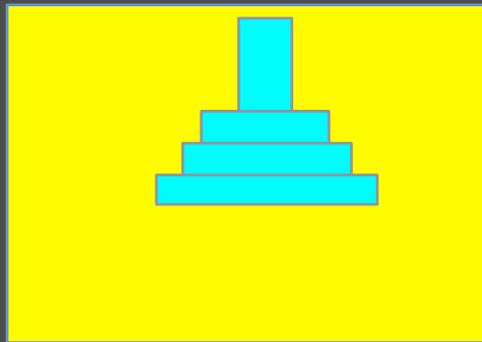
→ 2 caractéristiques recherchées : v_p et v_s



3.b Grandeurs recherchées

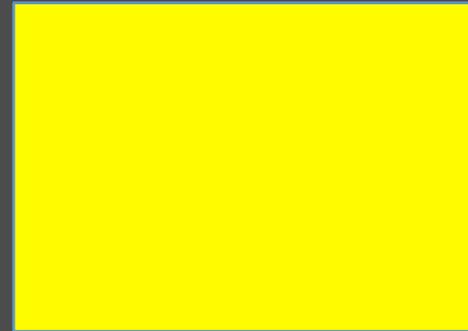
→ On raisonne par variations par rapport à un milieu de référence

Milieu recherché



$$(v_p, v_s)$$

Milieu de référence (connu)



$$(v_p^0, v_s^0)$$

→ Recherche de deux contrastes

$$\chi_p = (v_p)^2 - (v_p^0)^2$$

$$\chi_s = (v_s)^2 - (v_s^0)^2$$

3.c Formulations possibles

Expression des vitesses mesurées en fonction des contrastes

→ Formulation directe

$$h(\chi_p, \chi_s) = (V_{\omega,k}^0)_{capt} - A_{\omega}^d [(I + (X_p + X_s)A_{\omega}^c)^{-1} (X_p + X_s)V_{\omega,k}^0]$$

→ Formulation bilinéaire

$$h(W_{\omega,k}) = (V_{\omega,k}^0)_{capt} - A_{\omega}^d \cdot W_{\omega,k} \quad \text{Données}$$

$$W_{\omega,k} = (X_p + X_s)[V_{\omega,k}^0 - A_{\omega}^c \cdot W_{\omega,k}] \quad \text{Couplage (contrainte)}$$

h n'est pas linéaire en χ_p et χ_s

→ terme d'adéquation aux données non quadratique

$$F = \left\| y - h(\chi_p, \chi_s) \right\|_2^2$$

3.d Méthode CSI

→ Expression bilinéaire avec relâchement de la contrainte

$$h(W_{\omega,k}) = (V_{\omega,k}^0)_{capt} - A_{\omega}^d \cdot W_{\omega,k}$$

Données

$$W_{\omega,k} \approx (X_p + X_s)[V_{\omega,k}^0 - A_{\omega}^c \cdot W_{\omega,k}]$$

Couplage (contrainte relâchée)

→ Nouvelle fonction coût

$$F_{CSI} = \|y - h(W_{\omega,k})\|_2^2 + \lambda \|W_{\omega,k} - (X_p + X_s)[V_{\omega,k}^0 - A_{\omega}^c \cdot W_{\omega,k}]\|_2^2$$

Algorithme associé :

Pour chaque variable auxiliaire $W_{\omega,k}$

Minimiser F_{CSI} selon $W_{\omega,k}$

Fin pour

Minimiser F_{CSI} selon χ_p et χ_s

3.e Autres méthodes en cartographie

→ Méthodes utilisant l'expression bilinéaire

Méthode CSI

Avantage : temps de calcul par itération court
Inconvénients : contraintes non satisfaites
variables à optimiser nombreuses

Méthode du Lagrangien augmenté

Avantages : temps de calcul par itération court
contraintes satisfaites
Inconvénient : variables à optimiser plus nombreuses

→ Méthodes utilisant l'expression directe

Avantages : variables à optimiser peu nombreuses
contraintes satisfaites
Inconvénient : temps de calcul par itération long

PLAN

1. Cadre
2. Modélisation
3. Inversion

Perspectives

Perspectives

→ **Méthodes de type cartographie**

→ **Exploitation d'informations *a priori* sur l'objet diffractant**

- Approches « région »
- Approches « contour »
- Approche paramétrique

Perspectives

Problème direct

→ Simulation à un ordre d'interpolation plus élevé

Problème inverse

→ Mise en œuvre d'une méthode inversion (L-BFGS) *(Romain Brossier)*

Perspectives

Validation

- Acquisition sur maquette (LCPC)
- Test sur pylône réel (fin octobre)

Merci de votre attention