

GLQ3205

Géophysique appliquée 2

Méthodes sismiques 2: Sismique réfraction

Ahmed Mhenni
ahmed.mhenni@polymtl.ca

Été 2024

Plan du cours

1. Révision
2. Étude de cas
3. Matériel d'acquisition
4. Rai sismique
5. Couches horizontales
6. Couches inclinées
7. Corrections et limitations

Propagation sismique

On applique brusquement une large **force** sur le sol.

Cette force fera varier les **contraintes** dans le sol, ce qui provoquera des **déformations** momentanées du volume de sol à proximité.

Ces déformations peuvent être mesurées par le **déplacement** d'une surface.

Comment varient contraintes, déformations et déplacements **dans l'espace et le temps** ?



<https://teara.govt.nz/en/photograph/9759/seismic-survey>

Ondes P et ondes S

Ondes P

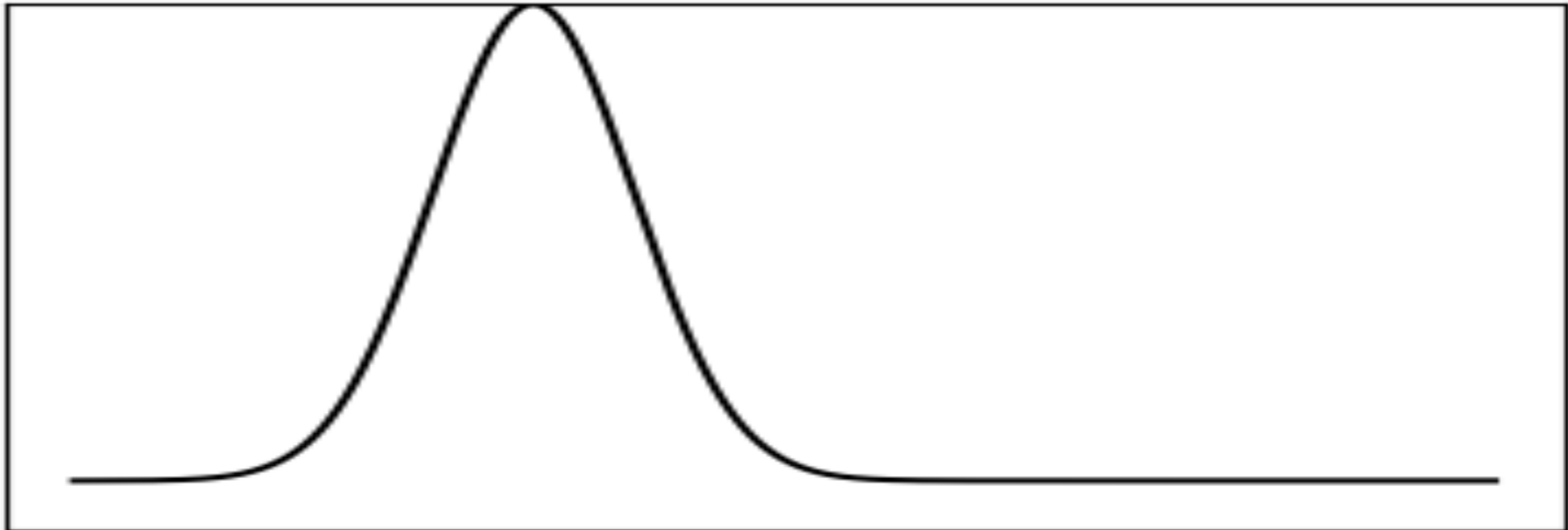
$$\frac{1}{V_p^2} \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} = \nabla^2 \delta$$

avec $\delta = \nabla \cdot \mathbf{u}$.

Ondes S

$$\frac{1}{V_s^2} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial t^2} = \nabla^2 \Theta$$

avec $\Theta = \nabla \times \mathbf{u}$.

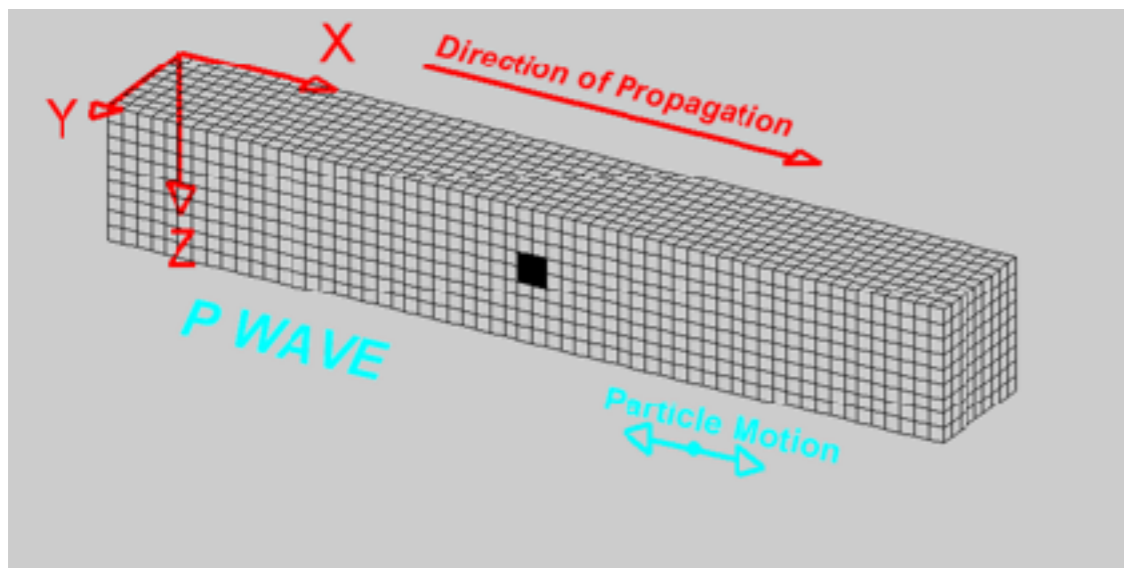


Ondes P et ondes S

Ondes P

$$\frac{1}{V_p^2} \frac{\partial^2 \delta}{\partial t^2} = \nabla^2 \delta$$

avec $\delta = \nabla \cdot \mathbf{u}$.

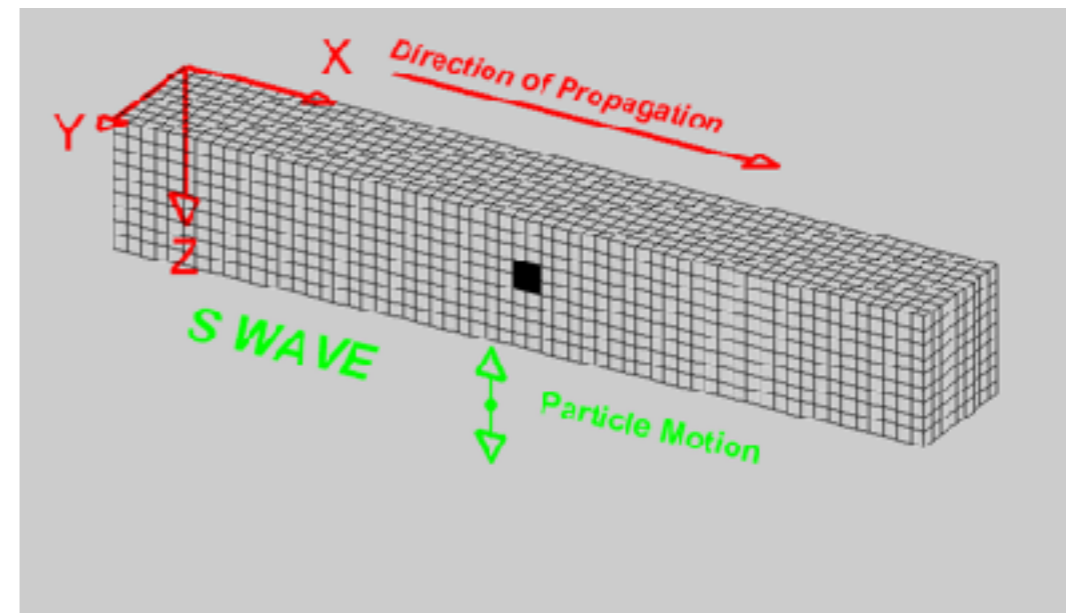


L'onde se propage dans la même direction que les déplacements.

Ondes S

$$\frac{1}{V_s^2} \frac{\partial^2 \Theta}{\partial t^2} = \nabla^2 \Theta$$

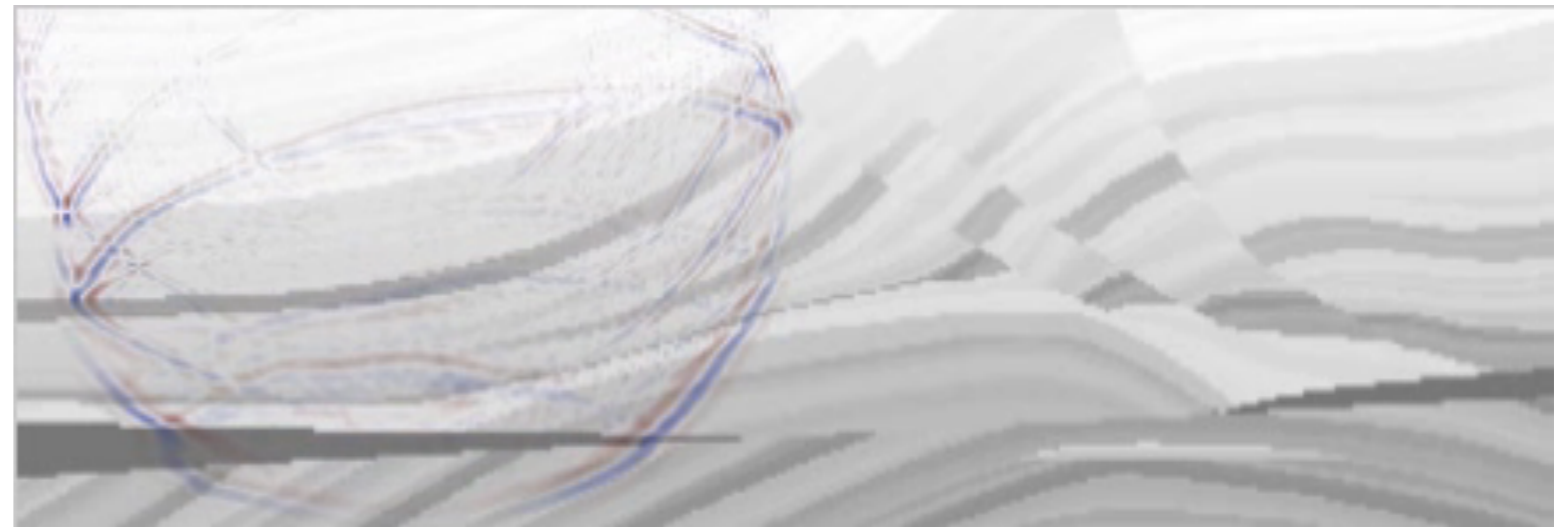
avec $\Theta = \nabla \times \mathbf{u}$.



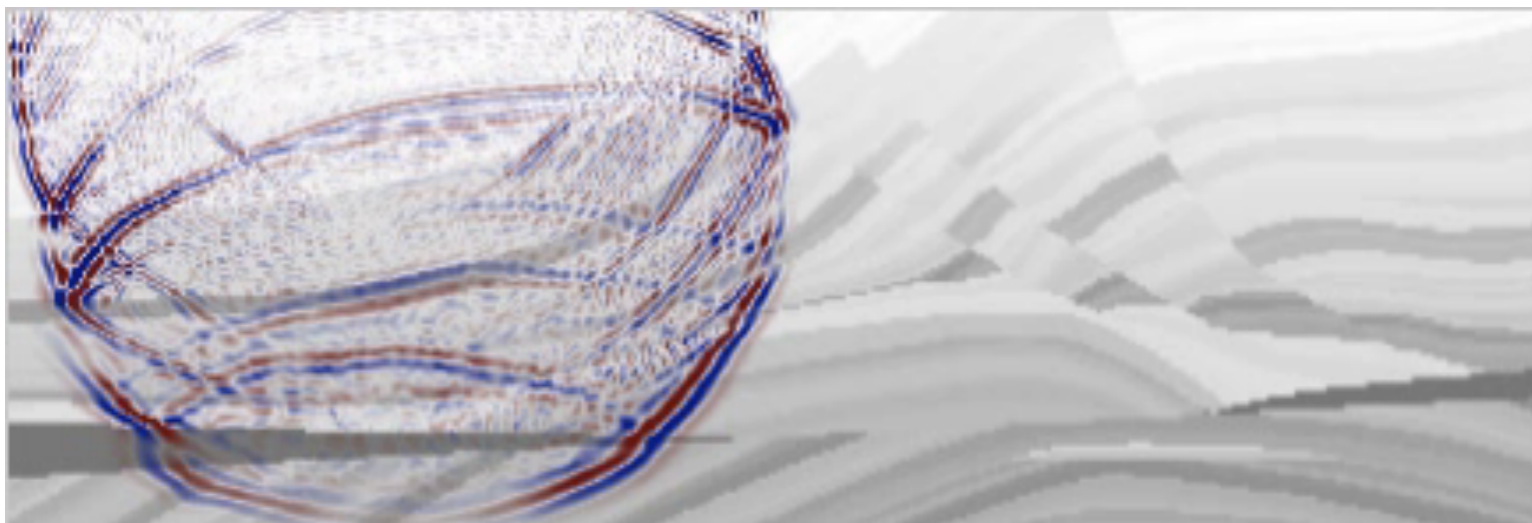
L'onde se propage perpendiculairement à la direction des déplacements.

Propagation des ondes

Viscoélastique (avec atténuation)



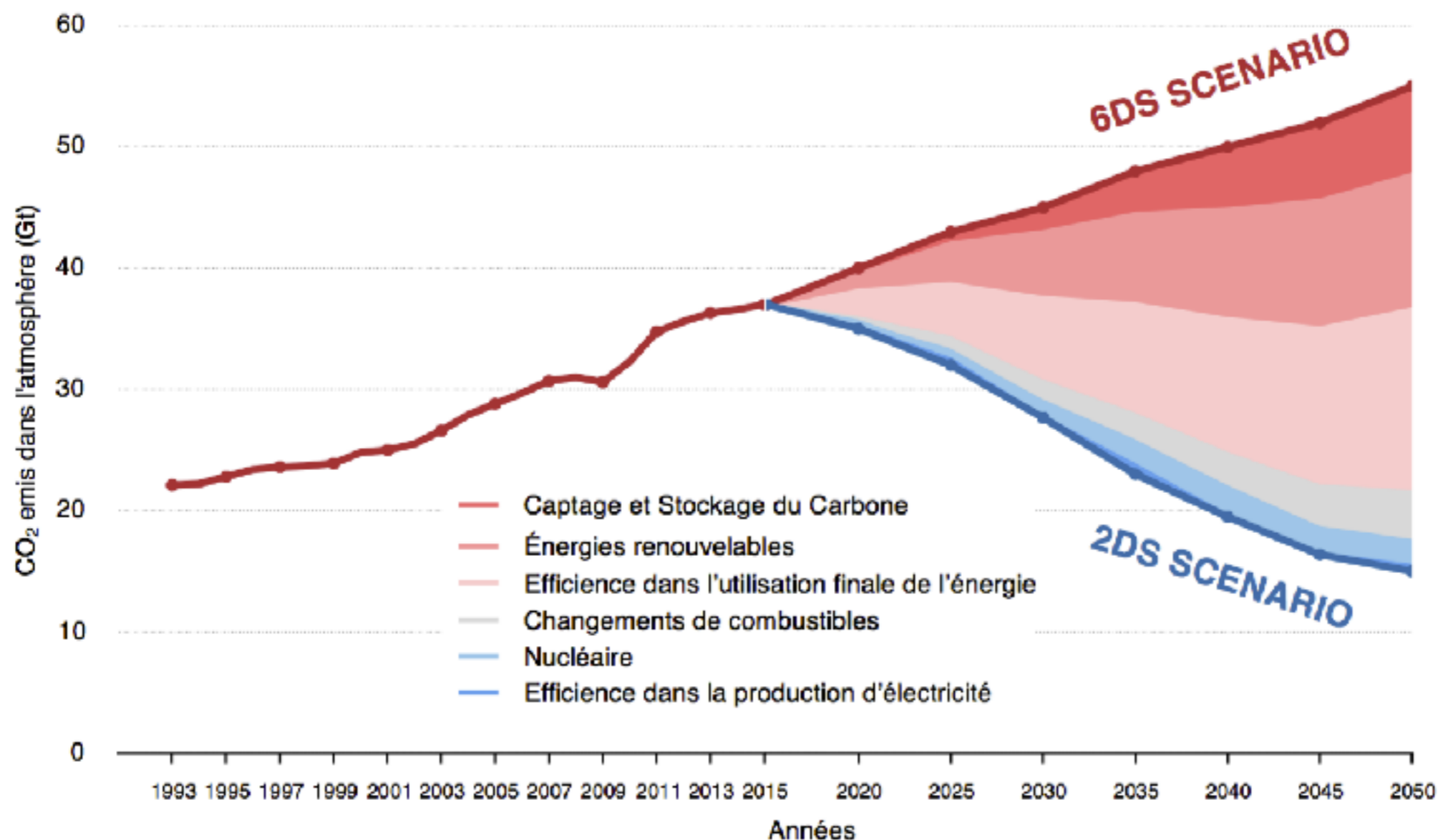
Élastique (sans atténuation)



Étude de cas

Problématique

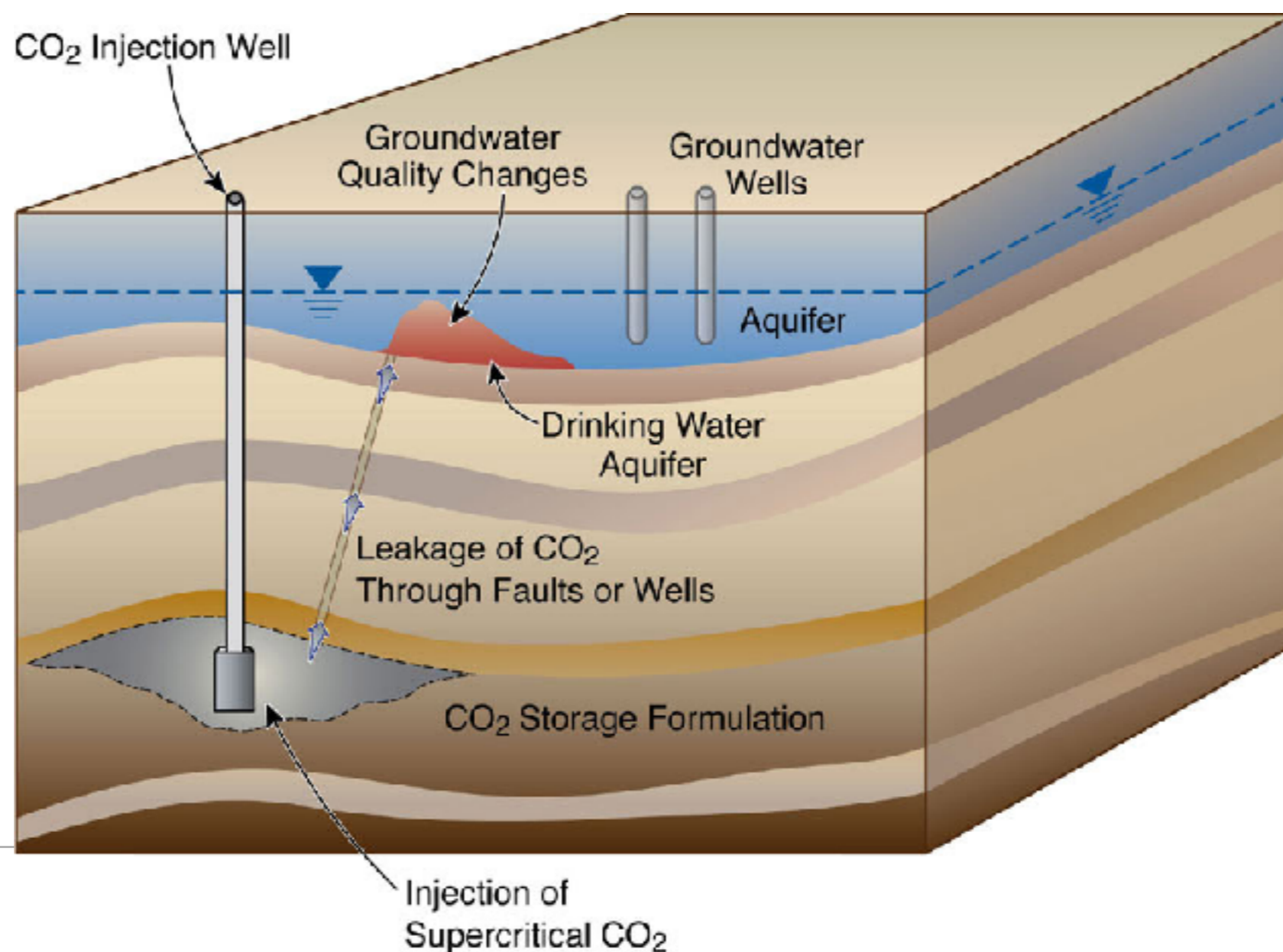
Les changements climatiques nous forcent à trouver de multiples solutions afin de réduire nos émissions. Le **stockage géologique du carbone** fait partie des solutions envisagées.



Problématique

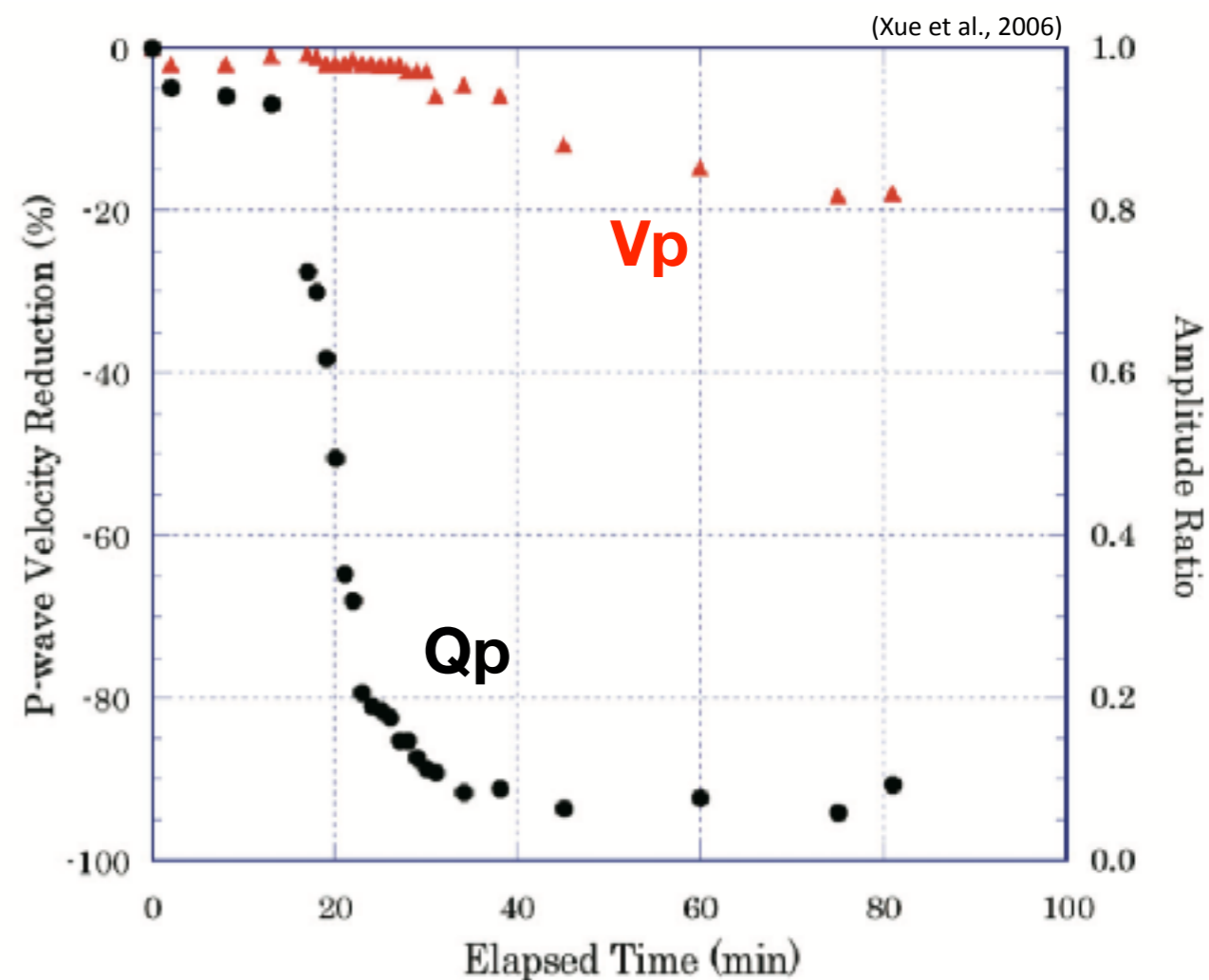
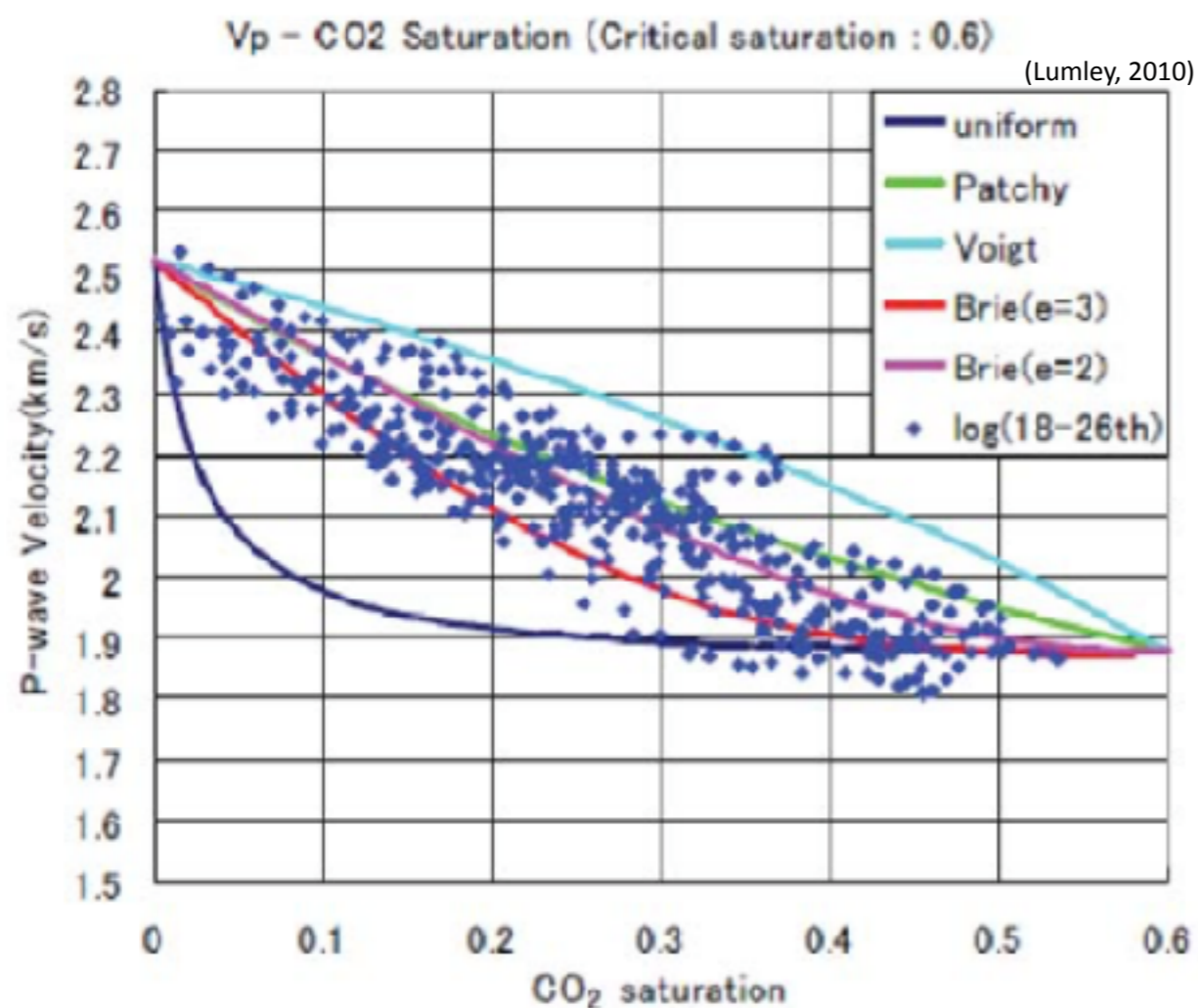
Lorsqu'on injecte du CO₂ dans le sol, on espère qu'il restera emprisonné en profondeur.

Objectif: Faire le suivi de l'injection de CO₂ dans le temps, afin de s'assurer que le panache ne migre pas en surface.



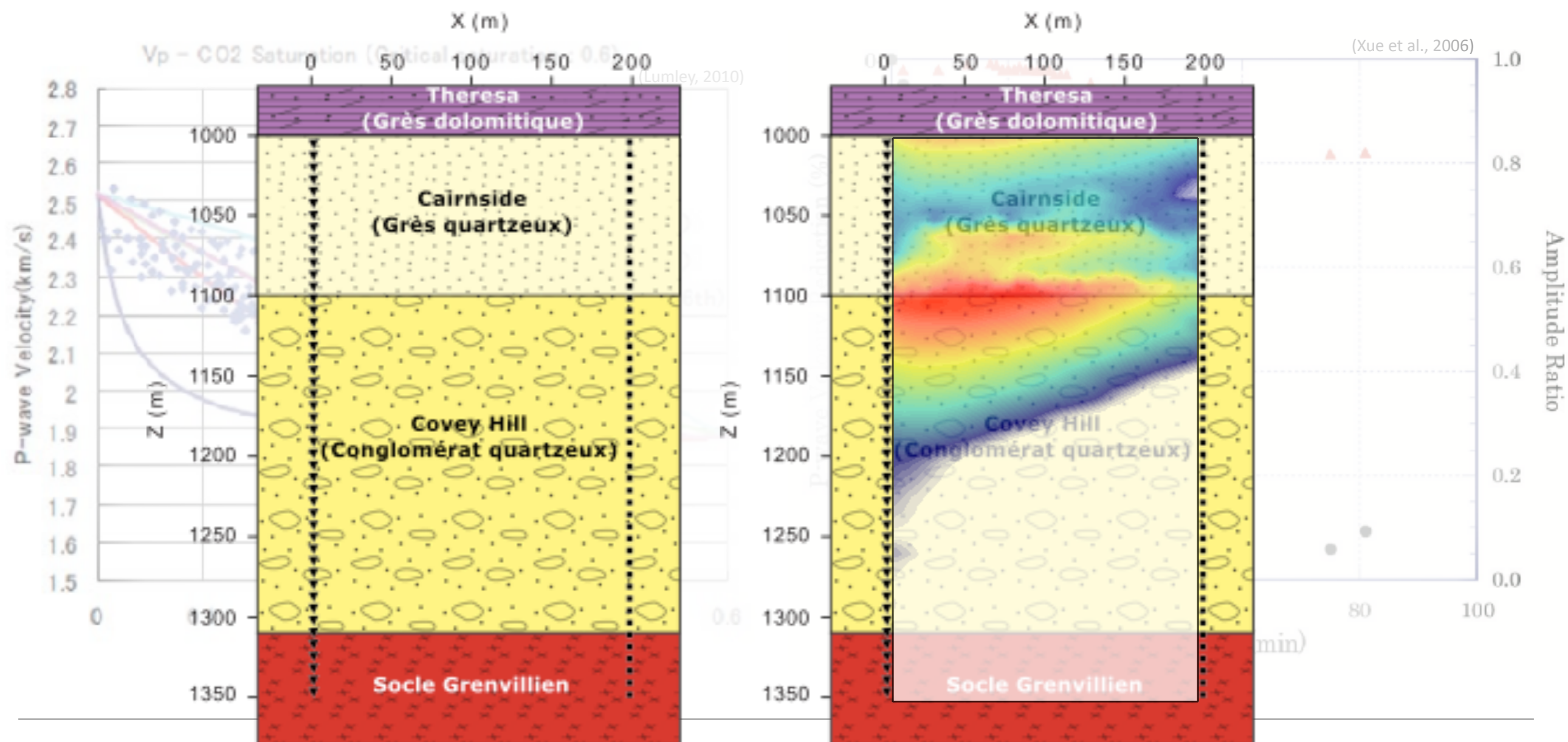
Propriété géophysique

La saturation en CO_2 est directement reliée à la vitesse V_p et à l'atténuation Q_p des ondes P



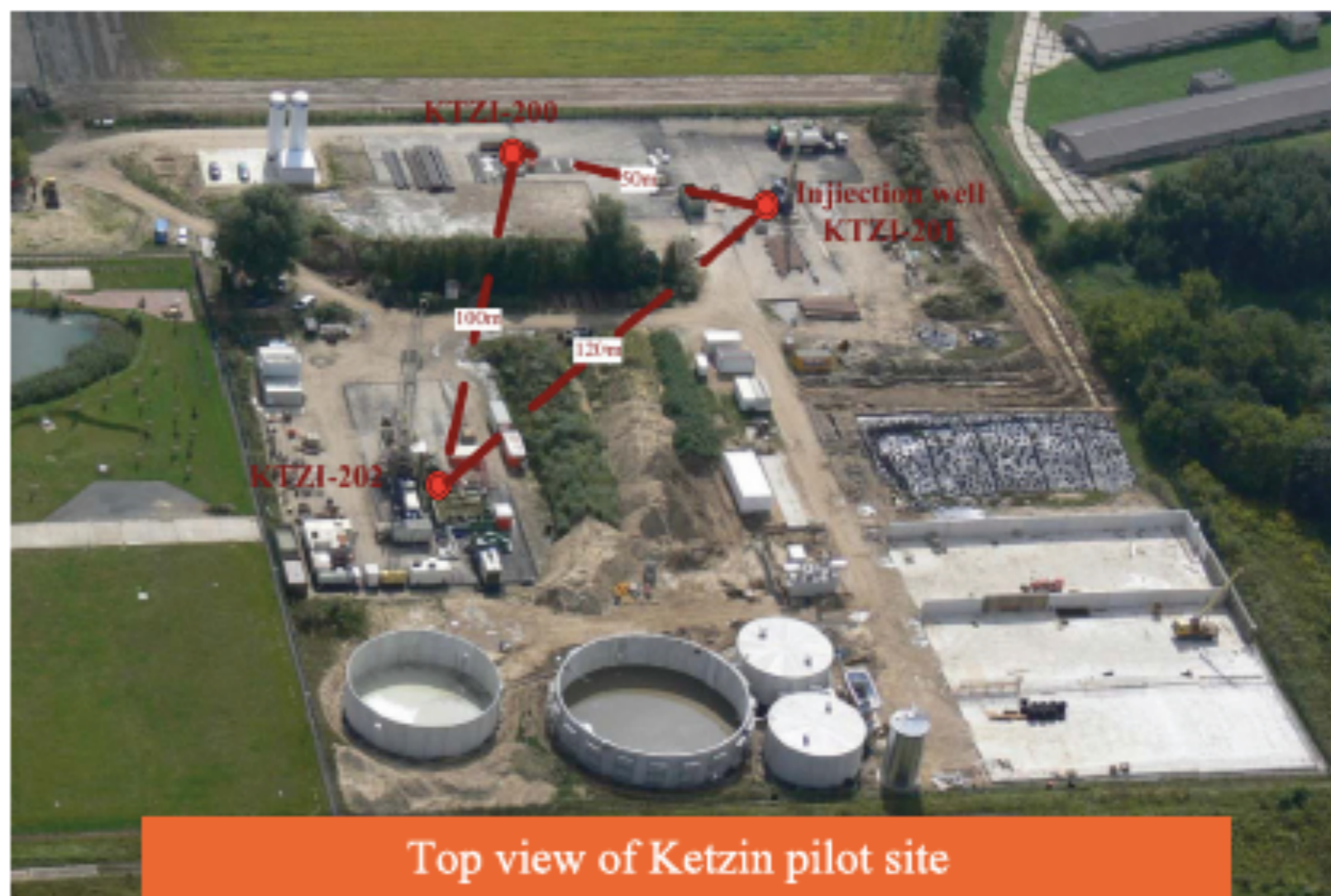
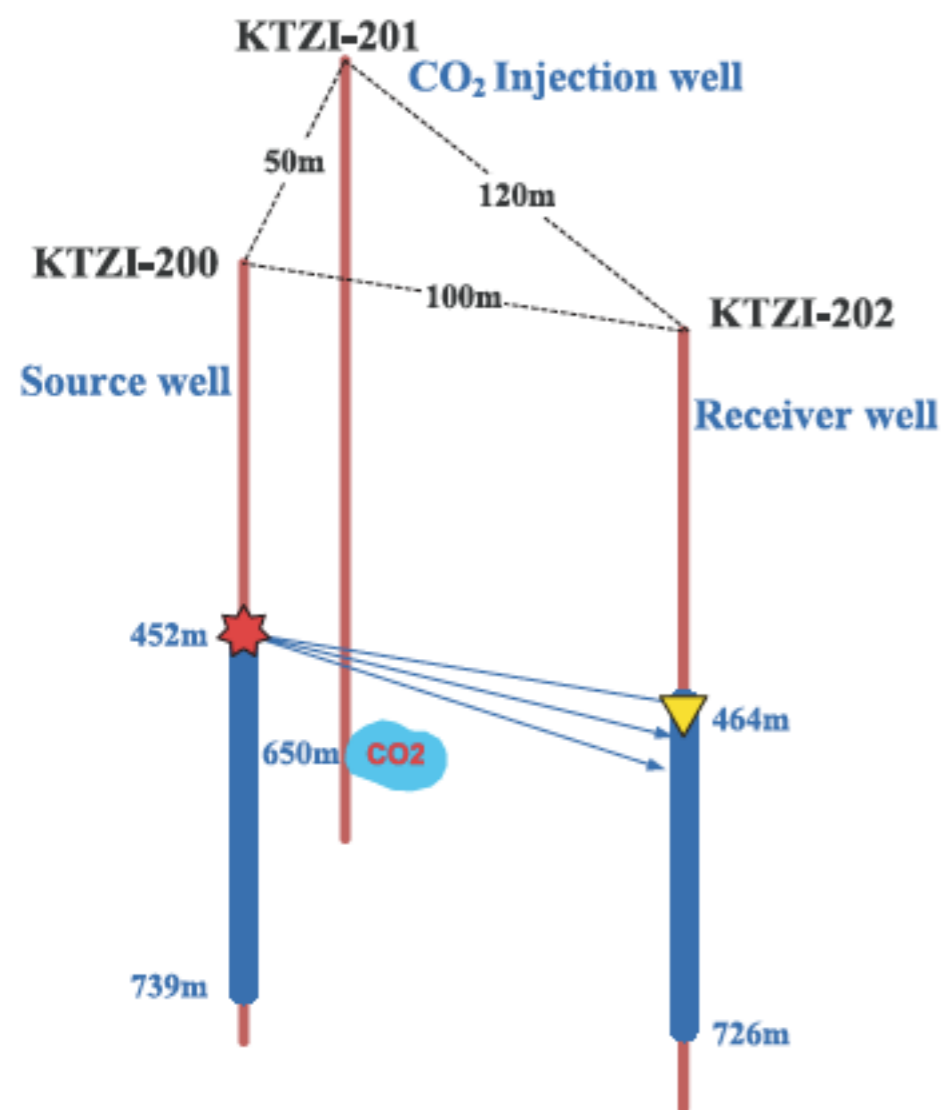
Méthode géophysique: Suivi temporel

Les levés sismiques entre forages peuvent être utilisés pour faire le suivi de l'injection de CO₂



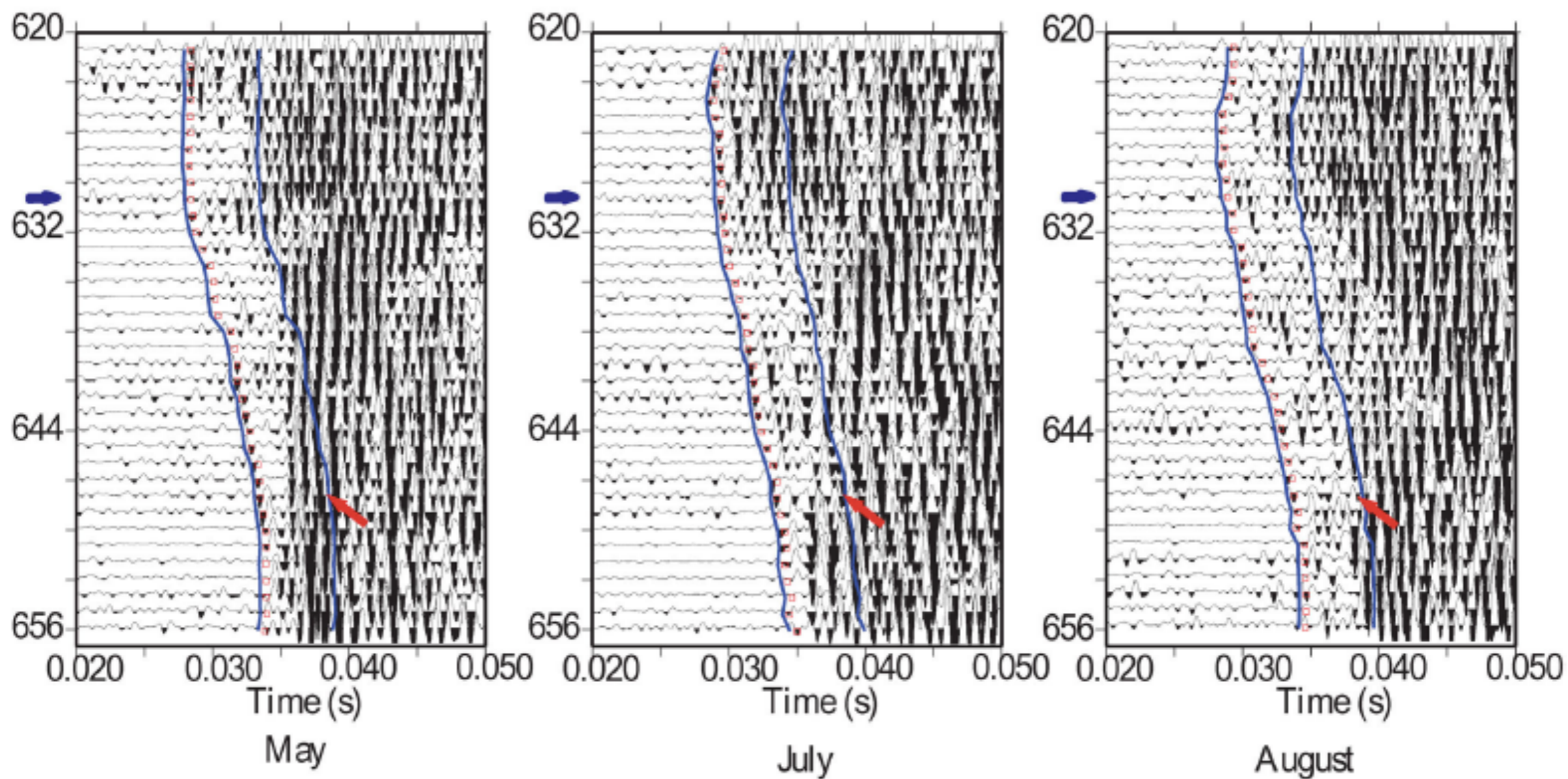
Méthode géophysique: Suivi temporel

Exemple de site d'injection Ketzin en Allemagne



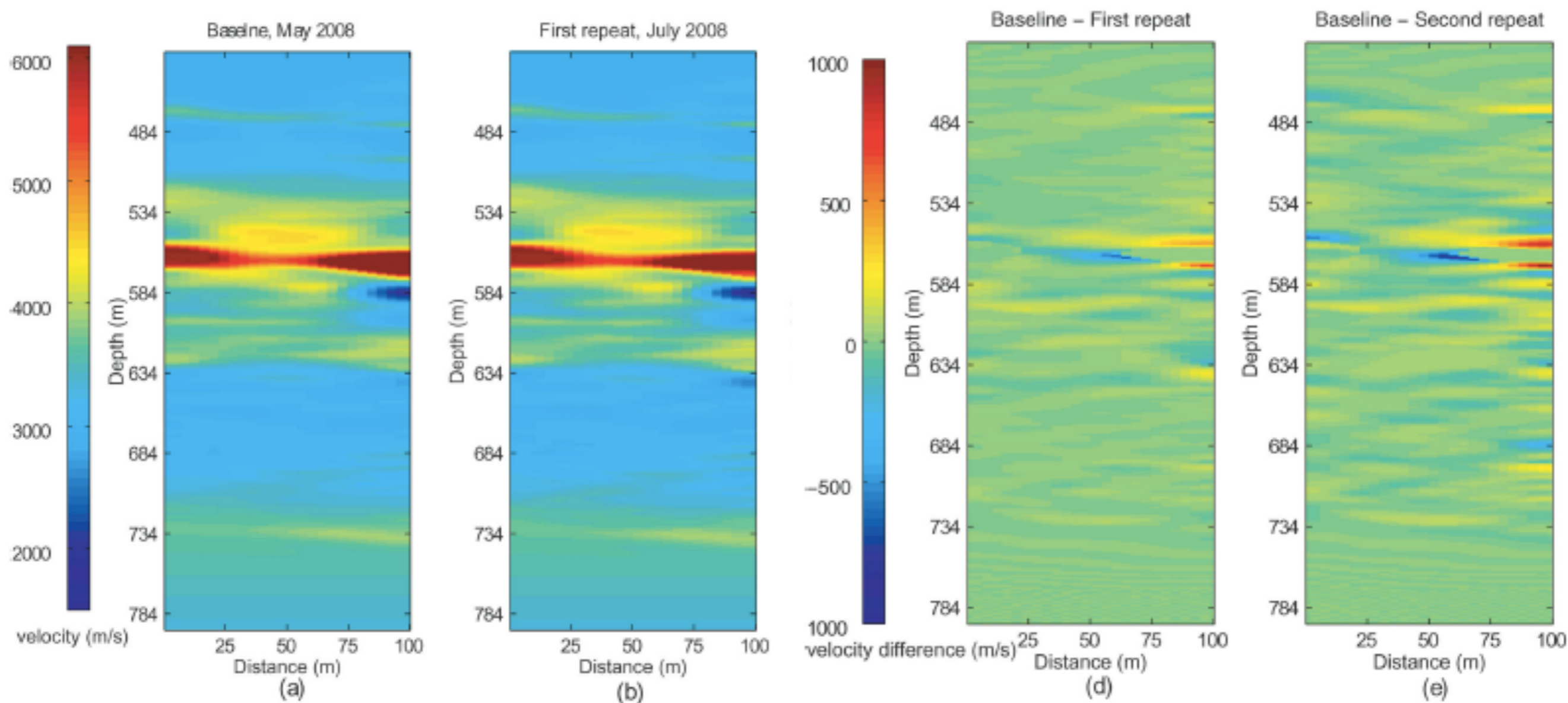
Acquisition des données

Exemple de données dans le temps obtenu au site d'injection Ketzin.



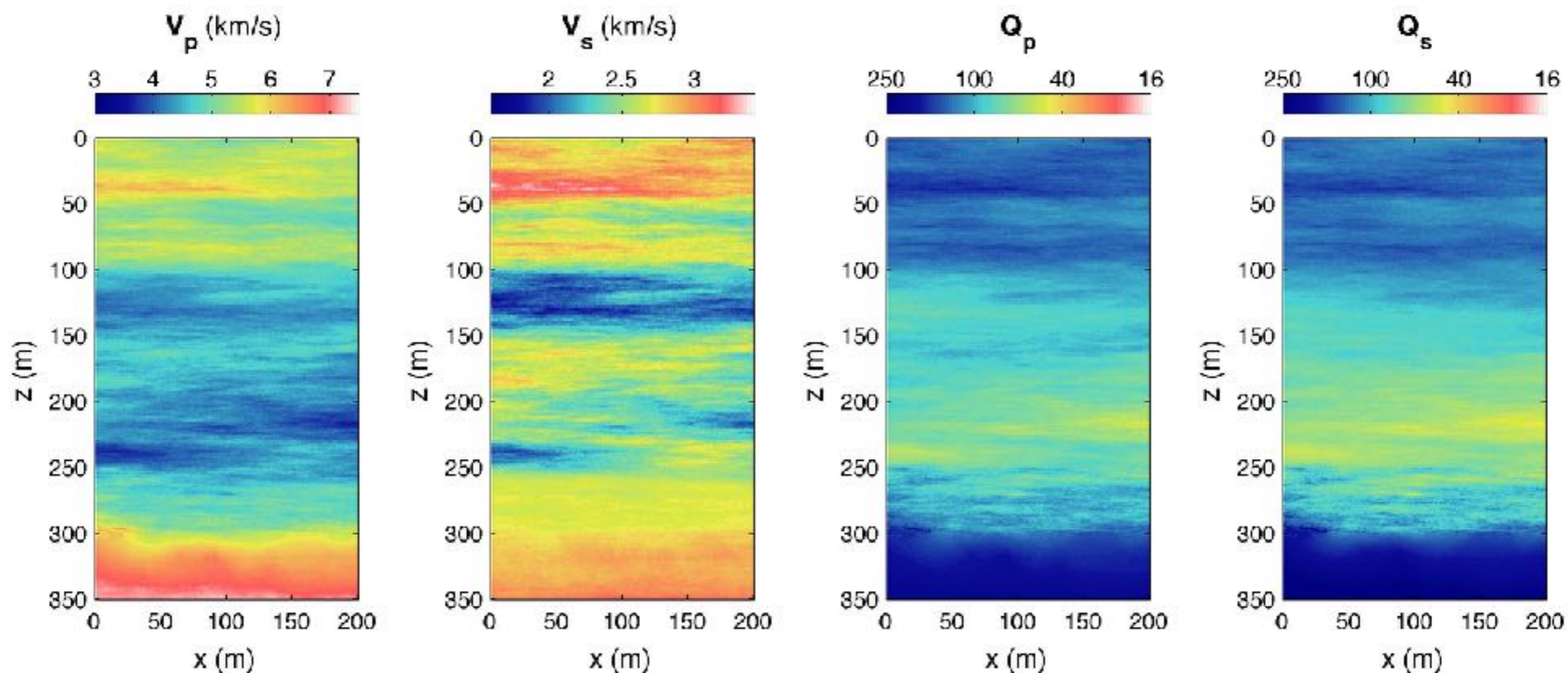
Traitement des données

Exemple de données dans le temps obtenu au site d'injection Ketzin.



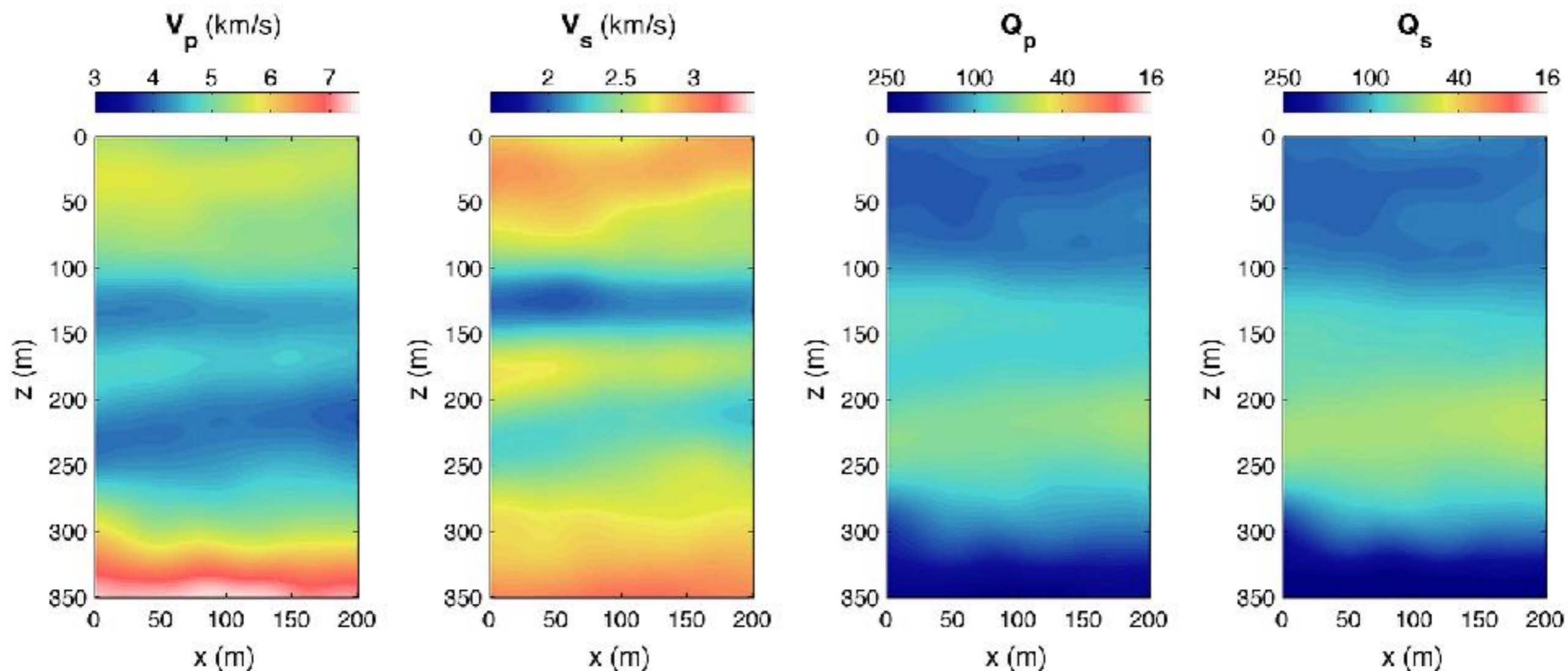
Recherche: vers l'inversion de formes d'onde

Peut-on retrouver les vitesses et les facteurs d'atténuation à plus haute résolution en utilisant l'inversion de forme d'ondes ?



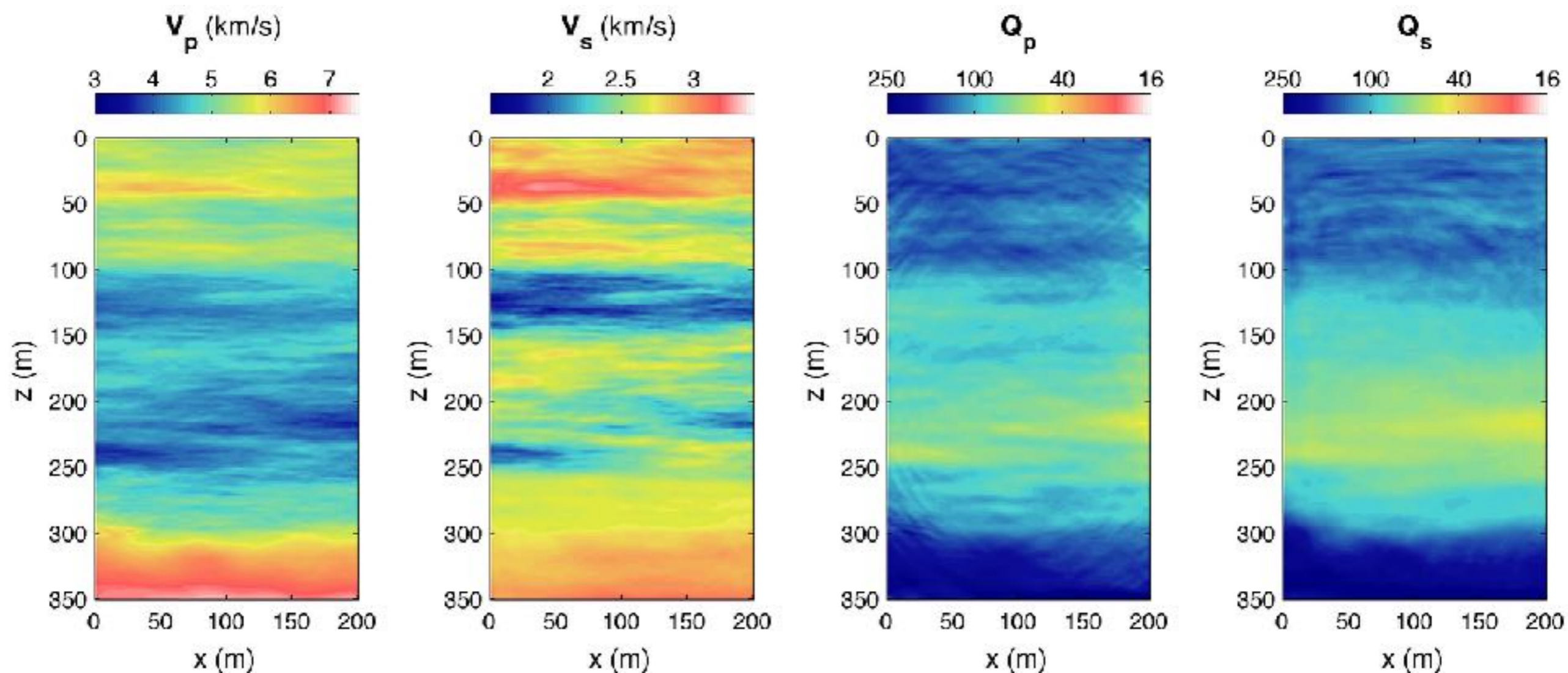
Recherche: vers l'inversion de formes d'onde

Voici les propriétés qui pourraient être retrouvées grâce à la **tomographie par tracé de rais**.



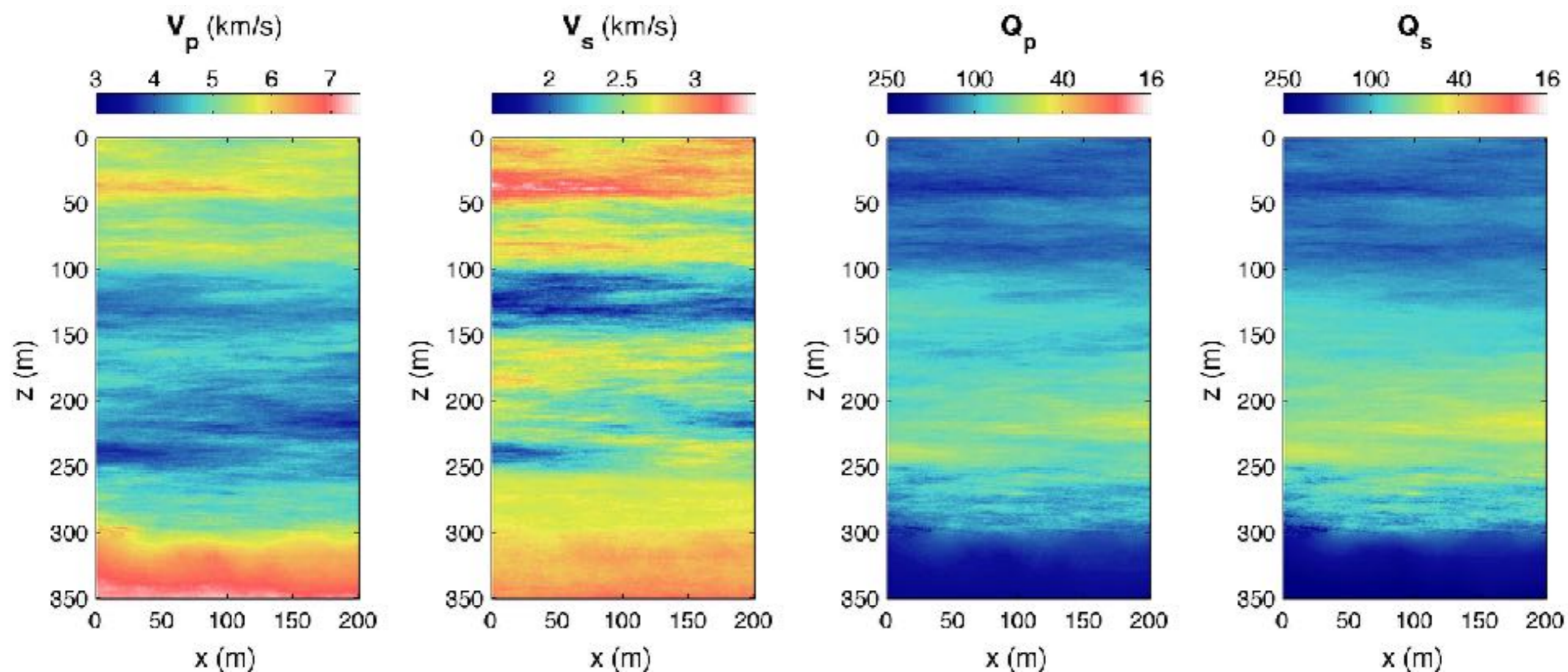
Recherche: vers l'inversion de formes d'onde

Voici les propriétés qui pourraient être retrouvées grâce à l'**inversion de forme d'onde**.



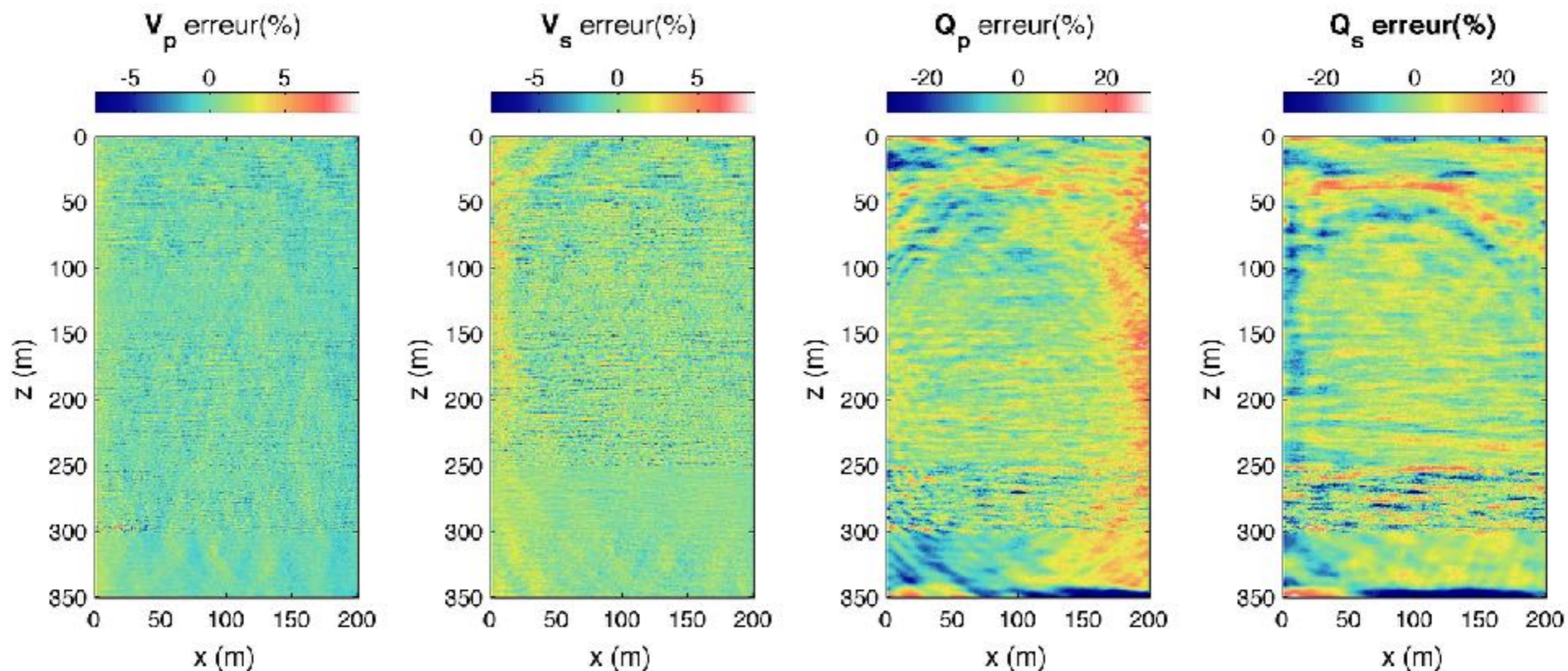
Recherche: vers l'inversion de formes d'onde

Comparez au **modèle vrai** qui devrait être retrouvé.



Recherche: vers l'inversion de formes d'onde

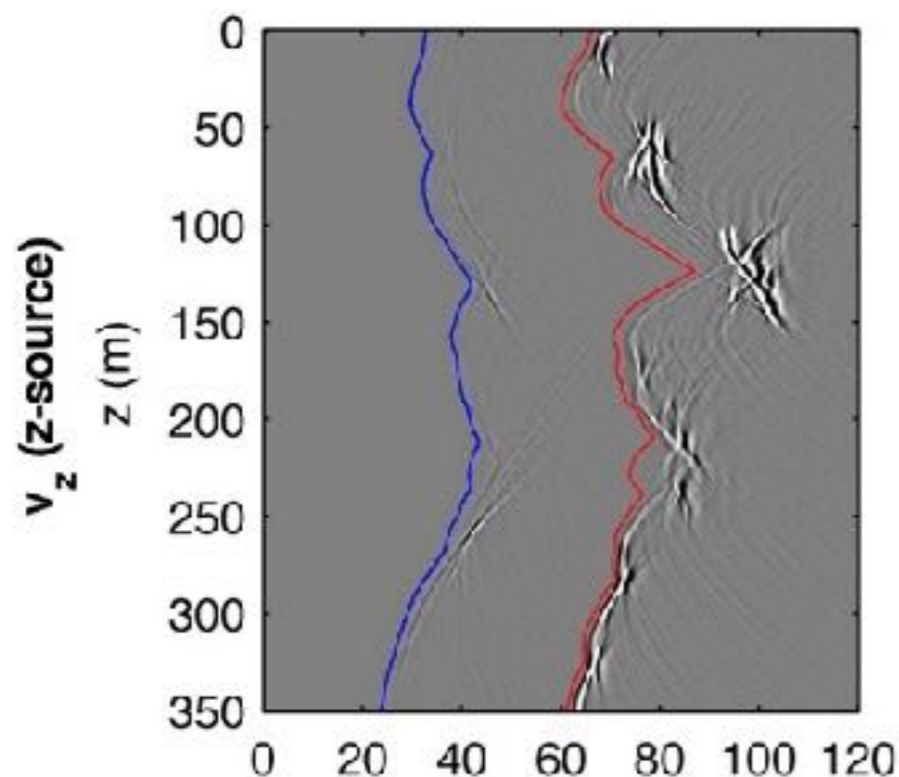
L'erreur après inversion est assez faible, moins de 5 % pour les vitesses.



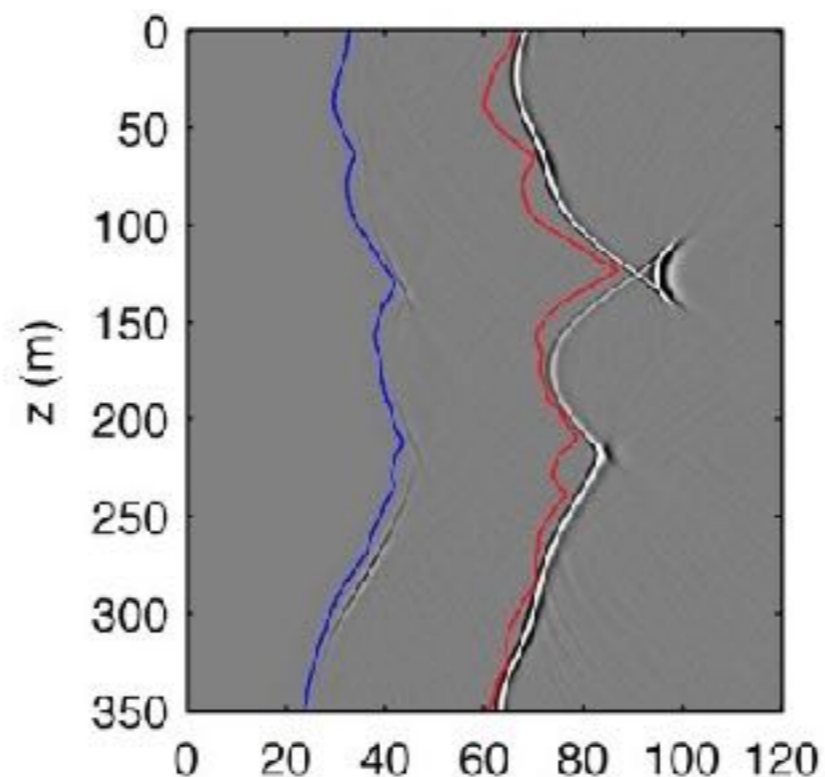
Recherche: vers l'inversion de formes d'onde

L'inversion de formes d'onde permet de reproduire fidèlement les données mesurées et donc utilise l'ensemble des informations sismiques!

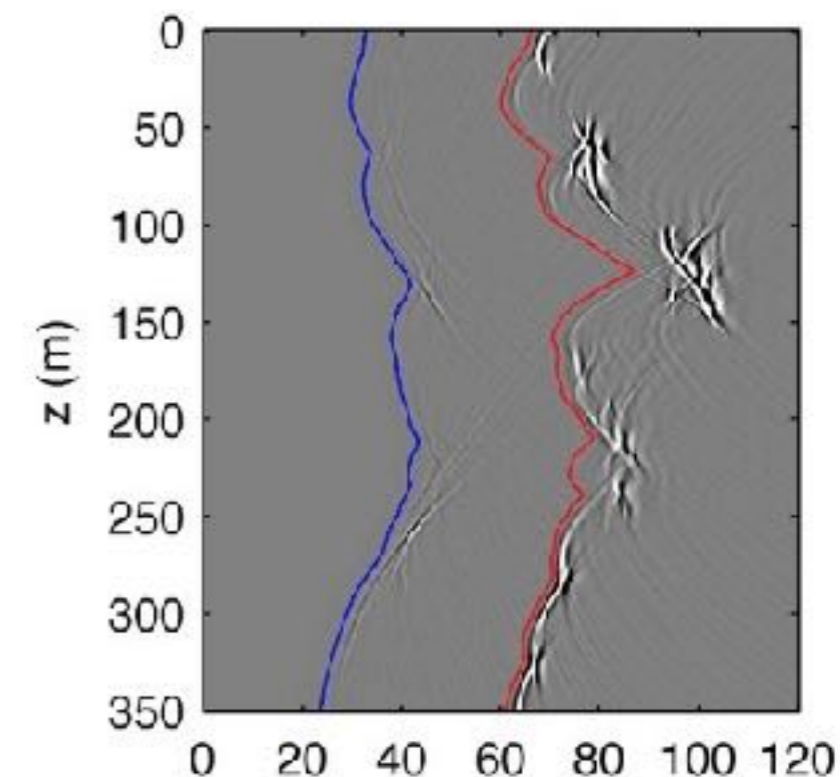
Modèle vrai



Modèle initial



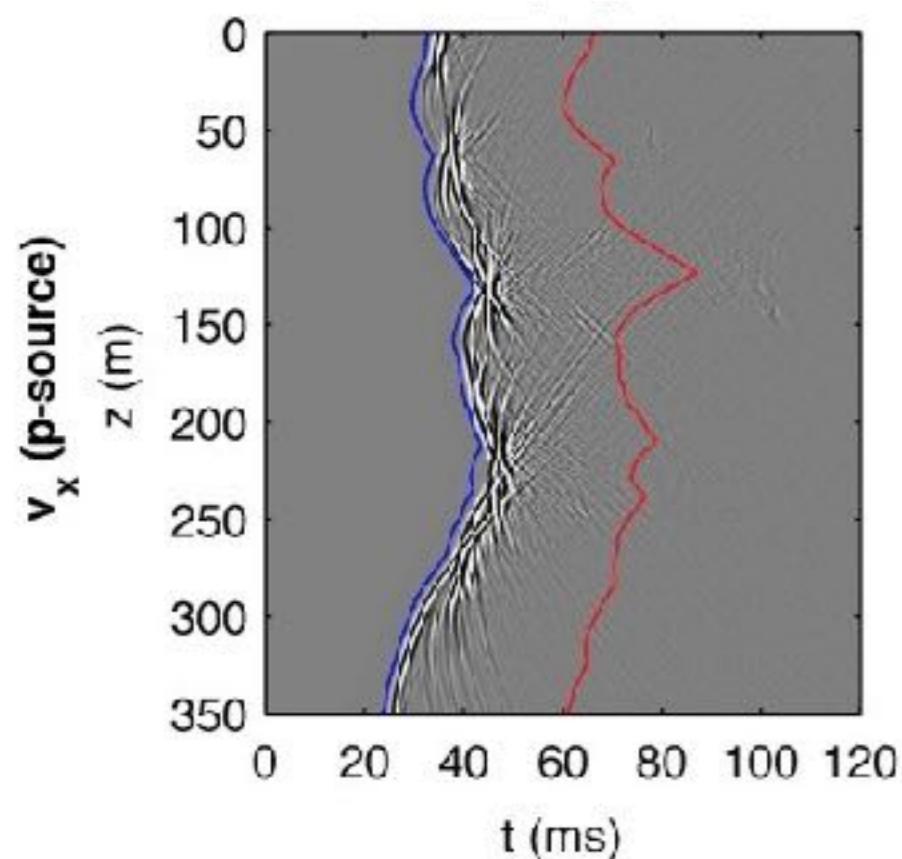
Modèle inversé



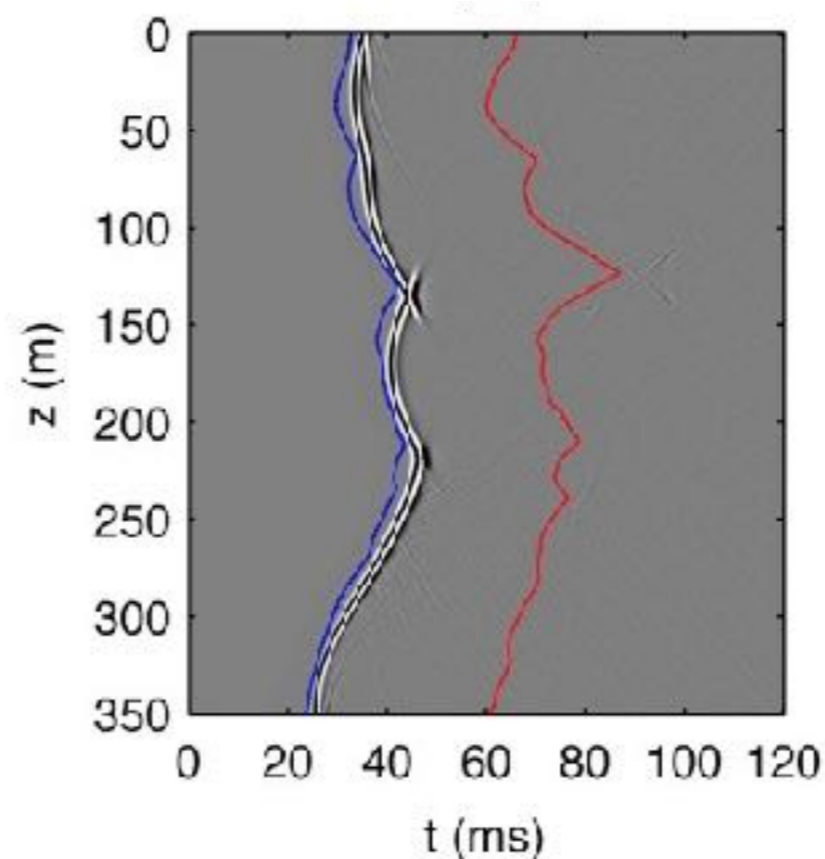
Recherche: vers l'inversion de formes d'onde

L'inversion de formes d'onde permet de reproduire fidèlement les données mesurées et donc utilise l'ensemble des informations sismiques!

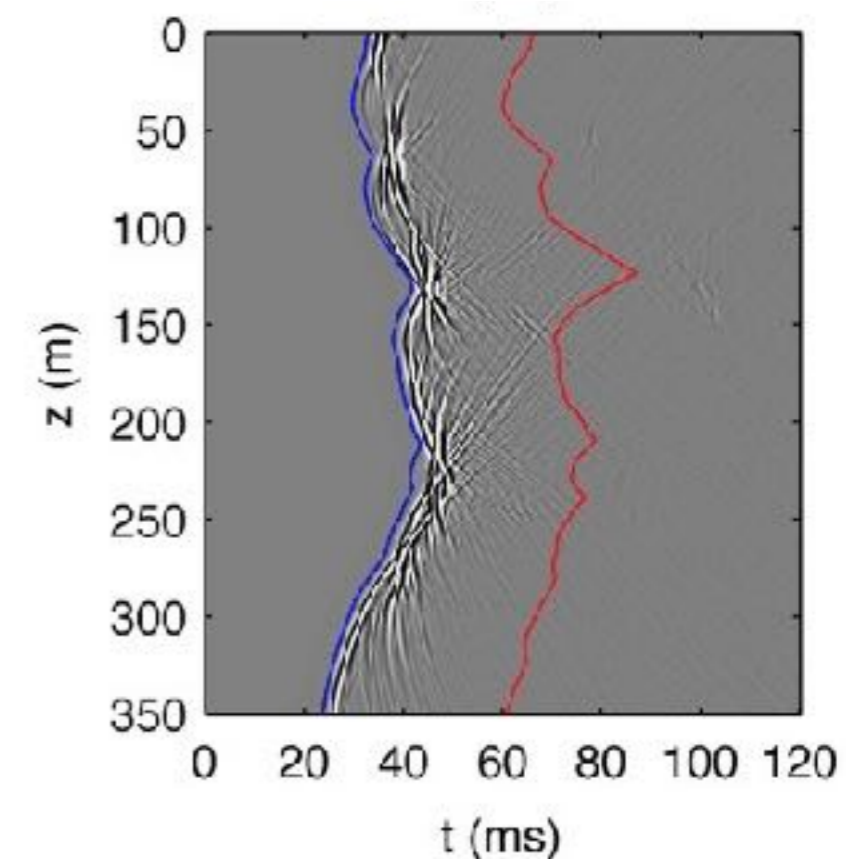
Modèle vrai



Modèle initial

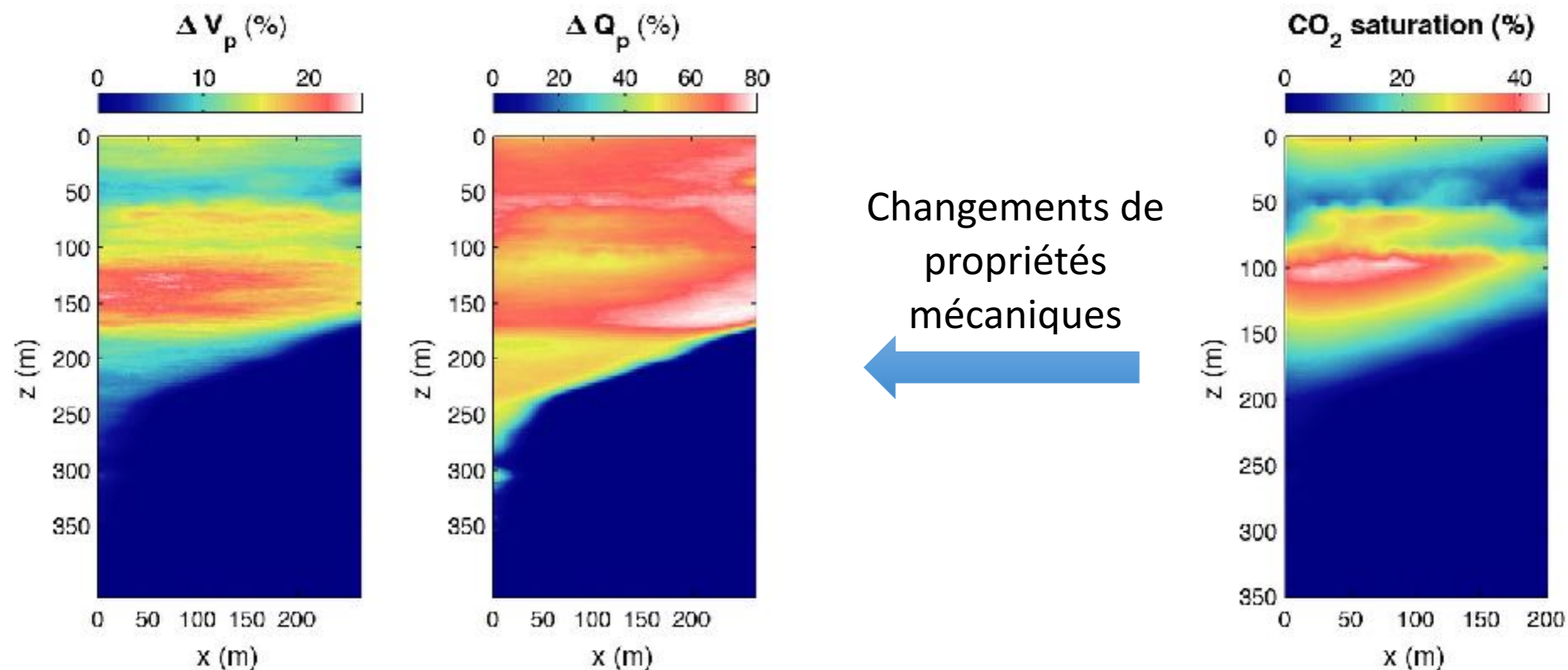


Modèle inversé



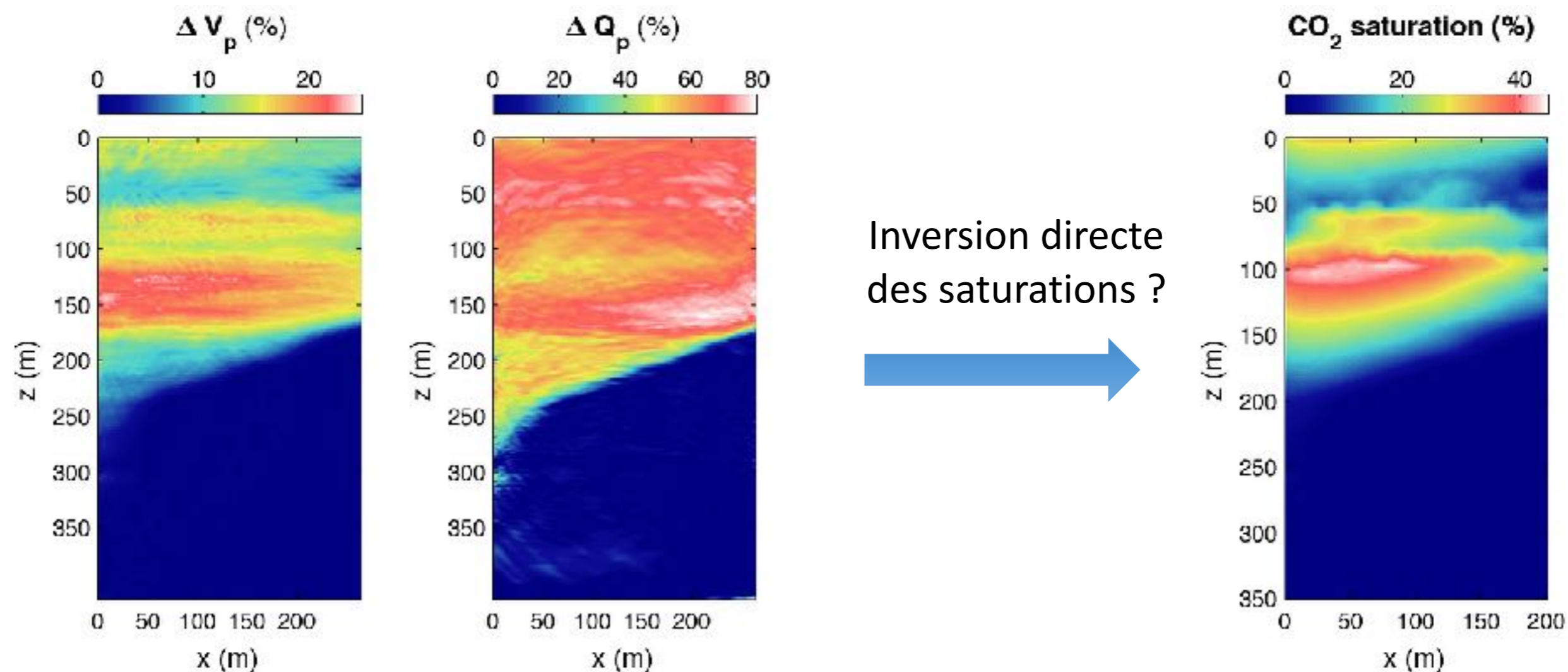
Résultat: suivi de l'injection de CO₂

Le suivi dans le temps de V_p et de Q_p peut nous renseigner sur la saturation en CO₂.



Résultat: suivi de l'injection de CO₂

L'inversion de formes d'onde permet de reconstruire les variations de Qp et de Vp à très haute résolution, et donner des informations qualitatives sur la saturation en CO₂.

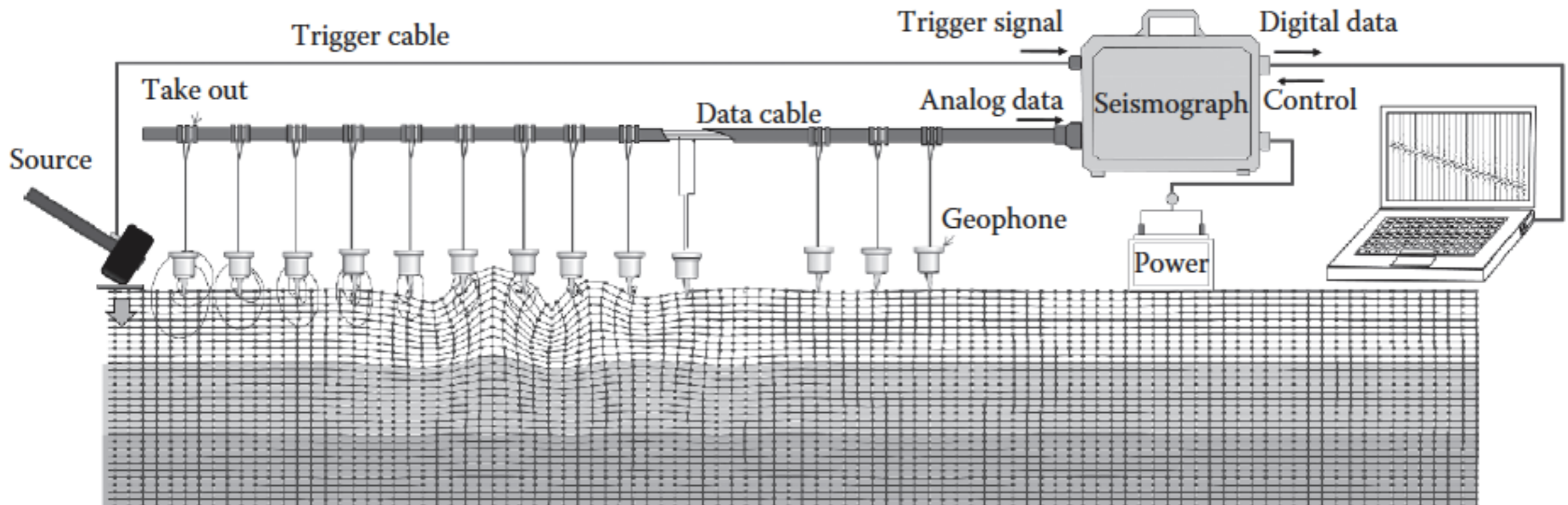


Matériel d'acquisition

Matériel de base en génie

Le matériel typique comprend:

- Sismographe (souvent autour de 24 canaux)
- Géophones
- Source
- Signal de déclenchement (trigger)



Géophones

Les géophones permettent de mesurer la **vitesse de déplacement** en un point du sol. L'équation d'onde donnait la solution du déplacement:

$$\rho \frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial t^2} = (K + 1/3\mu) \nabla \delta + \mu \nabla^2 \mathbf{u}$$

avec la vitesse de déplacement:

$$\mathbf{v} = \frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = (v_x, v_y, v_z)$$

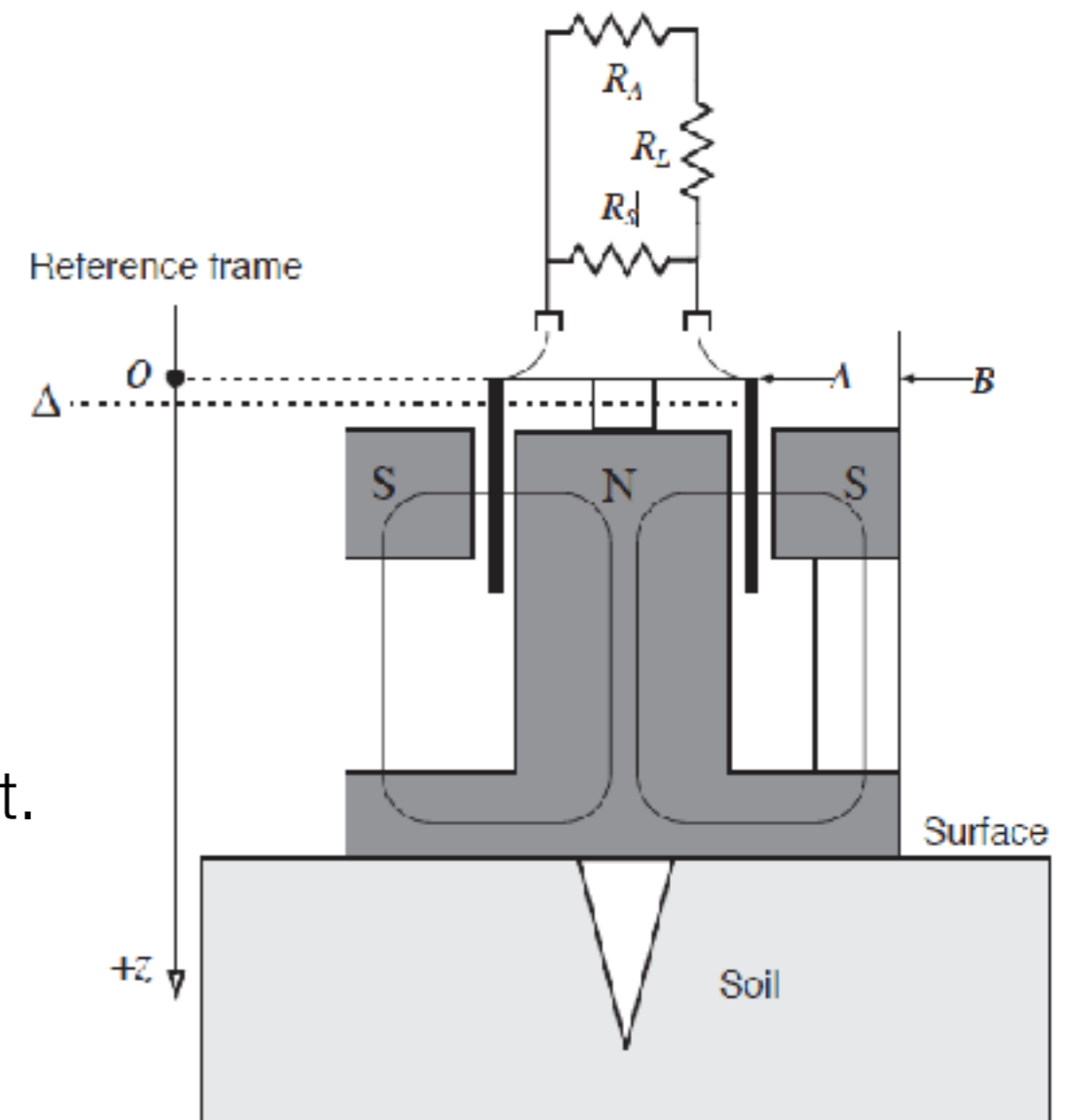
La mesure du géophone est donc directionnelle !



Géophones

Principe de fonctionnement:

- Un aimant est suspendu par un ressort à l'intérieur d'une bobine.
- Lorsque le sol vibre, l'aimant oscille à l'intérieur de la bobine, produisant une tension par induction.
- Le signal mesuré est donc une tension proportionnelle à la vitesse de déplacement.



Géophones

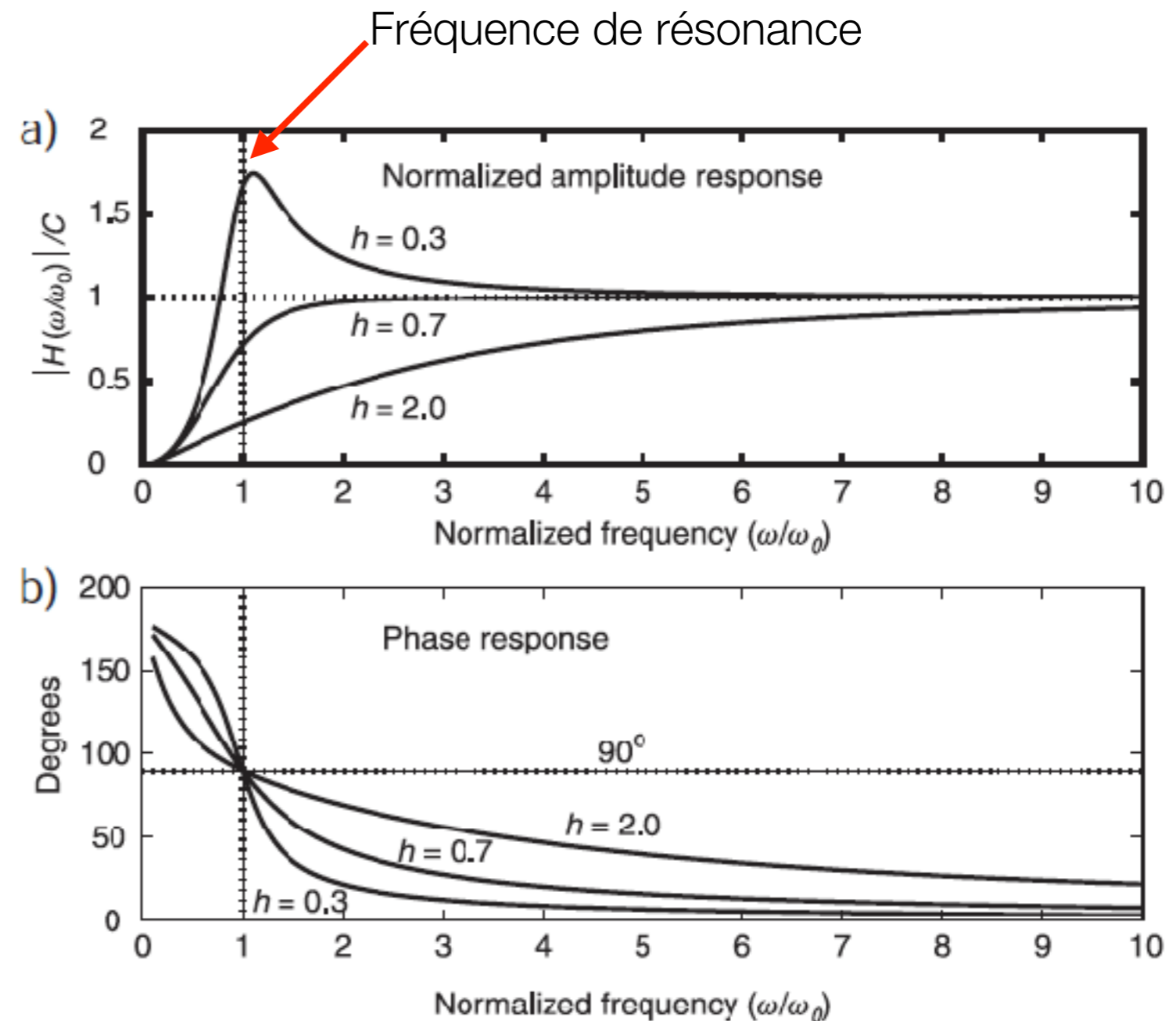
Le système masse-ressort est amorti afin de réduire le phénomène de résonance.

Sa réponse en fréquence est donnée par:

$$|\tilde{H}(\omega)| = \frac{C\omega^2}{\sqrt{(\omega^2 - \omega_0^2)^2 + 4h^2\omega^2\omega_0^2}}$$

$$\angle \tilde{H}(\omega) = -\arctan\left(\frac{-2h\omega\omega_0}{\omega^2 - \omega_0^2}\right)$$

où ω_0 est la fréquence propre et h est le coefficient d'amortissement (mécanique et électrique)

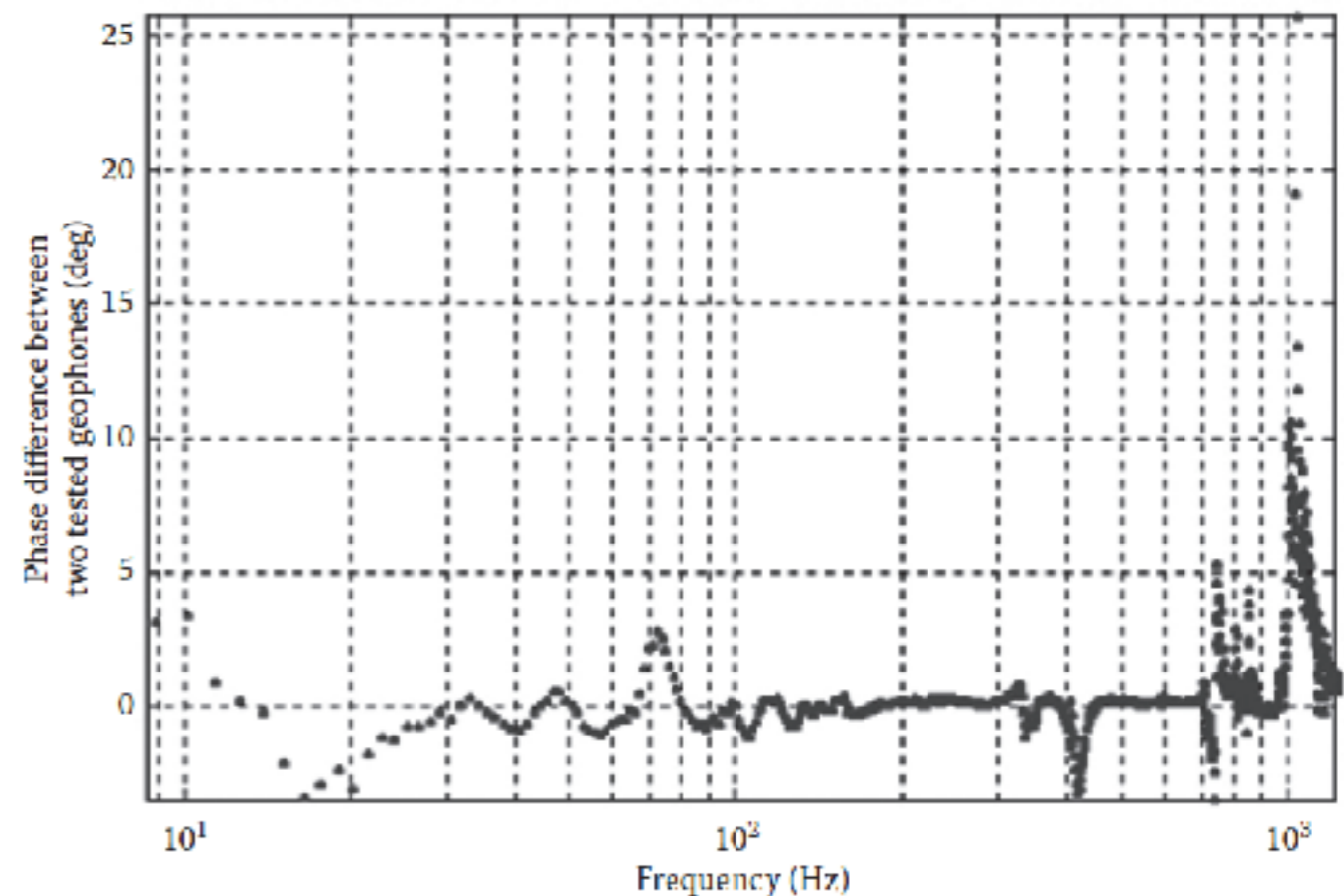


Géophones

Les géophones ont une signature en phase et en fréquence, et donc **ne mesurent pas exactement la vitesse de déplacement!**

De plus, pour les fréquences trop éloignées de la fréquence naturelle, la réponse en phase devient erratique.

Il faut donc choisir la fréquence naturelle pour qu'elle corresponde à la bande de fréquence du signal mesuré



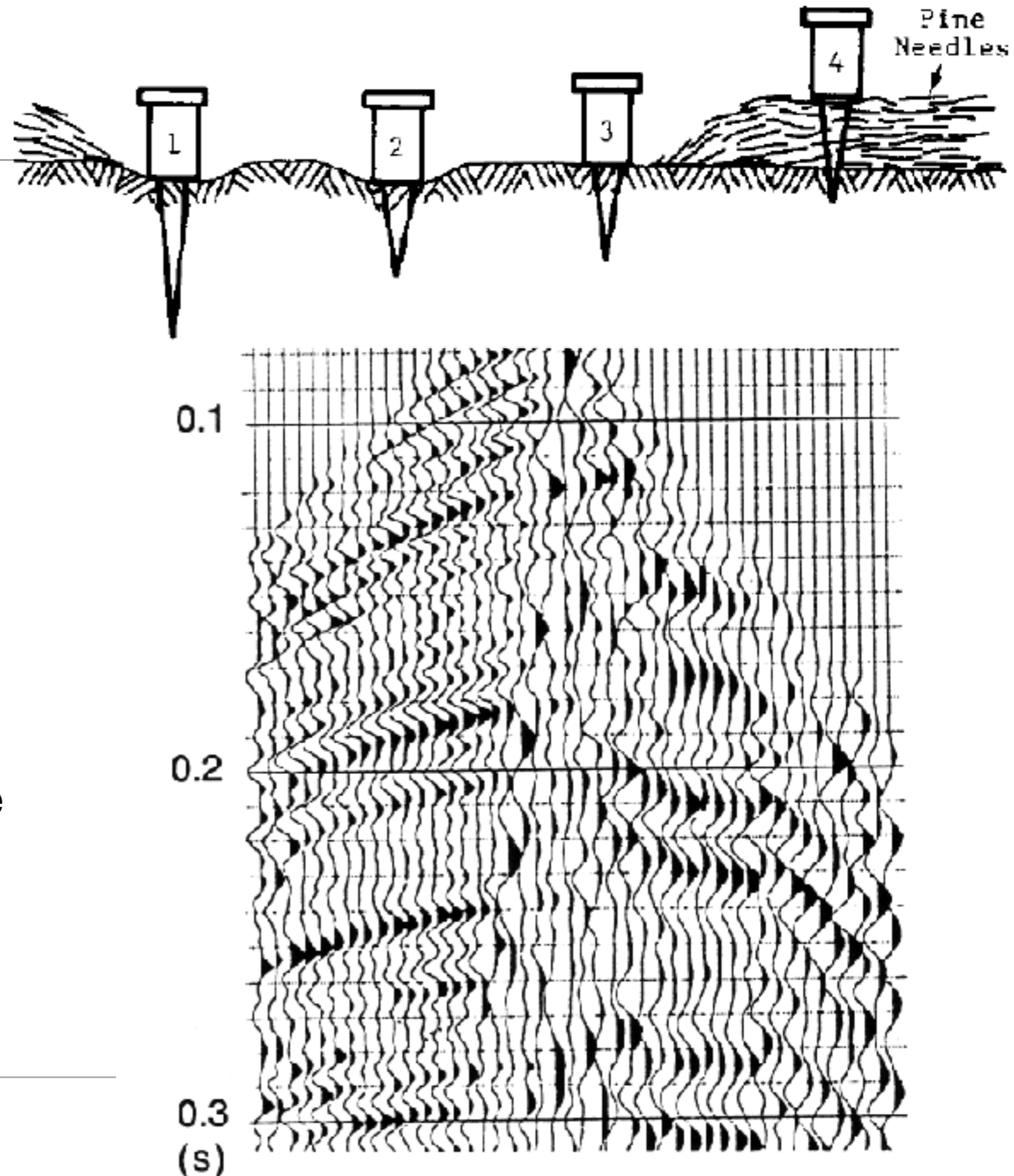
Différence de phase entre deux géophones de même modèle!

Géophones

Le couplage entre le géophone et le sol affecte aussi le signal mesuré.

Obtenir un bon couplage est donc essentiel pour obtenir des données de qualité !

Les **géophones sont plantés dans le sol** et même parfois enfouis afin d'améliorer la qualité du signal!



Géophones

Le couplage reste un compromis: enfouir les géophones empêche une bonne productivité.

Dans certains cas, un **couplage gravitationnel** est suffisant (par exemple sur l'asphalte ou lorsqu'un taux de production élevé est nécessaire)



Socle pour les surfaces solides



Un « landstreamer » place les géophones sur des traineaux en acier pour un taux de production élevé!

Sources

La source permet de générer de façon contrôlée des vibrations mécaniques du sol.

- Doit produire suffisamment d'énergie pour se propager jusqu'à la cible et revenir en surface!
- Doit produire un spectre en fréquence assez large
- Facilité de mise en oeuvre
- Respect de l'environnement
- Répétabilité



Sources: Masse

Pour les projets en génie, souvent une simple masse qui percute une plaque en acier permet une énergie suffisante.

- Robuste
- Simple d'utilisation
- Bonne plage de fréquence
- Énergie limitée
- Tôt de production limité



Sommation

On peut augmenter significativement le rapport signal-sur-bruit en sommant plusieurs tirs.

Les bruits non-corrélés seront ainsi atténués selon, et le rapport signal sur bruit S/N augmentera selon:

$$\frac{(S/N)_{\text{somme}}}{(S/N)_{\text{tracce}}} \approx \sqrt{n}$$

où n est le nombre de tirs qui ont été sommés.



Source: Impacts accélérés

Les sources à impacts accélérés reprennent le concept de la masse, mais l'accélèrent grâce à une bande élastique.

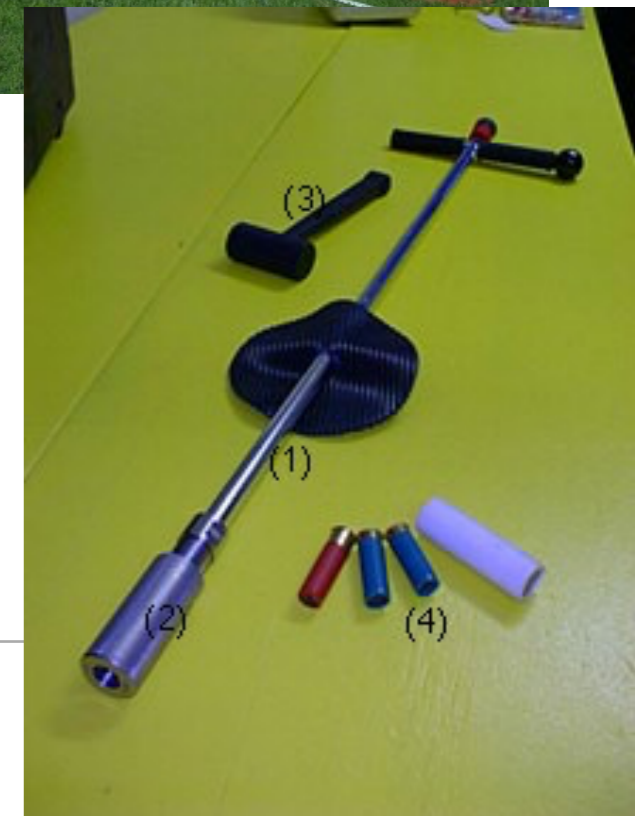
- Robuste
- Simple d'utilisation
- Bonne plage de fréquence
- Une énergie appréciable (quelques centaines de mètres en réflexion)
- Taux de production élevé.



Sources: Fusil Betsy

Fusil Besty: Explosion d'une balle à blanc dans un trou peu profond:

- Meilleure puissance (mais dépend de la force des balles à blanc)
- Bonne plage de fréquence
- Tôt de production plutôt faible (nécessite de creuser un trou)
- Peut relâcher des produits toxiques



Sources: Dynamite

La dynamite est utilisée lorsqu'une grande puissance est requise (de la sismique réfraction aux levés en réflexion profonds)

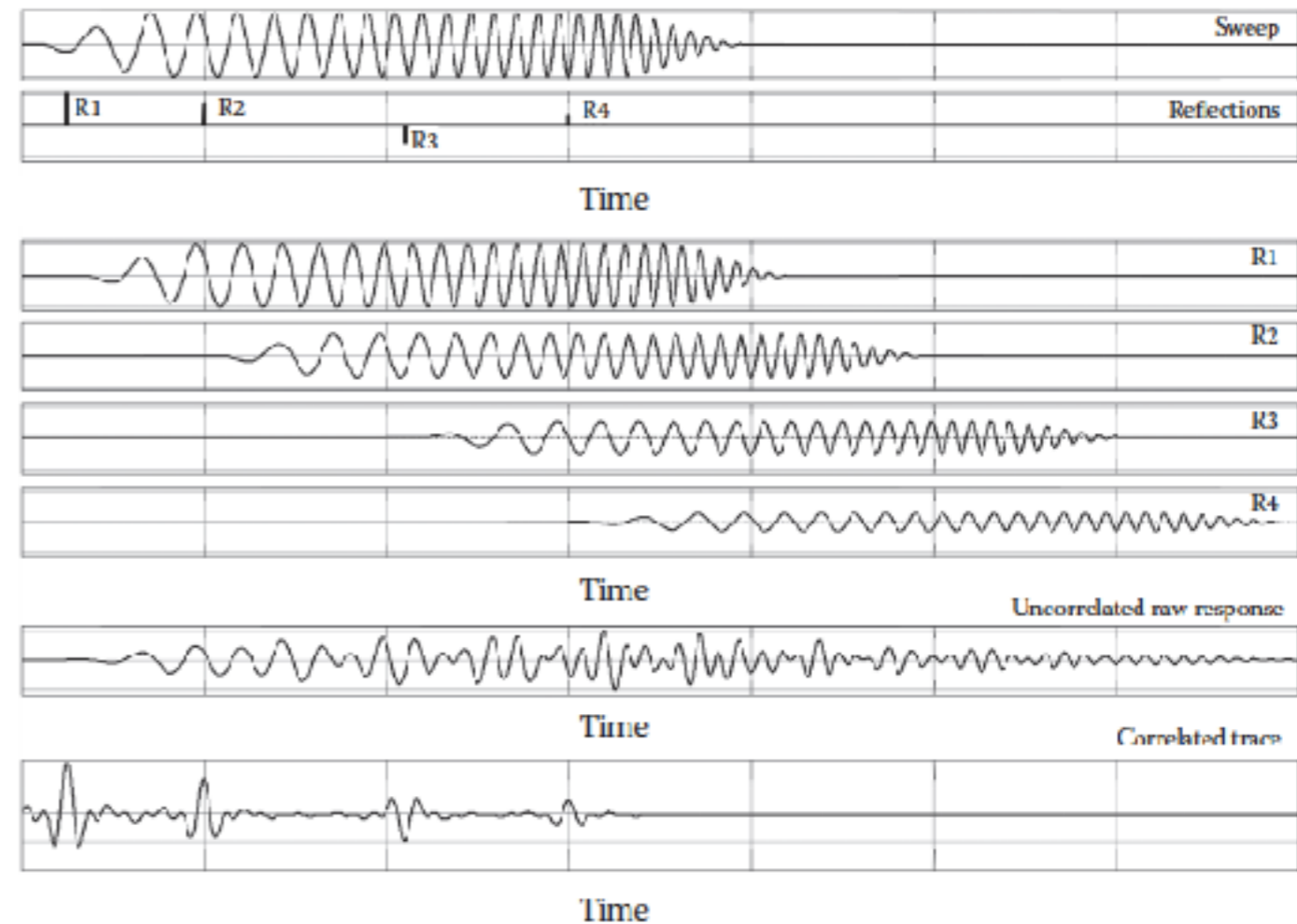
- Puissance plus ou moins illimitée
- Bonne plage de fréquence
- Nécessite des permis
- Tôt de production faible
- En dernier recours pour les projets en génie



Sources: Vibroseis

Les sources vibrantes sont une alternative à la dynamite.

- Grande puissance possible
- Plage de fréquence ajustable
- Tôt de production élevé
- Nécessite l'accès de camions encombrants
- Complexe à mettre en oeuvre et à traiter



<https://www.youtube.com/watch?v=DaX4krPTeJs>

Sources: Ondes S

Certaines sources sont spécialisées pour produire des ondes de cisaillement. La force appliquée est parallèle au sol.



Source SH vibrante



Source SH à impact

Sources: Canons à air

En milieu marin, les canons à air sont le type de source le plus commun:

- Une chambre contenant de l'air est pressurisée jusqu'à des pressions de 20 MPa
- L'air est brusquement relâché ce qui cause une onde de choc dans l'eau
- Peut être utilisé tant dans l'océan que dans des rivières pour les projets en génie

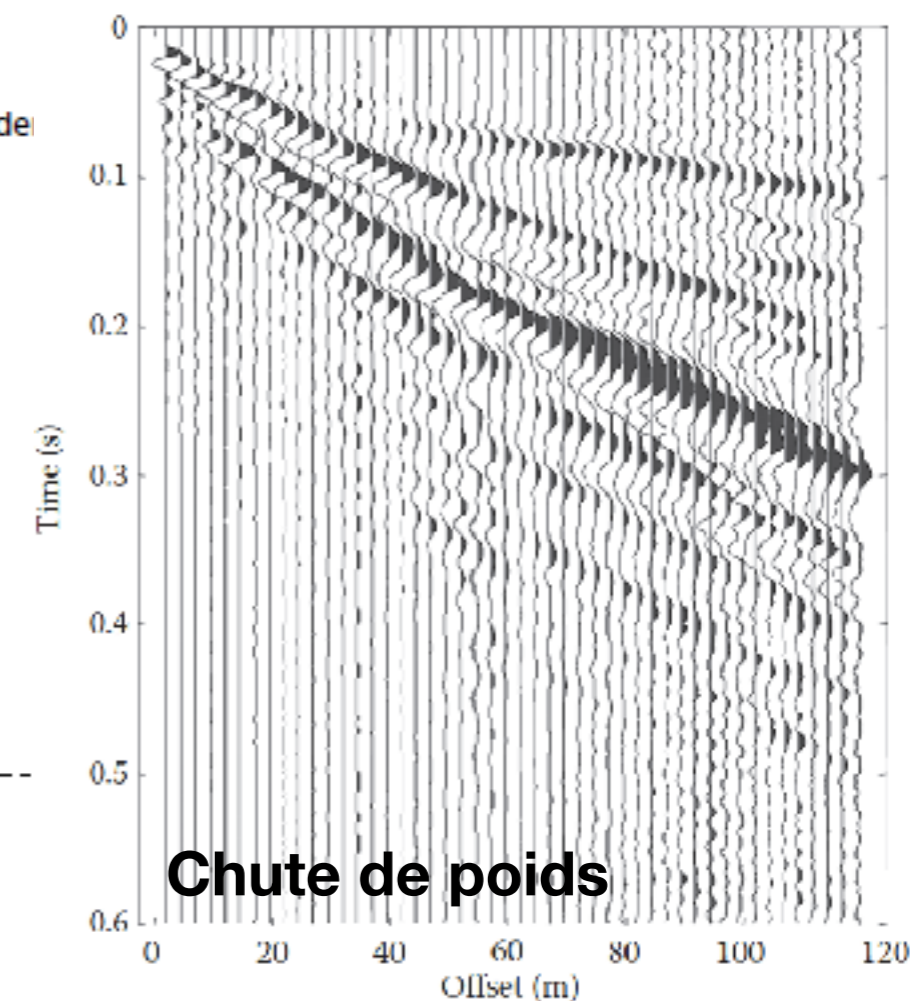
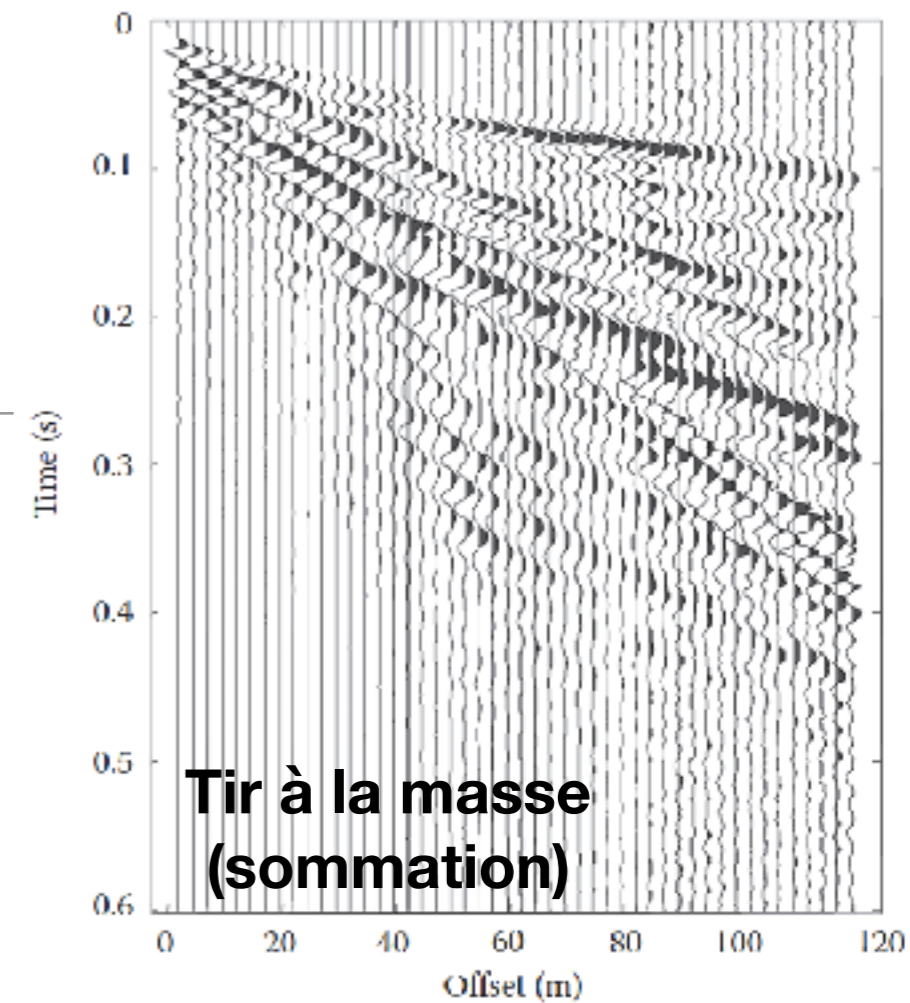
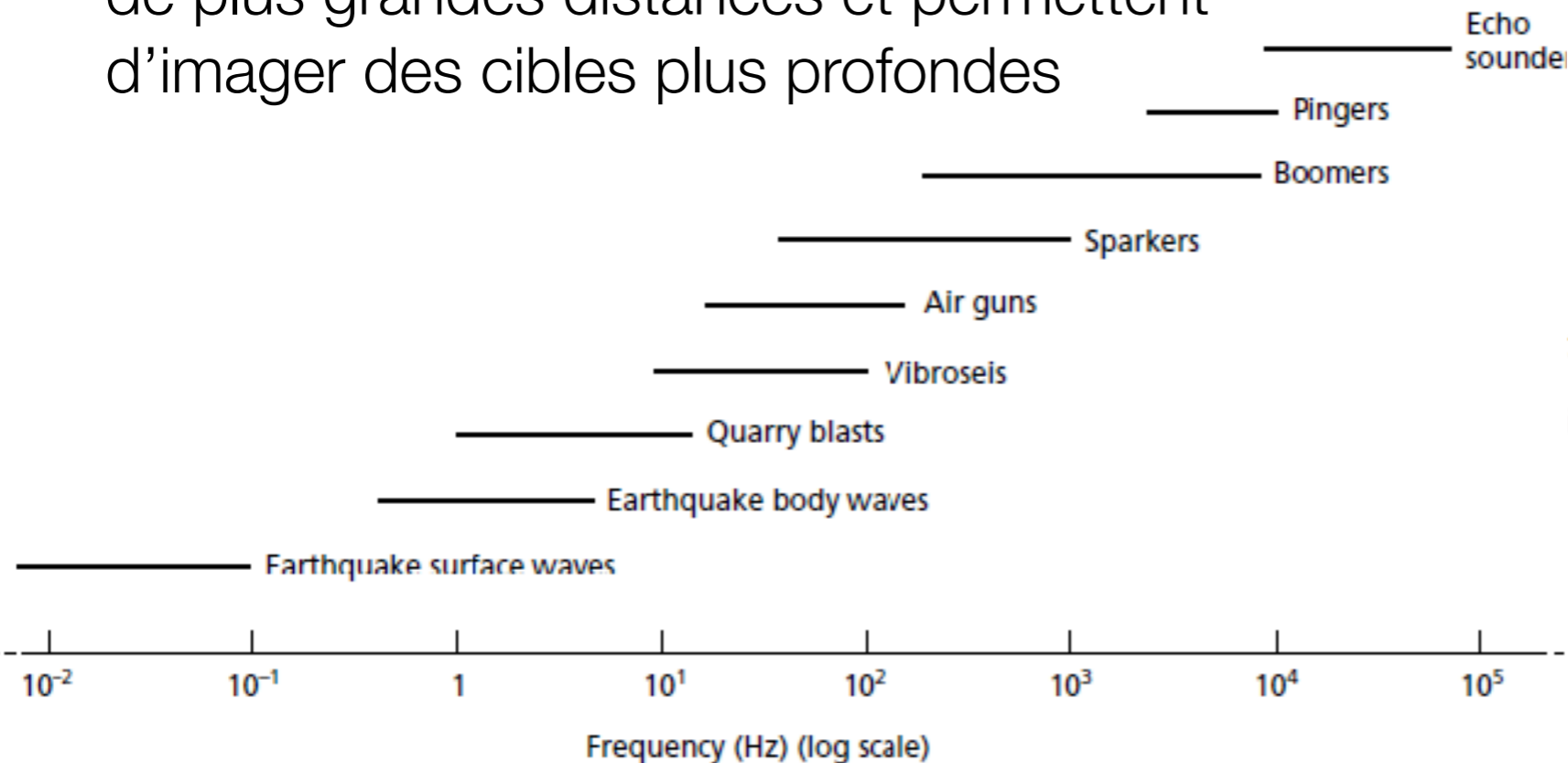


<https://www.youtube.com/watch?v=iMBq4xFNYU0>

Sources: Contenu en fréquence

Le contenu en fréquence d'une source varie souvent avec sa puissance.

- Des fréquences élevées sont nécessaires pour atteindre des hautes résolutions
- De basses fréquences se propagent sur de plus grandes distances et permettent d'imager des cibles plus profondes



Sismographe

Le signal généré par la source et détecté par le géophone est enregistré par un sismographe

- Numérisation du signal analogue
- Nombre de canaux limité
- Déclenche l'enregistrement précisément au moment où la source est mise en action
- Synchronisation temporelle de tous les enregistrements

