

GLQ3205

Géophysique appliquée 2

Méthodes sismiques 3: Sismique réfraction (suite)

Ahmed Mhenni
ahmed.mhenni@polymtl.ca

Été 2024

Plan du cours

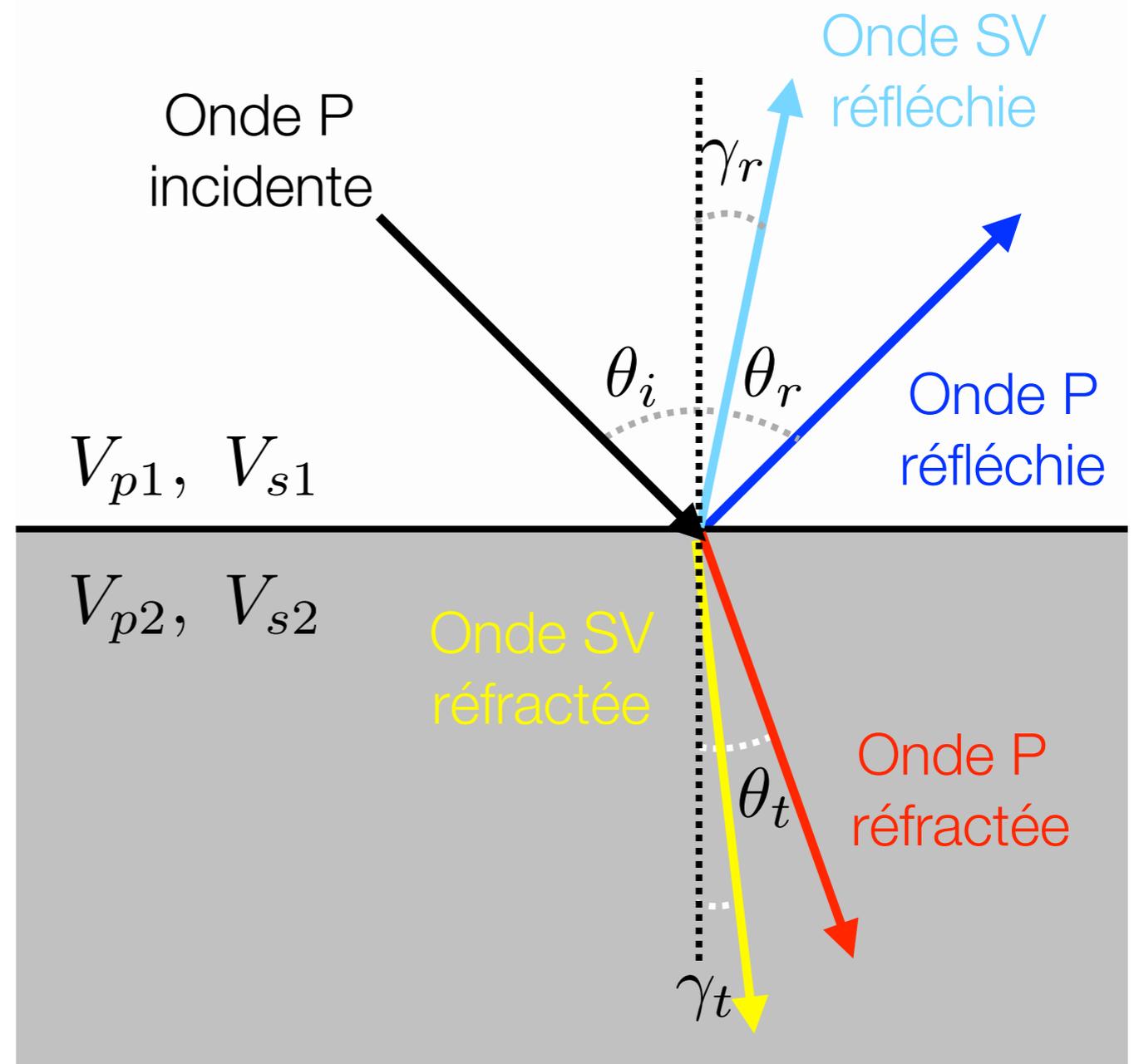
1. Révision
2. Vitesses sismiques
3. Méthode du Plus-Minus
4. Mise en oeuvre et applications
5. Étude de cas

Réfractions en sismique

Attention! En sismique, nous avons plusieurs types d'ondes (P et S). Une interface produira une conversion de mode, et chaque type d'onde répond à l'équation de réfraction généralisée:

$$p = \frac{\sin \theta_i}{V_{p1}} = \frac{\sin \theta_t}{V_{p2}} = \frac{\sin \gamma_r}{V_{s1}} = \frac{\sin \gamma_t}{V_{s2}}$$

où p est le paramètre de rai.

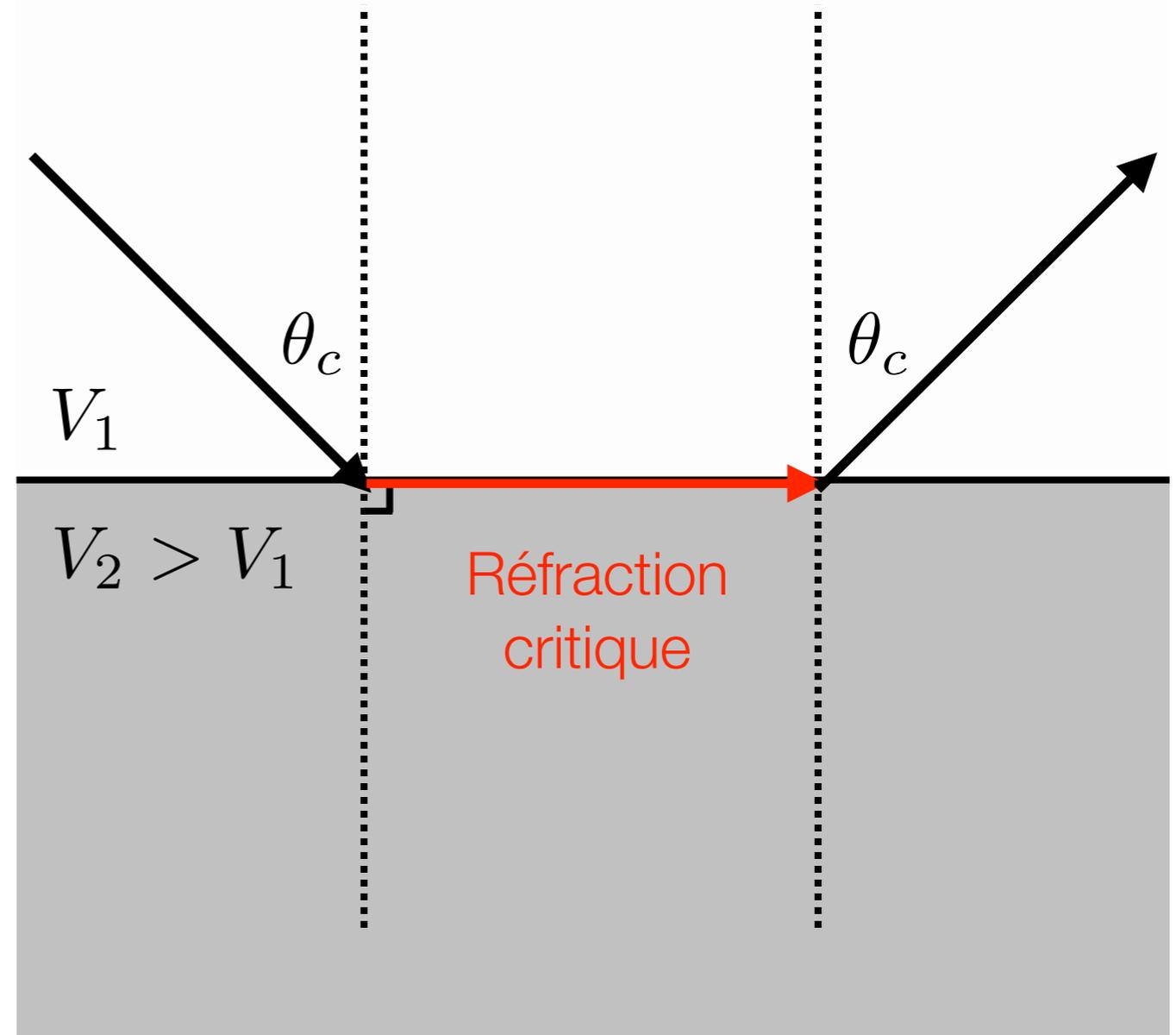


Réfraction critique

L'angle critique est donné par:

$$\theta_c = \sin^{-1} \left(\frac{V_1}{V_2} \right)$$

- La réfraction critique ne survient que si $V_2 > V_1$
- L'onde se propage à la vitesse V_2 le long de l'interface
- Selon le principe de Huygens, une onde est réémise vers le haut, à un angle égal à l'angle critique.

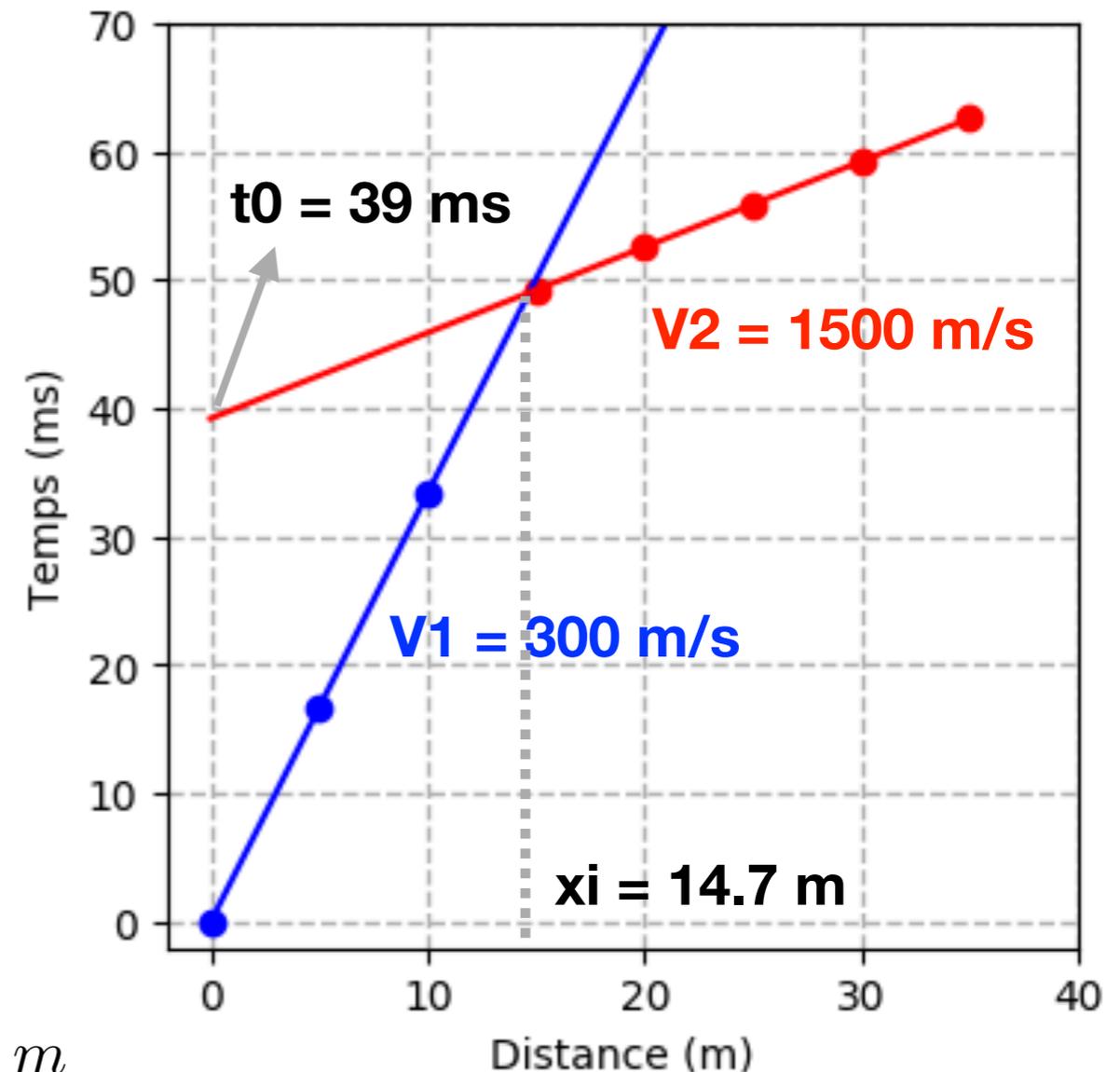


Exemple: Interprétation à deux couches

Exemple: Interprétez les temps d'arrivées suivants selon un modèle à deux couches horizontales.

1. Tracez la dromochronique
2. Identifiez les brisures de pente et assigner les arrivées à un réfracteur
3. Obtenir les vitesses par l'inverse des pentes
4. Déterminez le temps d'intercepte et la distance de croisement
5. Déterminez la profondeur sous le tir:

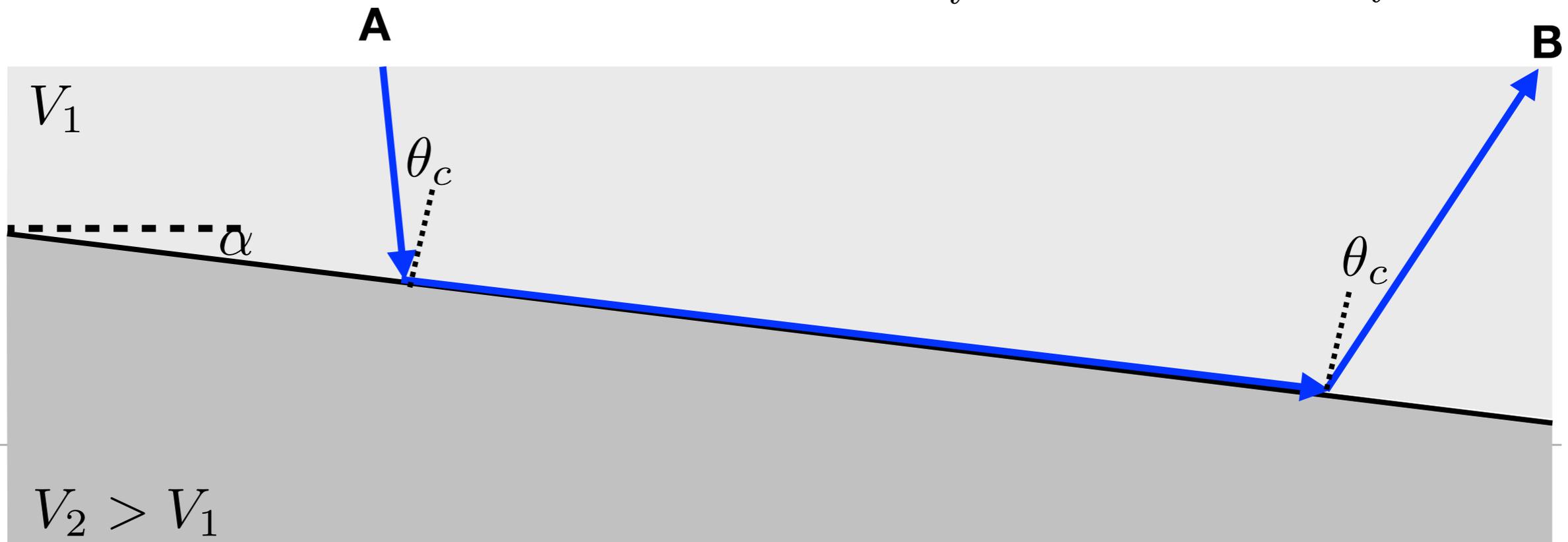
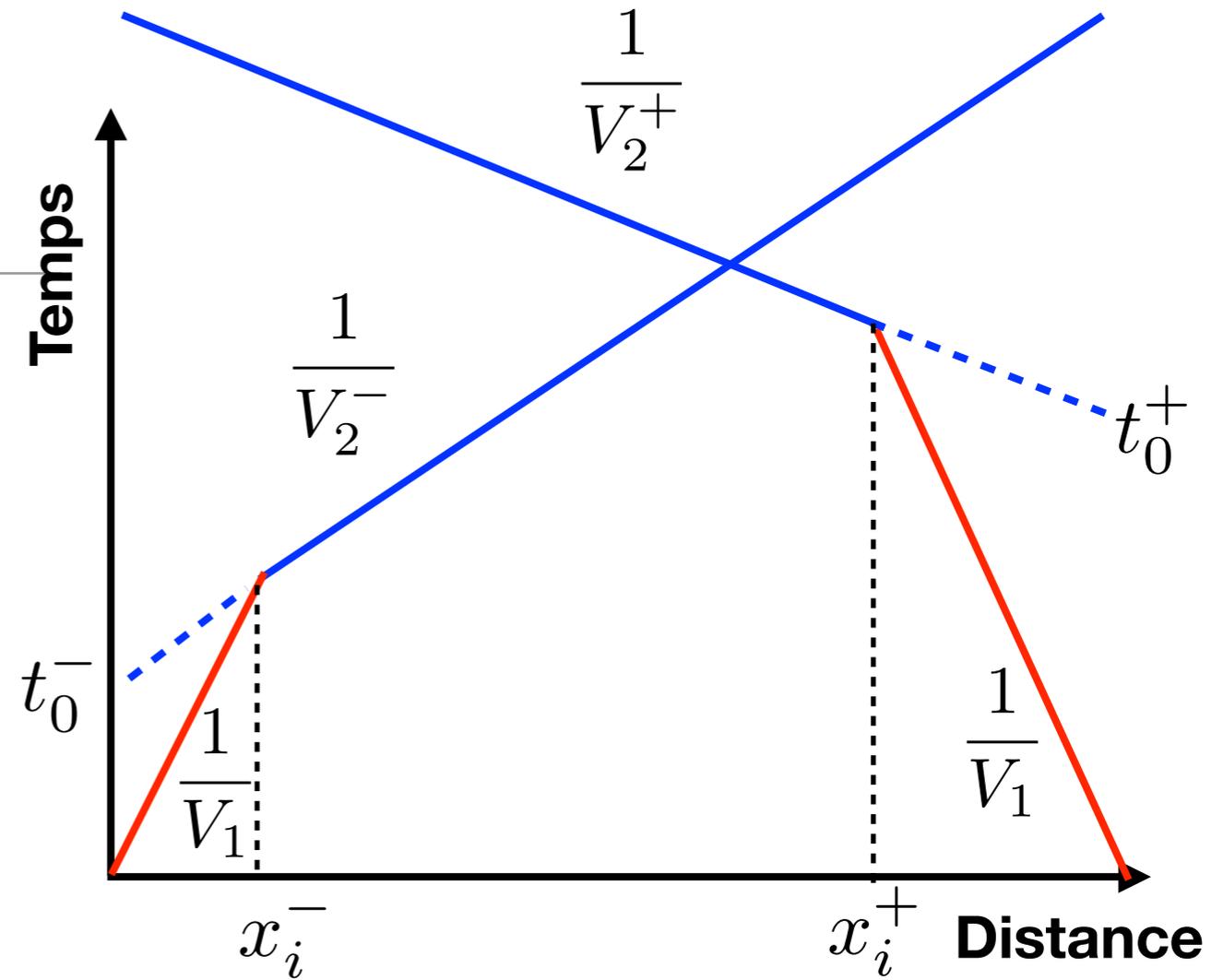
$$h = \frac{x_i}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} = \frac{14.7}{2} \sqrt{\frac{1500 - 300}{1500 + 300}} = 6 \text{ m}$$



Couches inclinées

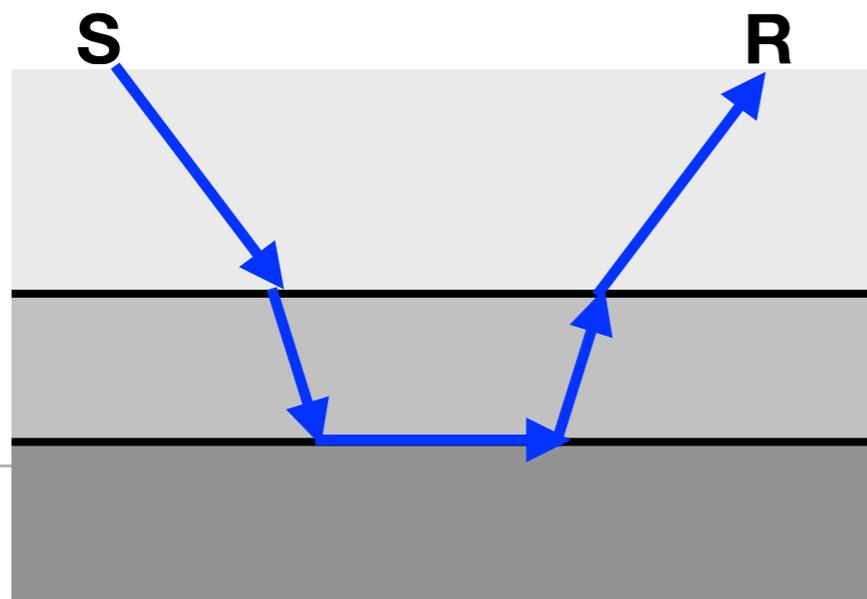
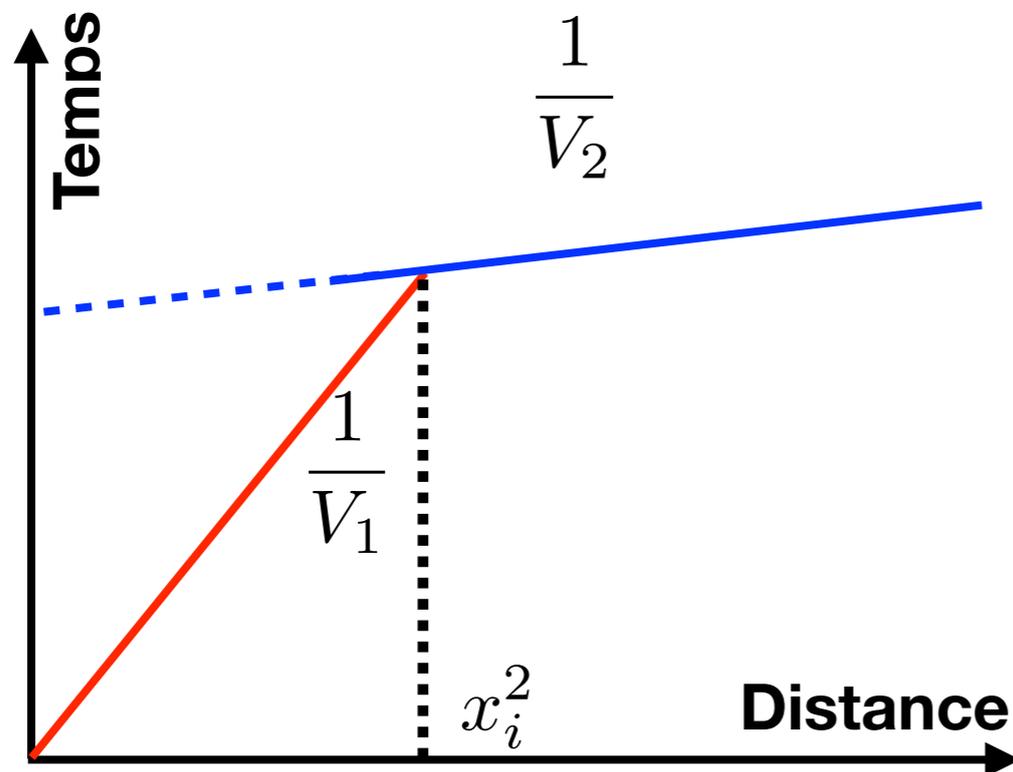
Les vitesses apparentes du réfracteur dépendent maintenant de la direction du tir!

Il faut toujours un tir direct et un tir inverse en sismique réfraction !

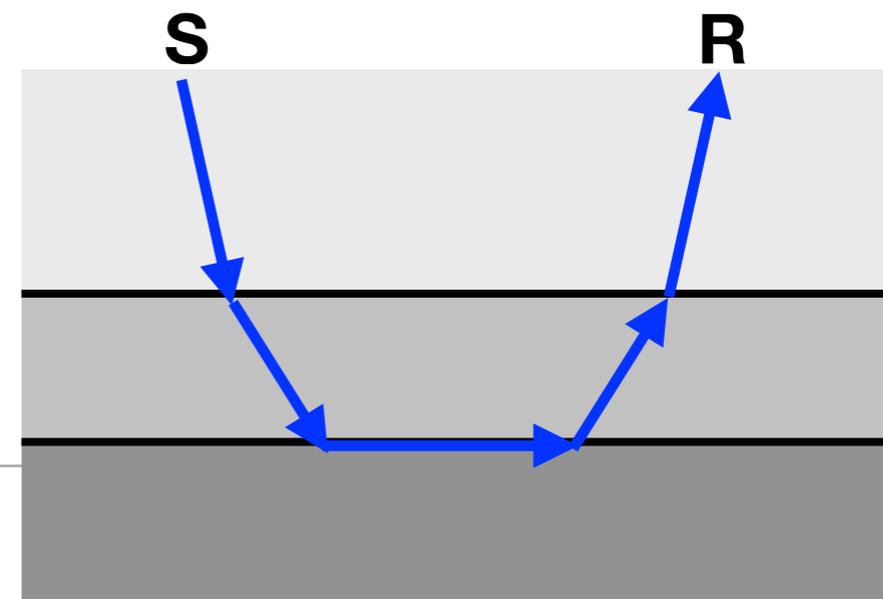
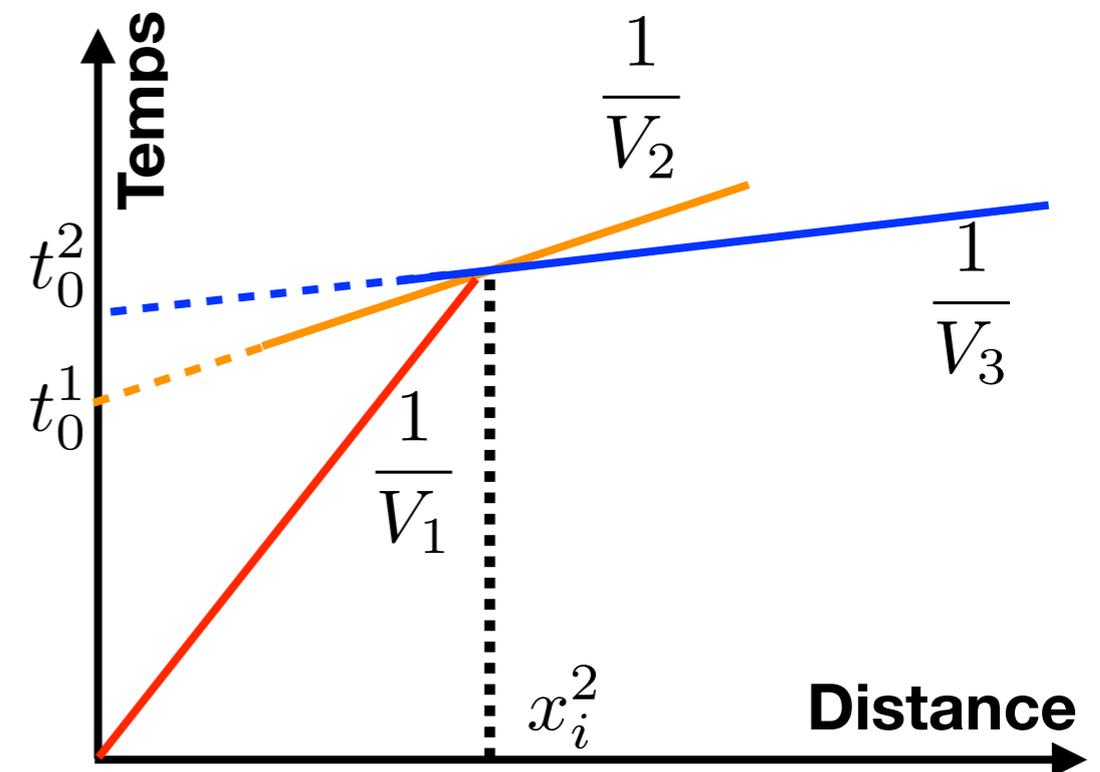


Difficultés

Inversion de vitesse

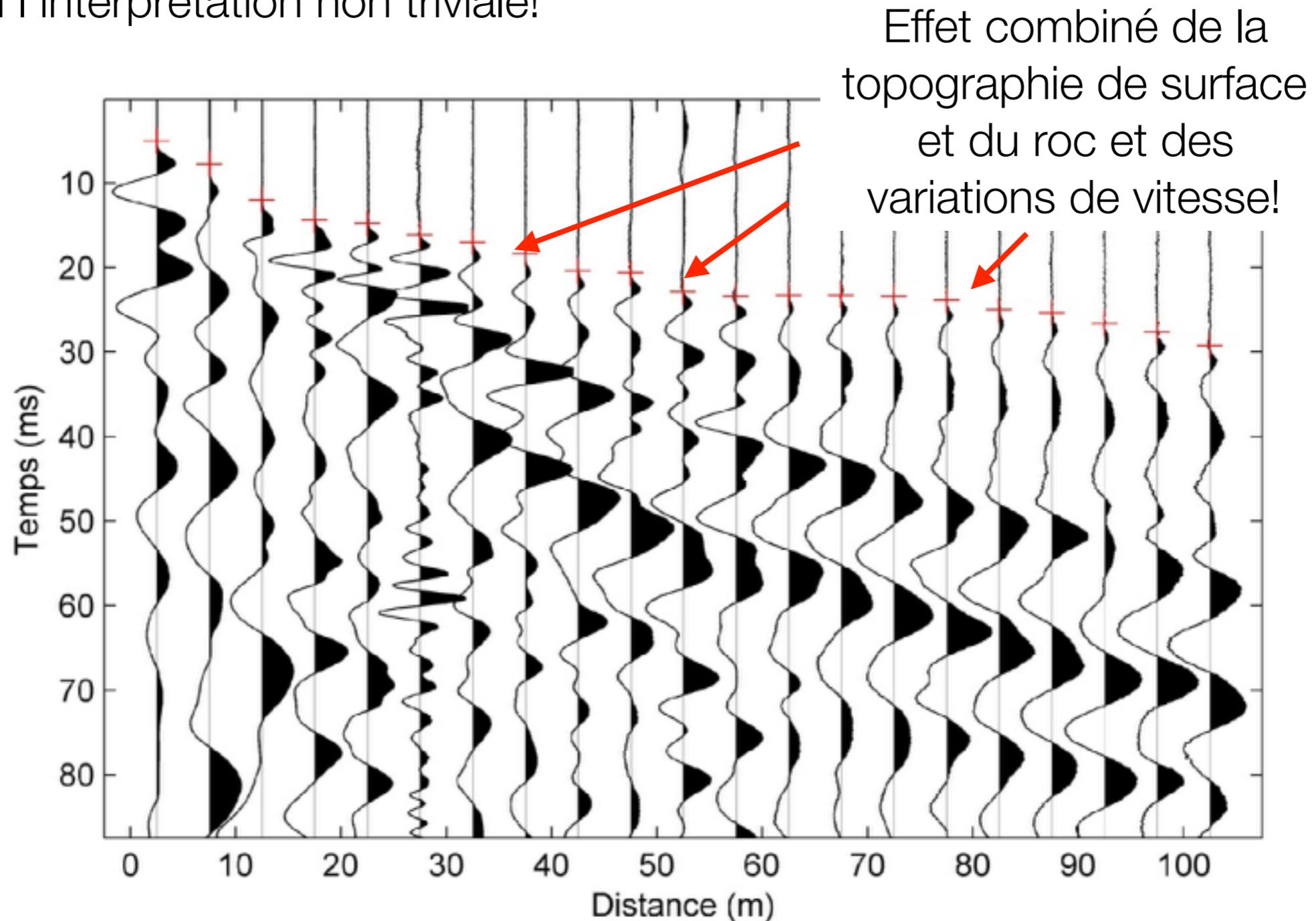


Couche cachée



Corrections et limitations

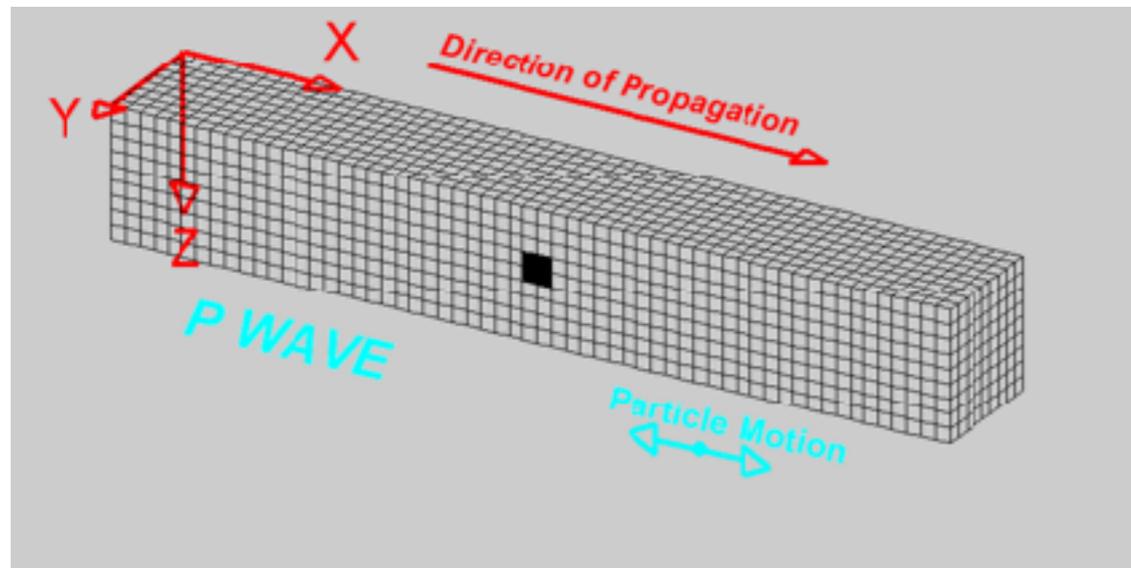
Bref, les dromochroniques sont rarement des droites parfaites en pratique, ce qui rend l'interprétation non triviale!



Vitesse sismiques

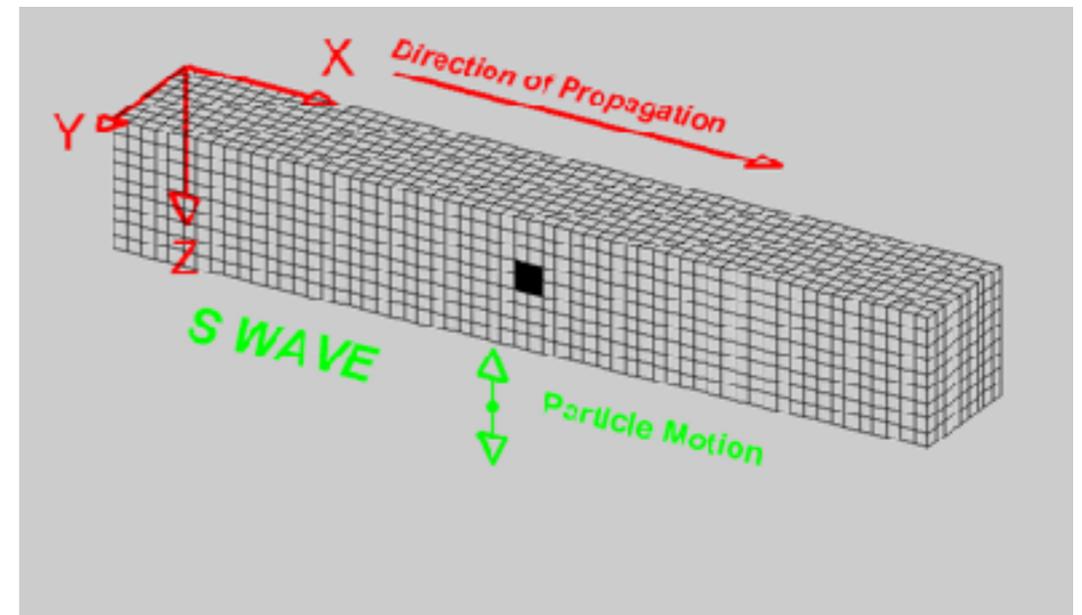
Ondes P et ondes S

Ondes P



$$V_p = \sqrt{\frac{K + 4/3\mu}{\rho}}$$

Ondes S



$$V_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

La vitesse des ondes P est toujours plus grande que celle des ondes S !

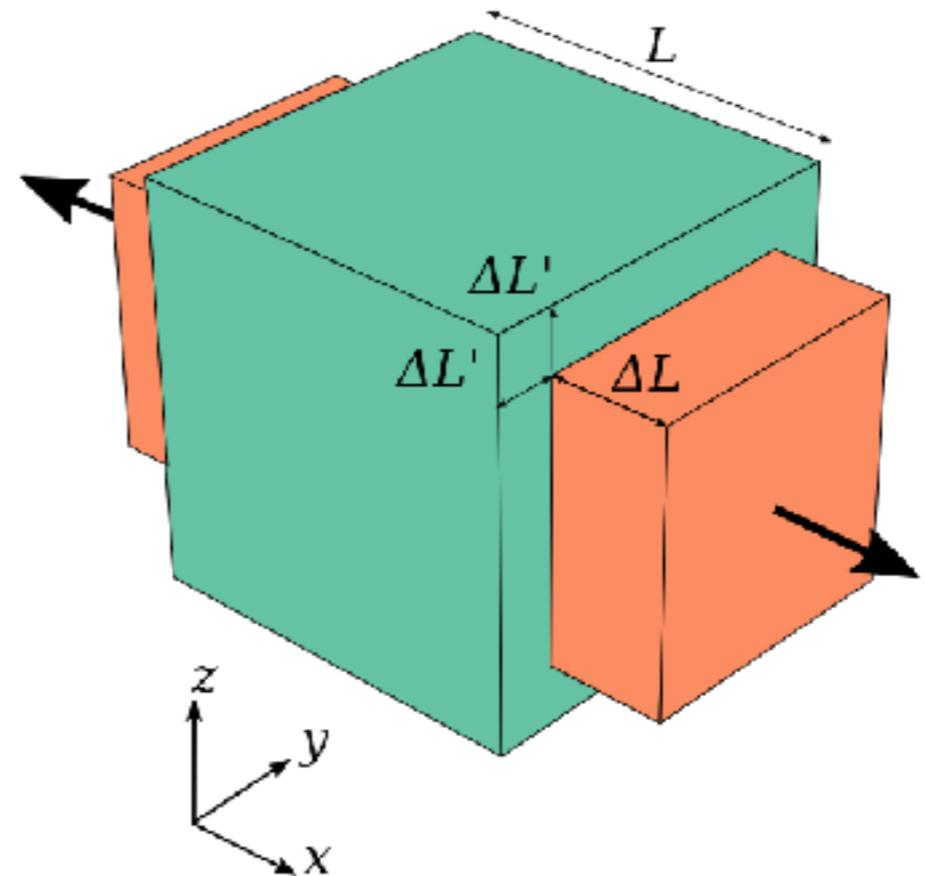
Coefficient de Poisson

Les modules élastiques et la densité sont donc directement liés aux vitesses sismiques!

Il est possible d'obtenir le coefficient de Poisson à partir des vitesses:

$$\nu = \frac{1}{2} \left[\frac{1}{1 - (V_p/V_s)^2} \right] = \frac{\Delta L'/L'}{\Delta L/L}$$

Le rapport V_p/V_s est donc fondamental!



Vitesses sismiques

Plusieurs facteurs affectent les vitesses sismiques:

- Lithologie: D'énormes différences sont rencontrées entre roches et dépôts granulaires, qui sont dues aux différences de rigidité de la matrice.
- Minéralogie: La structure atomique des minéraux et la composition des roches affectent leur densité et leur module élastique.
- Porosité: Une grande porosité diminue les vitesses sismiques.
- Saturation: La nature des fluides contenus dans les pores affecte grandement la vitesse des ondes P.
- Pression effective: Plus la pression effective est grande, plus les vitesses augmentent.
- Compaction et cimentation: Lorsque les sédiments se compactent, la porosité diminue et la vitesse augmente. Lors de la cimentation, les grains deviennent solidaires, ce qui augmente la rigidité de la matrice et donc les vitesses sismiques.

Lithologie

La lithologie affecte grandement les vitesses sismiques. En particulier, des variations de 10x sont rencontrées entre dépôts granulaires et roches.

Roches

| Matériau | Ondes P (m/s) | Ondes S (m/s) | Sédiments | | |
|------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | | Matériau | Ondes P (m/s) | Ondes S (m/s) |
| Grès | 2000-3500 | 800-1800 | Air | 343 | N/A |
| Marne | 2000 - 3000 | 750 - 1500 | Eau | 1450 - 1500 | N/A |
| Craie | 2300 - 2600 | 1100 - 1300 | Glace | 3400 - 3800 | 1700 - 1900 |
| Charbon | 2200 - 2700 | 1000 - 1400 | Huile | 1200 - 1250 | N/A |
| Sel | 4500 - 5500 | 2500 - 3100 | Sol végétal | 300 - 700 | 100 - 300 |
| Anhydrites | 4000 - 5500 | 2200 - 3100 | Sables secs | 400 - 1200 | 100 - 500 |
| Calcaires | 3500 - 6000 | 2000 - 3300 | Sables saturés | 1500 - 2000 | 400 - 600 |
| Dolomites | 3500 - 6500 | 1900 - 3600 | Argiles saturés | 1100 - 2500 | 80 - 800 |
| Granite | 4500 - 6000 | 2500 - 3300 | | | |
| Basalte | 5000 - 6000 | 2800 - 2400 | | | |
| Gneiss | 4400 - 5200 | 2700 - 3200 | | | |

https://gpg.geosci.xyz/content/physical_properties/tables/index.html

Vitesses sismiques

Nous ferons une distinction entre matériaux granulaires et roches dans ce qui suit.



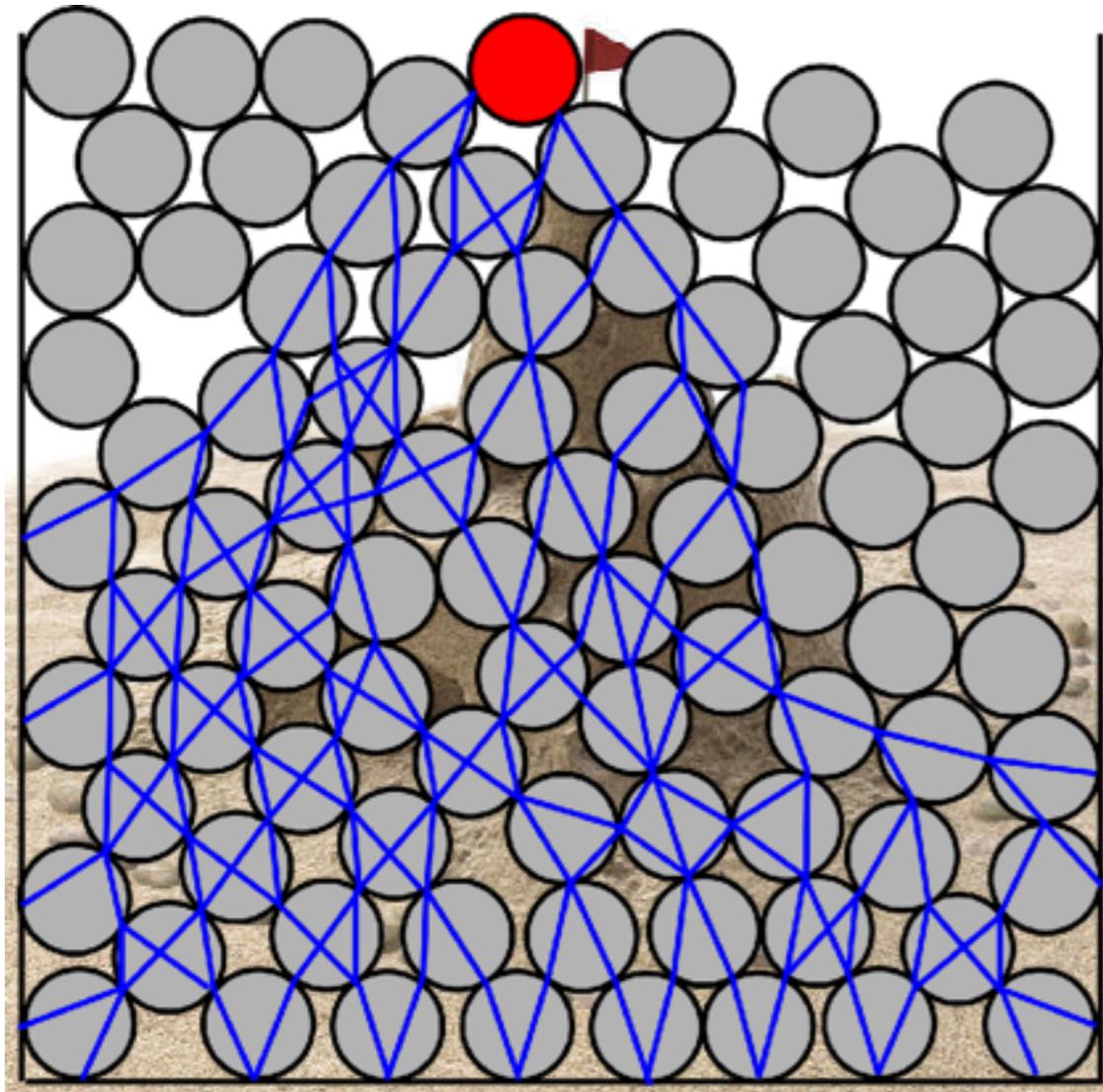
Matériaux granulaires



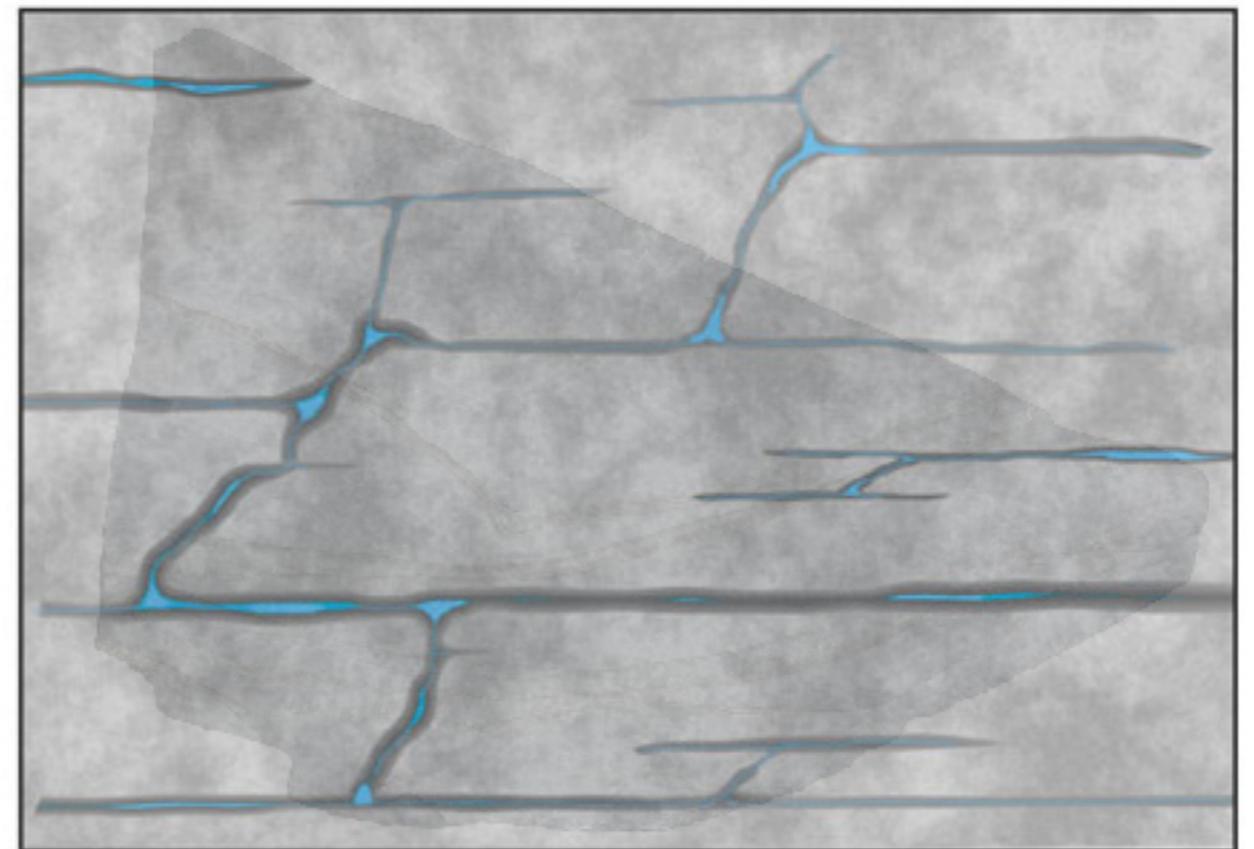
Roches

Vitesse sismiques

Nous ferons une distinction entre matériaux granulaires et roches dans ce qui suit.



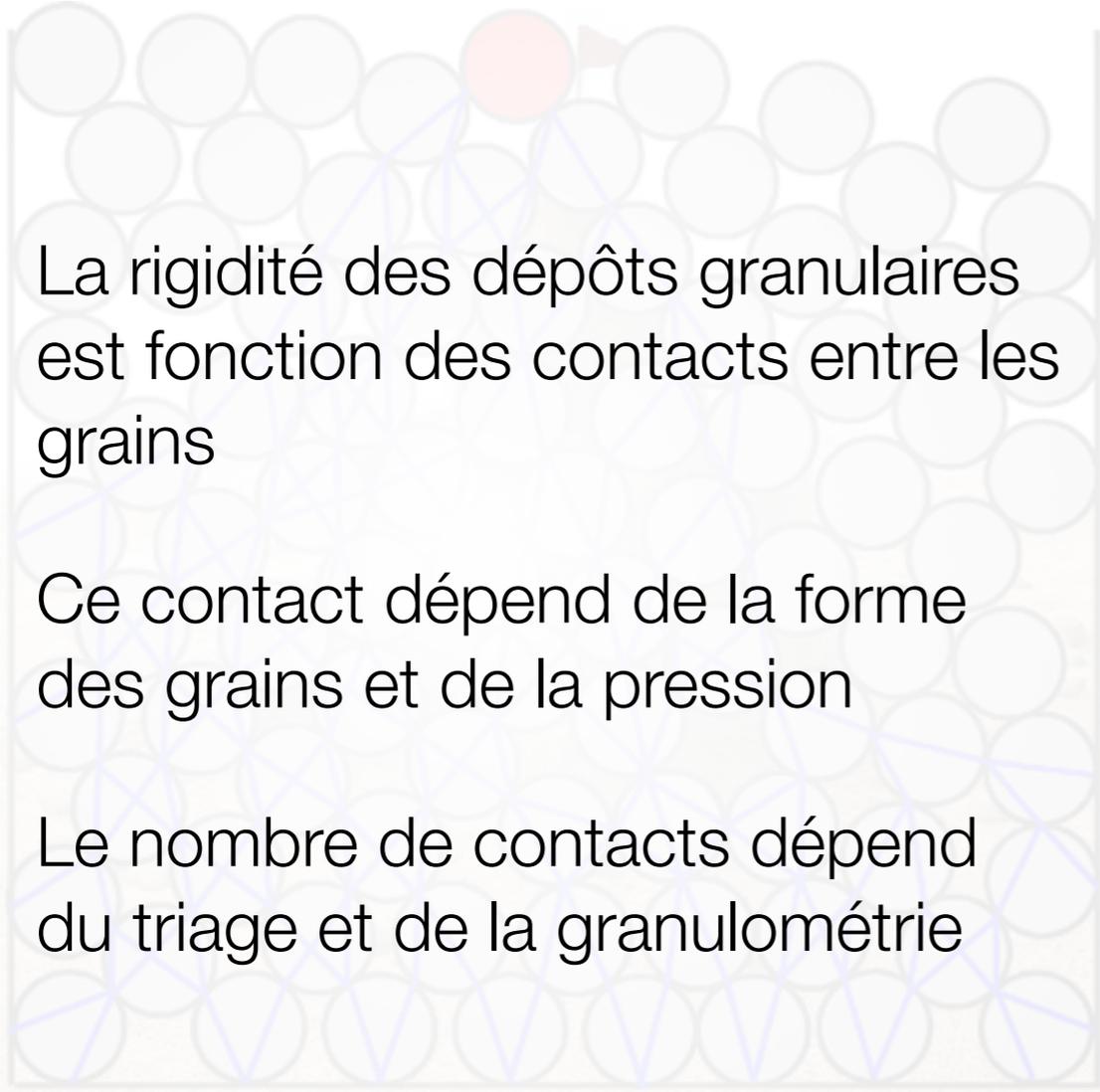
Matériaux granulaires



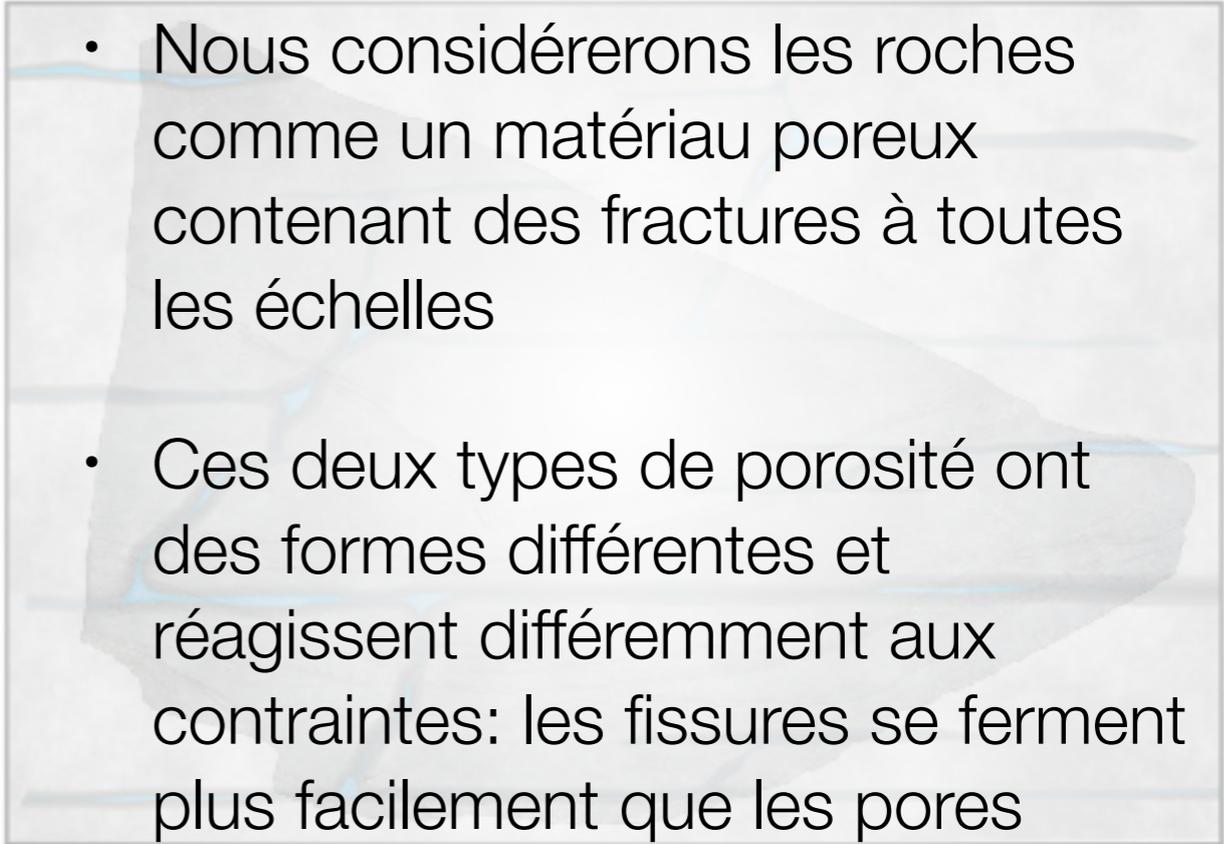
Roches

Vitesses sismiques

Nous ferons une distinction entre matériaux granulaires et roches dans ce qui suit

- 
- The diagram illustrates granular materials as a collection of overlapping circles representing grains. Blue lines connect the points of contact between adjacent grains, forming a network. One grain is highlighted in red, and a small red arrow points to its contact points.
- La rigidité des dépôts granulaires est fonction des contacts entre les grains
 - Ce contact dépend de la forme des grains et de la pression
 - Le nombre de contacts dépend du triage et de la granulométrie

Matériaux granulaires

- 
- The diagram shows a porous rock structure with a complex, interconnected network of fractures and pores. The fractures are represented by blue lines, and the pores are the spaces between the rock fragments.
- Nous considérerons les roches comme un matériau poreux contenant des fractures à toutes les échelles
 - Ces deux types de porosité ont des formes différentes et réagissent différemment aux contraintes: les fissures se ferment plus facilement que les pores

Roches

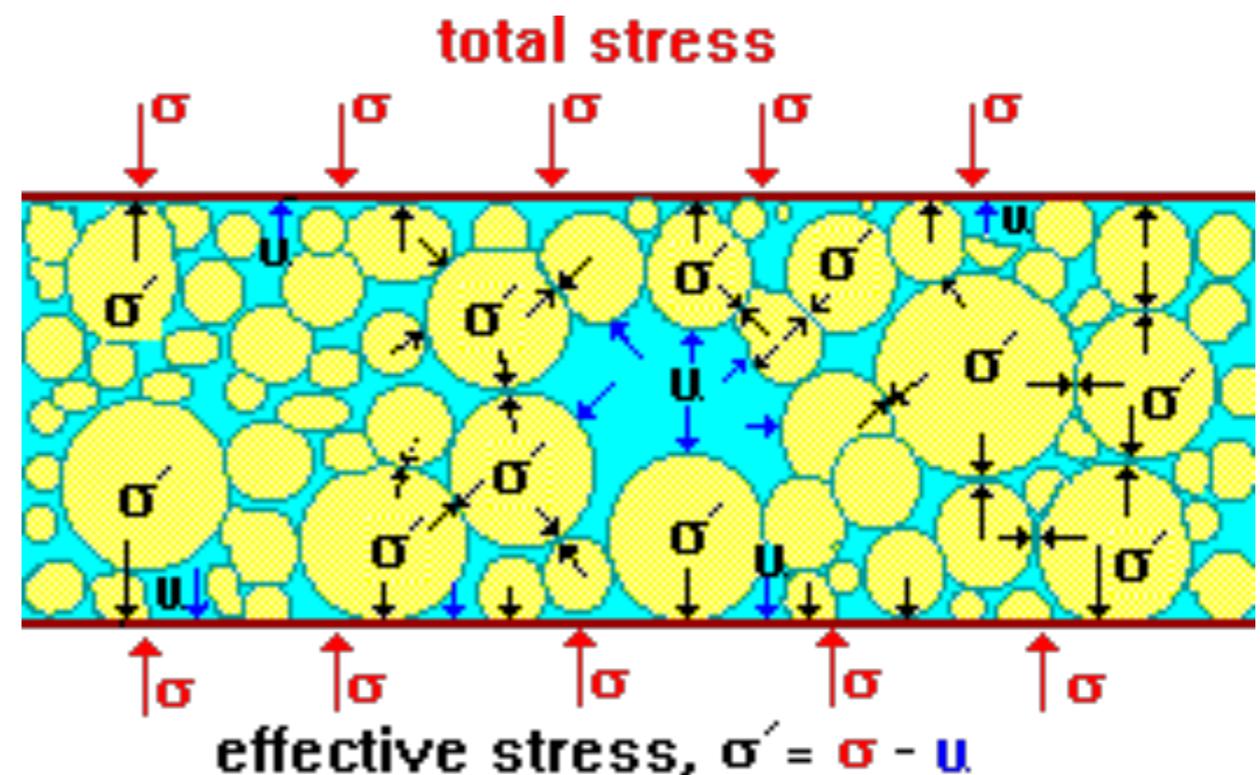
Contrainte effective

Les vitesses sismiques dépendent de la **contrainte effective**. Celle-ci dépend de la contrainte totale et de la contrainte du fluide:

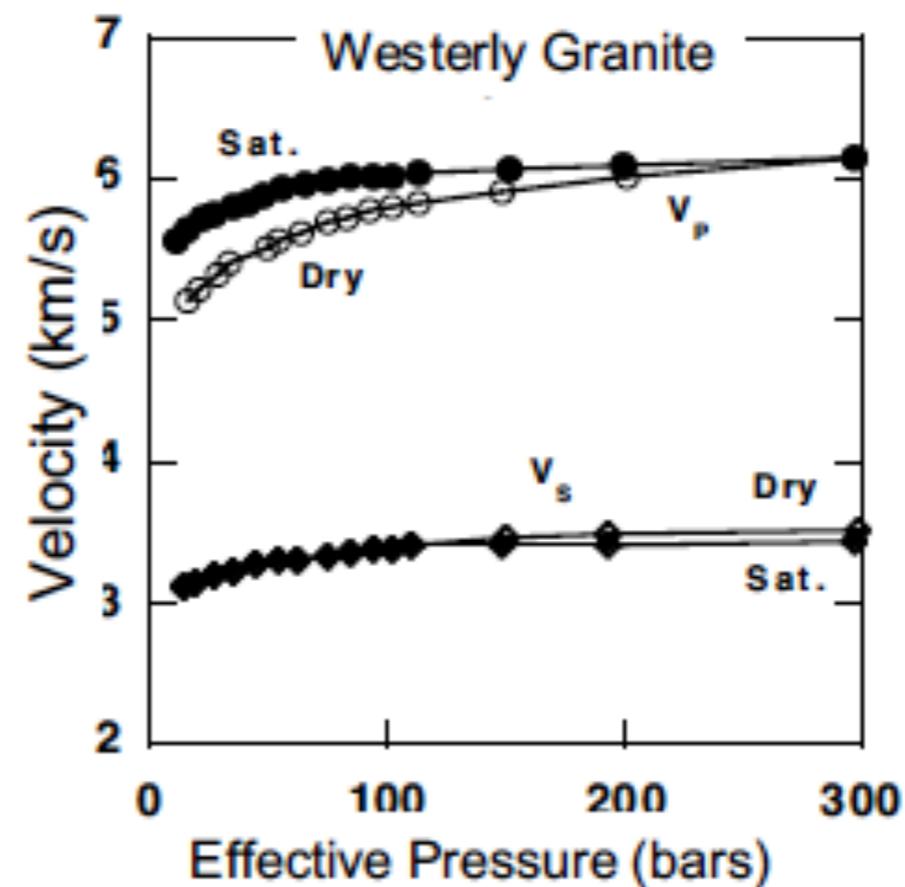
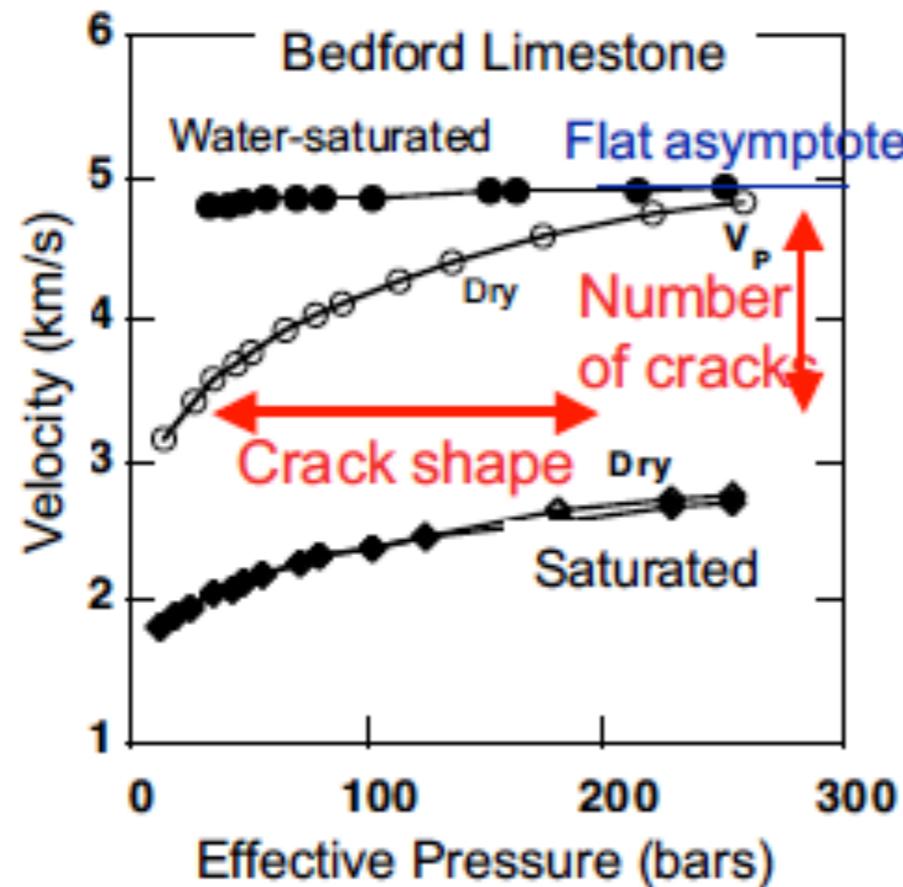
$$\sigma' = \sigma_{tot} - \sigma_{pore}$$

Lorsque la pression des pores est très élevée, la cohésion des dépôts granulaires peut être perdue et la résistance au cisaillement devient nulle.

La pression effective agit sur la matrice des roches et des matériaux granulaires en augmentant leur rigidité.



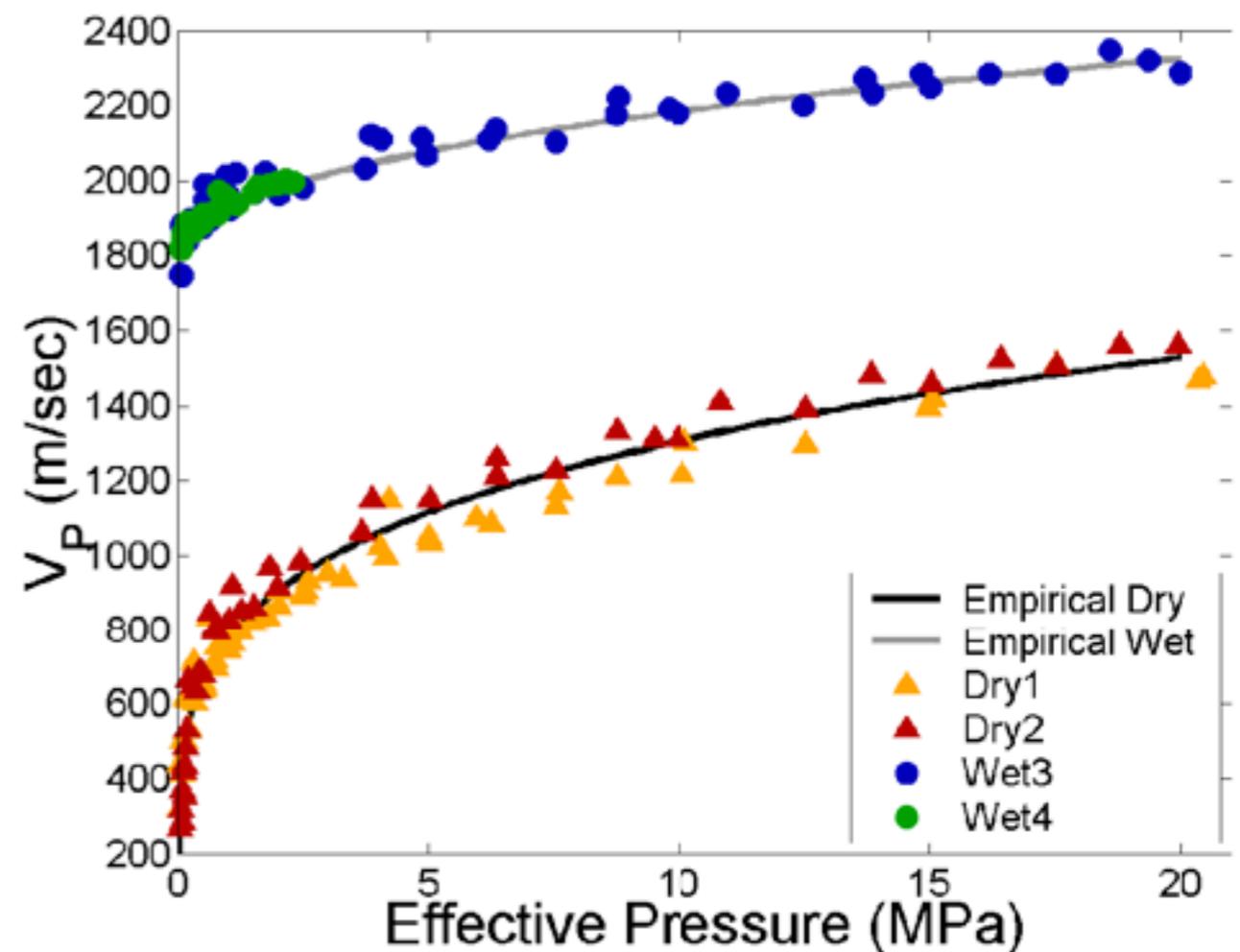
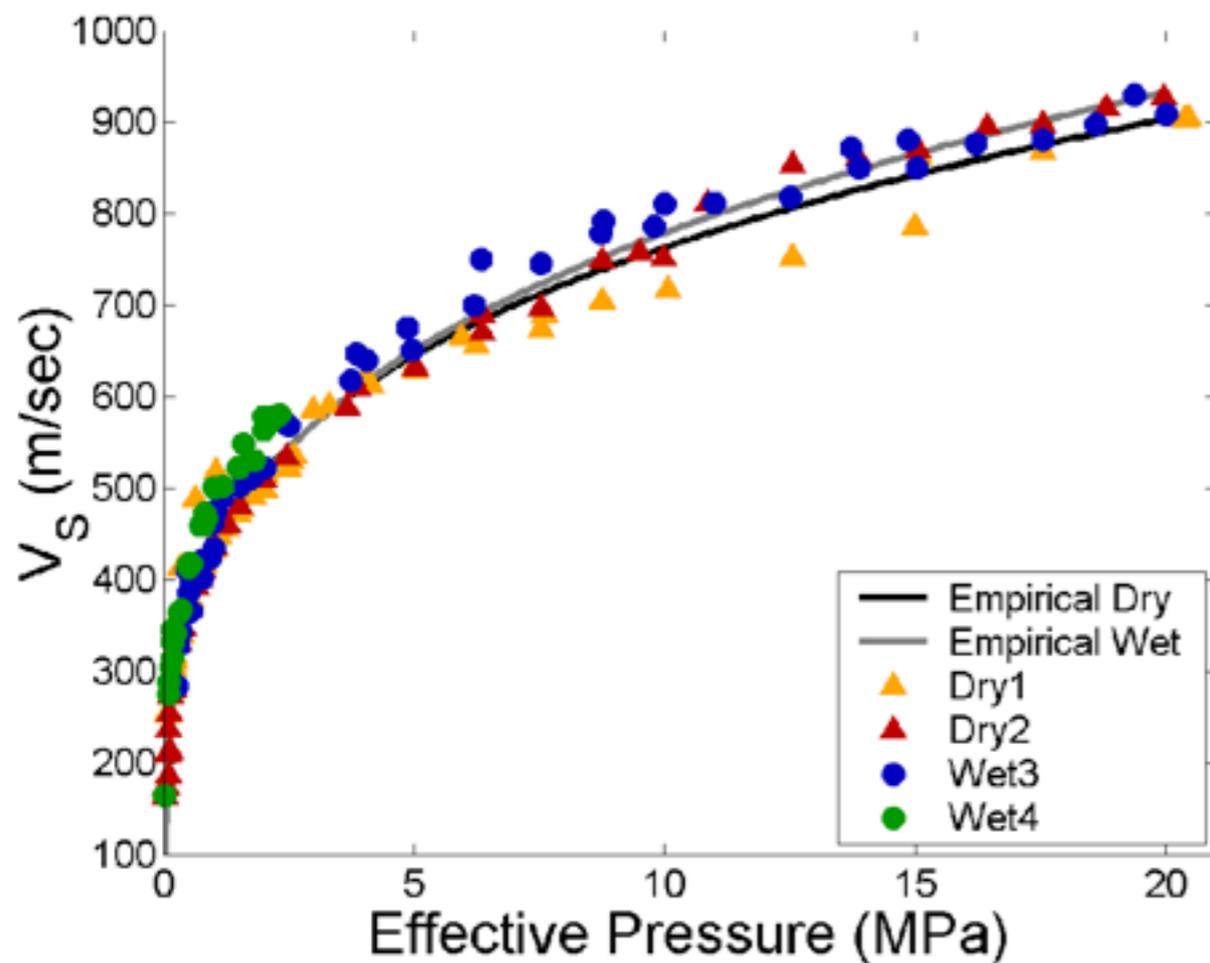
Roches: Pressure effective



- Les vitesses augmentent avec les contraintes effectives
- Cette dépendance provient de la fermeture des fractures qui rigidifie la matrice
- L'amplitude du changement est proportionnelle au niveau de fracturation
- La forme des fractures régit la pression à laquelle l'asymptote est atteinte

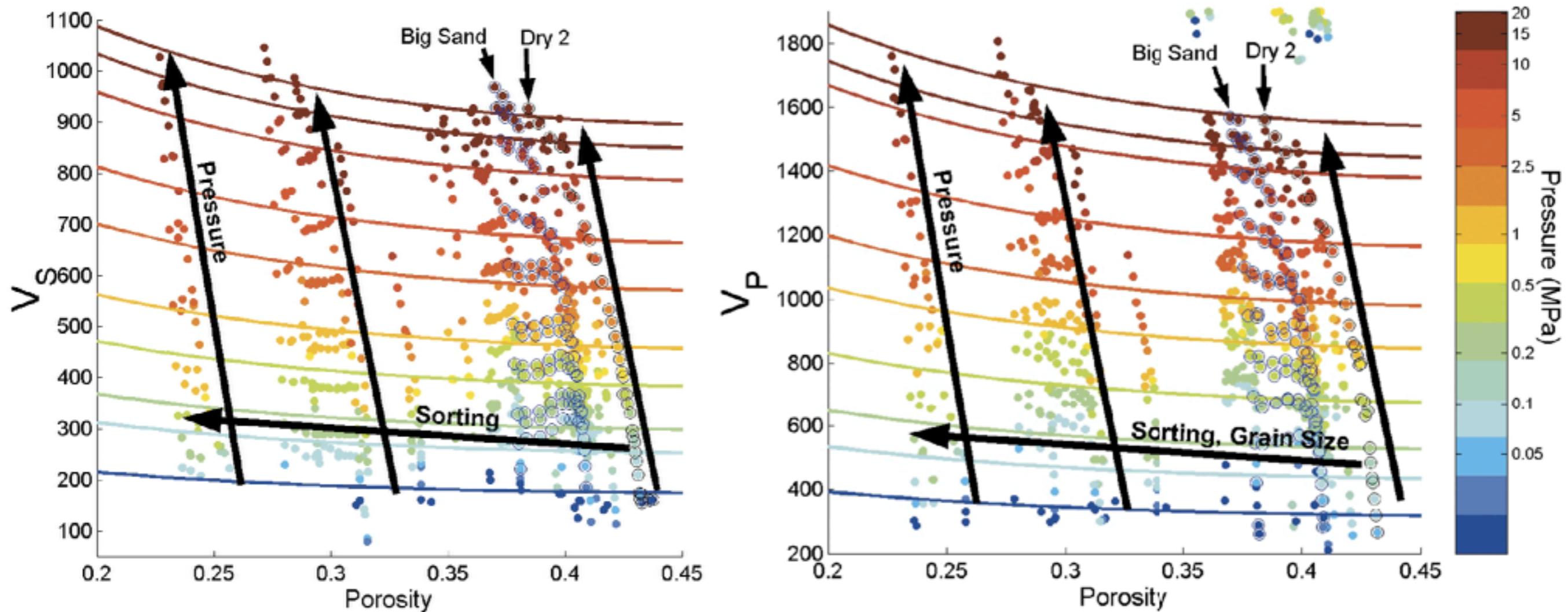
Dépôts granulaires: Pression effective

Les vitesses dans les dépôts meubles dépendent fortement de la pression effective!



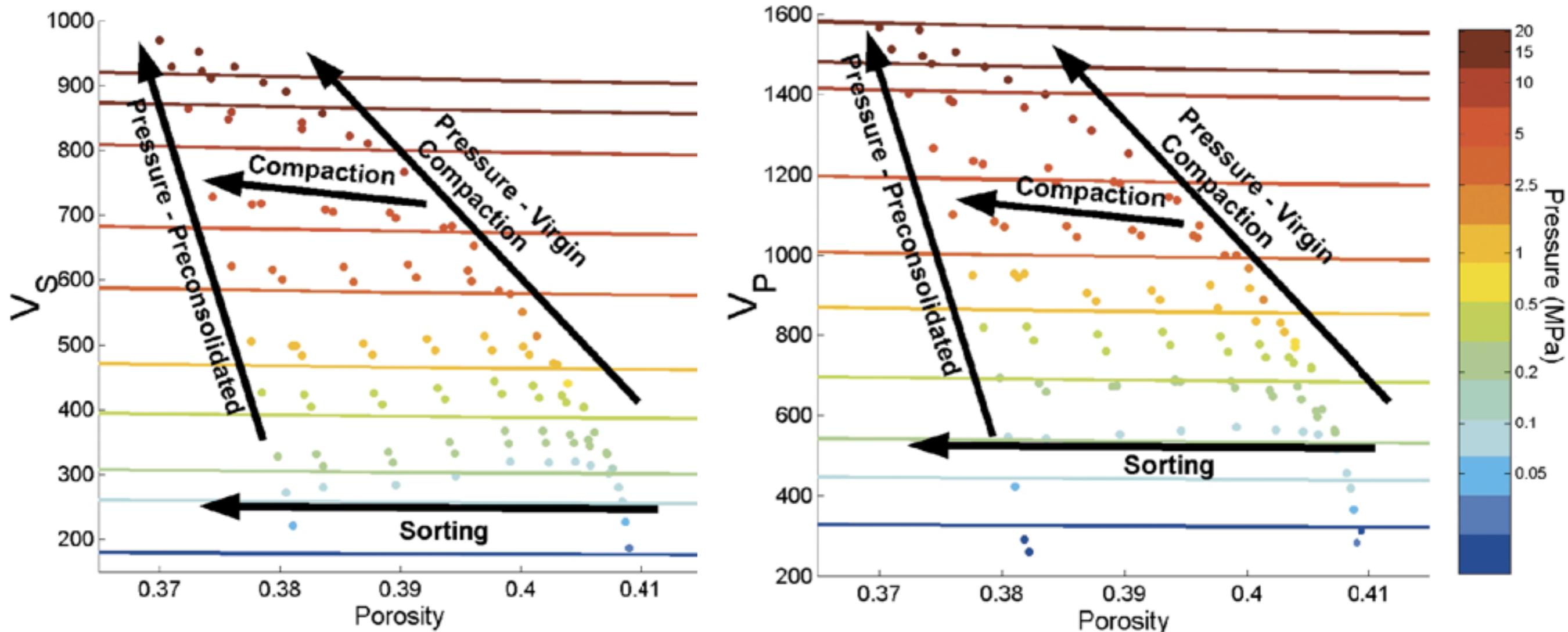
Dépôts granulaires: Taille des grains et consolidation

La taille des grains et leur triage affectent dans une moindre mesure les vitesses.



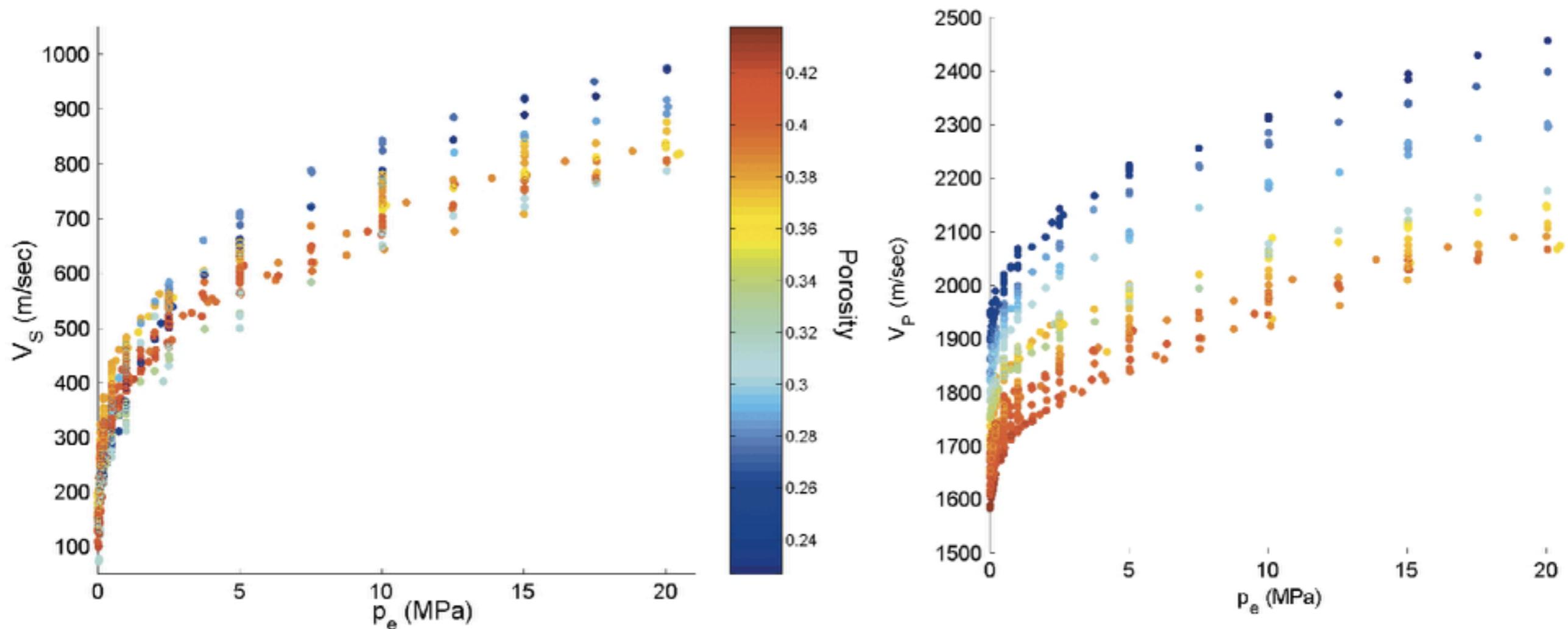
Dépôts granulaires: Compaction

Pour un même dépôt, la compaction augmente sensiblement les vitesses sismiques pour une même pression effective.



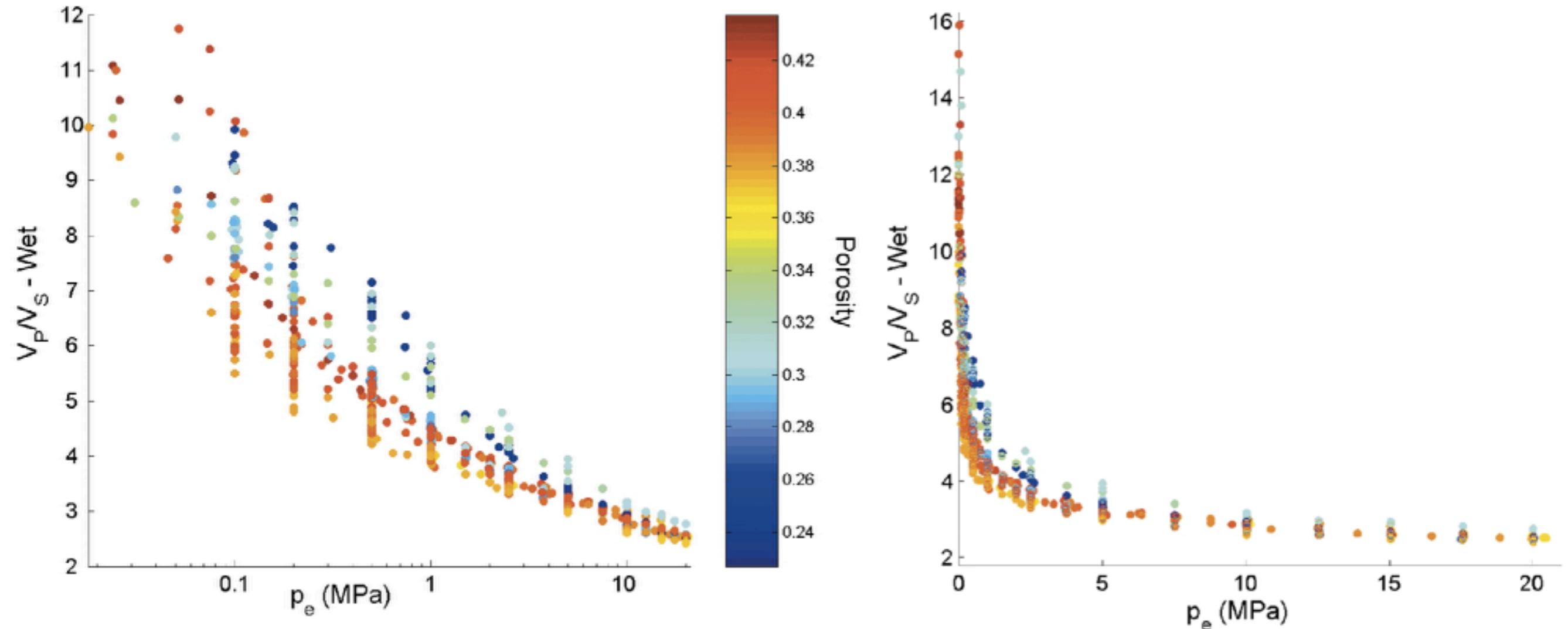
Dépôts granulaires: Porosité

Les vitesses des ondes P sont plus sensibles aux changements de porosité que les ondes S.



Dépôts granulaires: Porosité

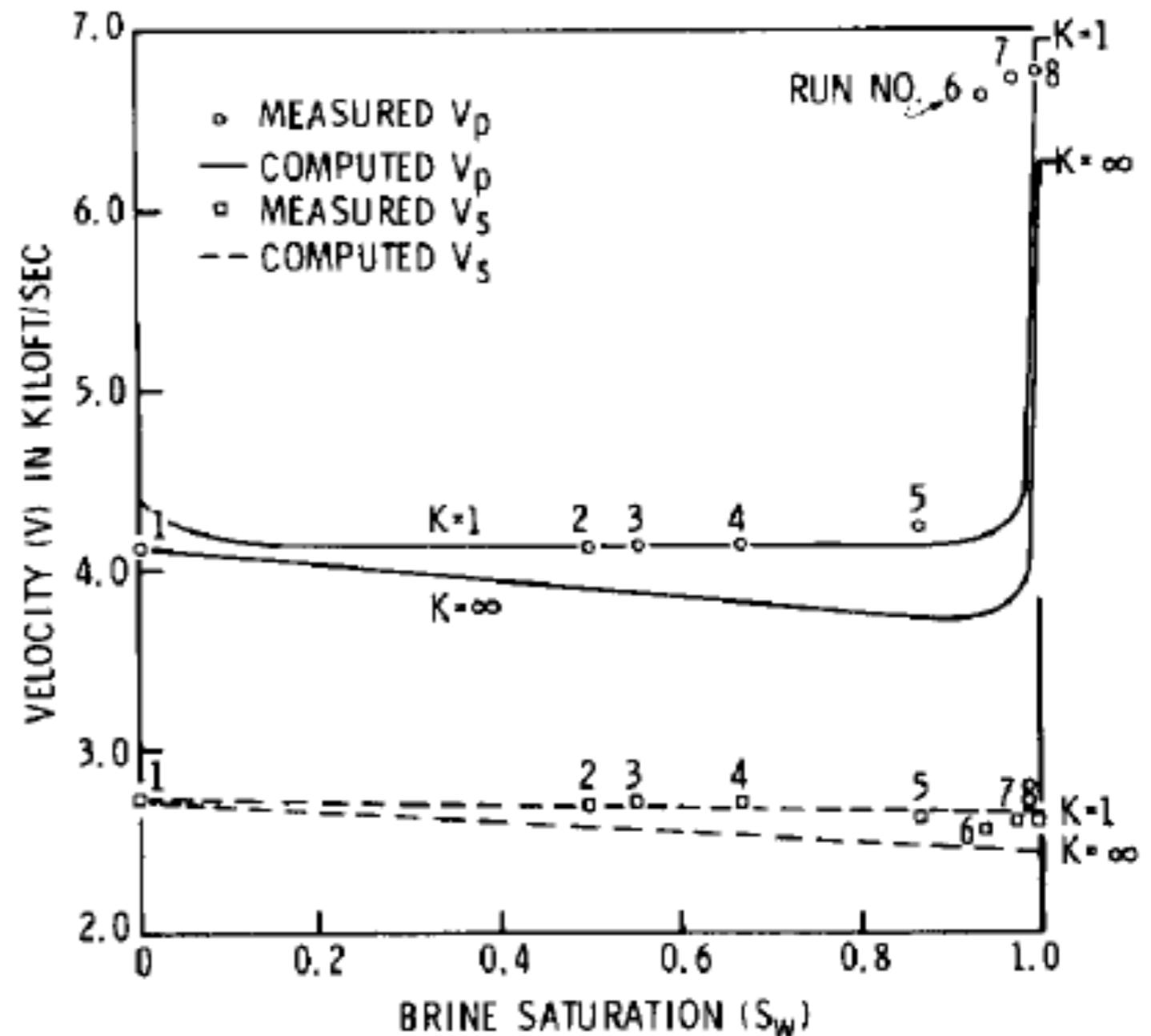
Le rapport V_p/V_s est beaucoup moins sensible aux effets de porosité et est plus lié à la pression effective.



Dépôts granulaires: Saturation

La saturation en eau influence grandement les vitesses sismiques:

- **Variation non-linéaire de V_p avec la saturation: brusque augmentation autour de 1**
- Affecte peu les vitesses des ondes de cisaillement (légère diminution de la vitesse avec une augmentation de la saturation).

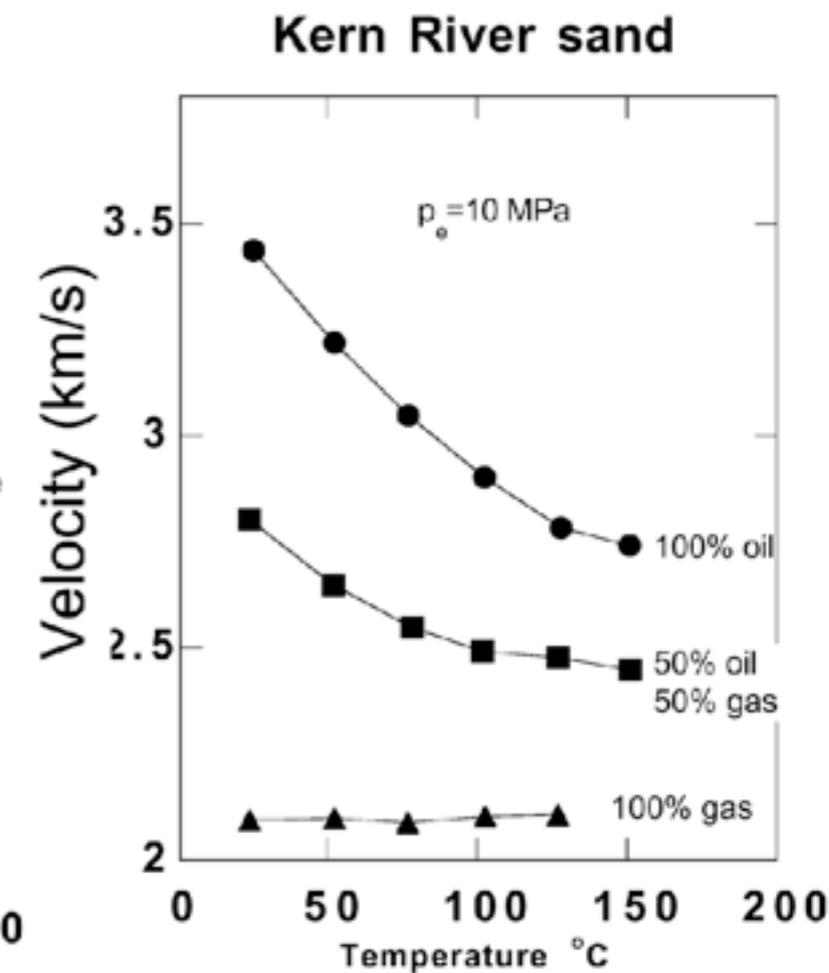
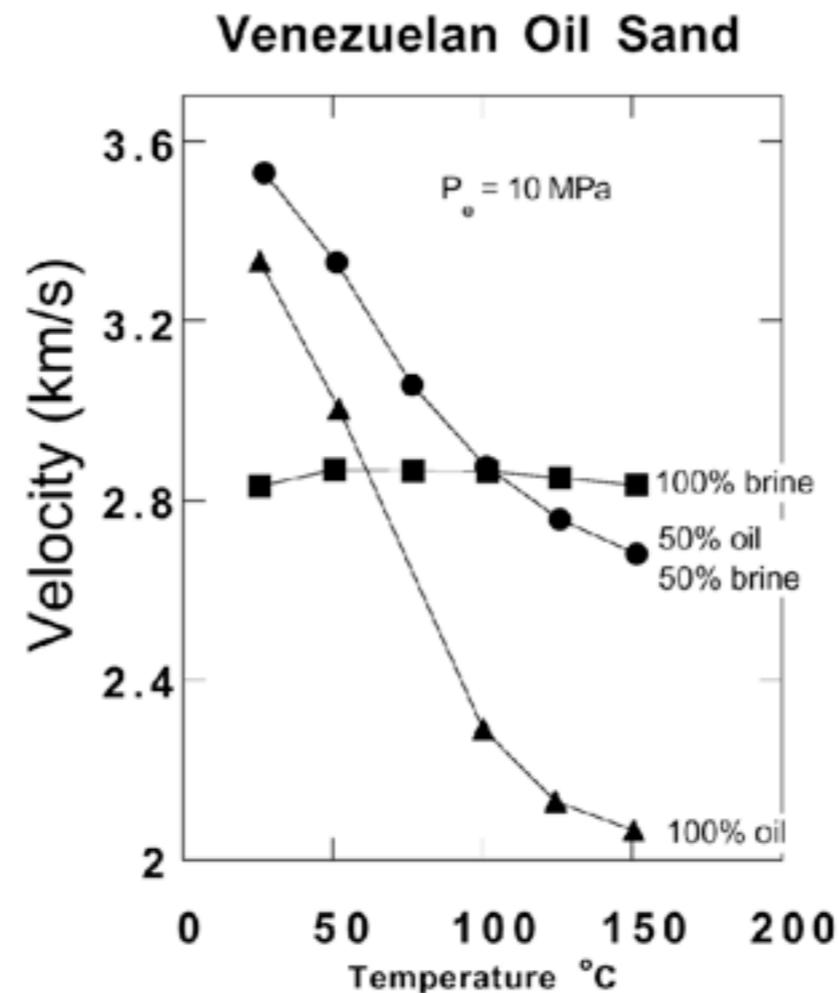


(Domenico, 1977)

Température

La température affecte peu les vitesses sismiques, sauf lorsque la viscosité du fluide contenu dans les pores varie fortement en fonction de la température:

- Peu de variations pour de l'eau ou de l'air
- Variations notoires en présence d'huile.



F.16

Résumé: vitesses sismiques

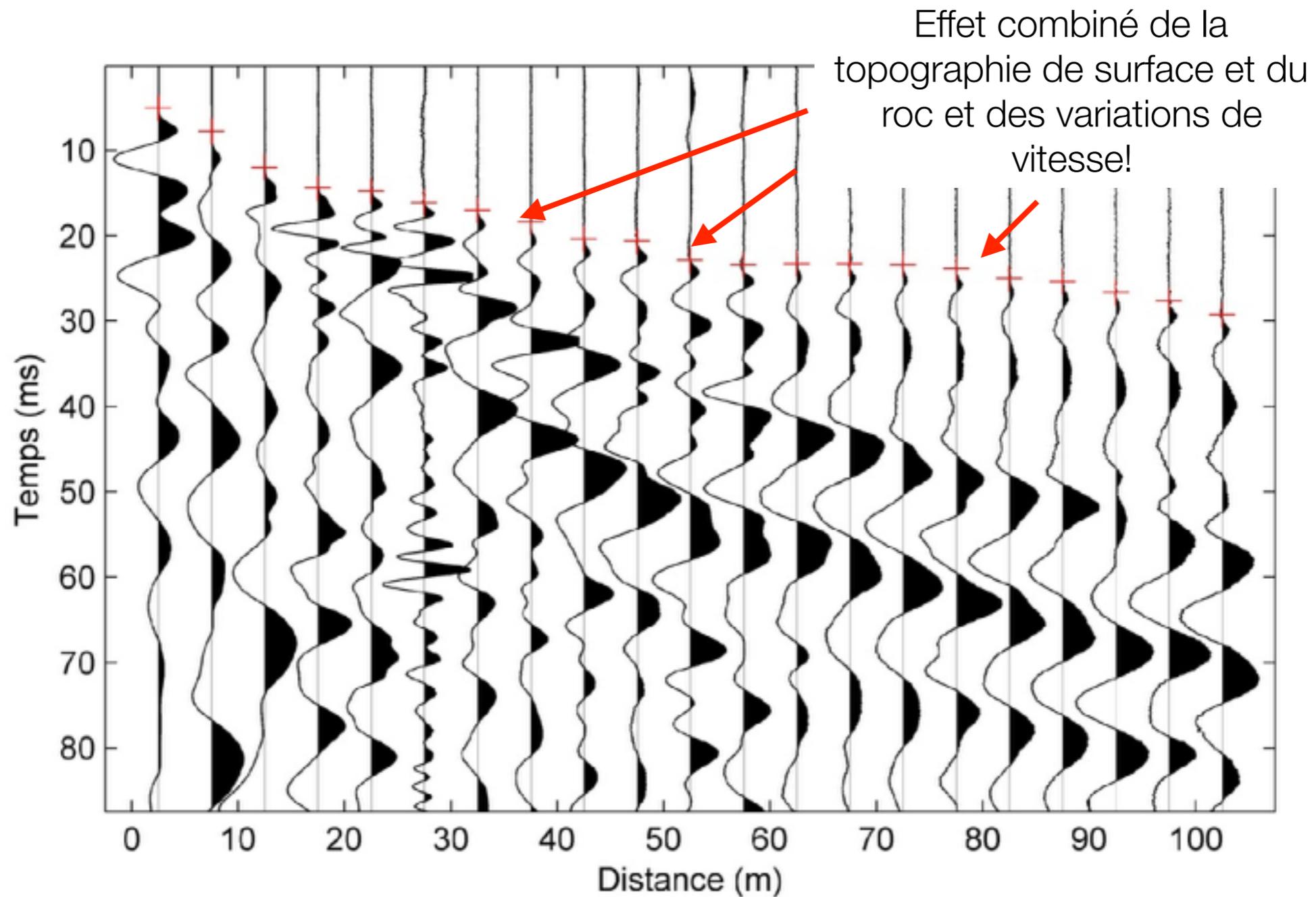
Pour interpréter les variations de vitesse sismique dans les sols, les points importants sont:

- Une variation marquée de V_p entre saturation partielle et complète pour un dépôt non-consolidé (de 300 m/s à 1500 m/s)
- V_s est peu influencé par la saturation et par la porosité
- Les vitesses augmentent avec la pression effective, surtout pour les matériaux en surface.
- La quantité de fractures et leur forme affectent grandement V_p et V_s dans les roches: les vitesses diminuent avec un degré croissant de fracturation.

Méthode du Plus-Minus

Méthode du Plus-Minus

Comment tenir compte des variations de vitesse et de la topographie des réfracteurs ?



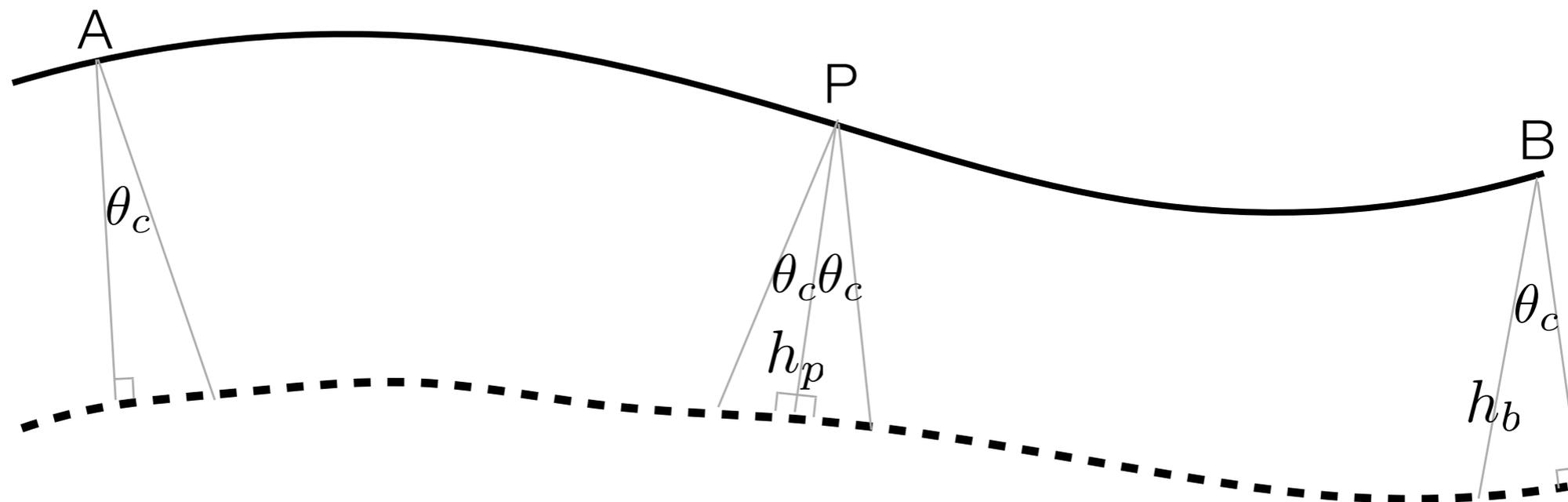
Méthode de Plus-Minus

La **méthode de Plus-Minus** permet une interprétation d'un **réfracteur ondulé dont la vitesse est variable!**

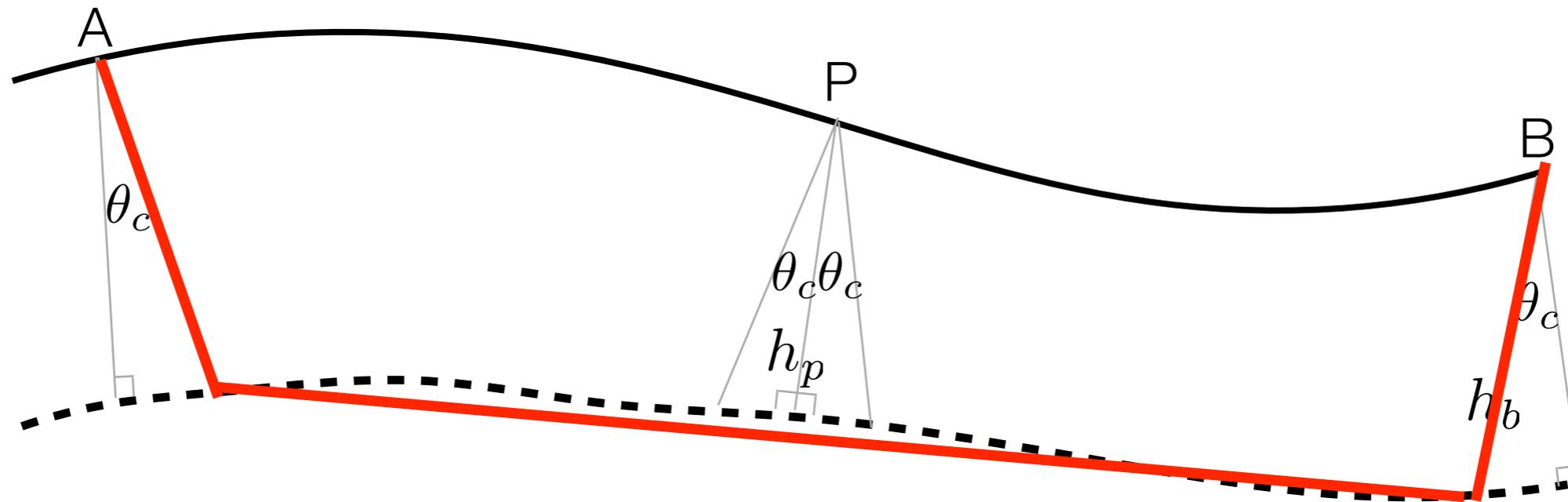
Elle se base sur deux temps, le Plus et le Minus:

$$T^+ = T_{AP} + T_{BP} - T_{AB}$$

$$T_p^- = T_{AP} - T_{BP} + T_{AB}$$

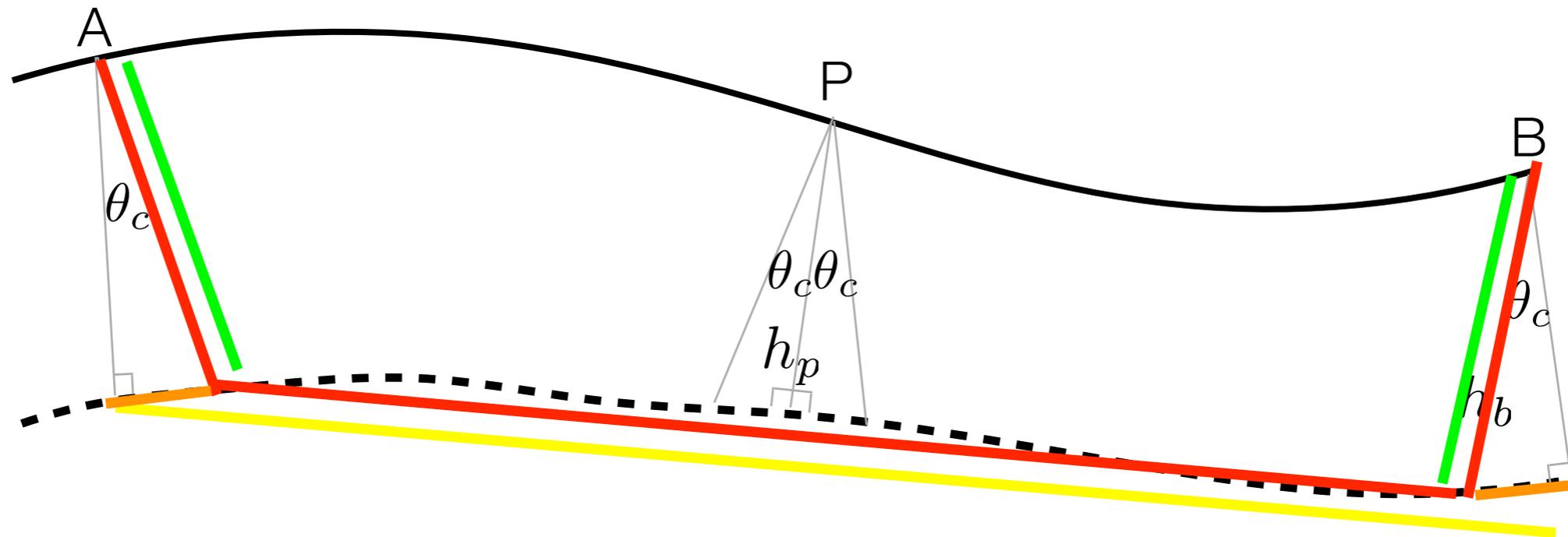


Parcours entre les deux tirs en bout de ligne



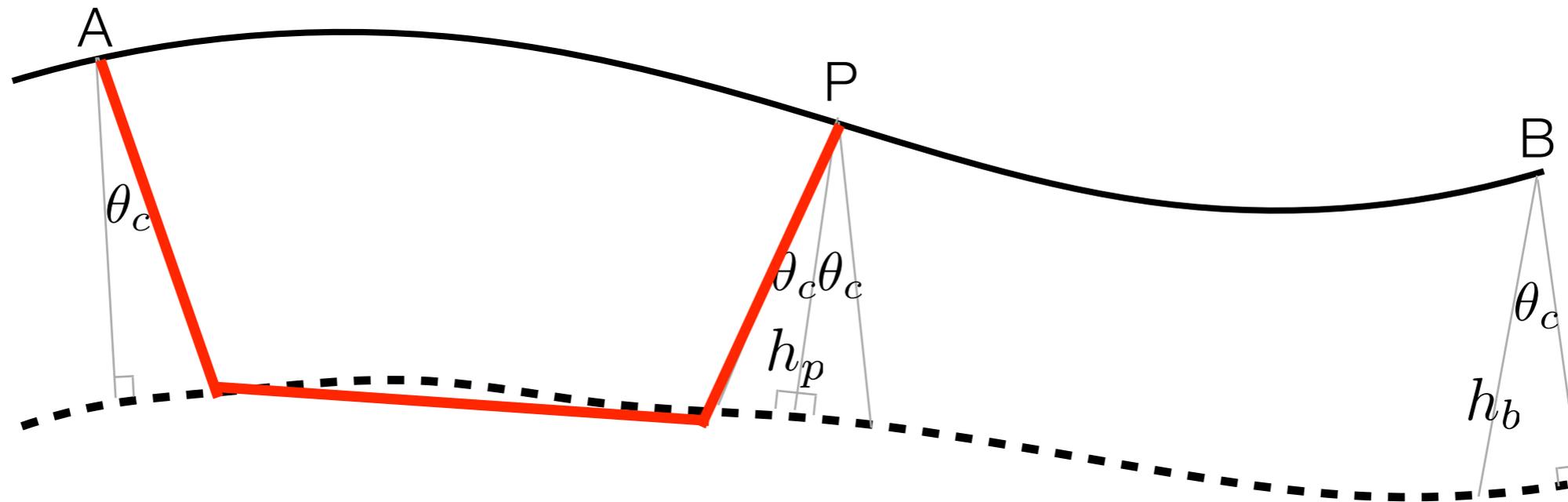
$$\overline{AB} \approx \frac{h_a}{\cos \theta_c} + \overline{AB} - h_a \tan \theta_c - h_b \tan \theta_c + \frac{h_b}{\cos \theta_c}$$

Parcours entre les deux tirs en bout de ligne



$$AB \approx \frac{\overline{h_a}}{\cos \theta_c} + \overline{AB} - h_a \tan \theta_c - h_b \tan \theta_c + \frac{\overline{h_b}}{\cos \theta_c}$$

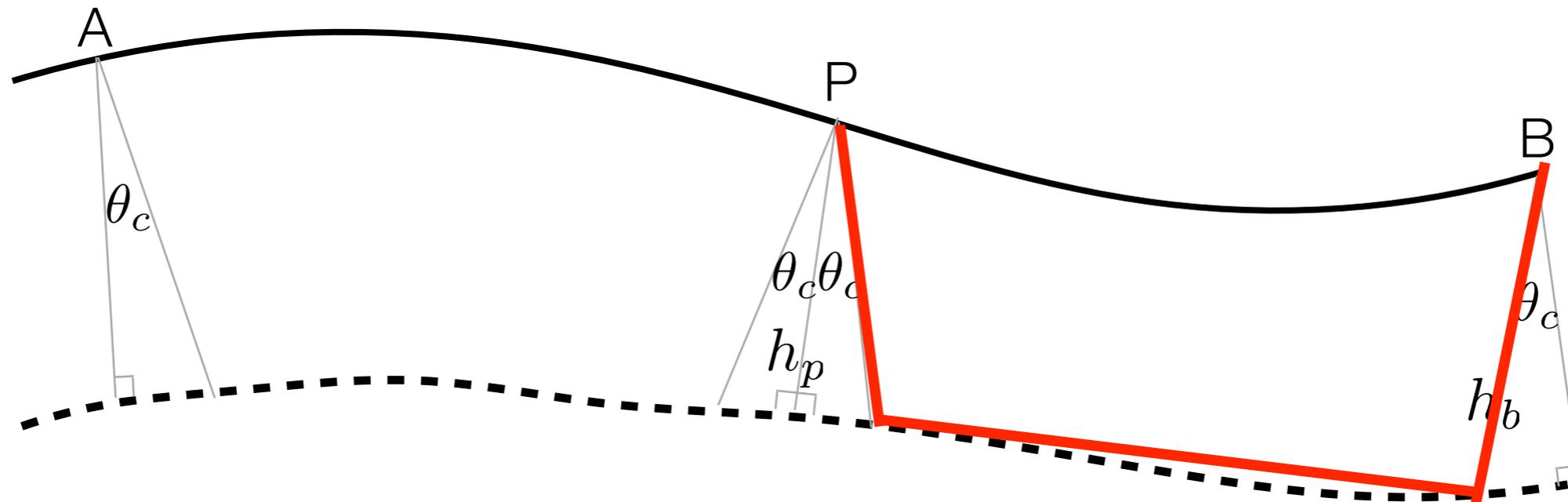
Parcours entre les deux tirs en bout de ligne



$$AB \approx \frac{h_a}{\cos \theta_c} + \overline{AB} - h_a \tan \theta_c - h_b \tan \theta_c + \frac{h_b}{\cos \theta_c}$$

$$AP \approx \frac{h_a}{\cos \theta_c} + \overline{AP} - h_a \tan \theta_c - h_p \tan \theta_c + \frac{h_p}{\cos \theta_c}$$

Parcours entre les deux tirs en bout de ligne

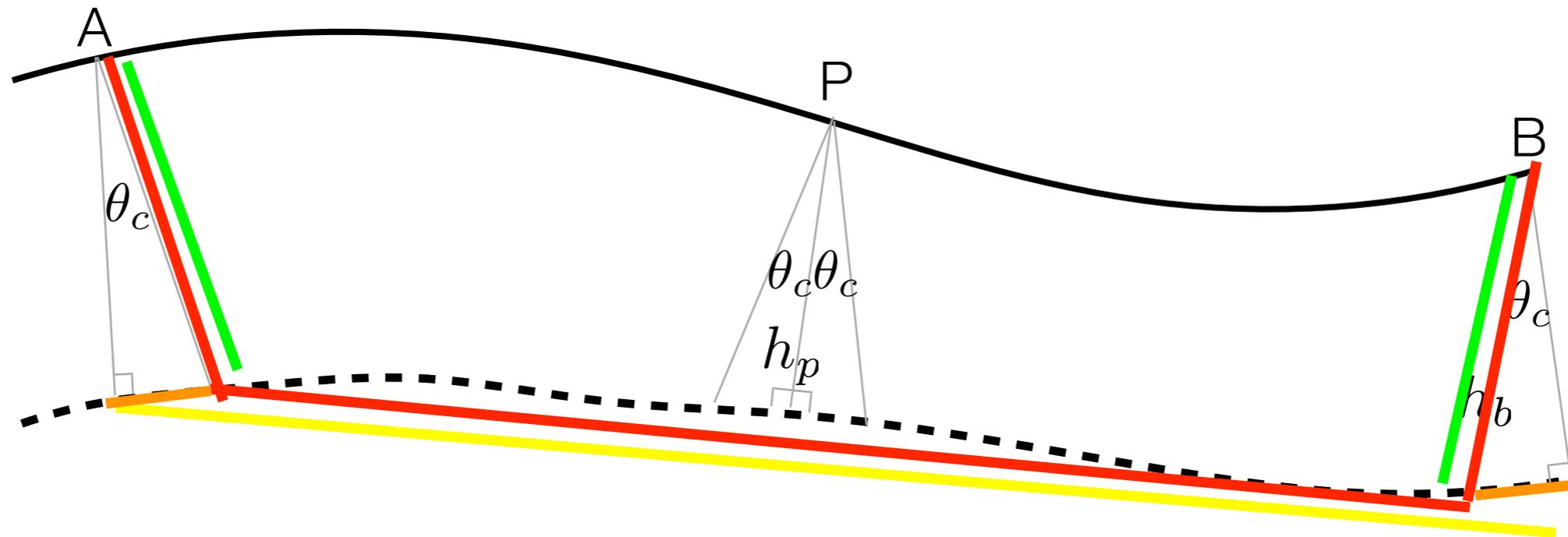


$$AB \approx \frac{h_a}{\cos \theta_c} + \overline{AB} - h_a \tan \theta_c - h_b \tan \theta_c + \frac{h_b}{\cos \theta_c}$$

$$AP \approx \frac{h_a}{\cos \theta_c} + \overline{AP} - h_a \tan \theta_c - h_p \tan \theta_c + \frac{h_p}{\cos \theta_c}$$

$$BP \approx \frac{h_b}{\cos \theta_c} + \overline{BP} - h_b \tan \theta_c - h_p \tan \theta_c + \frac{h_p}{\cos \theta_c}$$

Parcours entre les deux tirs en bout de ligne



$$\begin{aligned}
 T_{AB} &\approx \frac{\overline{h_a}}{V_1 \cos \theta_c} + \frac{\overline{AB}}{V_2} - \frac{h_a \tan \theta_c}{V_2} - \frac{h_b \tan \theta_c}{V_2} + \frac{\overline{h_b}}{V_1 \cos \theta_c} \\
 T_{AP} &\approx \frac{h_a}{V_1 \cos \theta_c} + \frac{\overline{AP}}{V_2} - \frac{h_a \tan \theta_c}{V_2} - \frac{h_p \tan \theta_c}{V_2} + \frac{h_p}{V_1 \cos \theta_c} \\
 T_{BP} &\approx \frac{h_b}{V_1 \cos \theta_c} + \frac{\overline{BP}}{V_2} - \frac{h_b \tan \theta_c}{V_2} - \frac{h_p \tan \theta_c}{V_2} + \frac{h_p}{V_1 \cos \theta_c}
 \end{aligned}$$

Le Plus

Le temps Plus est défini comme:

$$T^+ = T_{AP} + T_{BP} - T_{AB}$$

Grâce aux expressions précédentes:

$$\begin{aligned}
 T_p^+ = & \left[\frac{h_a}{V_1 \cos \theta_c} + \frac{\overline{AP}}{V_2} - \frac{h_a \tan \theta_c}{V_2} - \frac{h_p \tan \theta_c}{V_2} + \frac{h_p}{V_1 \cos \theta_c} \right] \\
 & + \left[\frac{h_b}{V_1 \cos \theta_c} + \frac{\overline{BP}}{V_2} - \frac{h_b \tan \theta_c}{V_2} - \frac{h_p \tan \theta_c}{V_2} + \frac{h_p}{V_1 \cos \theta_c} \right] \\
 & - \left[\frac{h_a}{V_1 \cos \theta_c} + \frac{\overline{AB}}{V_2} - \frac{h_a \tan \theta_c}{V_2} - \frac{h_b \tan \theta_c}{V_2} + \frac{h_b}{V_1 \cos \theta_c} \right]
 \end{aligned}$$

Le Plus

Le temps Plus est défini comme:

$$T^+ = T_{AP} + T_{BP} - T_{AB}$$

Grâce aux expressions précédentes:

$$\begin{aligned}
 T_p^+ = & \left[\frac{\cancel{h_a}}{V_1 \cos \theta_c} + \frac{\overline{AP}}{V_2} - \frac{\cancel{h_a \tan \theta_c}}{V_2} - \frac{h_p \tan \theta_c}{V_2} + \frac{h_p}{V_1 \cos \theta_c} \right] \\
 & + \left[\frac{\cancel{h_b}}{V_1 \cos \theta_c} + \frac{\overline{BP}}{V_2} - \frac{\cancel{h_b \tan \theta_c}}{V_2} - \frac{h_p \tan \theta_c}{V_2} + \frac{h_p}{V_1 \cos \theta_c} \right] \\
 & - \left[\frac{\cancel{h_a}}{V_1 \cos \theta_c} + \frac{\overline{AB}}{V_2} - \frac{\cancel{h_a \tan \theta_c}}{V_2} - \frac{\cancel{h_b \tan \theta_c}}{V_2} + \frac{\cancel{h_b}}{V_1 \cos \theta_c} \right]
 \end{aligned}$$

Le Plus

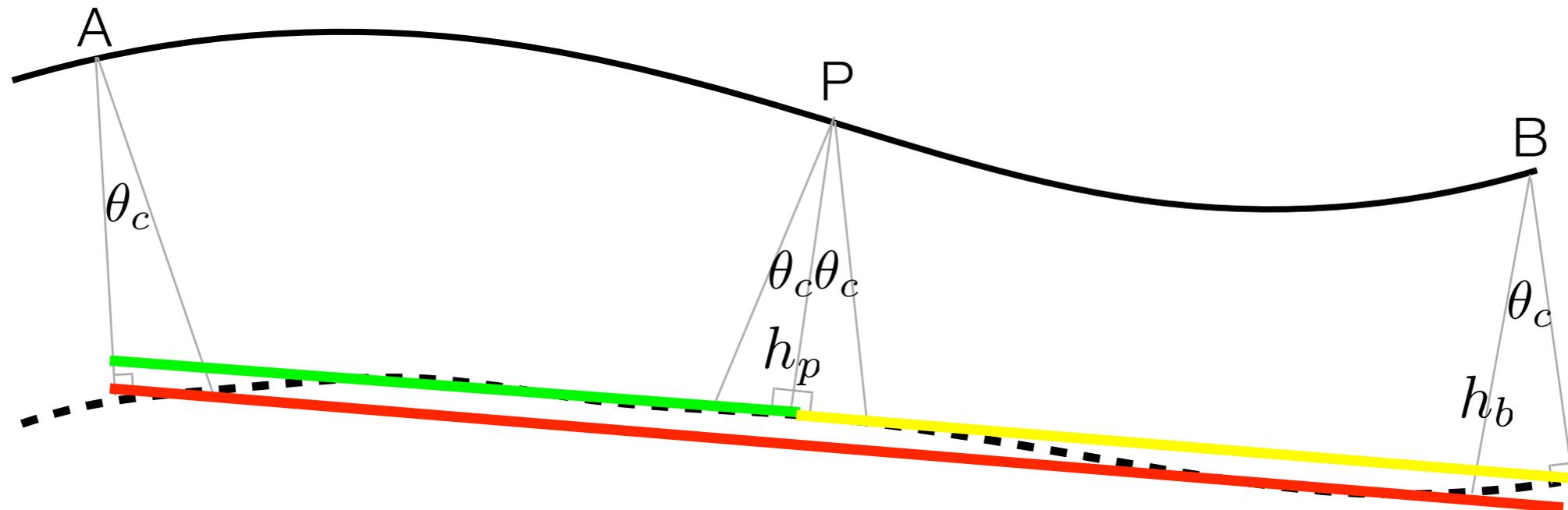
Le temps Plus est défini comme:

$$T^+ = T_{AP} + T_{BP} - T_{AB}$$

Grâce aux expressions précédentes:

$$T^+ = \frac{\overline{AP} + \overline{BP} - \overline{AB}}{V_2} - 2 \frac{h_p \tan \theta_c}{V_2} + 2 \frac{h_p}{V_1 \cos \theta_c}$$

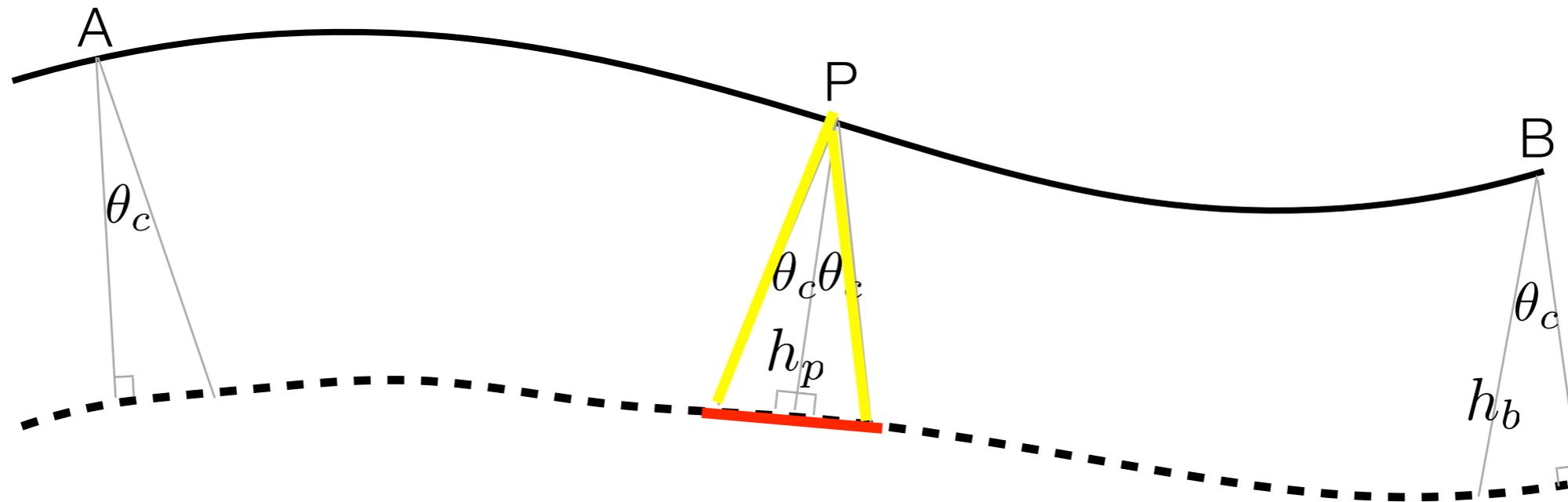
Le Plus



$$T^+ = \frac{\overline{AP} + \overline{BP} - \overline{AB}}{V_2} + 2 \frac{h_p}{V_1 \cos \theta_c} - 2 \frac{h_p \tan \theta_c}{V_2}$$

$$T^+ = 2 \frac{h_p}{V_1 \cos \theta_c} - 2 \frac{h_p \tan \theta_c}{V_2}$$

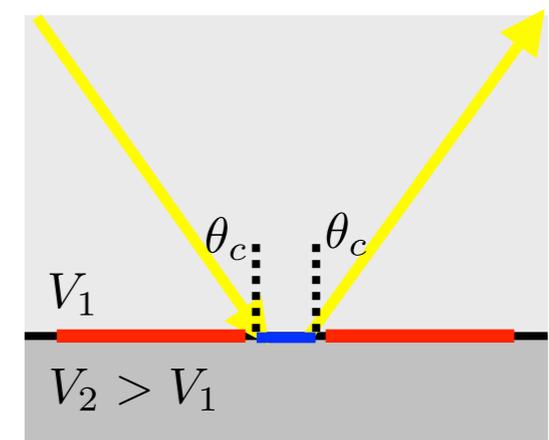
Le Plus



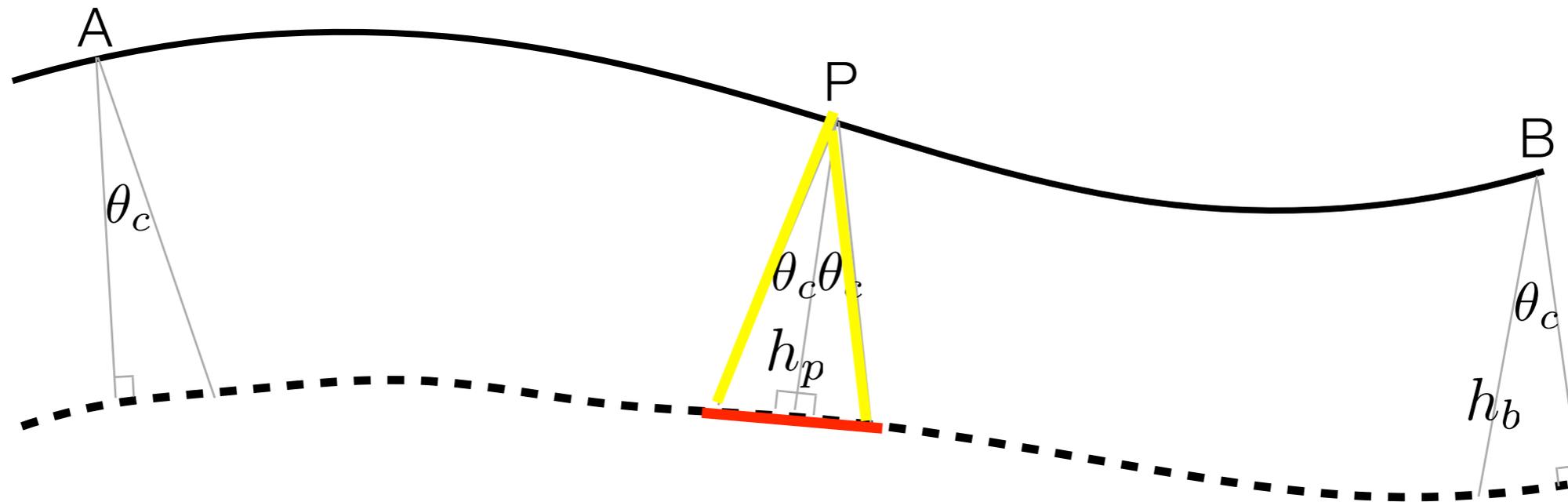
$$T^+ = \frac{\overline{AP} + \overline{BP} - \overline{AB}}{V_2} + 2 \frac{h_p}{V_1 \cos \theta_c} - 2 \frac{h_p \tan \theta_c}{V_2}$$

$$T^+ = 2 \frac{h_p}{V_1 \cos \theta_c} - 2 \frac{h_p \tan \theta_c}{V_2}$$

Temps d'intercepte



Le Plus



$$T_p^+ = T_{AP} + T_{BP} - T_{AB}$$

$$T_p^+ = 2h_p \sqrt{\frac{1}{V_1^2} - \frac{1}{V_2^2}}$$

Le temps Plus est le temps d'intercepte au point P. Il est relié à la **profondeur sous le géophone.**

Le Minus

Le temps Minus est défini comme:

$$T_p^- = T_{AP} - T_{BP} + T_{AB}$$

Grâce aux expressions précédentes:

$$T_{AB} \approx \frac{h_a}{V_1 \cos \theta_c} + \frac{\overline{AB}}{V_2} - \frac{h_a \tan \theta_c}{V_2} - \frac{h_b \tan \theta_c}{V_2} + \frac{h_b}{V_1 \cos \theta_c}$$

$$T_{AP} \approx \frac{h_a}{V_1 \cos \theta_c} + \frac{\overline{AP}}{V_2} - \frac{h_a \tan \theta_c}{V_2} - \frac{h_p \tan \theta_c}{V_2} + \frac{h_p}{V_1 \cos \theta_c}$$

$$T_{BP} \approx \frac{h_b}{V_1 \cos \theta_c} + \frac{\overline{BP}}{V_2} - \frac{h_b \tan \theta_c}{V_2} - \frac{h_p \tan \theta_c}{V_2} + \frac{h_p}{V_1 \cos \theta_c}$$

Le Minus

Le temps Minus est défini comme:

$$T_p^- = T_{AP} - T_{BP} + T_{AB}$$

Grâce aux expressions précédentes:

$$\begin{aligned}
 T_p^- = & \left[\frac{h_a}{V_1 \cos \theta_c} + \frac{\overline{AP}}{V_2} - \frac{h_a \tan \theta_c}{V_2} - \frac{h_p \tan \theta_c}{V_2} + \frac{h_p}{V_1 \cos \theta_c} \right] \\
 & - \left[\frac{h_b}{V_1 \cos \theta_c} + \frac{\overline{BP}}{V_2} - \frac{h_b \tan \theta_c}{V_2} - \frac{h_p \tan \theta_c}{V_2} + \frac{h_p}{V_1 \cos \theta_c} \right] \\
 & + \left[\frac{h_a}{V_1 \cos \theta_c} + \frac{\overline{AB}}{V_2} - \frac{h_a \tan \theta_c}{V_2} - \frac{h_b \tan \theta_c}{V_2} + \frac{h_b}{V_1 \cos \theta_c} \right]
 \end{aligned}$$

Le Minus

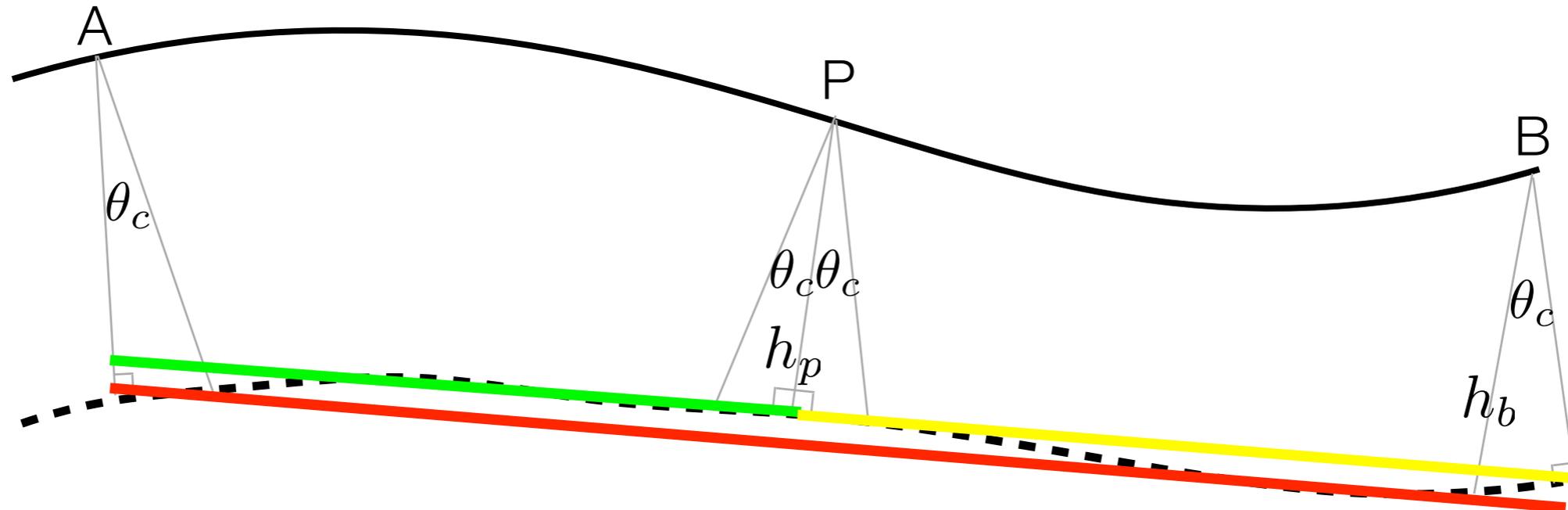
Le temps Minus est défini comme:

$$T_p^- = T_{AP} - T_{BP} + T_{AB}$$

Grâce aux expressions précédentes:

$$\begin{aligned}
 T_p^- = & \left[\frac{h_a}{V_1 \cos \theta_c} + \frac{\overline{AP}}{V_2} - \frac{h_a \tan \theta_c}{V_2} - \frac{\cancel{h_p \tan \theta_c}}{V_2} + \frac{\cancel{h_p}}{V_1 \cos \theta_c} \right] \\
 & - \left[\frac{\cancel{h_b}}{V_1 \cos \theta_c} + \frac{\overline{BP}}{V_2} - \frac{\cancel{h_b \tan \theta_c}}{V_2} - \frac{\cancel{h_p \tan \theta_c}}{V_2} + \frac{\cancel{h_p}}{V_1 \cos \theta_c} \right] \\
 & + \left[\frac{h_a}{V_1 \cos \theta_c} + \frac{\overline{AB}}{V_2} - \frac{h_a \tan \theta_c}{V_2} - \frac{\cancel{h_b \tan \theta_c}}{V_2} + \frac{\cancel{h_b}}{V_1 \cos \theta_c} \right]
 \end{aligned}$$

Le Minus

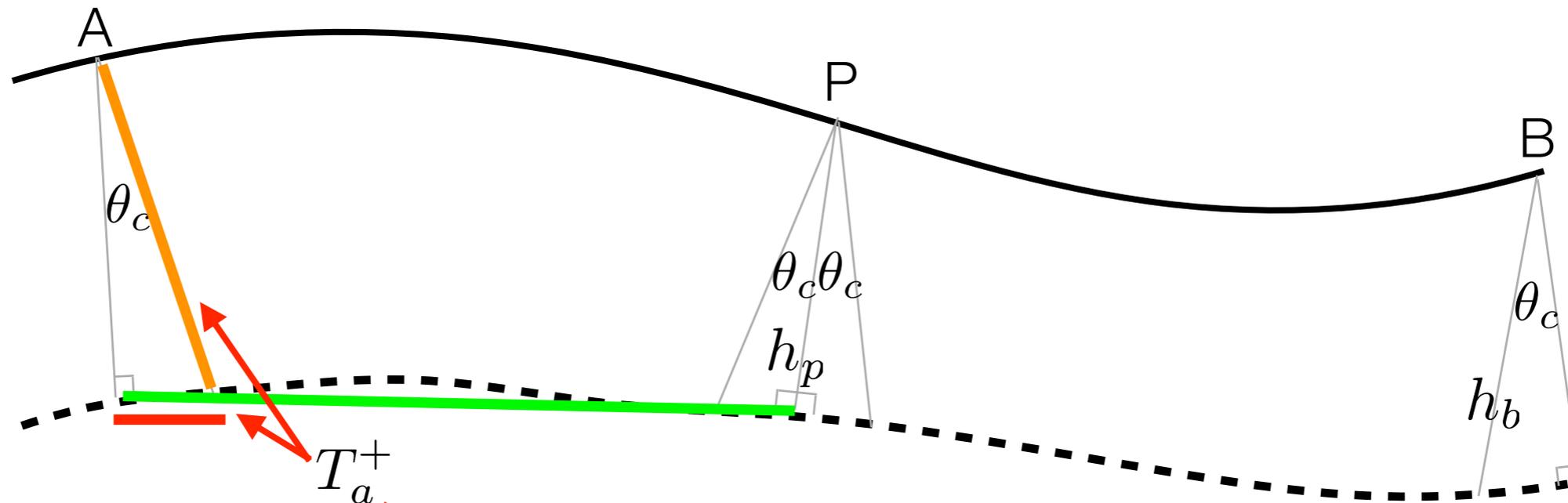


$$T_p^- = \frac{\overline{AP} - \overline{BP} + \overline{AB}}{V_2} + \frac{2h_a}{V_1 \cos \theta_c} - \frac{2h_a \tan \theta_c}{V_2}$$

$$T_p^- = \frac{\overline{AP} - \overline{BP} + \overline{BP} + \overline{AP}}{V_2} + \frac{2h_a}{V_1 \cos \theta_c} - \frac{2h_a \tan \theta_c}{V_2}$$

$$T_p^- = \frac{2\overline{AP}}{V_2} + \frac{2h_a}{V_1 \cos \theta_c} - \frac{2h_a \tan \theta_c}{V_2}$$

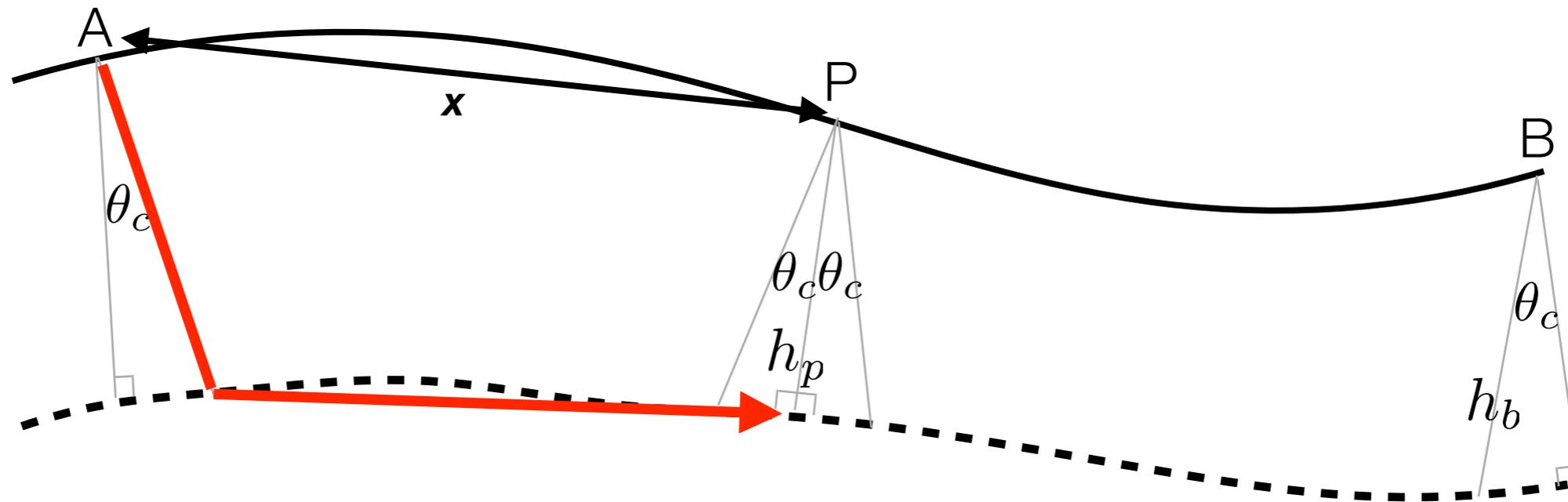
Le Minus



$$T_p^- = \frac{\overline{2AP}}{V_2} + \frac{\overline{2h_a}}{V_1 \cos \theta_c} - \frac{\overline{2h_a \tan \theta_c}}{V_2}$$

**Temps d'intercepte
pour A**

Le Minus

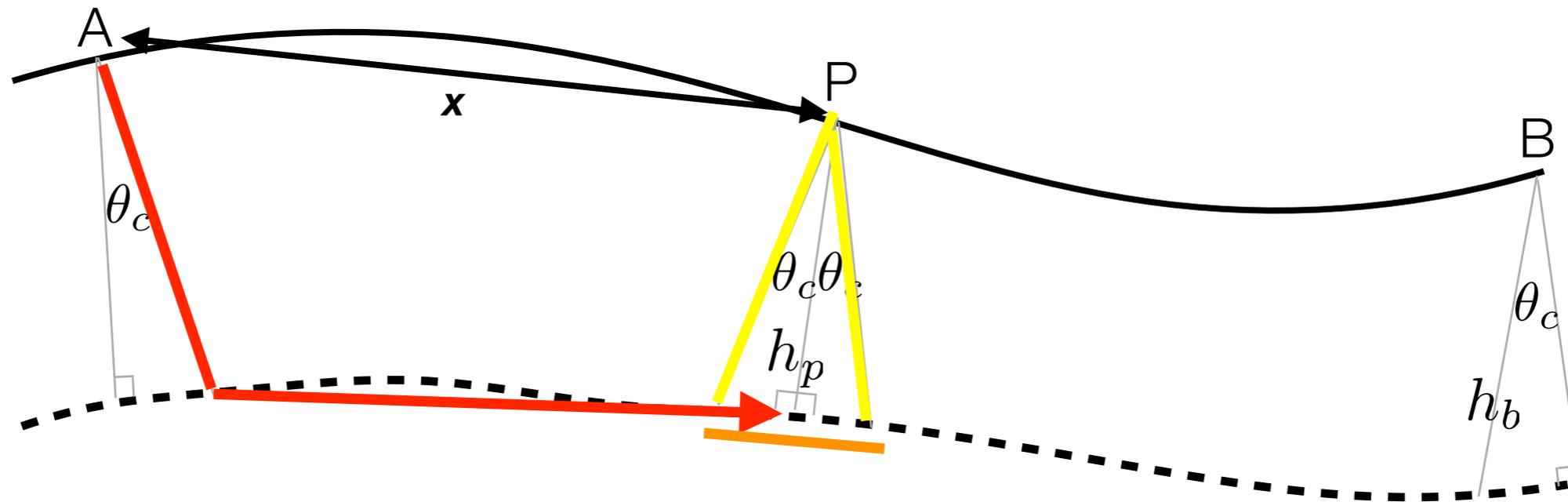


$$T_p^- = T_{AP} - T_{BP} + T_{AB}$$

$$T_p^- = T_a^+ + \frac{2x}{V_2}$$

Le temps Minus est le temps entre la source et un point au droit du géophone. Il **dépend de la vitesse près du géophone.**

Parcours des Plus et Minus



Le temps Minus

Sa pente ne dépend que de la vitesse du réfracteur.

$$T_p^- = T_{AP} - T_{BP} + T_{AB}$$

$$T_p^- = T_a^+ + \frac{2x}{V_2}$$

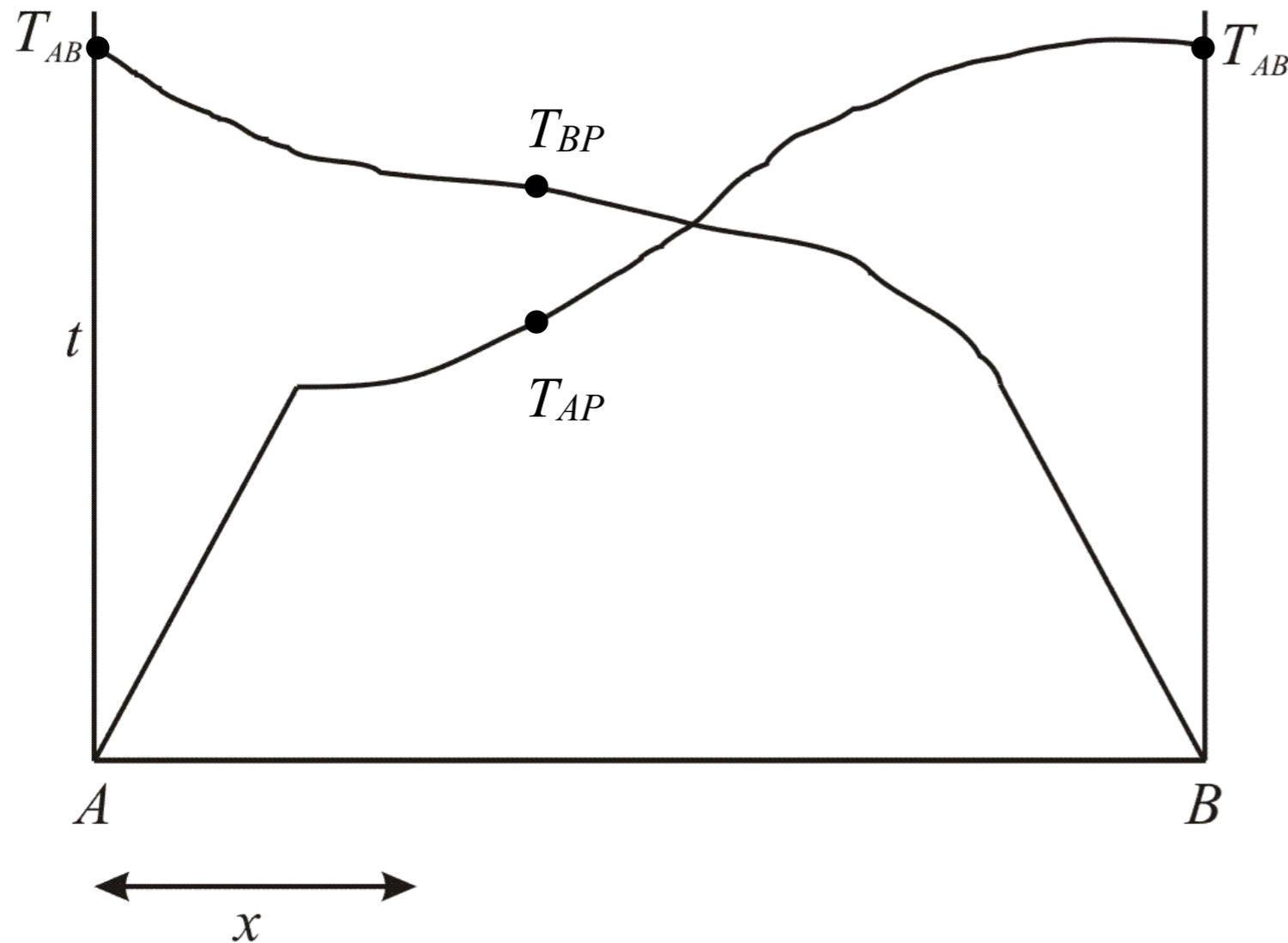
Le temps Plus

Dépend de la profondeur et de la vitesse locale du réfracteur.

$$T_p^+ = T_{AP} + T_{BP} - T_{AB}$$

$$T_p^+ = 2h_p \sqrt{\frac{1}{V_1^2} - \frac{1}{V_2^2}}$$

Méthode de Plus-Minus



$$T_p^+ = T_{AP} + T_{BP} - T_{AB}$$

$$T_p^- = T_{AP} - T_{BP} + T_{AB}$$

Les temps Plus-Minus peuvent être mesurés directement sur la dromochronique!

Méthode de Plus-Minus

1. On peut déterminer la vitesse du réfracteur grâce à la pente du **temps Minus**:

$$T_p^- = T_a^+ + \frac{2x}{V_2} \quad \longrightarrow \quad V_2 = 2 \frac{\Delta x}{\Delta T^-}$$

2. À l'aide des **temps Plus**, on peut déterminer la profondeur en dessous de chaque géophone:

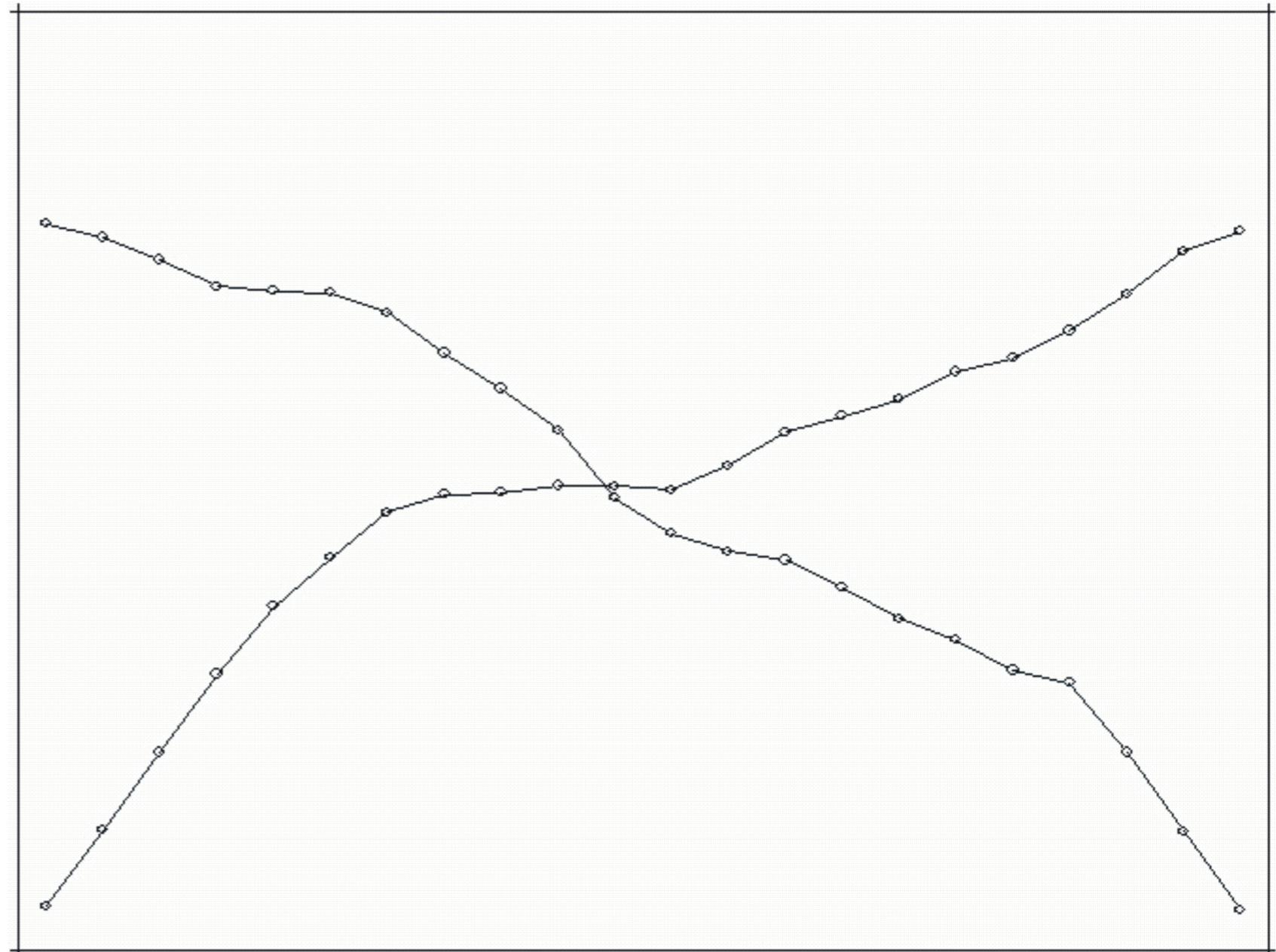
$$T_p^+ = 2h_p \sqrt{\frac{1}{V_1^2} - \frac{1}{V_2^2}} \quad \longrightarrow \quad h_p = \frac{D_p}{\sqrt{\frac{1}{V_1^2} - \frac{1}{V_2^2}}}$$

où D_p est le délai, donné par

$$D_p = \frac{T_p^+}{2}$$

Méthode de Plus-Minus

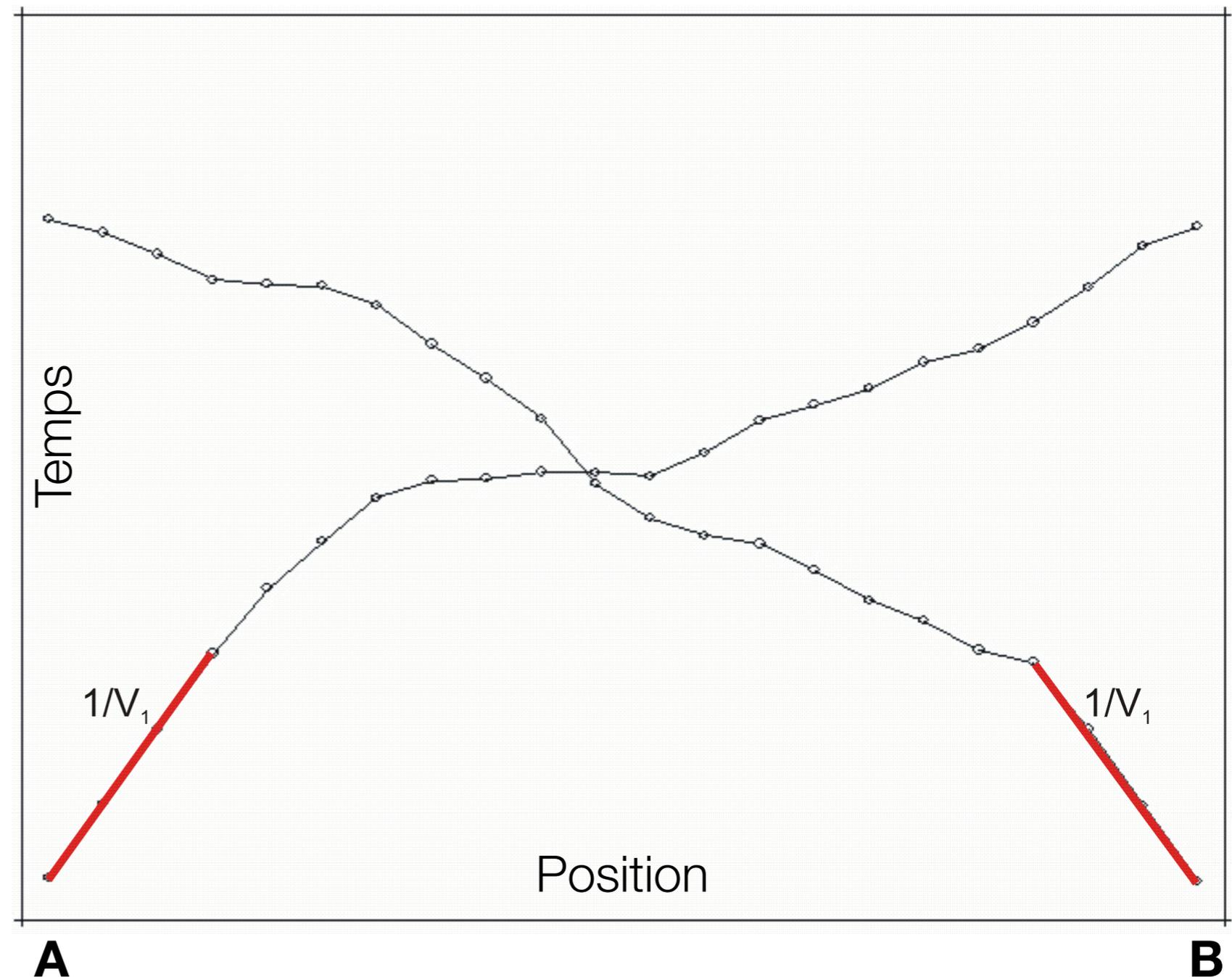
Méthode du Plus-Minus:



Méthode de Plus-Minus

Méthode du Plus-Minus:

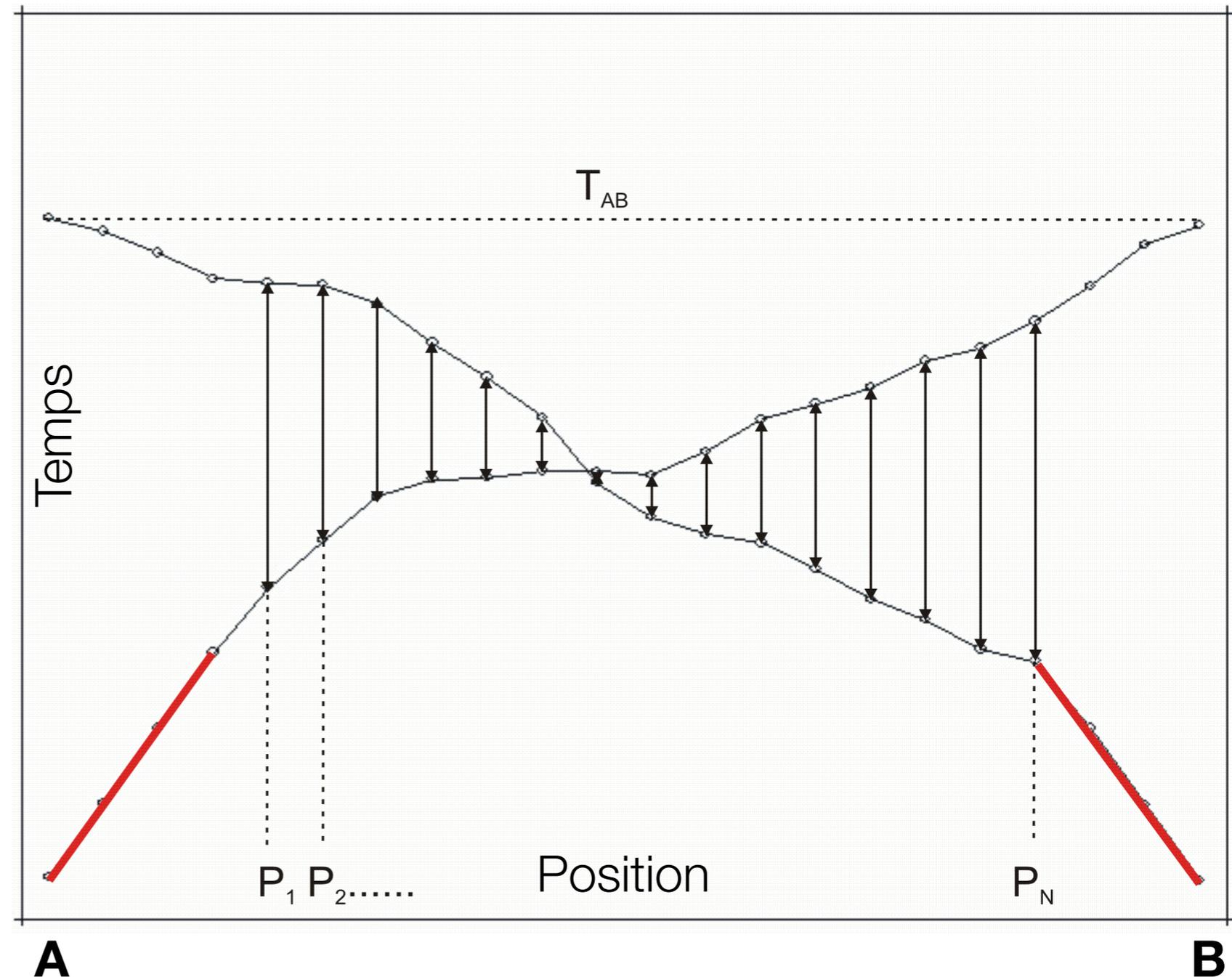
1. Mesurer la vitesse 1



Méthode de Plus-Minus

Méthode du Plus-Minus:

1. Mesurer la vitesse 1
2. Déterminer T_{AB}



Méthode de Plus-Minus

Méthode du Plus-Minus:

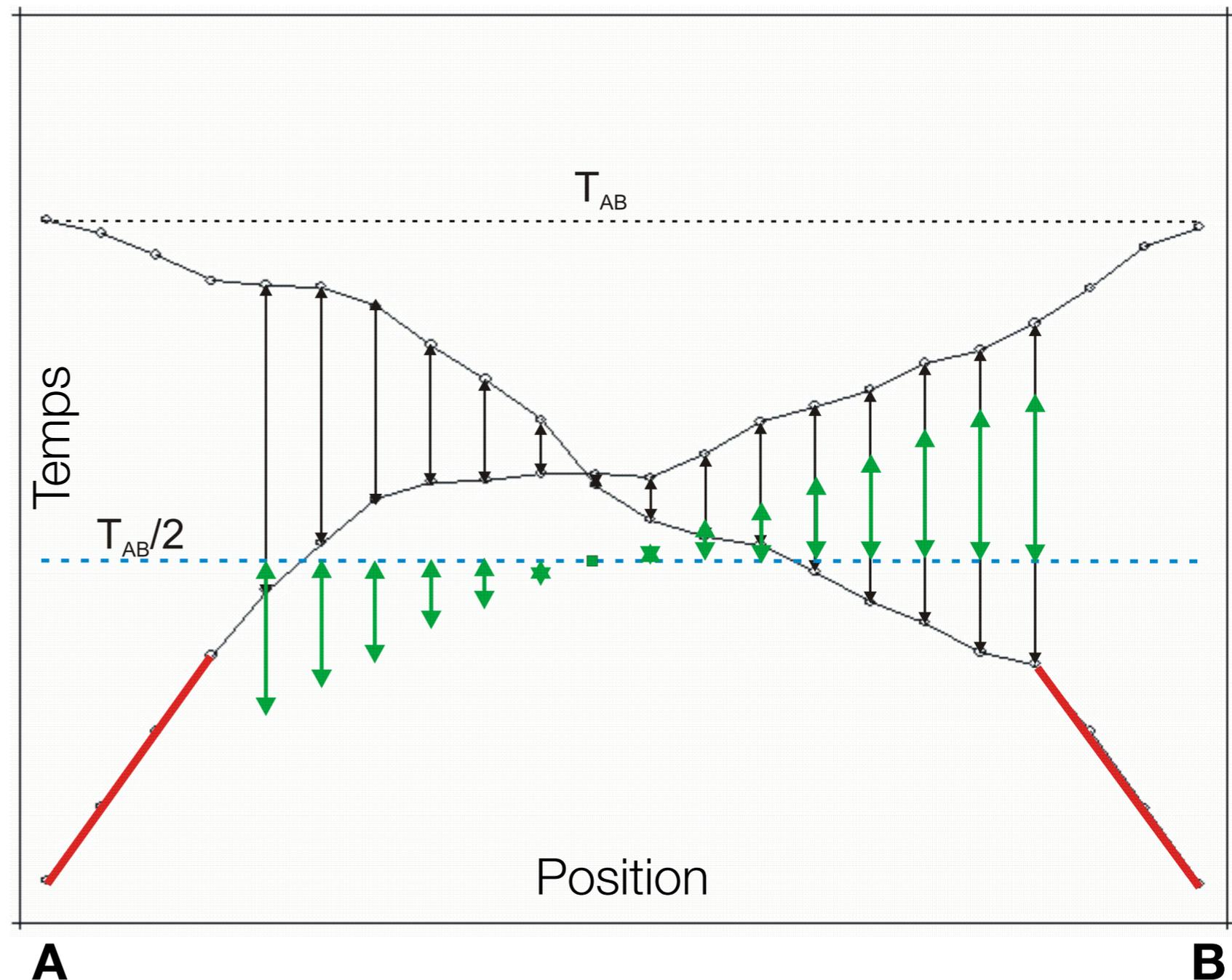
1. Mesurer la vitesse 1

2. Déterminer T_{AB}

3. Déterminer Minus et Plus

$$T_p^- = T_{AP} - T_{BP} + T_{AB}$$

$$T_p^+ = T_{AP} + T_{BP} - T_{AB}$$



Méthode de Plus-Minus

Méthode du Plus-Minus:

1. Mesurer la vitesse 1

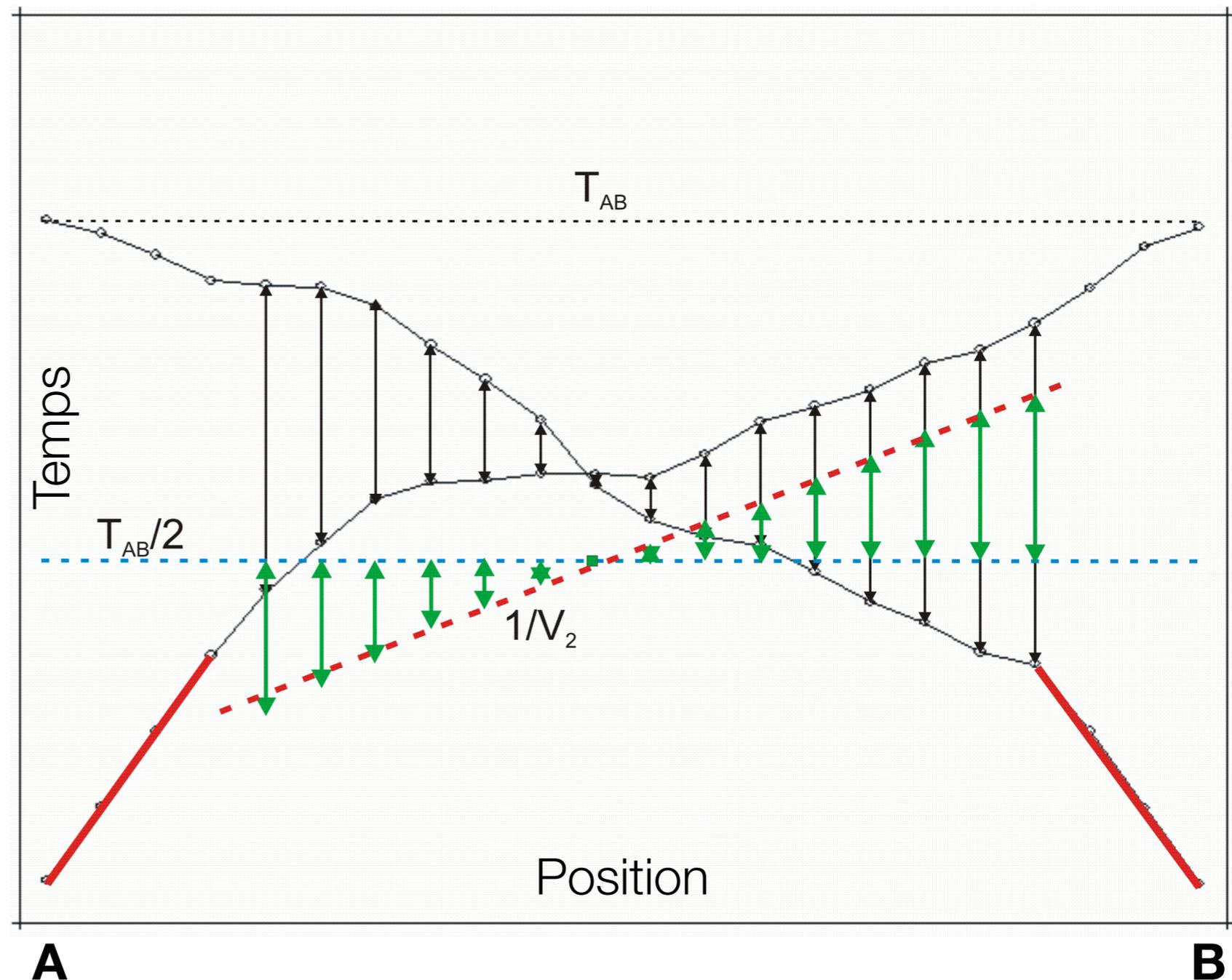
2. Déterminer T_{AB}

3. Déterminer Minus et Plus

$$T_p^- = T_{AP} - T_{BP} + T_{AB}$$

$$T^+ = T_{AP} + T_{BP} - T_{AB}$$

4. Calculer $V_2 = 2 \frac{\Delta x}{\Delta T^-}$



Méthode de Plus-Minus

Méthode du Plus-Minus:

1. Mesurer la vitesse 1

2. Déterminer T_{AB}

3. Déterminer Minus et Plus

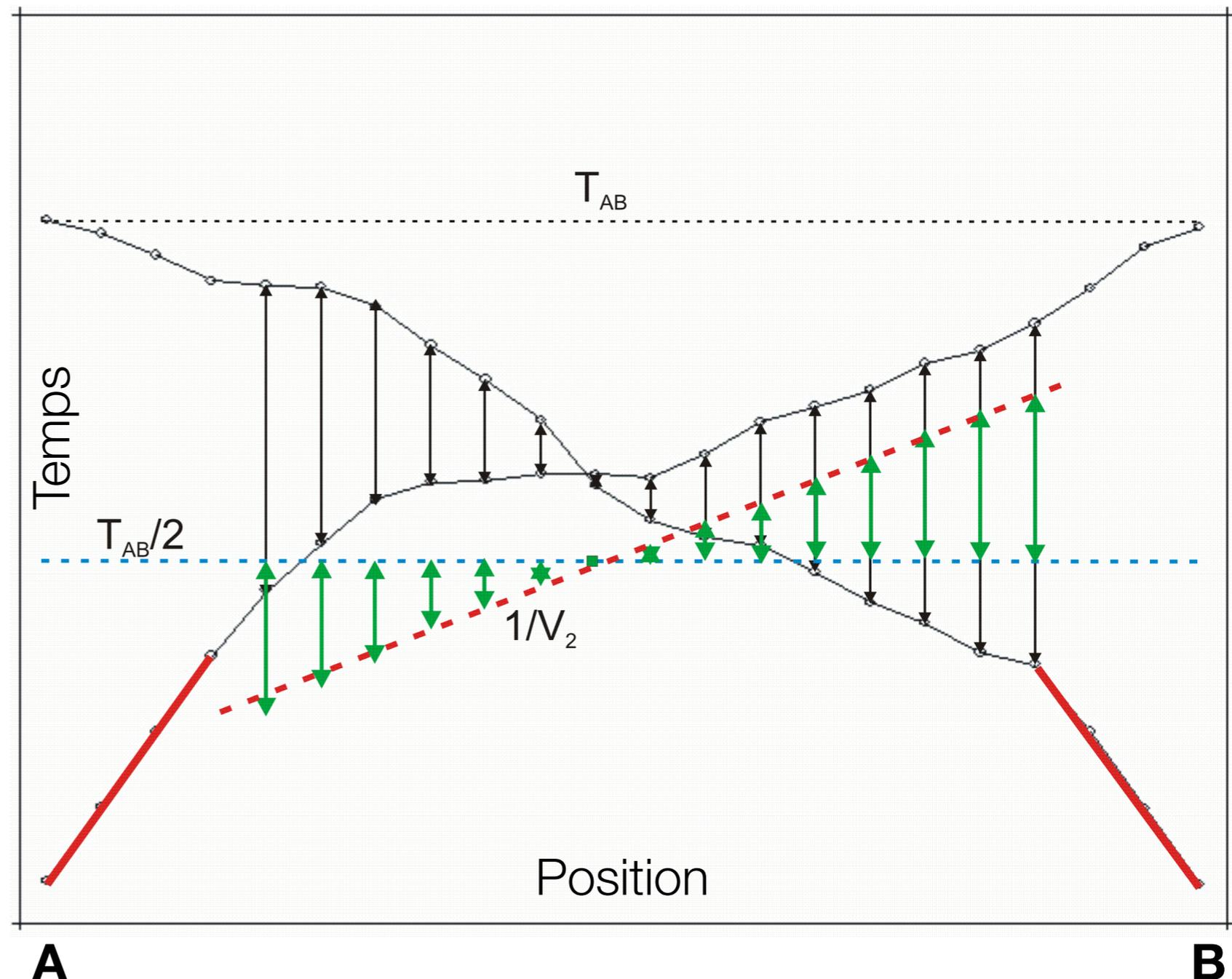
$$T_p^- = T_{AP} - T_{BP} + T_{AB}$$

$$T^+ = T_{AP} + T_{BP} - T_{AB}$$

4. Calculer $V_2 = 2 \frac{\Delta x}{\Delta T^-}$

5. Calculer les épaisseurs

$$h_p = \frac{T^+}{2\sqrt{1/V_1^2 - 1/V_2^2}}$$

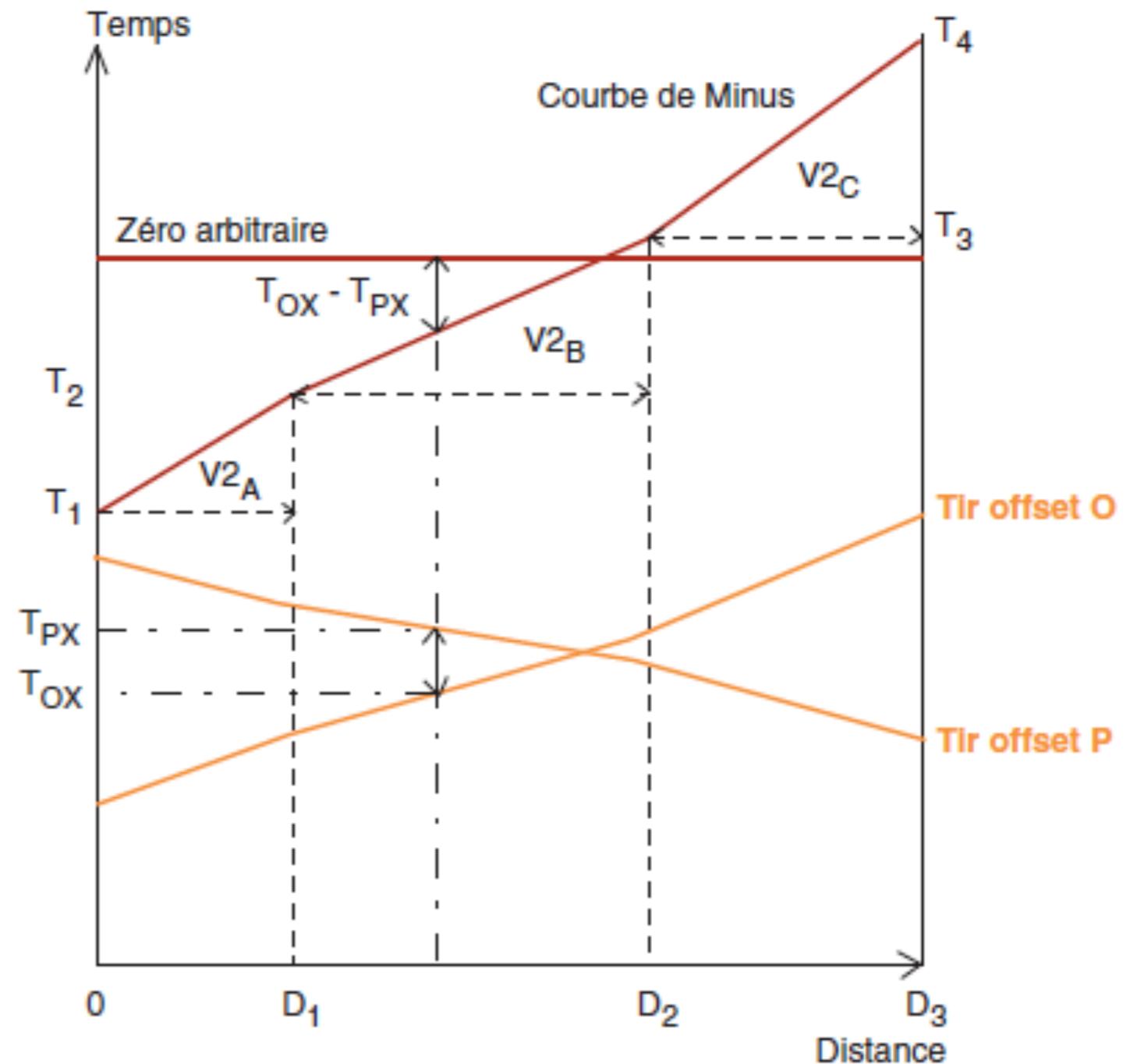


Variations de vitesse

Les variations de vitesse peuvent être mesurées sur la courbe minus par des pentes différentes.

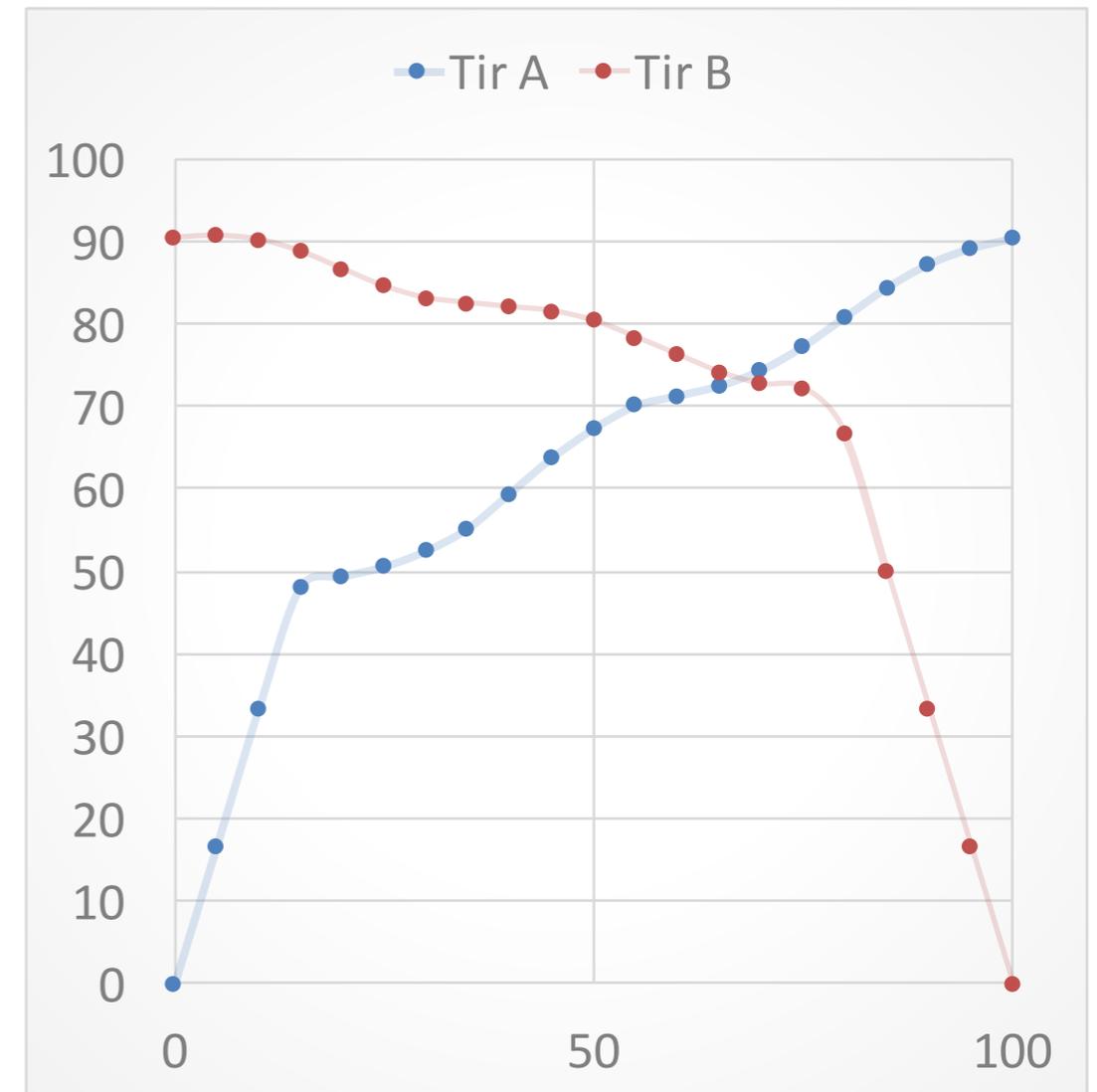
On peut donc identifier des vitesses différentes en prenant la pente des différents segments du Minus.

Lorsqu'on calcule les profondeurs avec les délais, il faut choisir la vitesse du réfracteur correspondant à la station pour laquelle on calcule la profondeur.



Exemple

| G | x (m) | TA (ms) | TB (ms) | Minus (ms) | Plus (ms) | v (km/s) | h (m) |
|----|----------|------------|------------|---------------|--------------|-------------|----------|
| | 0 | 0.0 | 90.5 | | | | |
| 1 | 5 | 16.7 | 90.7 | | | | |
| 2 | 10 | 33.3 | 90.2 | | | | |
| 3 | 15 | 48.1 | 88.8 | | | | |
| 4 | 20 | 49.4 | 86.7 | | | | |
| 5 | 25 | 50.6 | 84.6 | | | | |
| 6 | 30 | 52.5 | 83.1 | | | | |
| 7 | 35 | 55.2 | 82.6 | | | | |
| 8 | 40 | 59.5 | 82.1 | | | | |
| 9 | 45 | 63.8 | 81.6 | | | | |
| 10 | 50 | 67.3 | 80.4 | | | | |
| 11 | 55 | 70.1 | 78.4 | | | | |
| 12 | 60 | 71.3 | 76.3 | | | | |
| 13 | 65 | 72.6 | 74.2 | | | | |
| 14 | 70 | 74.5 | 72.7 | | | | |
| 15 | 75 | 77.3 | 72.3 | | | | |
| 16 | 80 | 80.9 | 66.7 | | | | |
| 17 | 85 | 84.5 | 50.0 | | | | |
| 18 | 90 | 87.3 | 33.3 | | | | |
| 19 | 95 | 89.2 | 16.7 | | | | |
| | 100 | 90.5 | 0.0 | | | | |

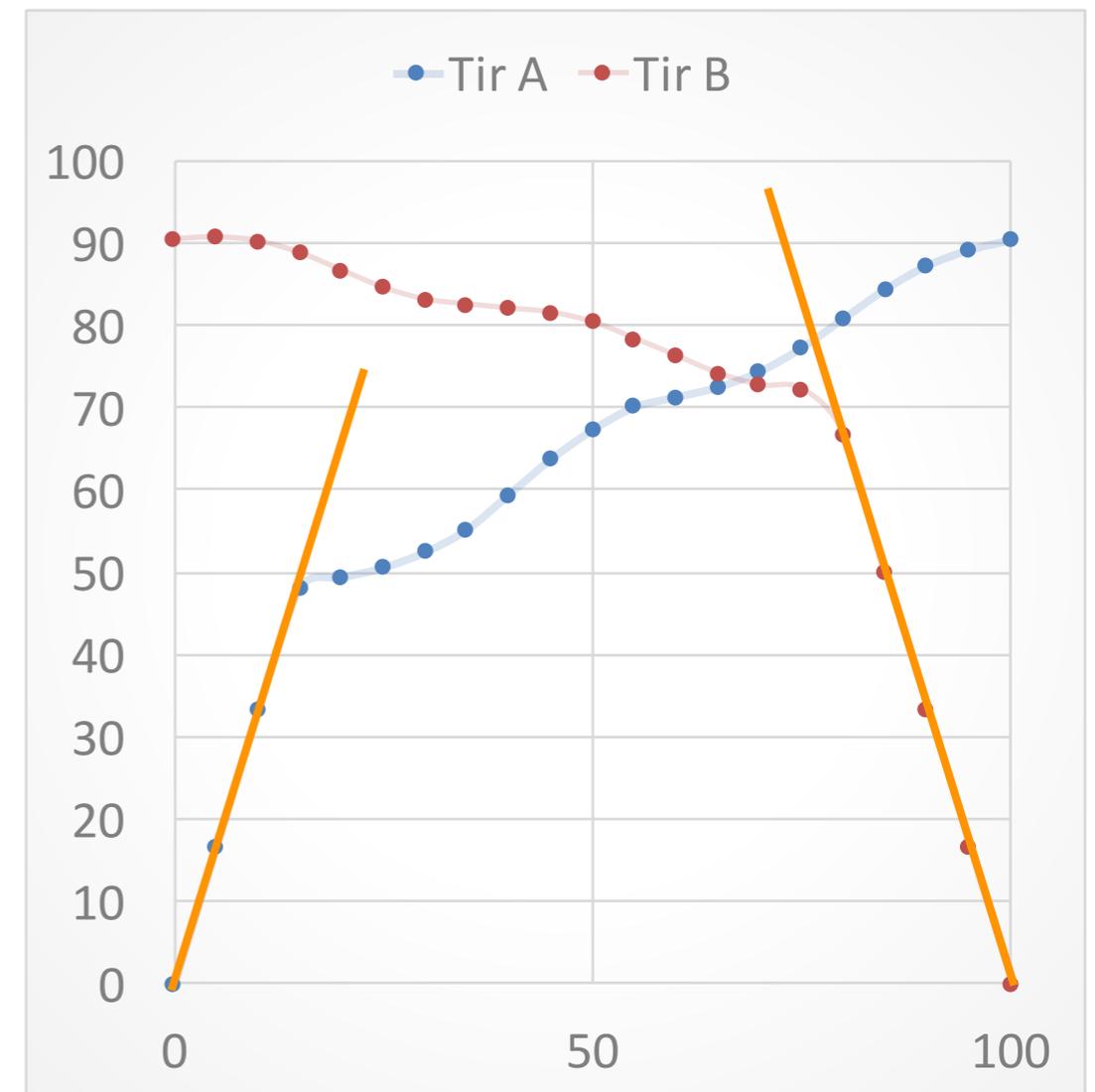


Exemple

| G | x (m) | TA (ms) | TB (ms) | Minus (ms) | Plus (ms) | v (km/s) | h (m) |
|----|----------|------------|------------|---------------|--------------|-------------|----------|
| | 0 | 0.0 | 90.5 | | | | |
| 1 | 5 | 16.7 | 90.7 | | | | |
| 2 | 10 | 33.3 | 90.2 | | | | |
| 3 | 15 | 48.1 | 88.8 | | | | |
| 4 | 20 | 49.4 | 86.7 | | | | |
| 5 | 25 | 50.6 | 84.6 | | | | |
| 6 | 30 | 52.5 | 83.1 | | | | |
| 7 | 35 | 55.2 | 82.6 | | | | |
| 8 | 40 | 59.5 | 82.1 | | | | |
| 9 | 45 | 63.8 | 81.6 | | | | |
| 10 | 50 | 67.3 | 80.4 | | | | |
| 11 | 55 | 70.1 | 78.4 | | | | |
| 12 | 60 | 71.3 | 76.3 | | | | |
| 13 | 65 | 72.6 | 74.2 | | | | |
| 14 | 70 | 74.5 | 72.7 | | | | |
| 15 | 75 | 77.3 | 72.3 | | | | |
| 16 | 80 | 80.9 | 66.7 | | | | |
| 17 | 85 | 84.5 | 50.0 | | | | |
| 18 | 90 | 87.3 | 33.3 | | | | |
| 19 | 95 | 89.2 | 16.7 | | | | |
| | 100 | 90.5 | 0.0 | | | | |

Mesurer V_1

$$V_1 = 300 \text{ m/s}$$

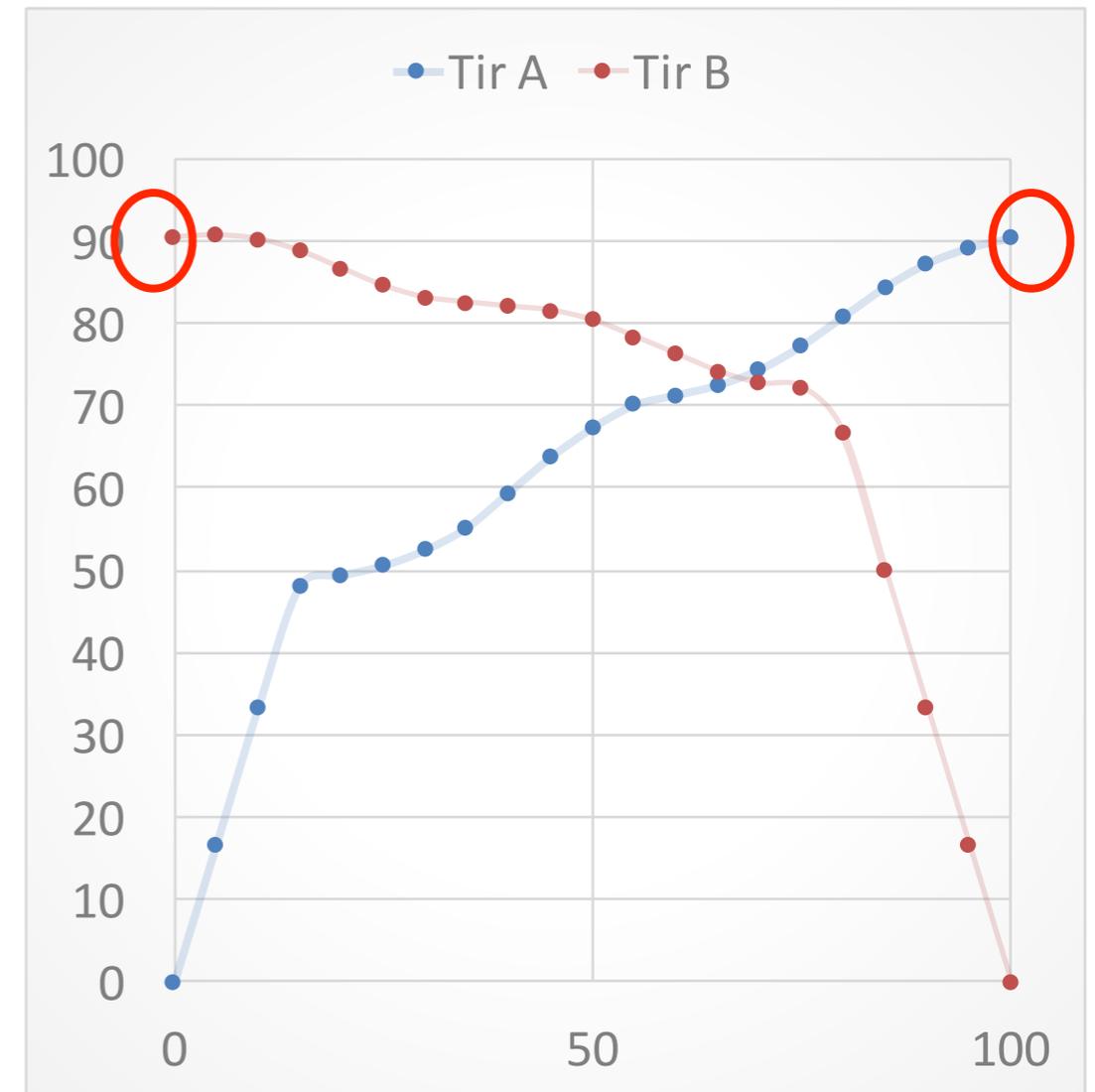


Exemple

| G | x (m) | TA (ms) | TB (ms) | Minus (ms) | Plus (ms) | v (km/s) | h (m) |
|----|-------|---------|---------|------------|-----------|----------|-------|
| | 0 | 0.0 | 90.5 | | | | |
| 1 | 5 | 16.7 | 90.7 | | | | |
| 2 | 10 | 33.3 | 90.2 | | | | |
| 3 | 15 | 48.1 | 88.8 | | | | |
| 4 | 20 | 49.4 | 86.7 | | | | |
| 5 | 25 | 50.6 | 84.6 | | | | |
| 6 | 30 | 52.5 | 83.1 | | | | |
| 7 | 35 | 55.2 | 82.6 | | | | |
| 8 | 40 | 59.5 | 82.1 | | | | |
| 9 | 45 | 63.8 | 81.6 | | | | |
| 10 | 50 | 67.3 | 80.4 | | | | |
| 11 | 55 | 70.1 | 78.4 | | | | |
| 12 | 60 | 71.3 | 76.3 | | | | |
| 13 | 65 | 72.6 | 74.2 | | | | |
| 14 | 70 | 74.5 | 72.7 | | | | |
| 15 | 75 | 77.3 | 72.3 | | | | |
| 16 | 80 | 80.9 | 66.7 | | | | |
| 17 | 85 | 84.5 | 50.0 | | | | |
| 18 | 90 | 87.3 | 33.3 | | | | |
| 19 | 95 | 89.2 | 16.7 | | | | |
| | 100 | 90.5 | 0.0 | | | | |

Identification de T_{AB}

$$T_{AB} = 90.5 \text{ ms}$$

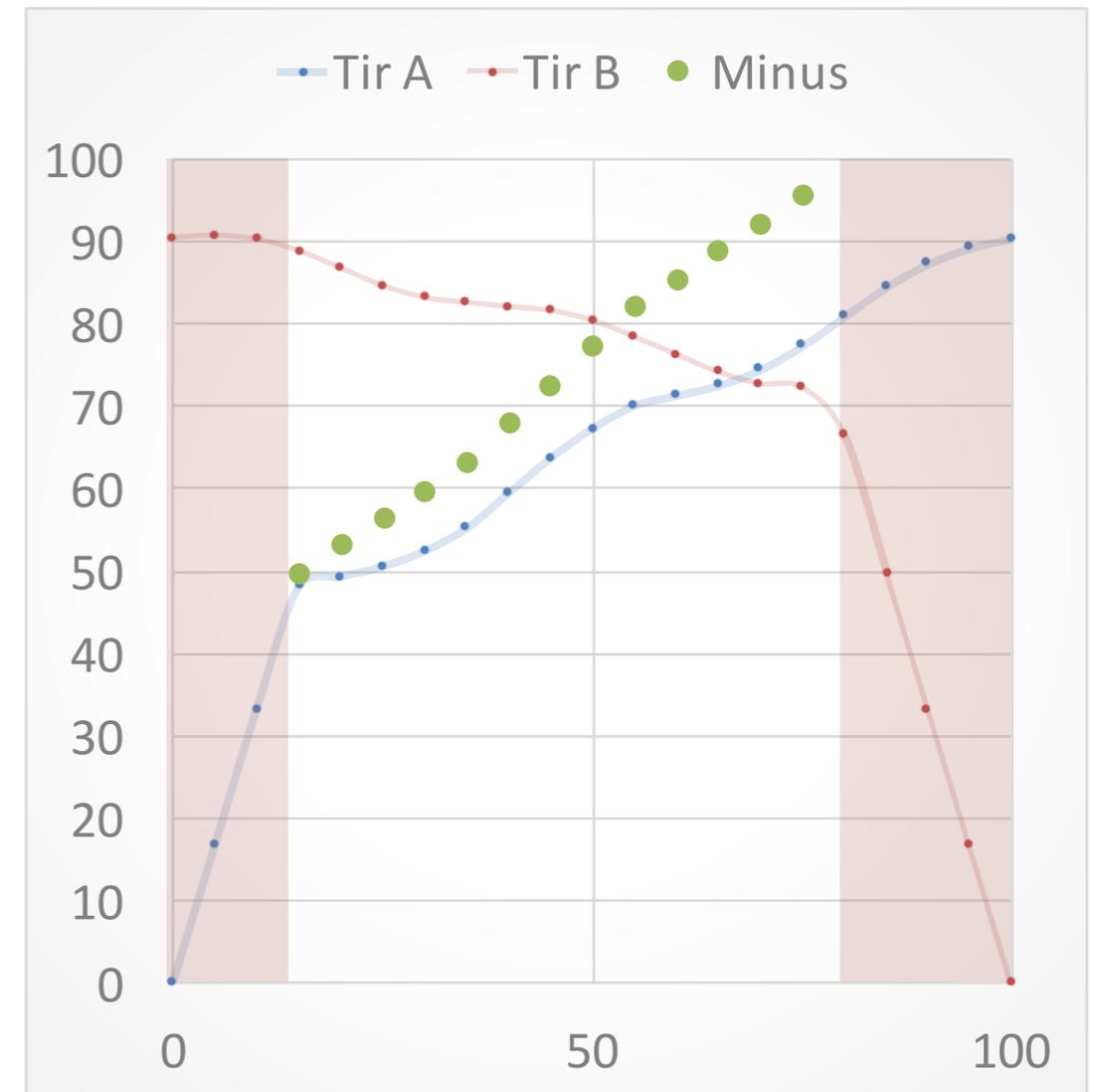


Exemple

| G | x (m) | TA (ms) | TB (ms) | Minus (ms) | Plus (ms) | v (km/s) | h (m) |
|----|-------|---------|---------|------------|-----------|----------|-------|
| | 0 | 0.0 | 90.5 | | | | |
| 1 | 5 | 16.7 | 90.7 | | | | |
| 2 | 10 | 33.3 | 90.2 | | | | |
| 3 | 15 | 48.1 | 88.8 | 49.8 | | | |
| 4 | 20 | 49.4 | 86.7 | 53.1 | | | |
| 5 | 25 | 50.6 | 84.6 | 56.5 | | | |
| 6 | 30 | 52.5 | 83.1 | 59.8 | | | |
| 7 | 35 | 55.2 | 82.6 | 63.1 | | | |
| 8 | 40 | 59.5 | 82.1 | 67.9 | | | |
| 9 | 45 | 63.8 | 81.6 | 72.7 | | | |
| 10 | 50 | 67.3 | 80.4 | 77.4 | | | |
| 11 | 55 | 70.1 | 78.4 | 82.2 | | | |
| 12 | 60 | 71.3 | 76.3 | 85.5 | | | |
| 13 | 65 | 72.6 | 74.2 | 88.8 | | | |
| 14 | 70 | 74.5 | 72.7 | 92.2 | | | |
| 15 | 75 | 77.3 | 72.3 | 95.5 | | | |
| 16 | 80 | 80.9 | 66.7 | | | | |
| 17 | 85 | 84.5 | 50.0 | | | | |
| 18 | 90 | 87.3 | 33.3 | | | | |
| 19 | 95 | 89.2 | 16.7 | | | | |
| | 100 | 90.5 | 0.0 | | | | |

Calcul du temps Minus

$$T_p^- = T_{AP} - T_{BP} + T_{AB}$$

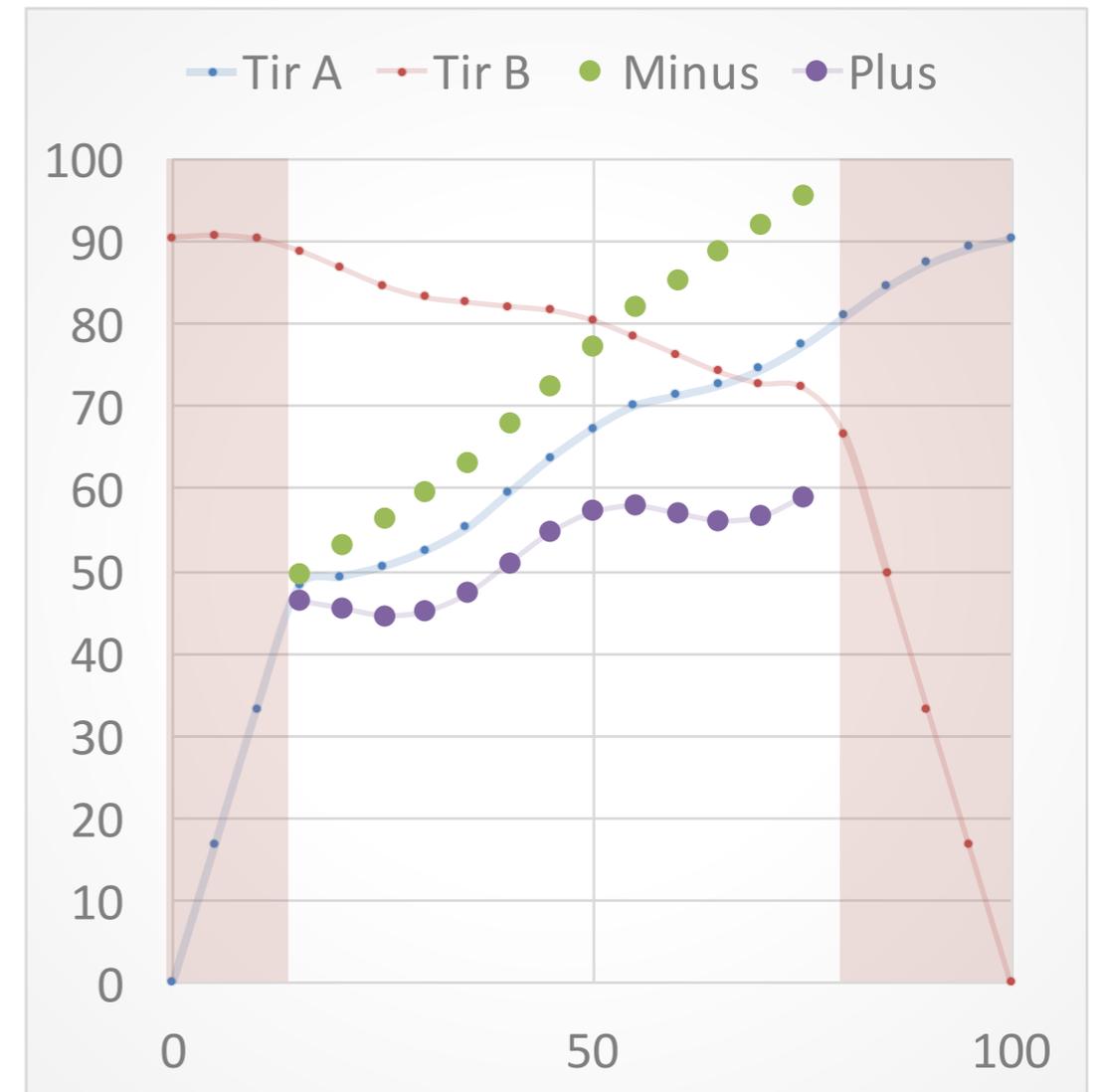


Exemple

| G | x (m) | TA (ms) | TB (ms) | Minus (ms) | Plus (ms) | v (km/s) | h (m) |
|----|----------|------------|------------|---------------|--------------|-------------|----------|
| | 0 | 0.0 | 90.5 | | | | |
| 1 | 5 | 16.7 | 90.7 | | | | |
| 2 | 10 | 33.3 | 90.2 | | | | |
| 3 | 15 | 48.1 | 88.8 | 49.8 | 46.5 | | |
| 4 | 20 | 49.4 | 86.7 | 53.1 | 45.6 | | |
| 5 | 25 | 50.6 | 84.6 | 56.5 | 44.7 | | |
| 6 | 30 | 52.5 | 83.1 | 59.8 | 45.2 | | |
| 7 | 35 | 55.2 | 82.6 | 63.1 | 47.3 | | |
| 8 | 40 | 59.5 | 82.1 | 67.9 | 51.1 | | |
| 9 | 45 | 63.8 | 81.6 | 72.7 | 54.9 | | |
| 10 | 50 | 67.3 | 80.4 | 77.4 | 57.3 | | |
| 11 | 55 | 70.1 | 78.4 | 82.2 | 58.1 | | |
| 12 | 60 | 71.3 | 76.3 | 85.5 | 57.2 | | |
| 13 | 65 | 72.6 | 74.2 | 88.8 | 56.3 | | |
| 14 | 70 | 74.5 | 72.7 | 92.2 | 56.7 | | |
| 15 | 75 | 77.3 | 72.3 | 95.5 | 59.2 | | |
| 16 | 80 | 80.9 | 66.7 | | | | |
| 17 | 85 | 84.5 | 50.0 | | | | |
| 18 | 90 | 87.3 | 33.3 | | | | |
| 19 | 95 | 89.2 | 16.7 | | | | |
| | 100 | 90.5 | 0.0 | | | | |

Calcul du temps Plus

$$T^+ = T_{AP} + T_{BP} - T_{AB}$$

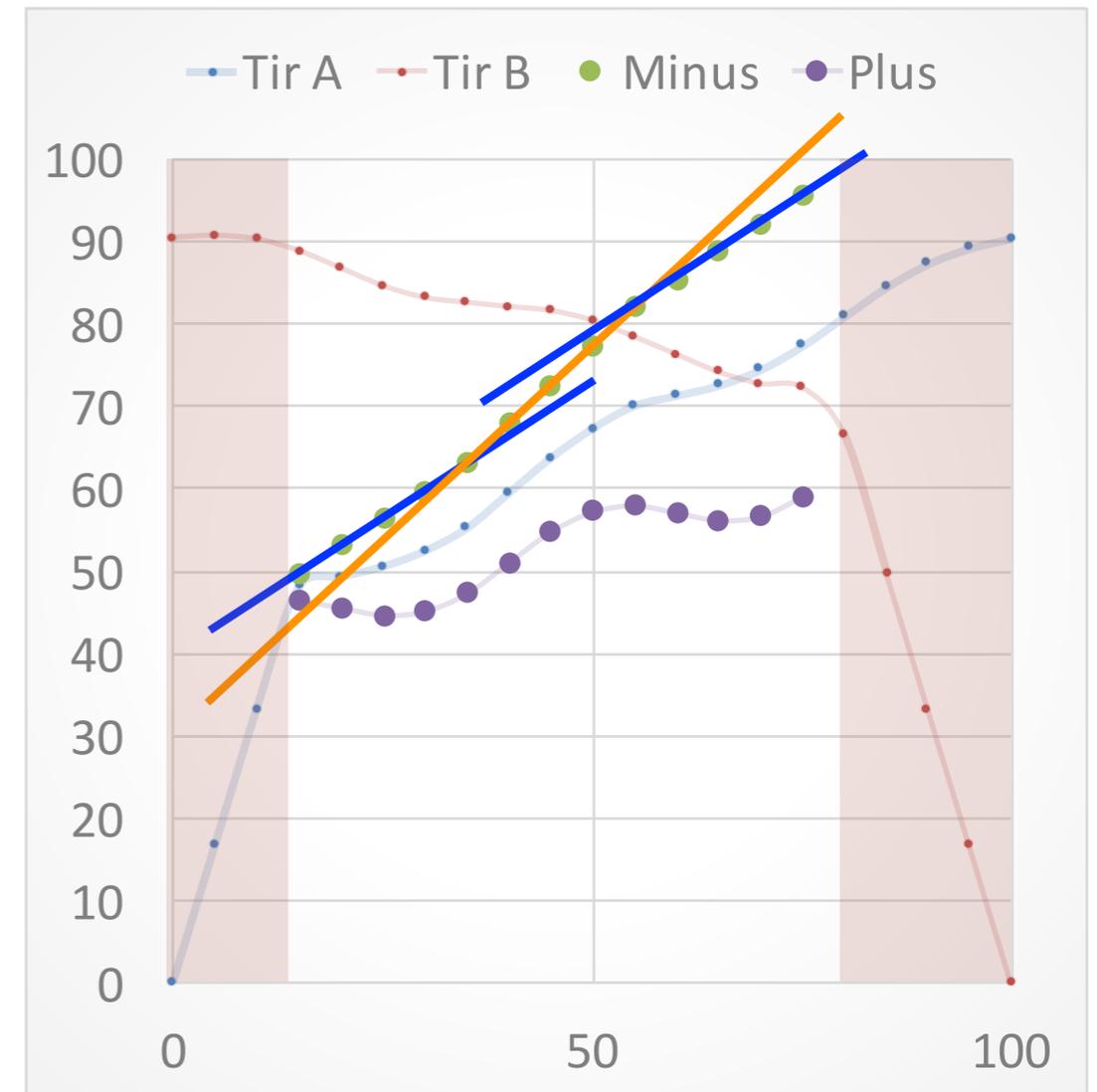


Exemple

| G | x (m) | TA (ms) | TB (ms) | Minus (ms) | Plus (ms) | v (km/s) | h (m) |
|----|----------|------------|------------|---------------|--------------|-------------|----------|
| | 0 | 0.0 | 90.5 | | | | |
| 1 | 5 | 16.7 | 90.7 | | | | |
| 2 | 10 | 33.3 | 90.2 | | | | |
| 3 | 15 | 48.1 | 88.8 | 49.8 | 46.5 | 3.0 | |
| 4 | 20 | 49.4 | 86.7 | 53.1 | 45.6 | 3.0 | |
| 5 | 25 | 50.6 | 84.6 | 56.5 | 44.7 | 3.0 | |
| 6 | 30 | 52.5 | 83.1 | 59.8 | 45.2 | 3.0 | |
| 7 | 35 | 55.2 | 82.6 | 63.1 | 47.3 | 3.0 | |
| 8 | 40 | 59.5 | 82.1 | 67.9 | 51.1 | 2.1 | |
| 9 | 45 | 63.8 | 81.6 | 72.7 | 54.9 | 2.1 | |
| 10 | 50 | 67.3 | 80.4 | 77.4 | 57.3 | 2.1 | |
| 11 | 55 | 70.1 | 78.4 | 82.2 | 58.1 | 2.1 | |
| 12 | 60 | 71.3 | 76.3 | 85.5 | 57.2 | 3.0 | |
| 13 | 65 | 72.6 | 74.2 | 88.8 | 56.3 | 3.0 | |
| 14 | 70 | 74.5 | 72.7 | 92.2 | 56.7 | 3.0 | |
| 15 | 75 | 77.3 | 72.3 | 95.5 | 59.2 | 3.0 | |
| 16 | 80 | 80.9 | 66.7 | | | | |
| 17 | 85 | 84.5 | 50.0 | | | | |
| 18 | 90 | 87.3 | 33.3 | | | | |
| 19 | 95 | 89.2 | 16.7 | | | | |
| | 100 | 90.5 | 0.0 | | | | |

Calcul des vitesses 2

$$V_2 = 2 \frac{\Delta x}{\Delta T^-}$$

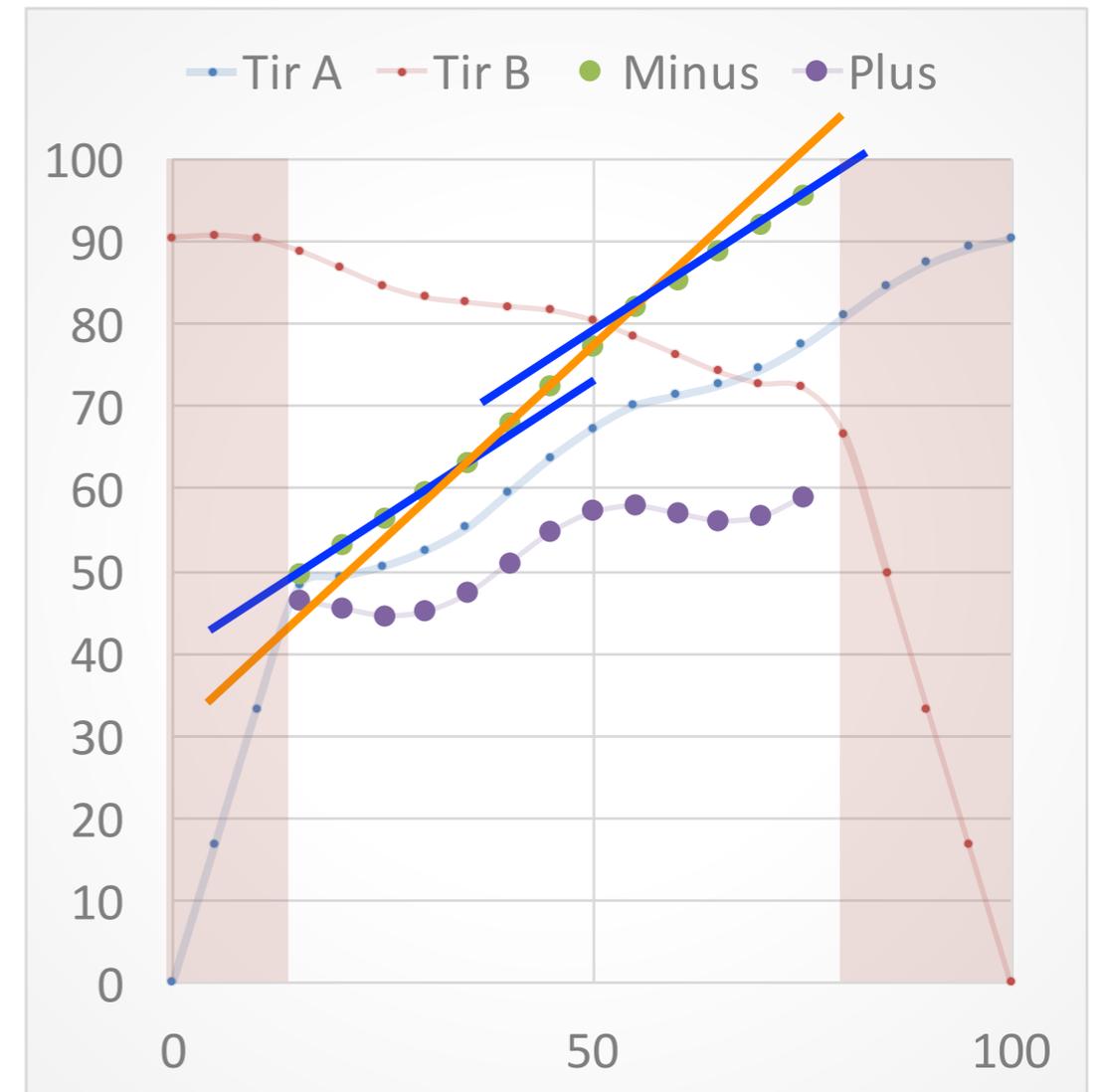


Exemple

| G | x (m) | TA (ms) | TB (ms) | Minus (ms) | Plus (ms) | v (km/s) | h (m) |
|----|----------|------------|------------|---------------|--------------|-------------|----------|
| | 0 | 0.0 | 90.5 | | | | |
| 1 | 5 | 16.7 | 90.7 | | | | |
| 2 | 10 | 33.3 | 90.2 | | | | |
| 3 | 15 | 48.1 | 88.8 | 49.8 | 46.5 | 3.0 | 7.0 |
| 4 | 20 | 49.4 | 86.7 | 53.1 | 45.6 | 3.0 | 6.9 |
| 5 | 25 | 50.6 | 84.6 | 56.5 | 44.7 | 3.0 | 6.7 |
| 6 | 30 | 52.5 | 83.1 | 59.8 | 45.2 | 3.0 | 6.8 |
| 7 | 35 | 55.2 | 82.6 | 63.1 | 47.3 | 3.0 | 7.1 |
| 8 | 40 | 59.5 | 82.1 | 67.9 | 51.1 | 2.1 | 7.7 |
| 9 | 45 | 63.8 | 81.6 | 72.7 | 54.9 | 2.1 | 8.3 |
| 10 | 50 | 67.3 | 80.4 | 77.4 | 57.3 | 2.1 | 8.7 |
| 11 | 55 | 70.1 | 78.4 | 82.2 | 58.1 | 2.1 | 8.8 |
| 12 | 60 | 71.3 | 76.3 | 85.5 | 57.2 | 3.0 | 8.6 |
| 13 | 65 | 72.6 | 74.2 | 88.8 | 56.3 | 3.0 | 8.5 |
| 14 | 70 | 74.5 | 72.7 | 92.2 | 56.7 | 3.0 | 8.6 |
| 15 | 75 | 77.3 | 72.3 | 95.5 | 59.2 | 3.0 | 8.9 |
| 16 | 80 | 80.9 | 66.7 | | | | |
| 17 | 85 | 84.5 | 50.0 | | | | |
| 18 | 90 | 87.3 | 33.3 | | | | |
| 19 | 95 | 89.2 | 16.7 | | | | |
| | 100 | 90.5 | 0.0 | | | | |

Calcul des épaisseurs

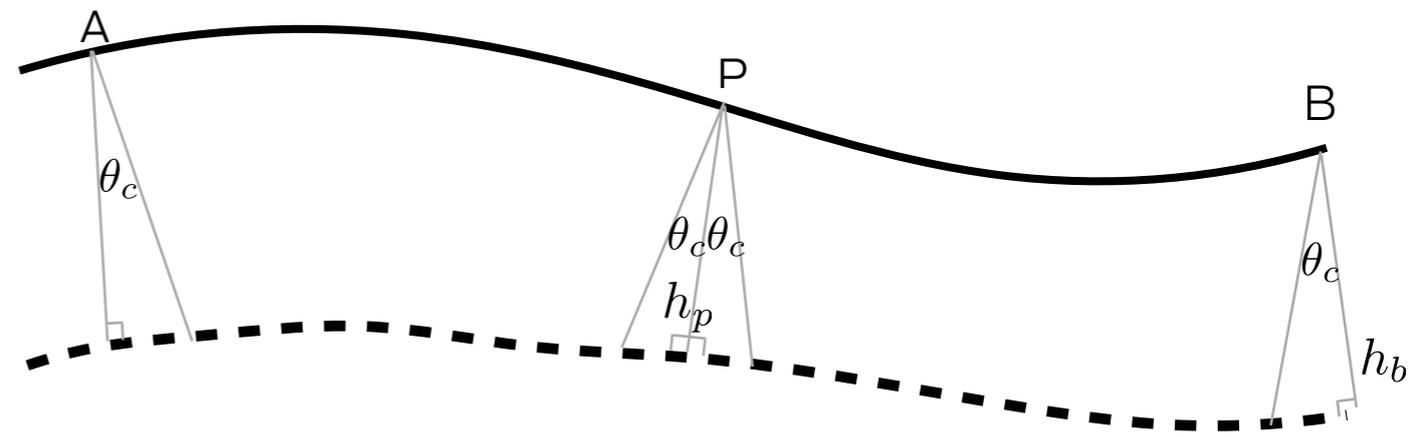
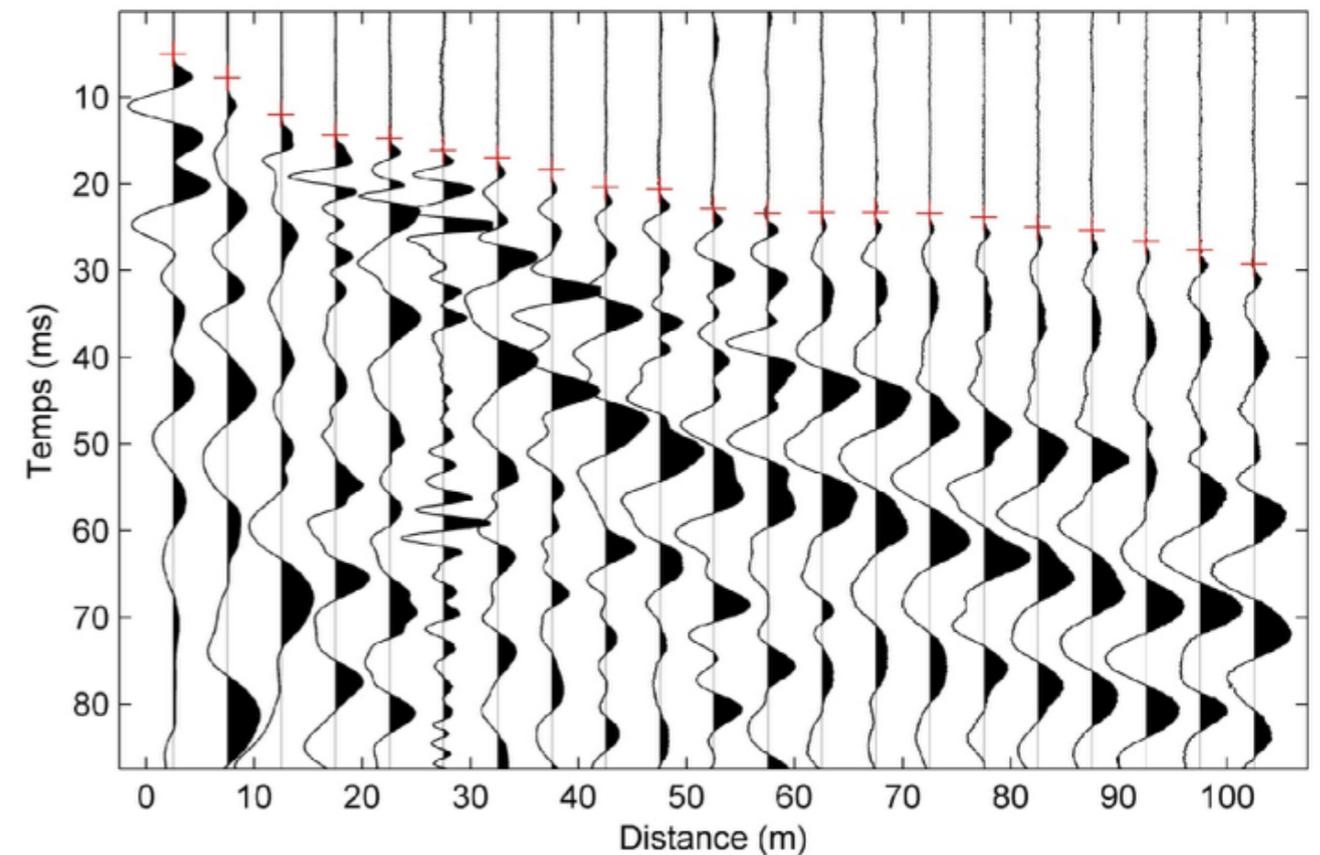
$$h_p = \frac{T^+}{2\sqrt{1/V_1^2 - 1/V_2^2}}$$



Résumé méthode de Plus-Minus

La méthode du Plus-Minus permet:

- Une interprétation de la topographie d'un réfracteur
- Permet d'identifier les variations de vitesse le long du réfracteur
- Produit une estimation de l'épaisseur et de la vitesse sous chaque capteur ayant observé la réfraction sur les tirs direct et inverse
- L'épaisseur obtenue est perpendiculaire à l'interface



Mise en oeuvre et applications

Longueur d'un levé

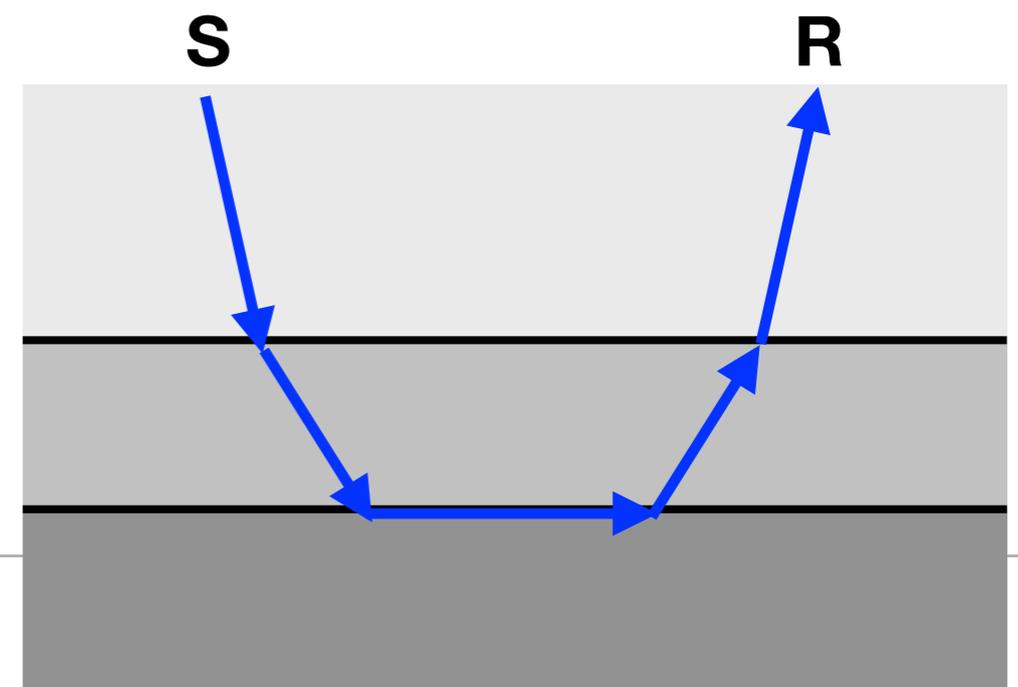
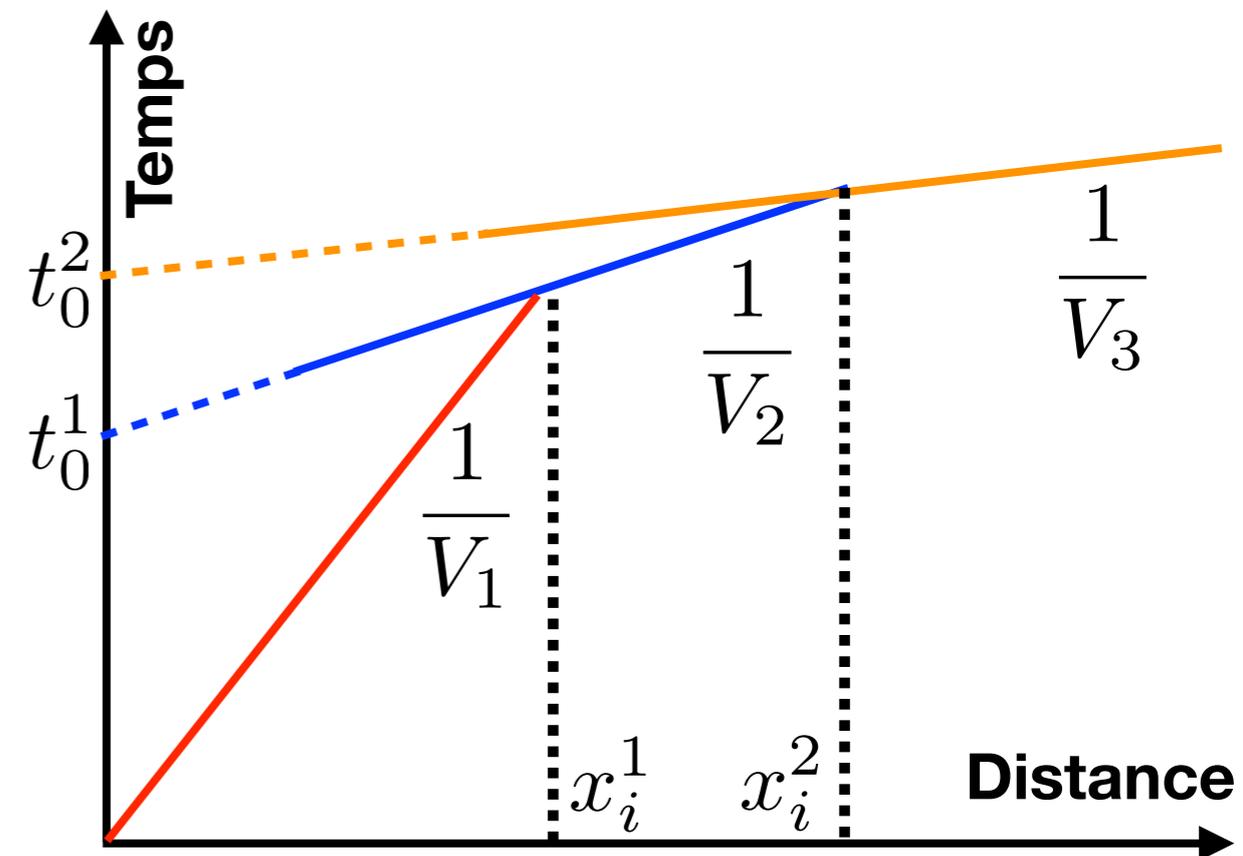
La longueur d'un levé doit permettre d'observer la distance de croisement

$$x_i = 2h \sqrt{\frac{V_1 + V_2}{V_2 - V_1}}$$

Pour $V_1 = 1500$ m/s et $V_2 = 2000$ m/s:

- $x_i = 5.3 h$

Règle de pouce: La longueur de la ligne devrait être autour de 6x la profondeur de la cible



Espacement des géophones

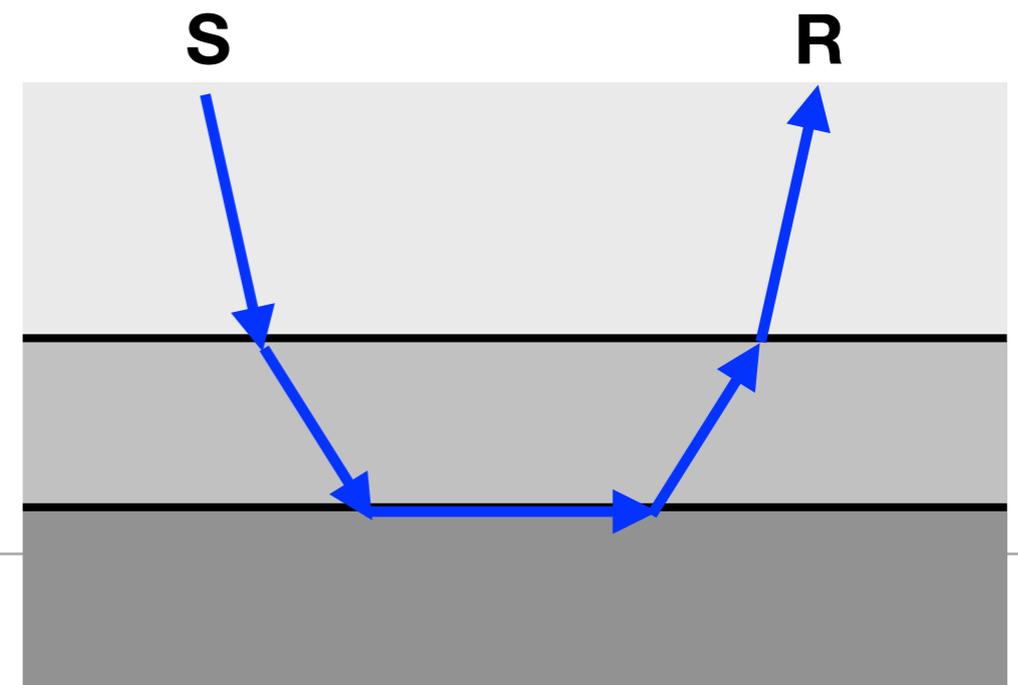
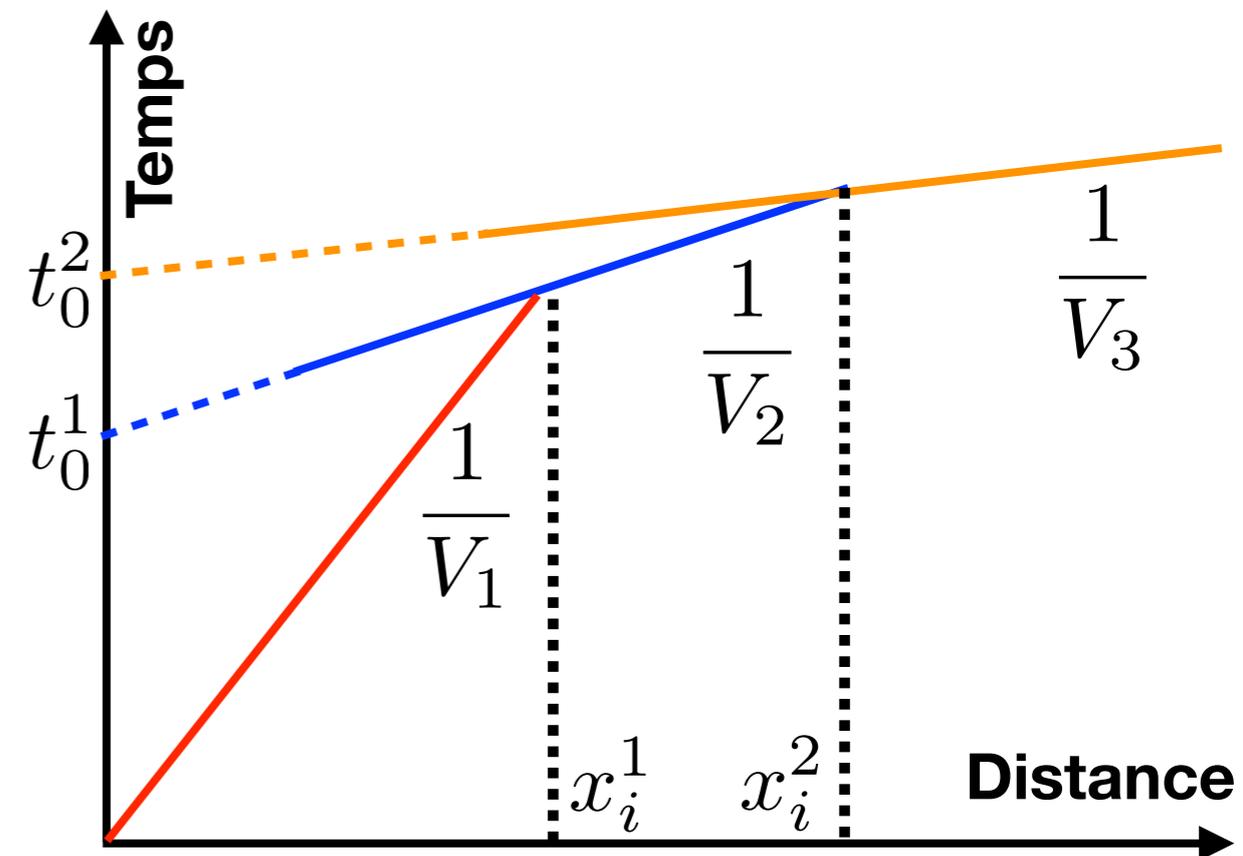
L'espacement des géophones devrait permettre d'observer la pente de chaque arrivée:

$$x_i = 2h \sqrt{\frac{V_1 + V_2}{V_2 - V_1}}$$

Pour $V_1 = 300$ m/s et $V_2 = 4500$ m/s et $h = 1$ m:

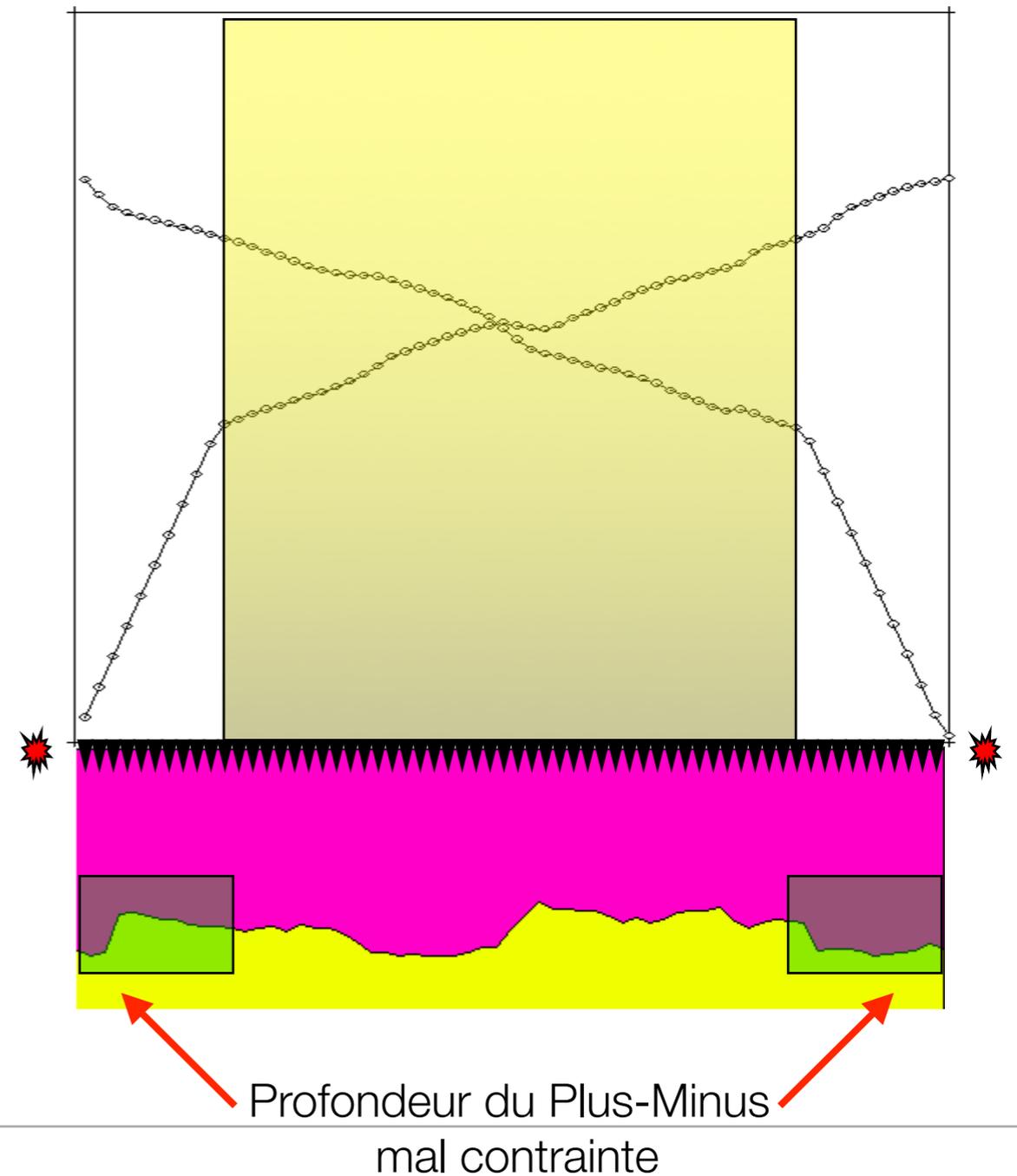
- $x_i = 2.14$ m

Règle de pouce: Chaque réfracteur devrait produire une arrivée sur au moins 3 capteurs



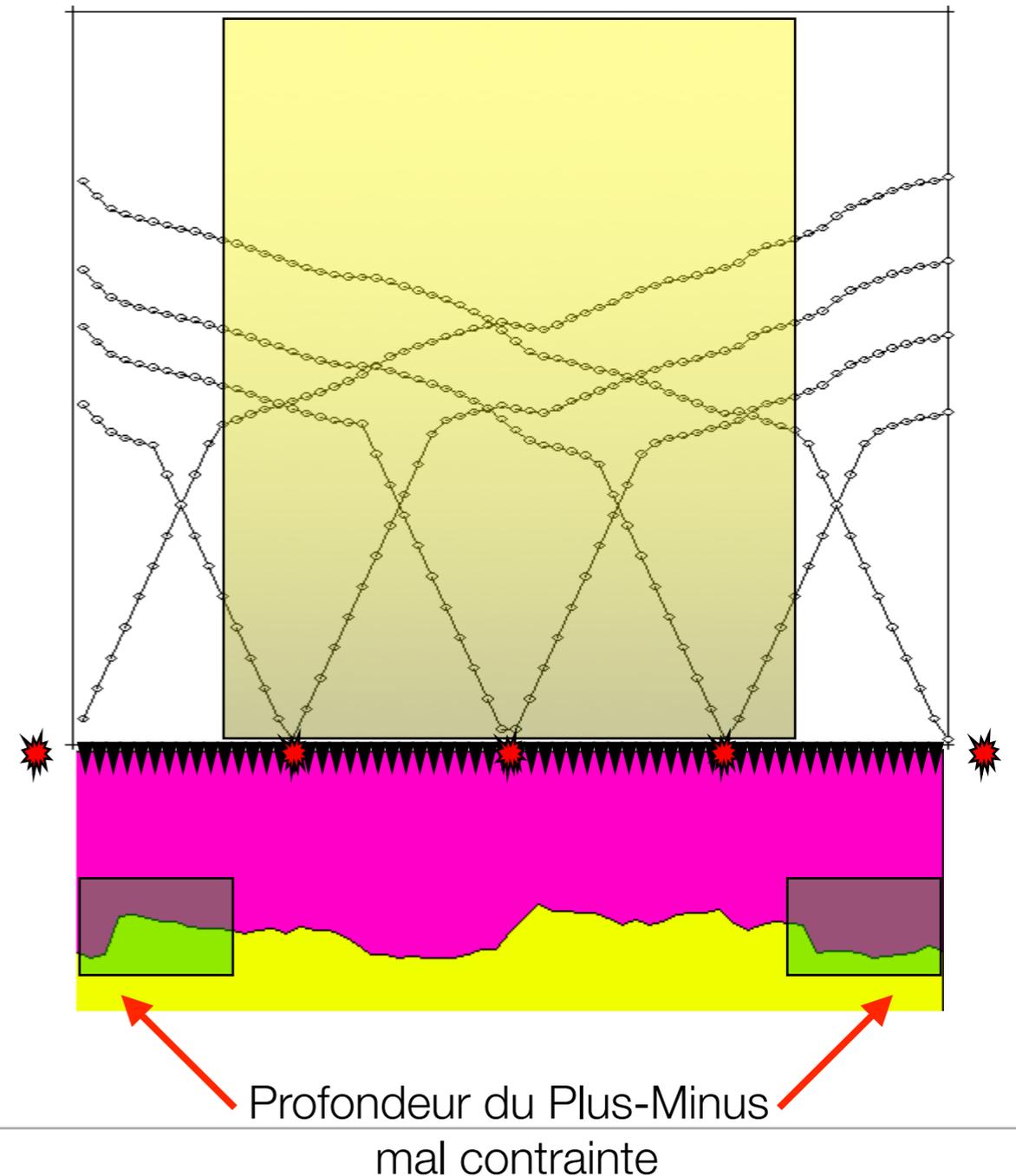
Positionnement des tirs

- Au minimum 2 tirs doivent être utilisés, placés de part et d'autre de la ligne.



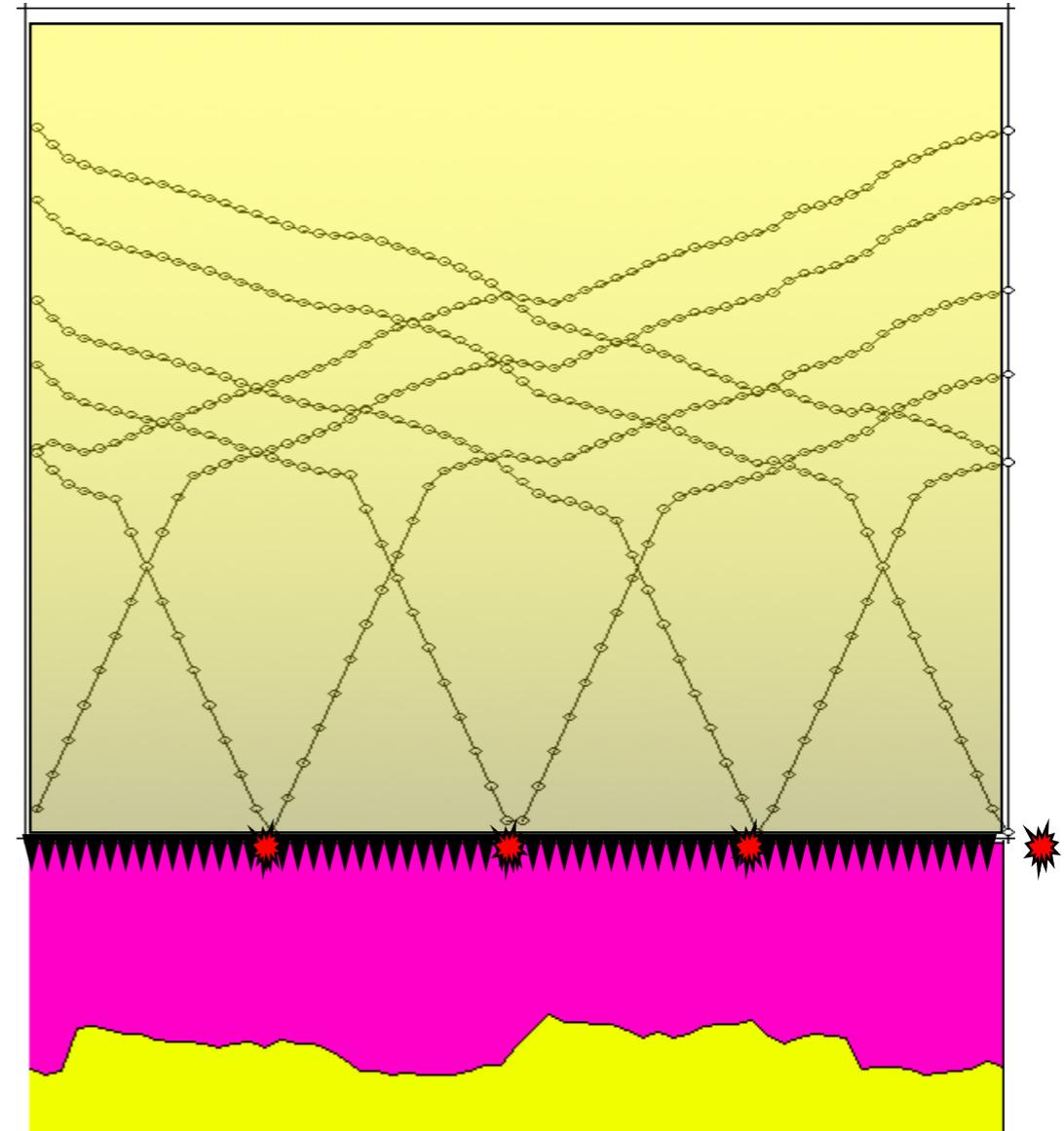
Positionnement des tirs

- Au minimum 2 tirs doivent être utilisés, placés de part et d'autre de la ligne.
- Des tirs internes permettent d'avoir une redondance des données et de mieux estimer la vitesse de la première couche



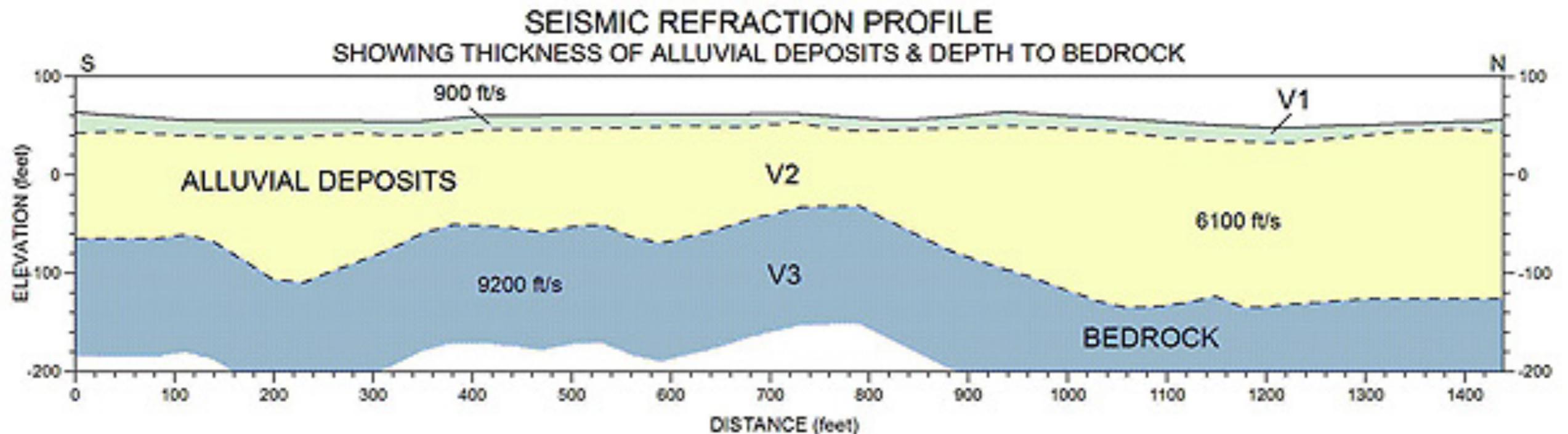
Positionnement des tirs

- Au minimum 2 tirs doivent être utilisés, placés de part et d'autre de la ligne.
- Des tirs internes permettent d'avoir une redondance des données et de mieux estimer la vitesse de la première couche
- Des tirs au loin permettent d'étendre l'estimation des profondeurs à toute la ligne et de mieux estimer les temps d'intercepte (Distance: $1.5x x_i$ du dernier géophone)



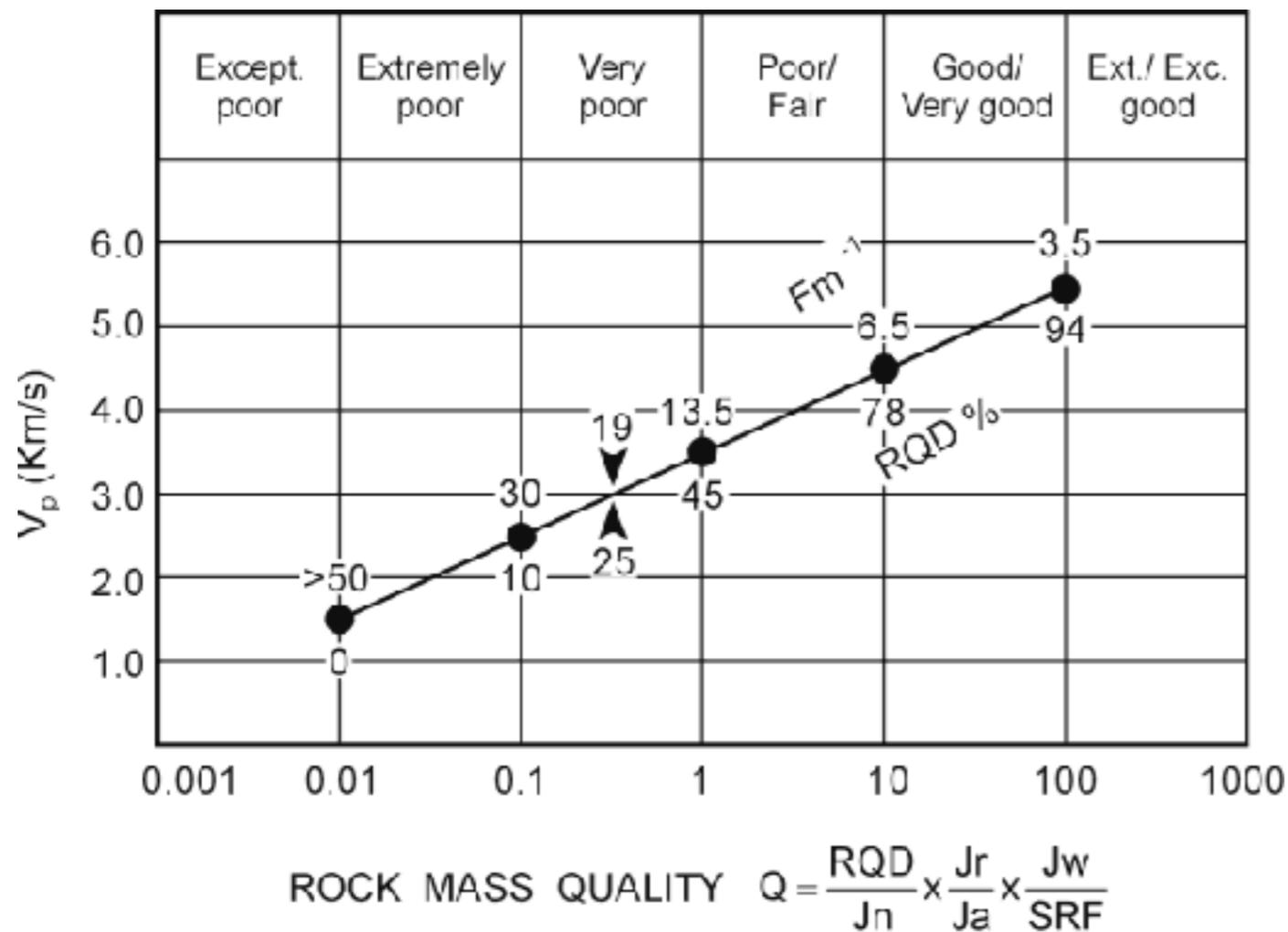
Profondeur au roc

L'application naturelle de la sismique réfraction est l'estimation de la profondeur au roc!



Évaluation de la qualité du roc

En géotechnique, la sismique réfraction est souvent utilisée pour estimer la qualité du roc!

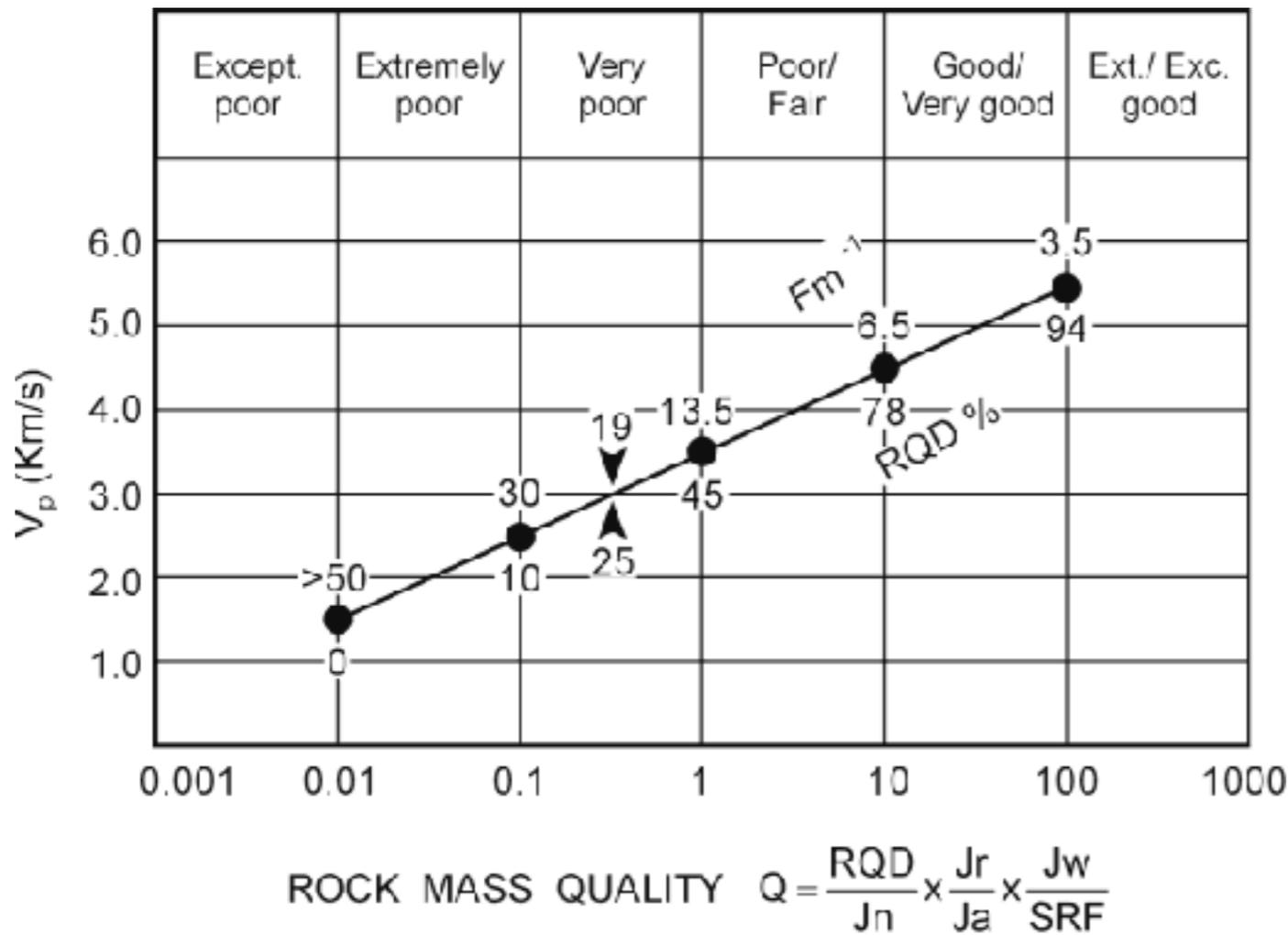


- RQD: % de fraction de roc compétent dans une carotte dont la longueur est de plus de 10 cm
- J_a: dépend du nombre de fractures
- J_r dépend de la rugosité des fractures
- J_a dépend du degré d'altération
- J_w dépend de la pression de l'eau
- SRF dépend du relâchement du aux failles

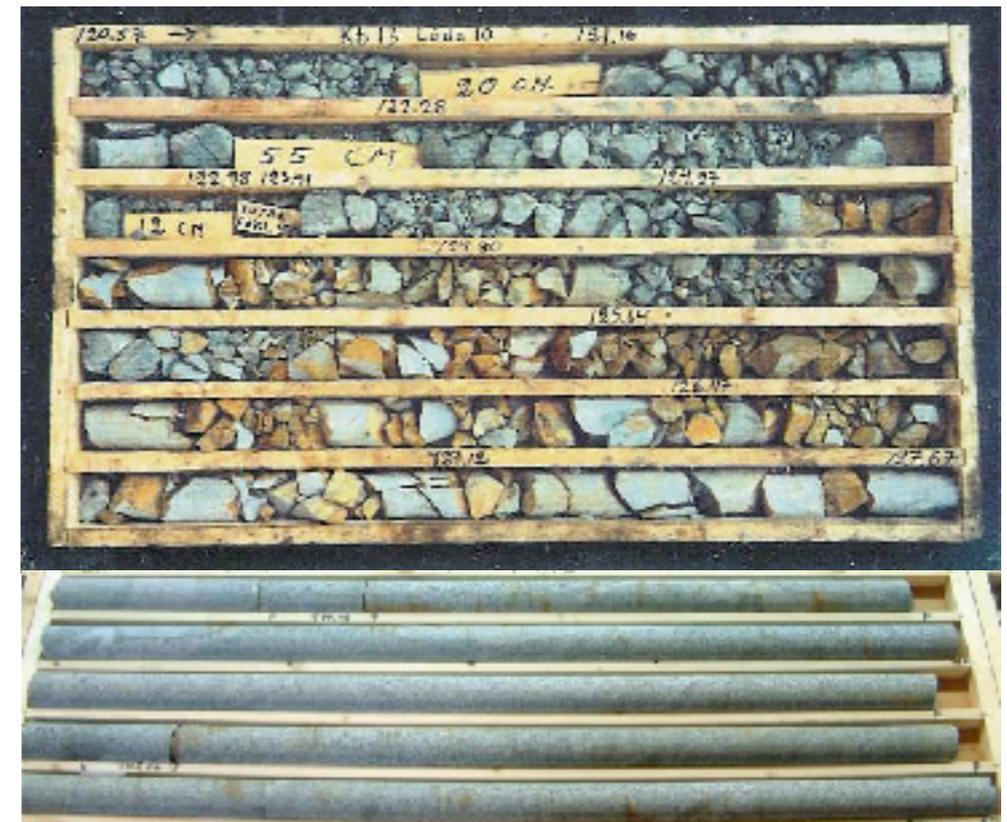
(Barton, 2007)

Évaluation de la qualité du roc

En géotechnique, la sismique réfraction est souvent utilisée pour estimer la qualité du roc!



Faible qualité Q



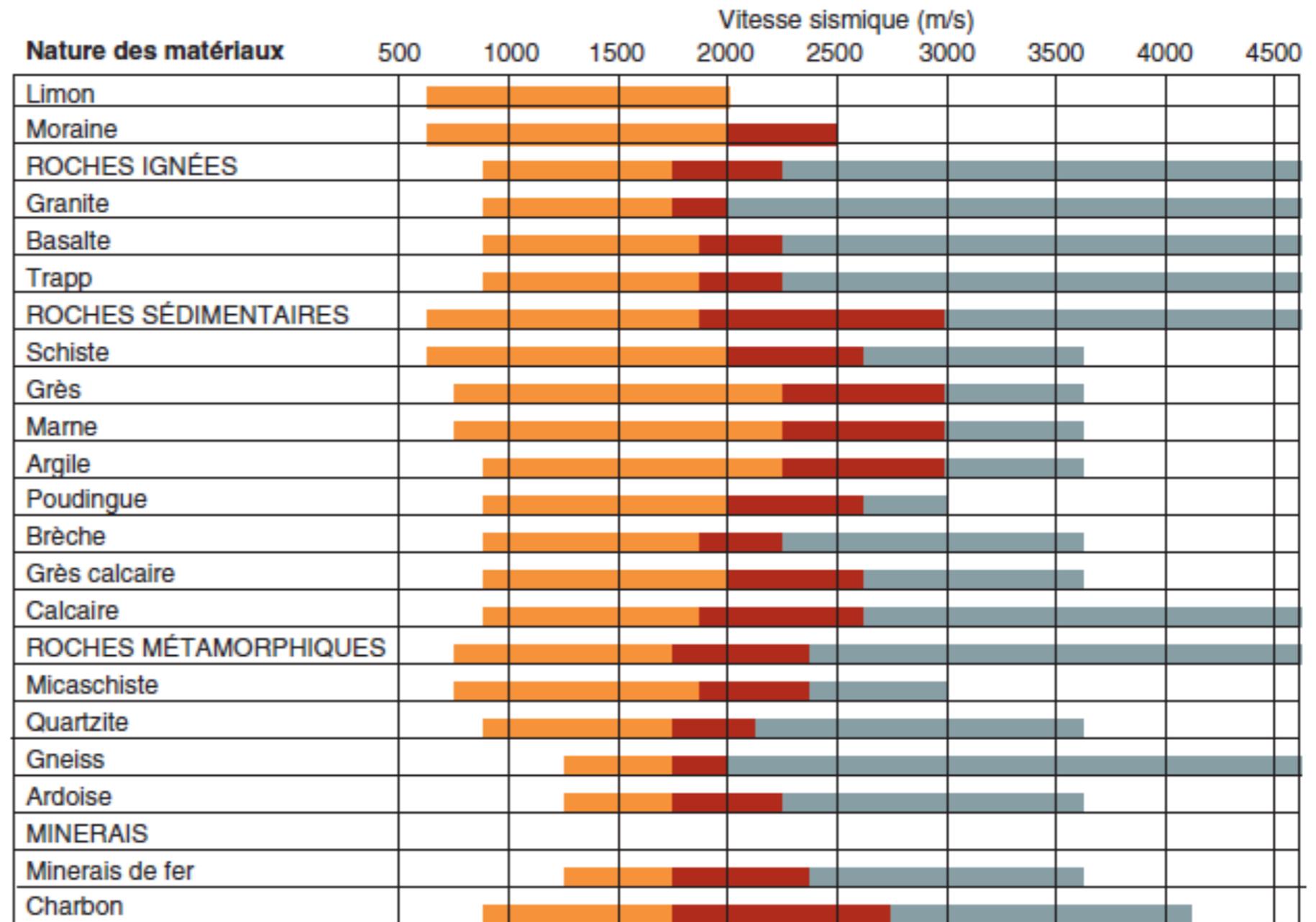
Grande qualité Q



(Barton, 2007)

Évaluation de la rippabilité

La sismique réfraction permet d'évaluer les moyens nécessaires lors du terrassement de roc.



Défonçable (1 tracteur)

Marginal ou défonçable par 2 tracteurs en tandem

Défonçable seulement après tirs d'ébranlement

Caractérisation des aquifères

