Modélisation des Écoulements Gravitaires Catastrophiques

par une

Approche Objet Dynamique : Érosion – Transport – Dépôt

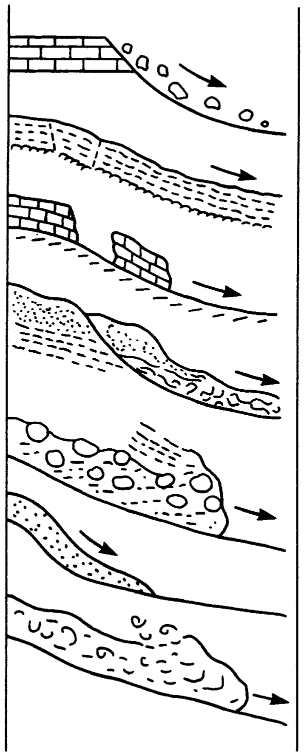
A. Hugot

2 Février 2000

Les écoulements gravitaires

PROCESSUS — CARACTÉRISTIQUES — DÉPÔTS

Resédimentation



PROCESSUS	DÉPÔTS
Éboulis	Olistolithe
Reptation	Creep deposit
Glissement	Slide
Slump	Slump
Écoulement à débris	Débrite
Écoulement granulaire fluidisé liquéfié	Dépôt d'écoulement { granulaire fluidisé liquéfié
Courant turbiditique (haute/basse densité)	Turbidite (grossière, moyenne et fine)

Les processus gravitaires opérant en milieu marin profond (d'après Stow *et al.* 1986).

Grande variabilité & diversité des écoulements

1. **Matériaux :**
   Sables & graviers ⇔ Boues & argiles
2. **Concentrations :**
   Faibles ⇔ Élevées

⇒ **Mécanismes de support des particules :**

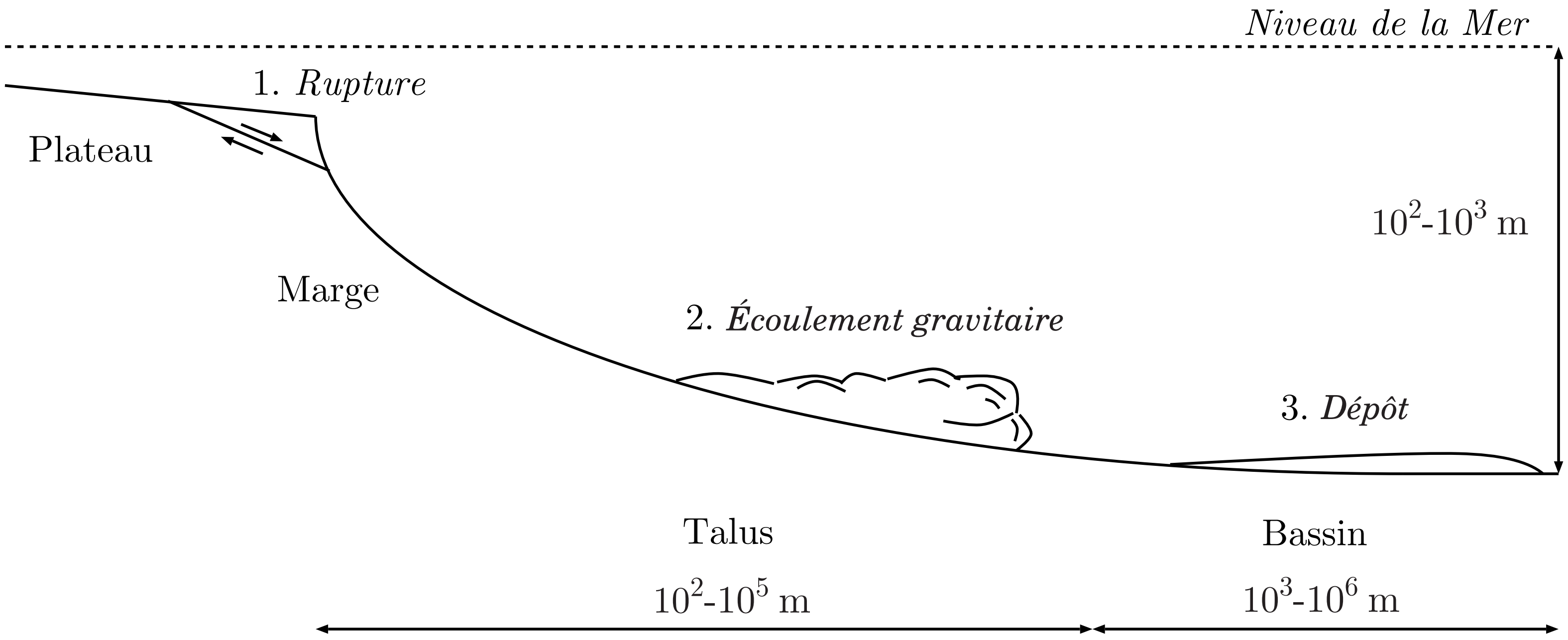
- **Rigidité de la matrice ;**
- **Collisions inter-granulaires ;**
- **Turbulence.**

⇒ **Rhéologie :**
Plastique ⇔ Fluide visqueux

Grande variabilité des échelles caractéristiques

1. **Échelles d'espace :**
   - **Mécanismes de support (mètres) ;**
   - **Événements (kilomètres).**
2. **Échelles de temps :**
   - **Mécanismes de support (secondes) ;**
   - **Événements (jours) ;**
   - **Inter–événementielles (années).**

Introduction



Déclenchement, développement et sédimentation d'un écoulement gravitaire (d'après Rothman *et al.* 1994).

Deux axes de travail

- Développer des méthodes numériques adaptées
  à la simulation de la sédimentation
  des écoulements gravitaires catastrophiques.
- Mettre au point une méthode de calage automatique
  des résultats du modèle sur des données expérimentales
  et/ou réelles.

Double intérêt

- **Fondamental :**

  ⇒ Meilleure compréhension de la dynamique des processus gravitaires, contrôlant le dépôt de très nombreux réservoirs pétroliers.

  ⇒ Impact des paramètres externes (morphologie du bassin, nature et quantité des apports en sédiments).

- **Appliqué :**

  ⇒ Aide à l'identification des conditions initiales et/ou des paramètres physiques des écoulements (test de scénarios).

Principales étapes

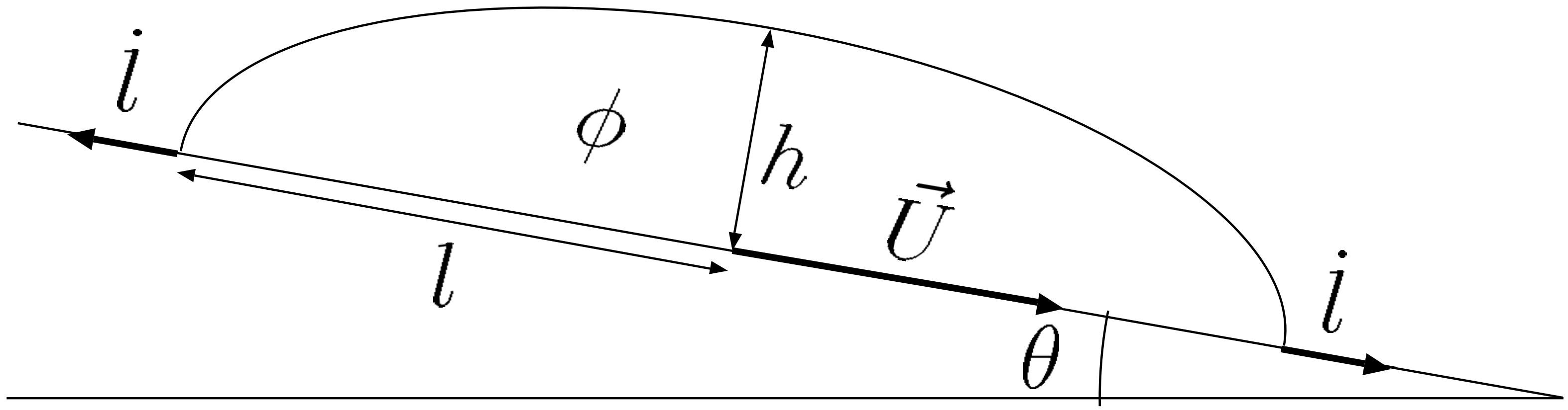
- Étude bibliographique de l'état des connaissances ;
- Développement d'un modèle & Bases physiques ;
- Validation à l'aide :
  - de solutions analytiques ;
  - de tests qualitatifs.
- Méthodologie de calage des résultats :
  - Modèles réduits analogiques ;
  - Analogue actuel : Nice, 1979.
- Conclusions & Développements.

Techniques de Modélisation Existantes

- Dynamique Moléculaire
  (microscopique : simulation directe sur les particules)
  ⇒ Petit nombre de particules simulé (CPU ∼ jours).
- Mécanique des Milieux Continus
  (macroscopique : Navier–Stokes, théorie de la couche limite)
  ⇒ Petit nombre d'écoulements simulé (CPU ∼ heures).
- Empiriques
  (expériences analogiques, descriptions d'affleurement)
  ⇒ Faible description de l'écoulement
  & validité restreinte des lois obtenues.

⇒ Insuffisance de ces méthodes.

Modèle proposé: l'objet écoulement



Géométrie et paramètres de l'objet écoulement, représenté ici en deux dimensions par une demi-ellipse déformable.

Définitions et Hypothèses

Paramètres caractéristiques:

- Vitesse moyenne de l'objet écoulement: U
- Longueur: l
- Hauteur: h
- Fraction volumique: ϕ

L'écoulement est :

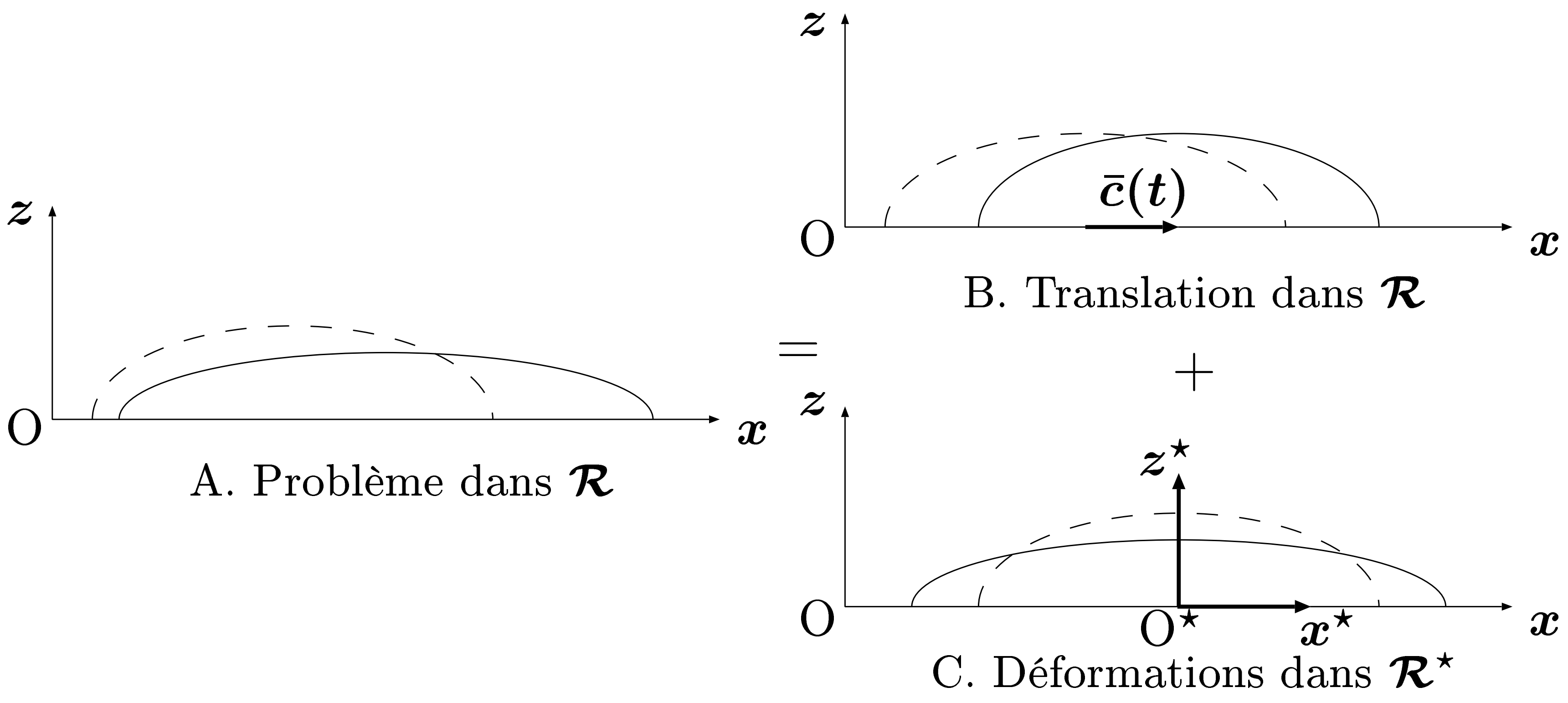
1. Mince : $h \ll l$ (Hypothèse de la couche limite) ;
2. Dilué : $\phi < 0.1$ ($\phi \ll 1$ Approximation "de Boussinesq") ;
3. Turbulent : $\mathrm{Re} \sim \left(\frac{h}{l}\right)^{-3/2}$.

Caractéristiques

Leur évolution temporelle est fonction de :

1. **La force motrice de gravité ;**
2. **La friction turbulente ;**
3. **L'étalement dû aux forces de pression ;**
4. **L'incorporation de fluide ambiant ;**
5. **Le dépôt de particules ;**
6. **L'érosion de particules.**

Méthode de décomposition du champ de vitesse



Système Différentiel

Mouvement de l'objet : $(Uhl)^{\cdot} = g'\phi hl \sin\theta - C_0 l f_1(U^2, \dot{\imath}^2, U\dot{\imath})$

Étalement de l'objet : $(\dot{\imath}hl)^{\cdot} = \frac{1}{2} g'\phi h^2 \cos\theta - C_0 l f_2(\dot{\imath}^2, U^2, U\dot{\imath})$

Incorporation de fluide : $(hl)^{\cdot} = \frac{C_1}{C_2 + \mathrm{Ri}} l f(\dot{\imath}, U)$

Érosion & Sédimentation : $(\phi hl)^{\cdot} = (C_4 C_0 f(\dot{\imath}, U) - C_3 V_{\mathrm{s}})\phi l$

U: vitesse moyenne; h: hauteur; l: longueur; ϕ: fraction volumique;

θ: pente; C_i: constantes; f_i: loi de friction turbulente;

V_{s}: vitesse de sédimentation; Ri: nombre de Richardson modifié;

g': accélération de gravité.

Dérivation Physique

Équation régissant le mouvement moyen :

$$(Uhl)^{\cdot} = g'\phi hl \sin\theta - C_0 l f_1(U^2, \dot{l}^2, U\dot{l})$$
$$\dot{X} = U$$

⇒ *Résolution :* Calcul de la vitesse U & de la position X.

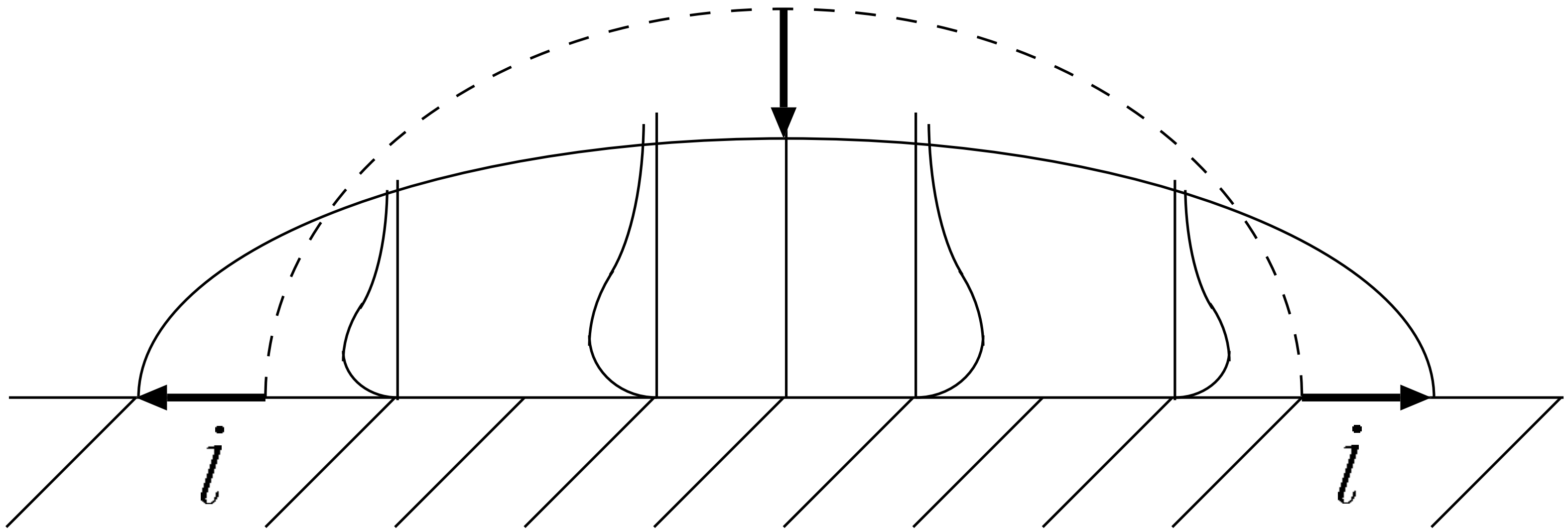
U: vitesse moyenne; h: hauteur; l: longueur; ϕ: fraction volumique;

C_0: coefficient de friction turbulent;

f_1: loi de friction turbulente (quadratique).

Étalement de l'objet

Forces de pression



Étalement de l'objet écoulement, où i est la vitesse d'étalement.

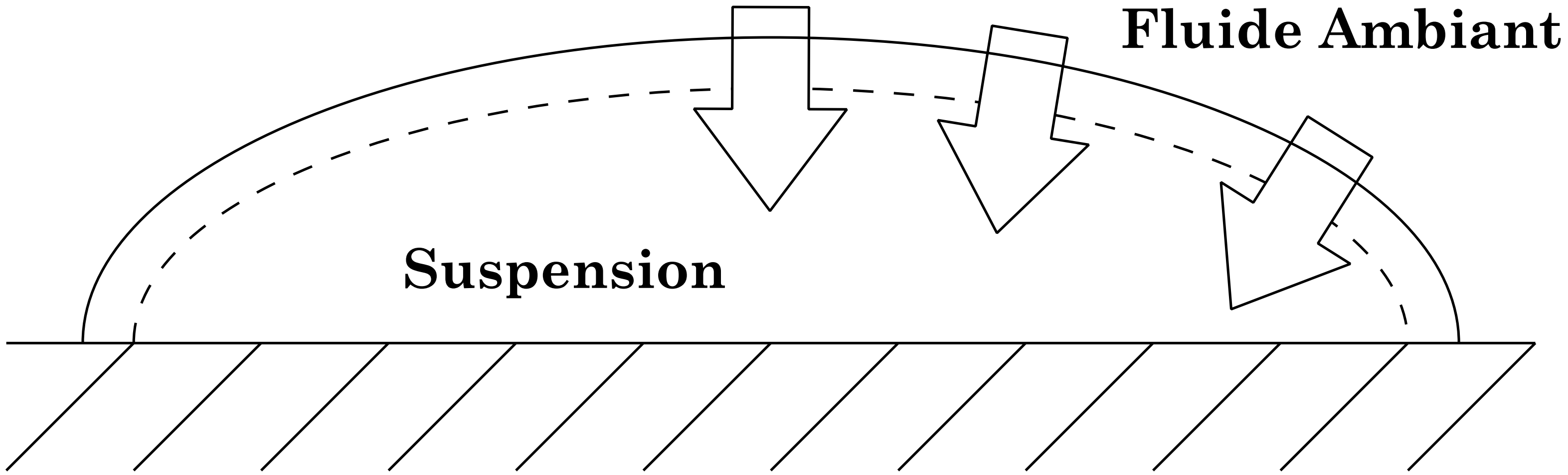
Étalement de l'objet

$$(\dot{l}hl)^{\cdot} = \frac{1}{2} g' \phi h^2 \cos\theta - C_0 l\, f_2(\dot{l}^2, U^2, U\dot{l})$$

⇒ *Résolution :* Calcul de la vitesse d'étalement de l'écoulement $\dot{l}$.

$\dot{l}$: vitesse d'étalement; C_0: coefficient de friction; f_2: loi de friction turbulente (quadratique).

Incorporation de fluide ambiant



Incorporation de fluide ambiant le long de l'interface supérieure.

Incorporation de fluide ambiant

$$(hl)^{\cdot} = \frac{C_1}{C_2 + \mathrm{Ri}} l f(\dot{l}, U)$$

⇒ *Résolution :* **Calcul de la hauteur de l'écoulement h.**

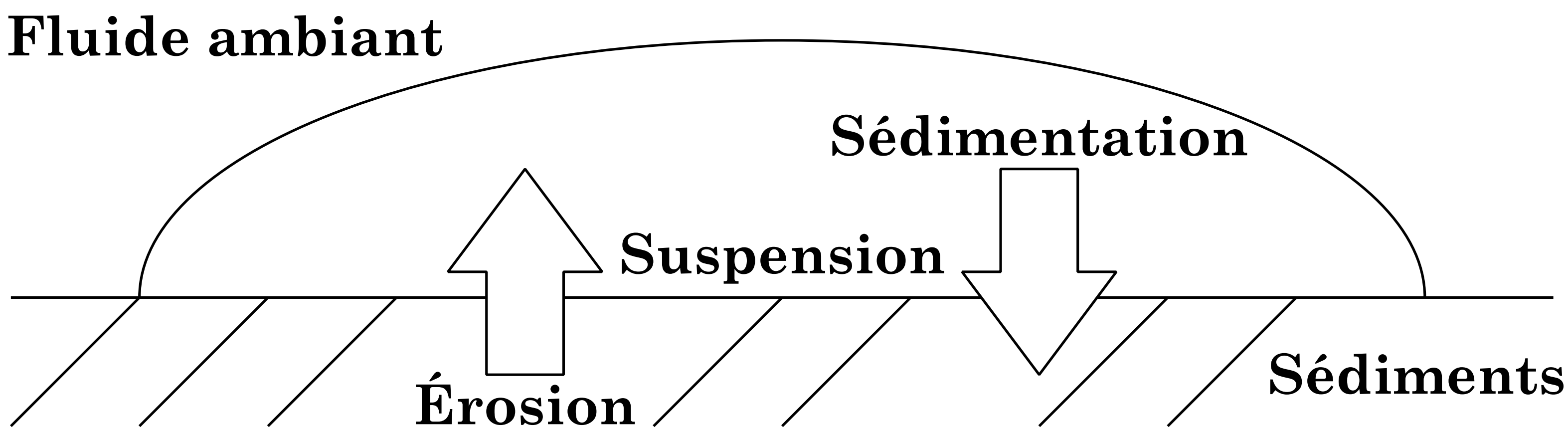
U: vitesse moyenne; $\dot{l}$: vitesse d'étalement;

C_1, C_2: coefficient d'incorporation d'eau;

Ri: nombre de Richardson modifié;

f: fonction linéaire des vitesses.

Transferts de particules



Sédimentation & Érosion le long de l'interface inférieure.

Transferts de particules

Deux flux :

- la sédimentation : $-C_3 V_s \phi$;
- l'érosion : $C_4 C_0 f(\dot{l}, U)\phi$.

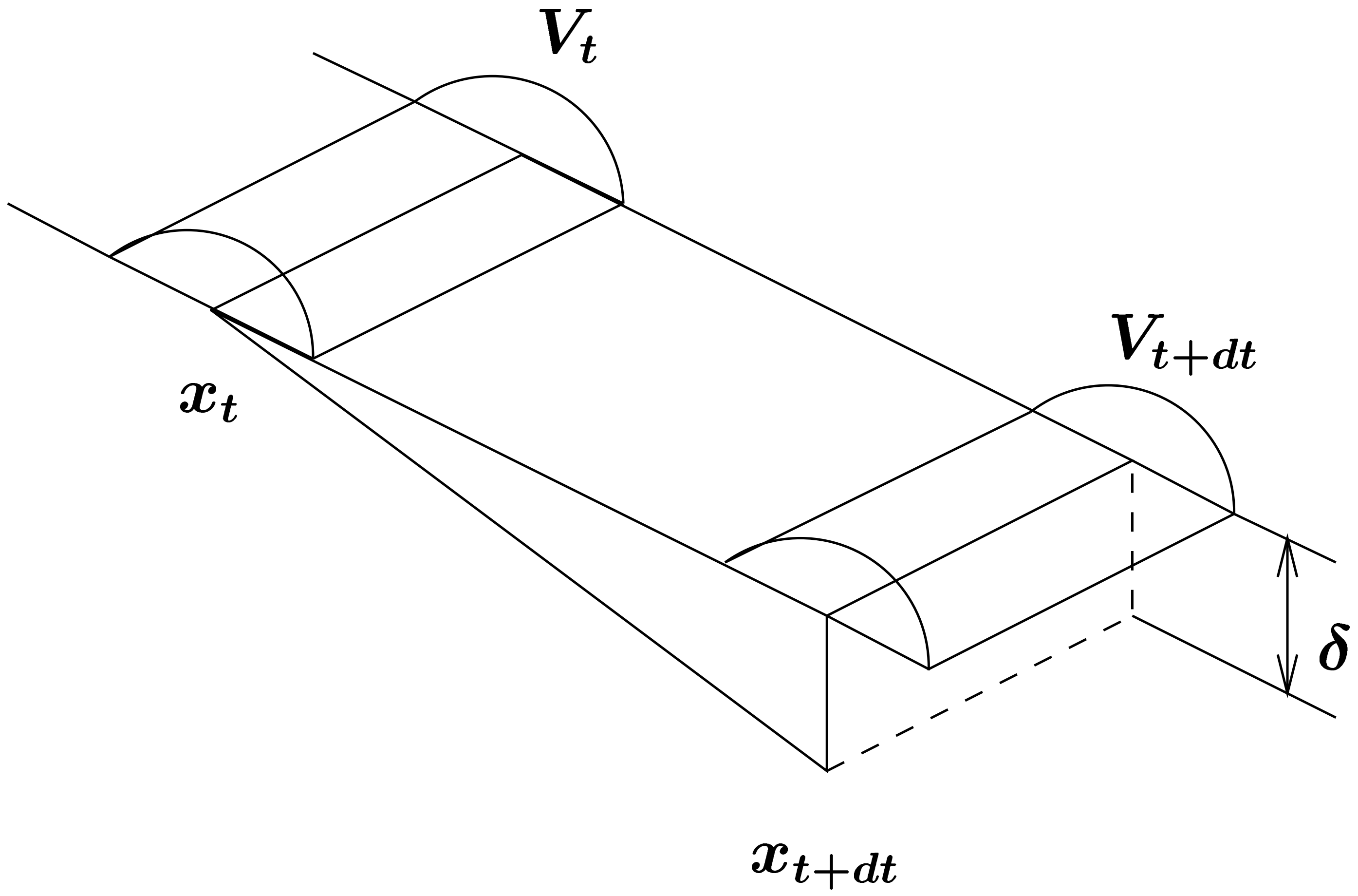
Modélisés par :

$$(\phi h l)^{\cdot} = (C_4 C_0 f(\dot{l}, U) - C_3 V_s)\phi l$$

$\Rightarrow$ ***Résolution :*** **Calcul de la fraction volumique des sédiments ϕ.**

C_4: inverse du nombre de Schmidt turbulent; C_0: coefficient de friction turbulent; C_3: coefficient de fraction volumique basale; V_s: vitesse de sédimentation; f: fonction linéaire des vitesses.

Traitement du Dépôt



Traitement du Dépôt

Aggradation et dénudation du lit :

$$V_{dépôt} = -\Delta(\phi hl) = (\phi hl)_t - (\phi hl)_{t+\Delta t}$$

$$\begin{cases} \text{Érosion} & \text{si} \quad \Delta(\phi hl) > 0, \\ \text{Conservation} & \text{si} \quad \Delta(\phi hl) = 0, \\ \text{Dépôt} & \text{si} \quad \Delta(\phi hl) < 0. \end{cases}$$

$\Rightarrow$ ***Résolution :*** **Calcul de la hauteur du dépôt δ.**

$V_{dépôt}$: Volume déposé pendant un pas de temps;
V_t: Volume de particules à l'instant t;
δ: épaisseur du dépôt.

Modèle de l’objet écoulement

- Modèle simple qui inclue les principaux mécanismes des écoulements gravitaires catastrophiques
- Il est formulé en lien direct avec la mécanique des milieux continus
- Il prend en compte deux nouveaux phénomènes :
  - l’étalement (dominant sur les pentes faibles comme les fonds marins) ;
  - les transferts de particules, qui ont un rôle très important sur le développement dynamique.
- Système d’équations différentielles non-linéaires

Validation

Étude Analytique

Deux cas physiques d'écoulement sur des pentes variant comme X^{γ}:

- Cas A: **Écoulement de densité miscible.**
  Simulé en posant C_3 et C_4 égaux à zéro.
- Cas B: **Suspension en sédimentation.**
  Simulé en posant C_4 égal à zéro.

Étude Analytique

On cherche, pour $t \to \infty$, des solutions de la forme*:

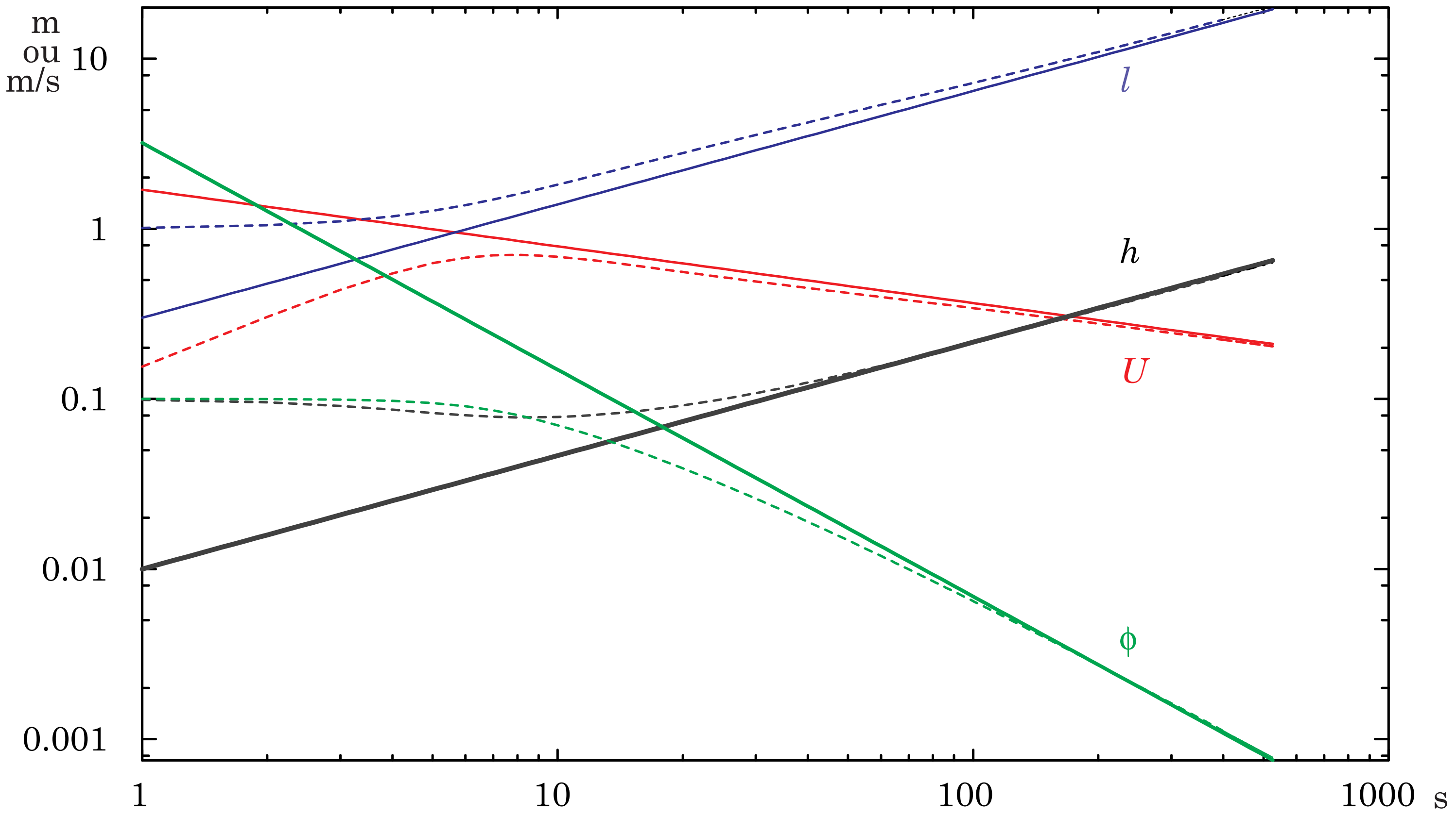
$$U \sim t^{\alpha_U} \qquad l \sim t^{\alpha_l} \qquad h \sim t^{\alpha_h} \qquad \phi \sim t^{\alpha_\phi} f_\phi(t)$$

	α_U	α_l	α_h	α_ϕ	f_ϕ
Cas A	$\frac{-3+4\gamma}{9-4\gamma}$	$\frac{6-2\gamma}{9-4\gamma}$	$\frac{6}{9-4\gamma}$	$2\frac{-6+\gamma}{9-4\gamma}$	1
Cas B	$\alpha-1$	α	α	-2α	$\exp\left(C_i, \alpha, v_s\right)$

avec $\alpha = \dfrac{1}{3 + \frac{4C_0}{E}}$.

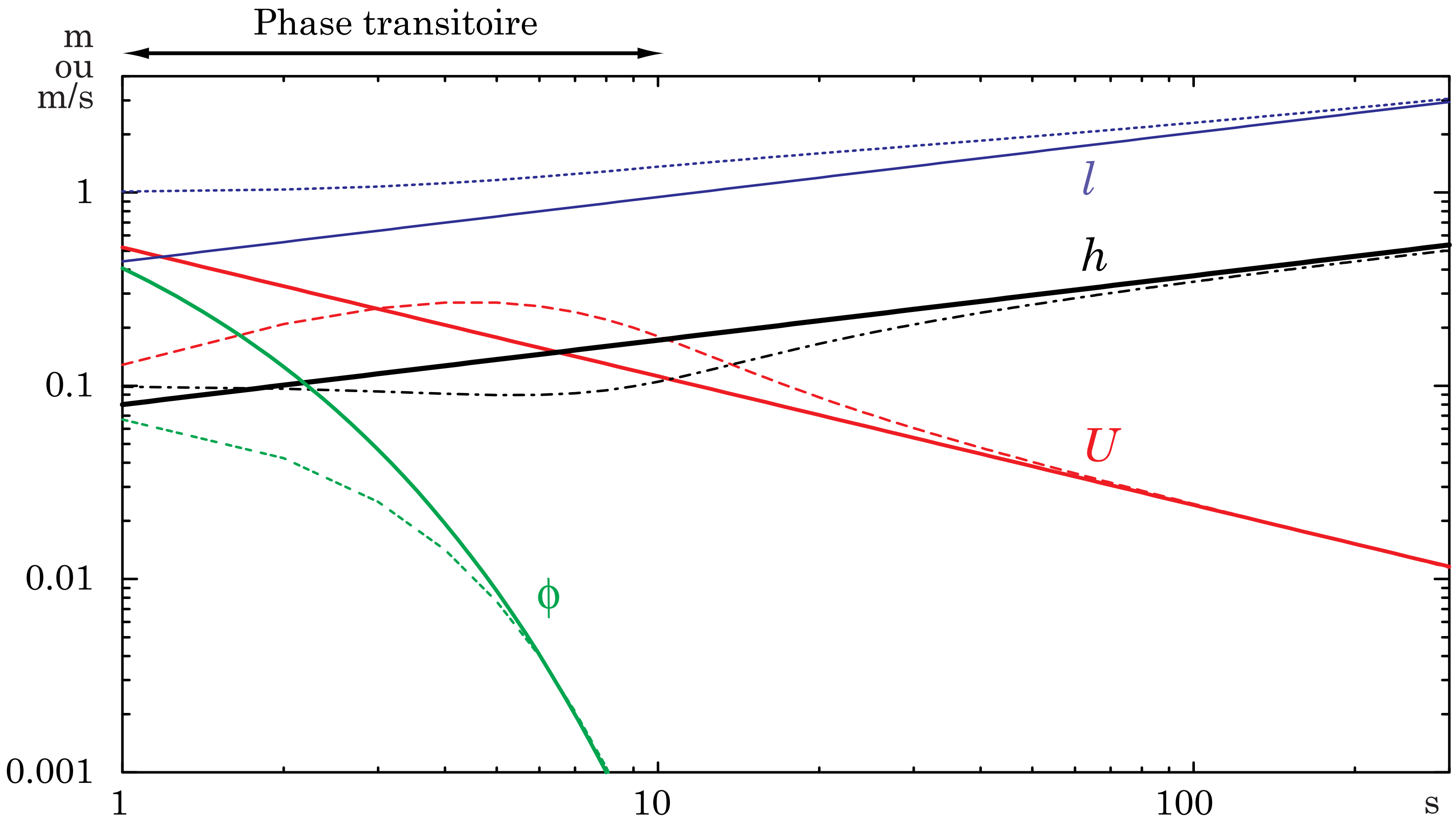
***termes du premier ordre de la série en temps** $\sum_{n=0}^{\infty} a_n t^{\alpha-n}$.

Écoulement de densité miscible



Solutions numériques et comportements asymptotiques sur pente constante ($\gamma = 0$); Les lignes solides sont les comportements asymptotiques, les lignes pointillées sont les solutions numériques.

Suspension en sédimentation



Solutions numériques et comportements asymptotiques sur pente constante ($\gamma = 0$); Les lignes solides sont les comportements asymptotiques, les lignes pointillées sont les solutions numériques.

Étude Analytique

A montré :

1. **La consistance du modèle numérique sur les temps longs**
2. **L'importance des transferts de masse sur la dynamique de l'écoulement**
3. **L'importance des phases transitoires du mouvement qui doivent être modélisées de façon satisfaisante**

Validation

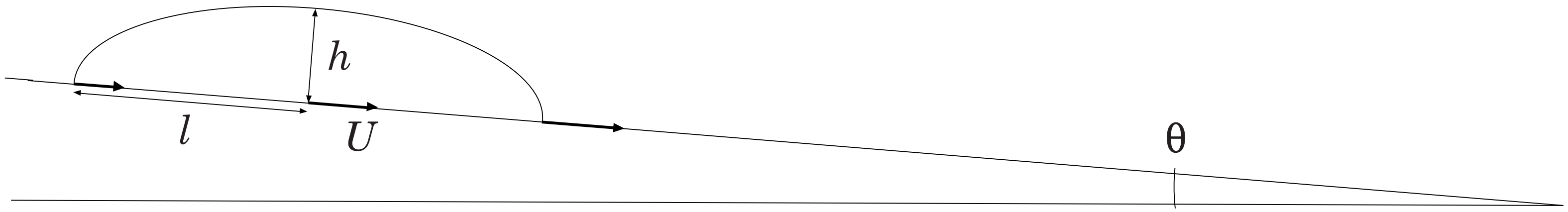
Tests Qualitatifs

Tester l'influence :

- des paramètres du modèle (C_i) ;
- des conditions initiales ($U_0, h_0, \ldots$) ;
- des paramètres de contrôle ($d, \theta, \ldots$).

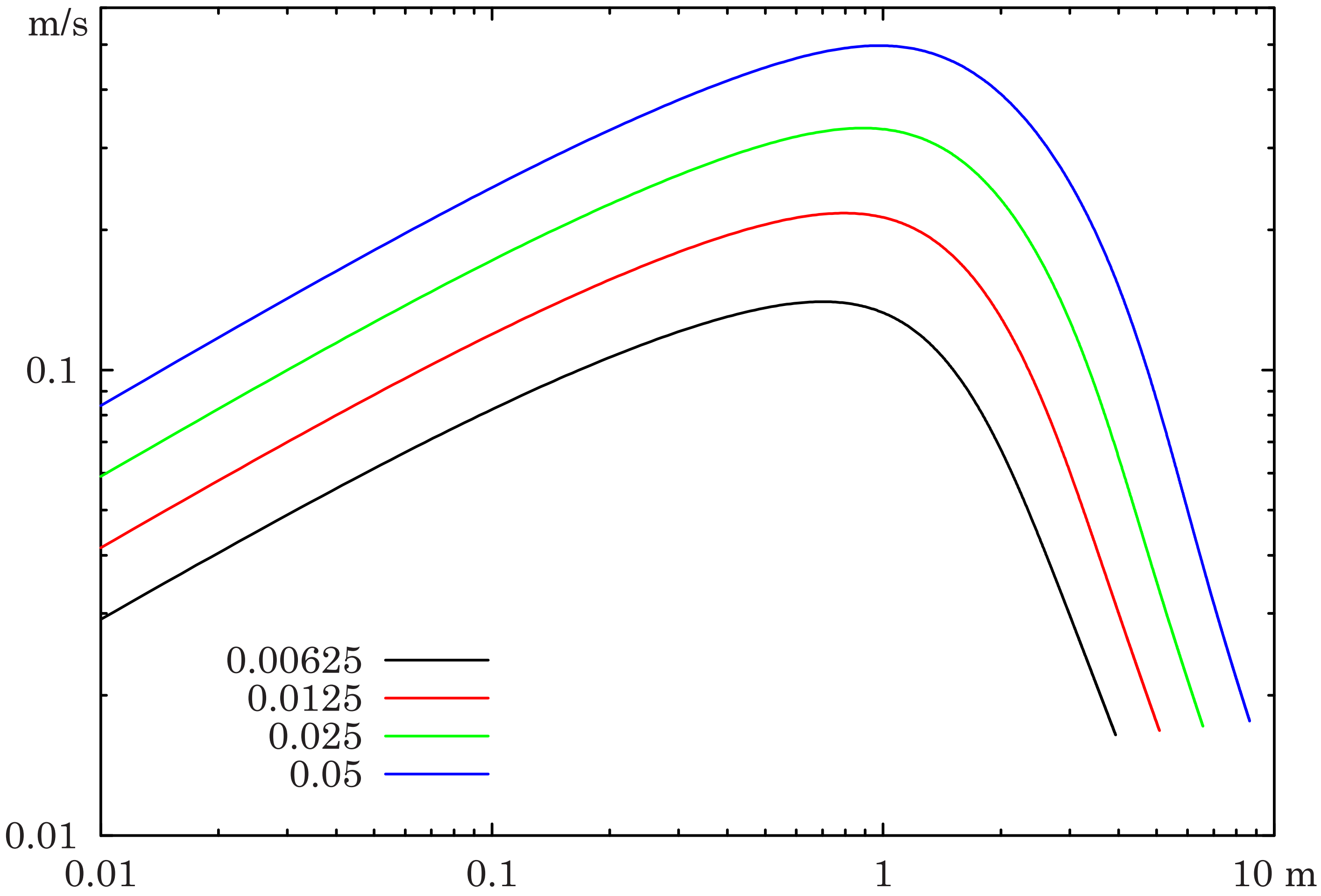
Tests Qualitatifs

Géométrie test



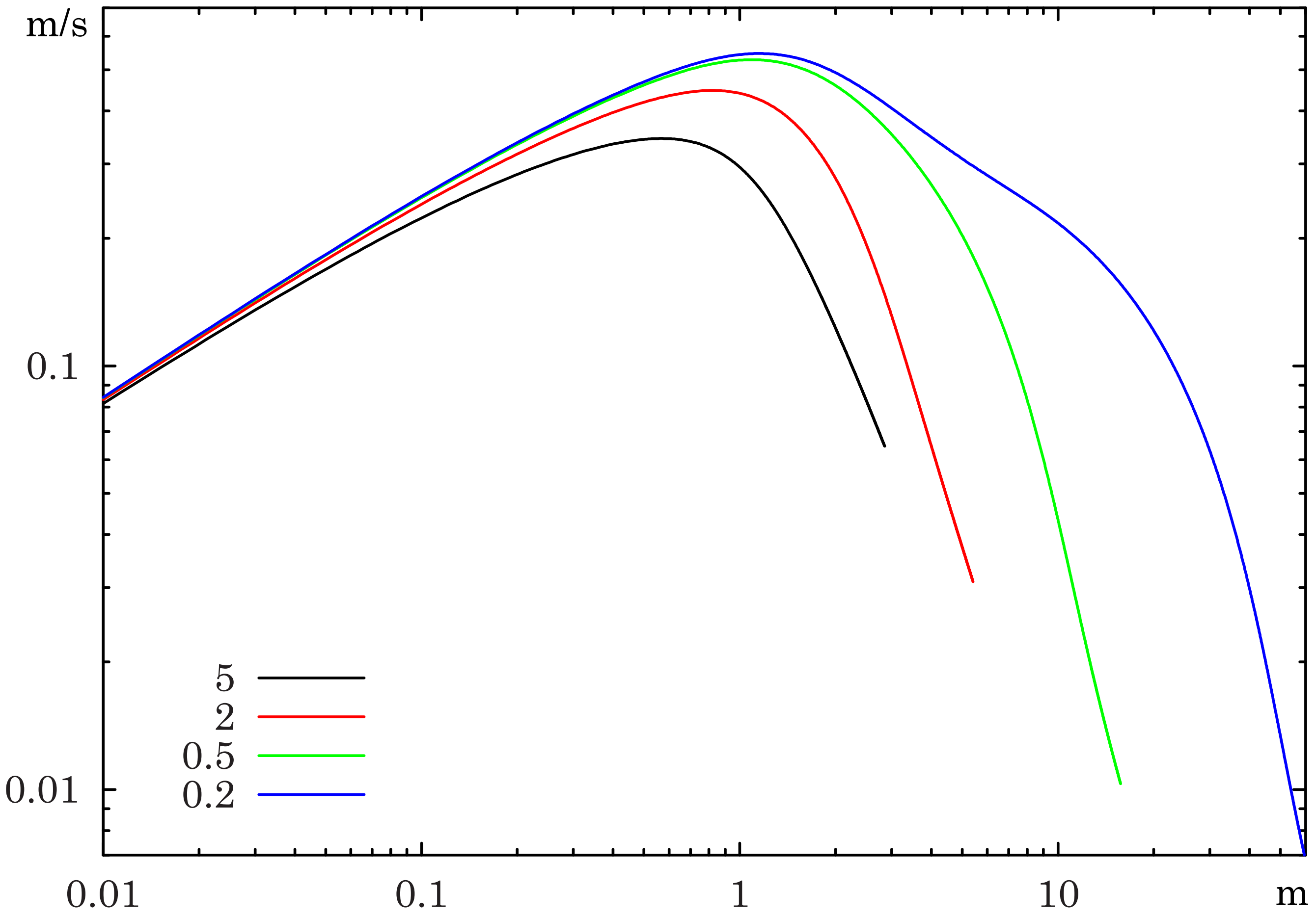
$$\boldsymbol{U_0 \equiv 0; \quad \phi_0 \equiv 0,05; \quad h_0 \equiv 0,01\mathrm{m}; \quad \theta \equiv 5^o.}$$

Influence quantitative



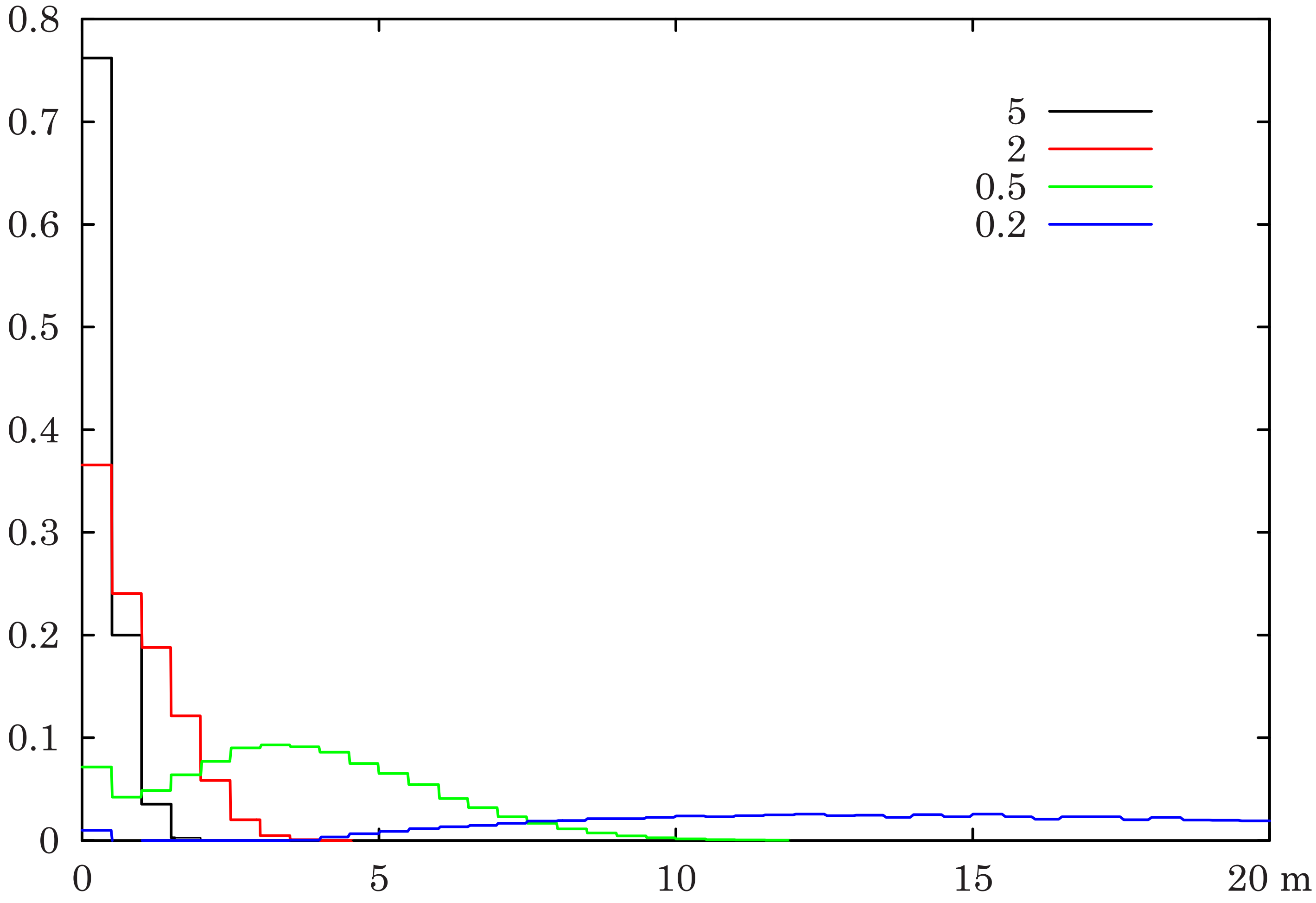
Vitesse du front en fonction de la position du front : influence de la fraction volumique initiale ϕ_0.

Influence qualitative



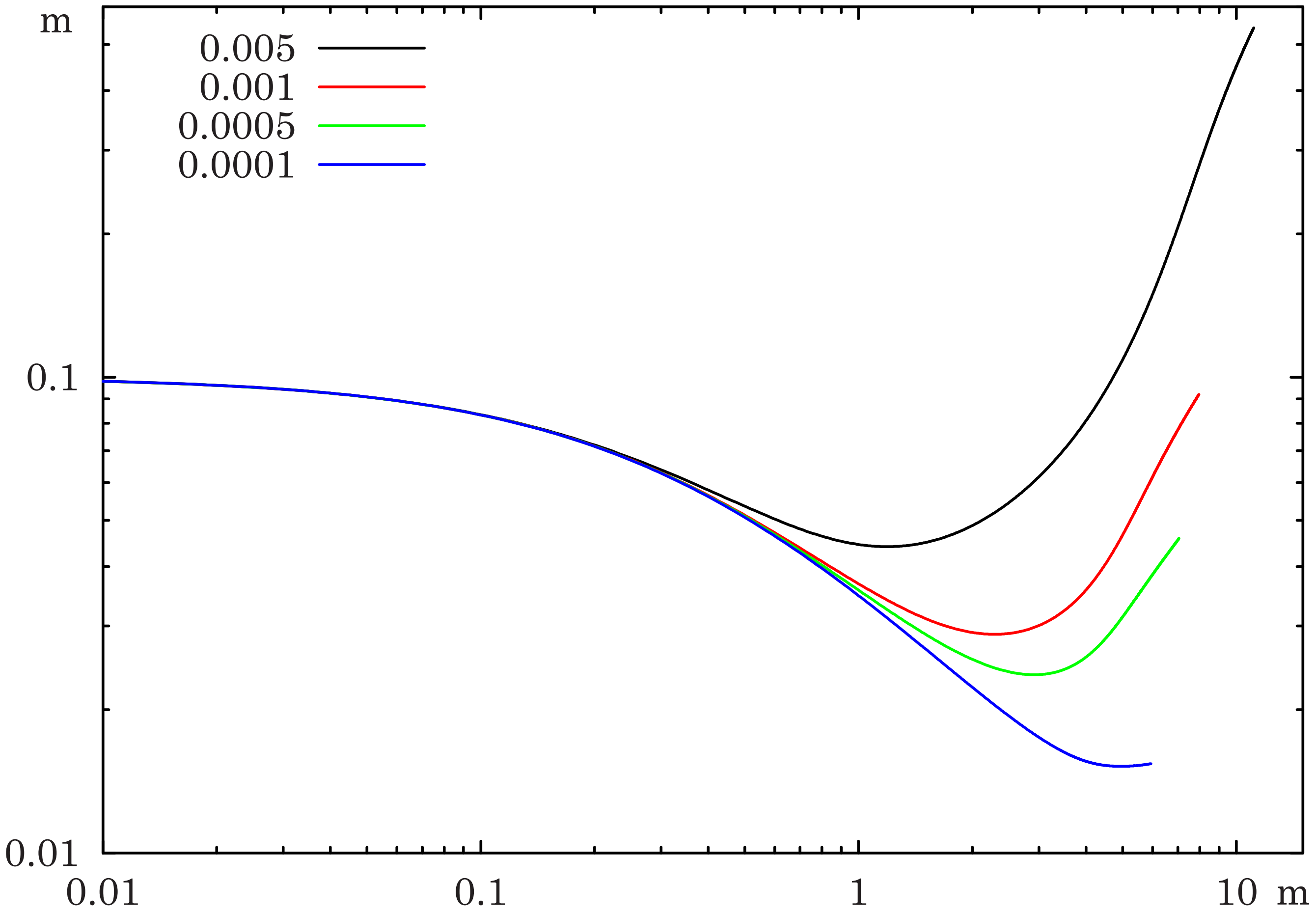
Vitesse du front en fonction de la position du front :
influence du coefficient de fraction volumique basale C_3 ($\phi_b = C_3\phi$).

Influence qualitative



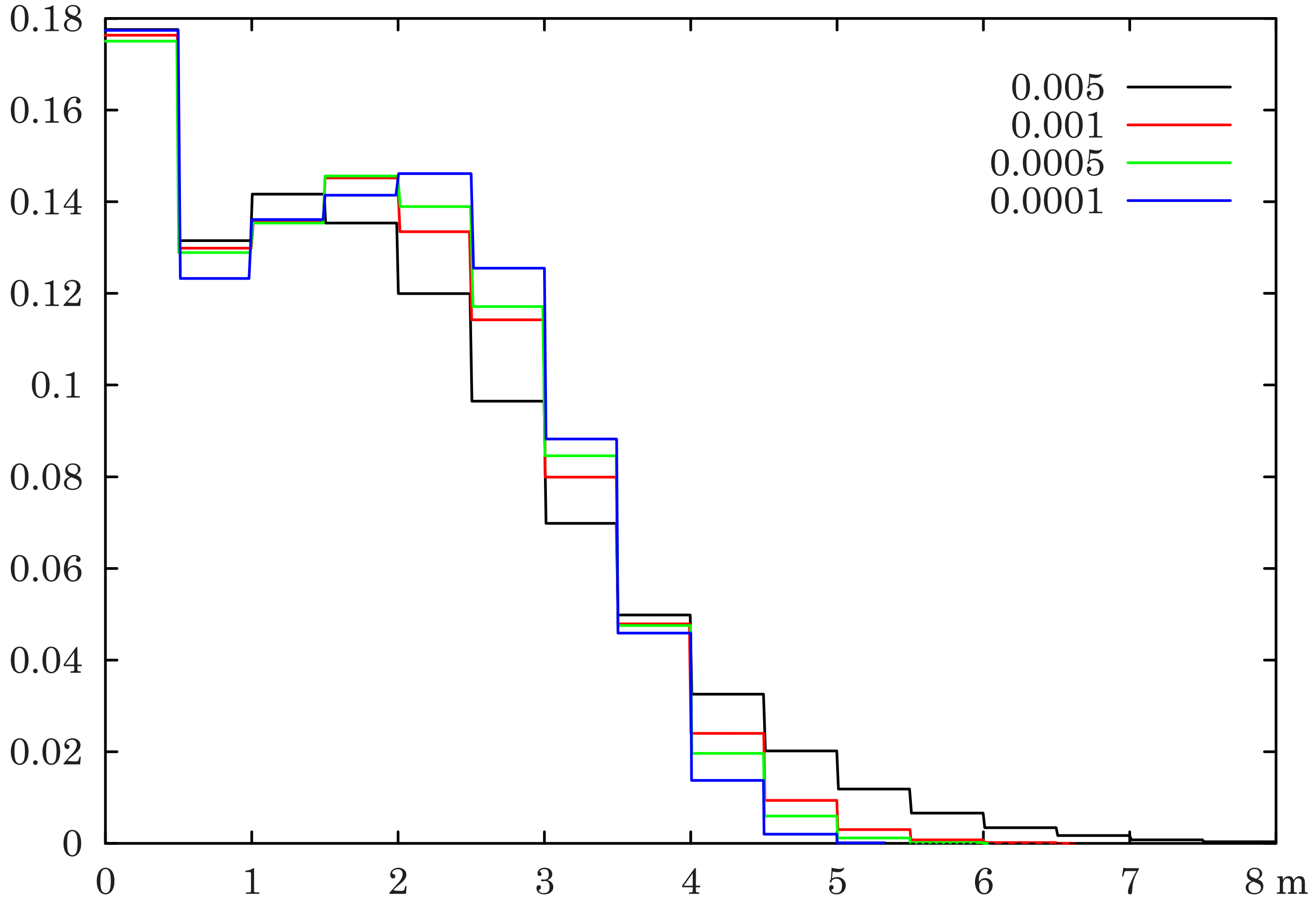
Histogramme de répartition du sable :
influence du coefficient de fraction volumique basale C_3 ($\phi_b = C_3\phi$).

Type de variable



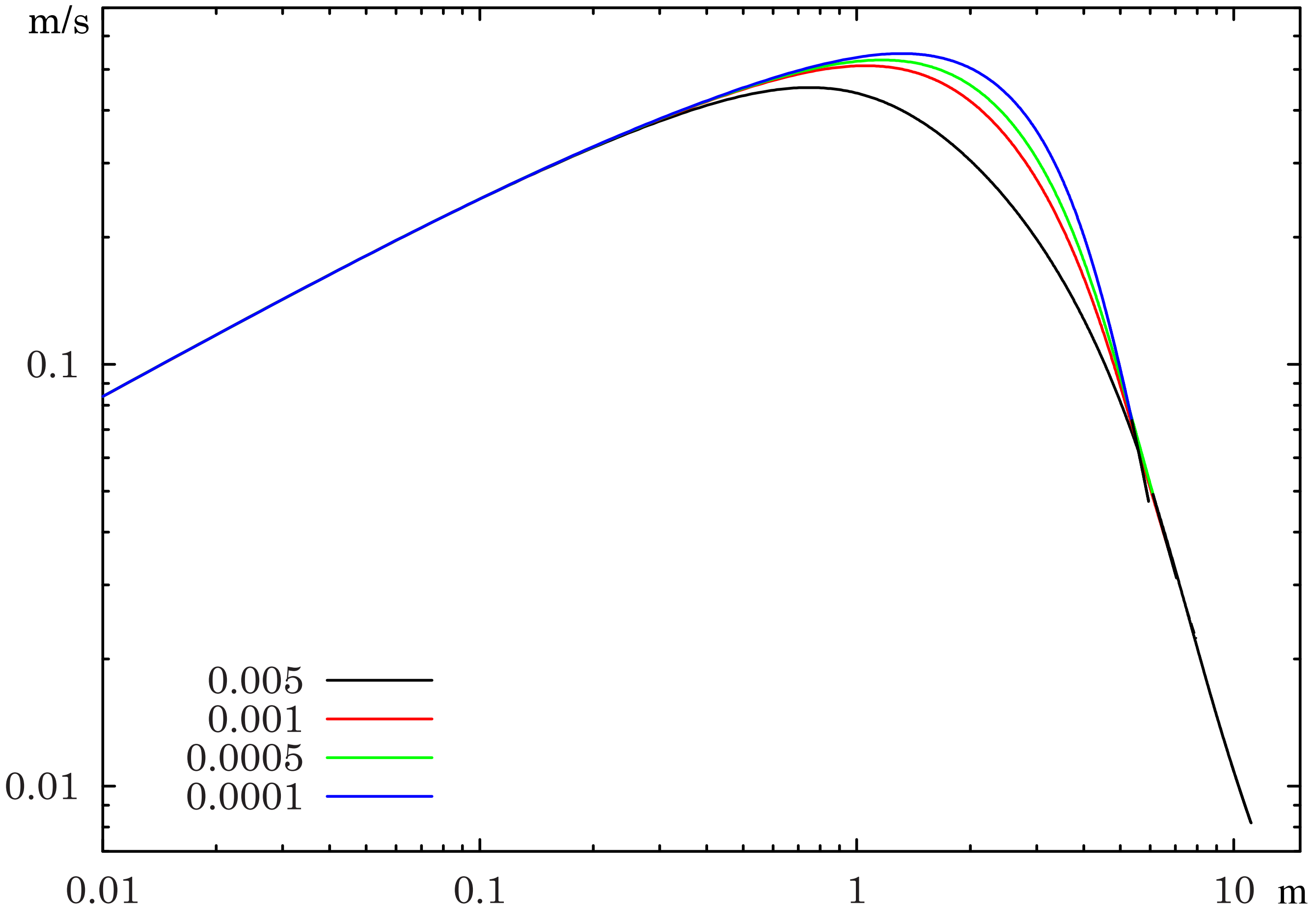
Hauteur de l'écoulement en fonction de la position : influence du coefficient d'incorporation d'eau C_1.

Type de variable



Histogramme de répartition du sable :
influence du coefficient d'incorporation d'eau C_1.

Type de variable

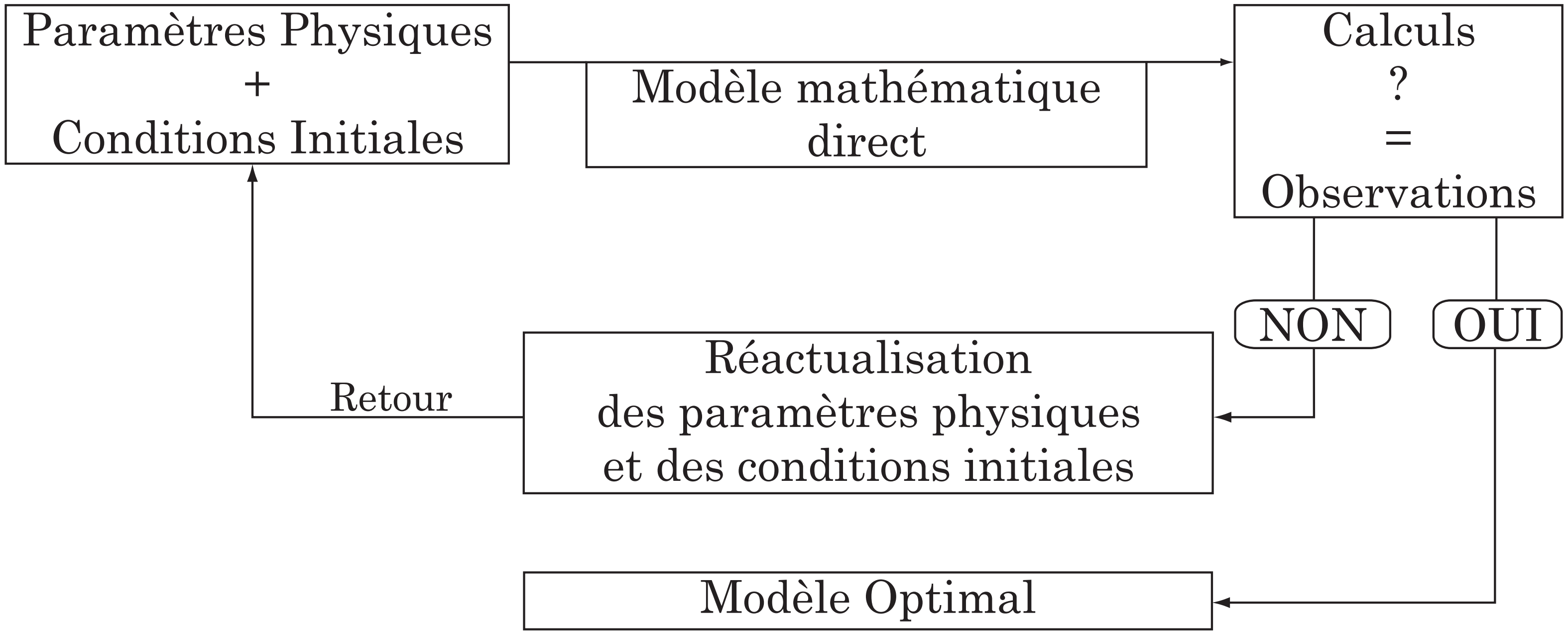


Vitesse du front en fonction de la position du front : influence du coefficient d'incorporation d'eau C_1.

Tests Qualitatifs

1. **montrent le bon comportement qualitatif du modèle ;**
2. **permettent de déterminer :**
   - **les paramètres les plus influents ;**
   - **leur type d'influence : qualitative / quantitative ;**
   - **la variable sur laquelle ils influent.**

Mise en œuvre d'une méthode inverse pour l'identification des paramètres



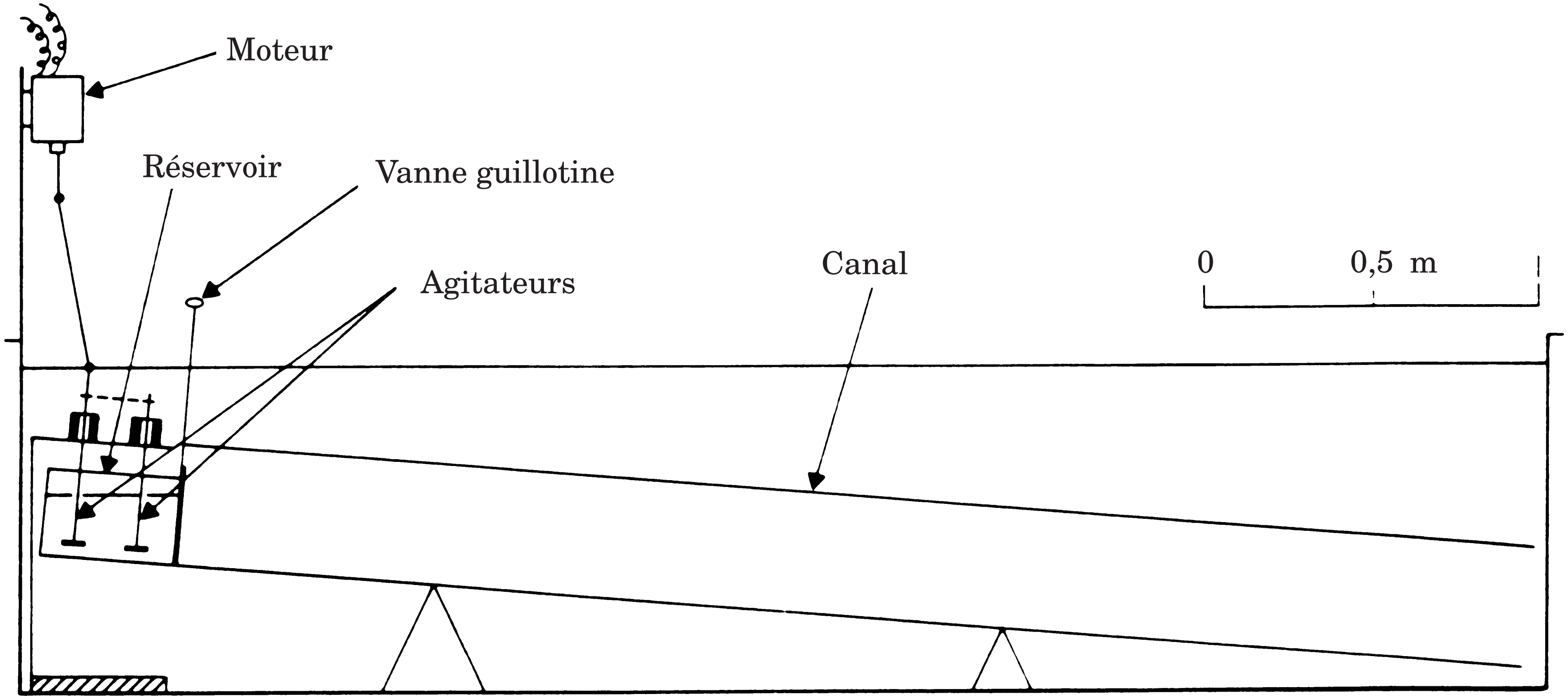
Mise en œuvre d'une méthode inverse pour l'identification des paramètres

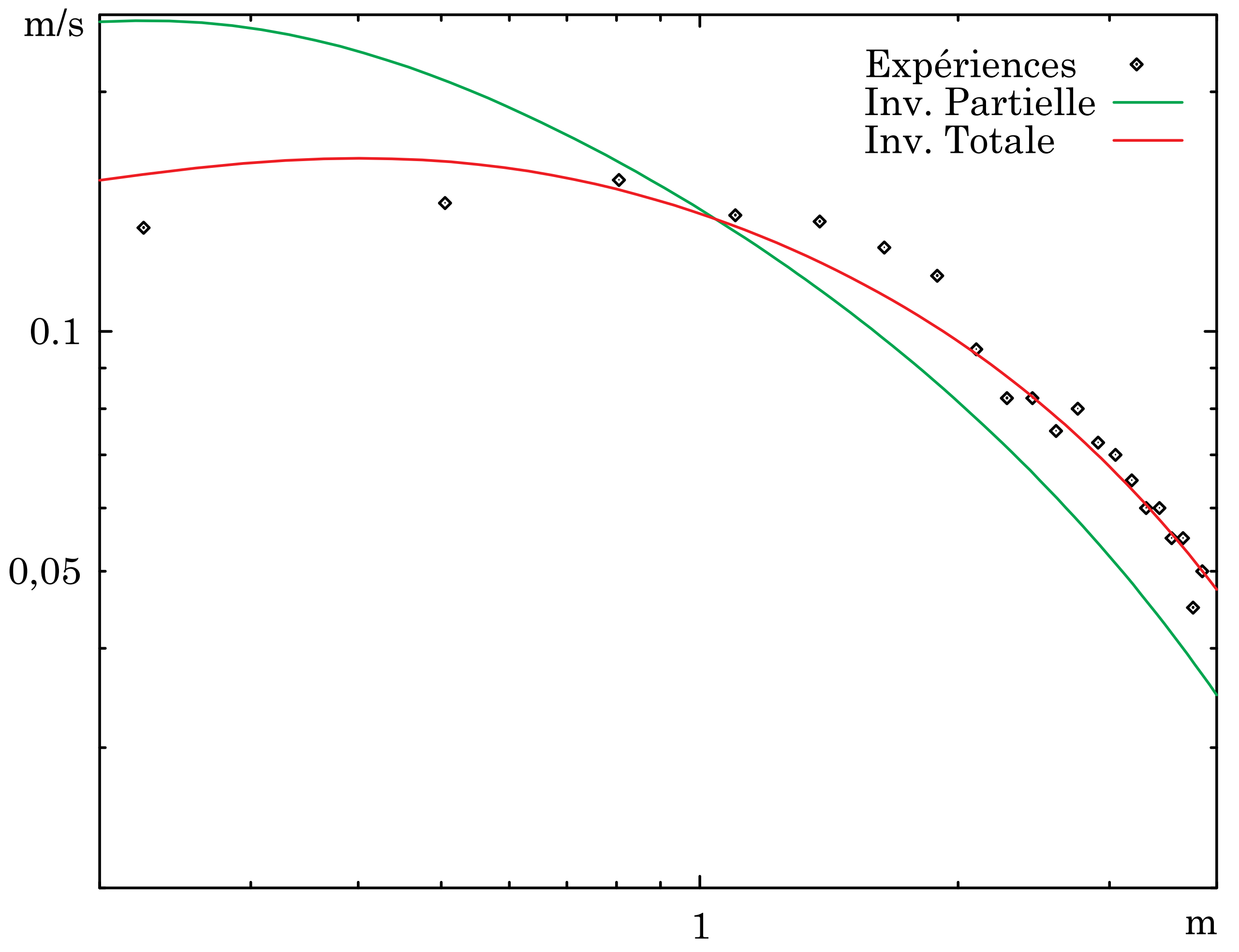
1. **Partielle :**
   ⇒Estimation des constantes du modèle (C_i)
   ou des conditions initiales (U_0, ϕ_0, h_0 et l_0).
2. **Totale :**
   ⇒Estimation des constantes du modèle (C_i)
   et des conditions initiales (U_0, ϕ_0, h_0 et l_0).

Elles permettent :

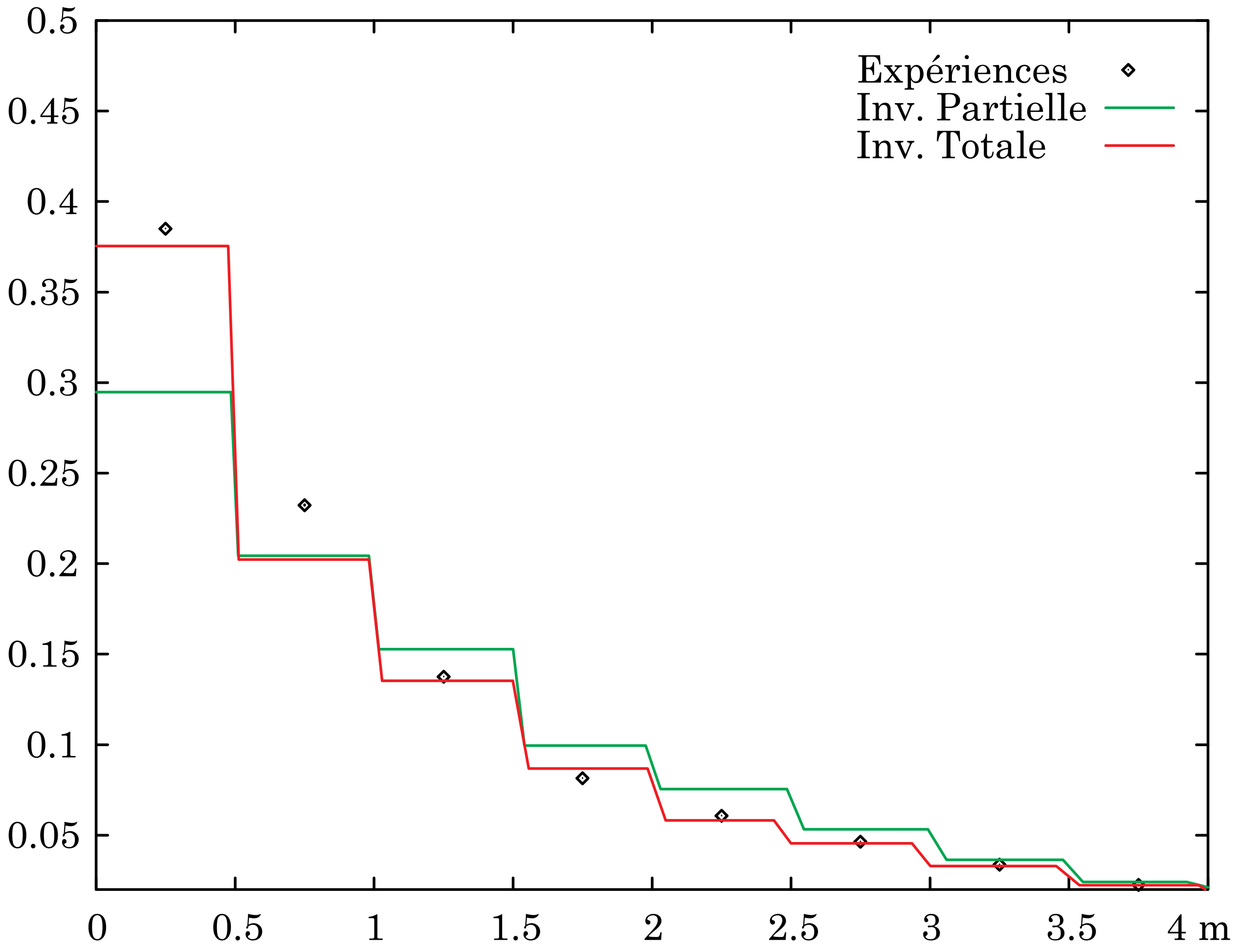
- Valider le modèle par comparaison des paramètres obtenus avec les valeurs bibliographiques.
- Tester des scénarios d'écoulement.

Modèle réduit de Laval (1988)





Comparaison de la vitesse du front, U_f, en fonction de la position du front. Prédictions numériques et mesures expérimentales.



Comparaison du pourcentage de récupération en fonction de la position. Prédictions numériques et mesures expérimentales.

Inversion partielle / Inversion totale

Inversion partielle :

- Bon comportement du modèle d'un point de vue qualitatif (même hors du domaine de validité).

Inversion totale :

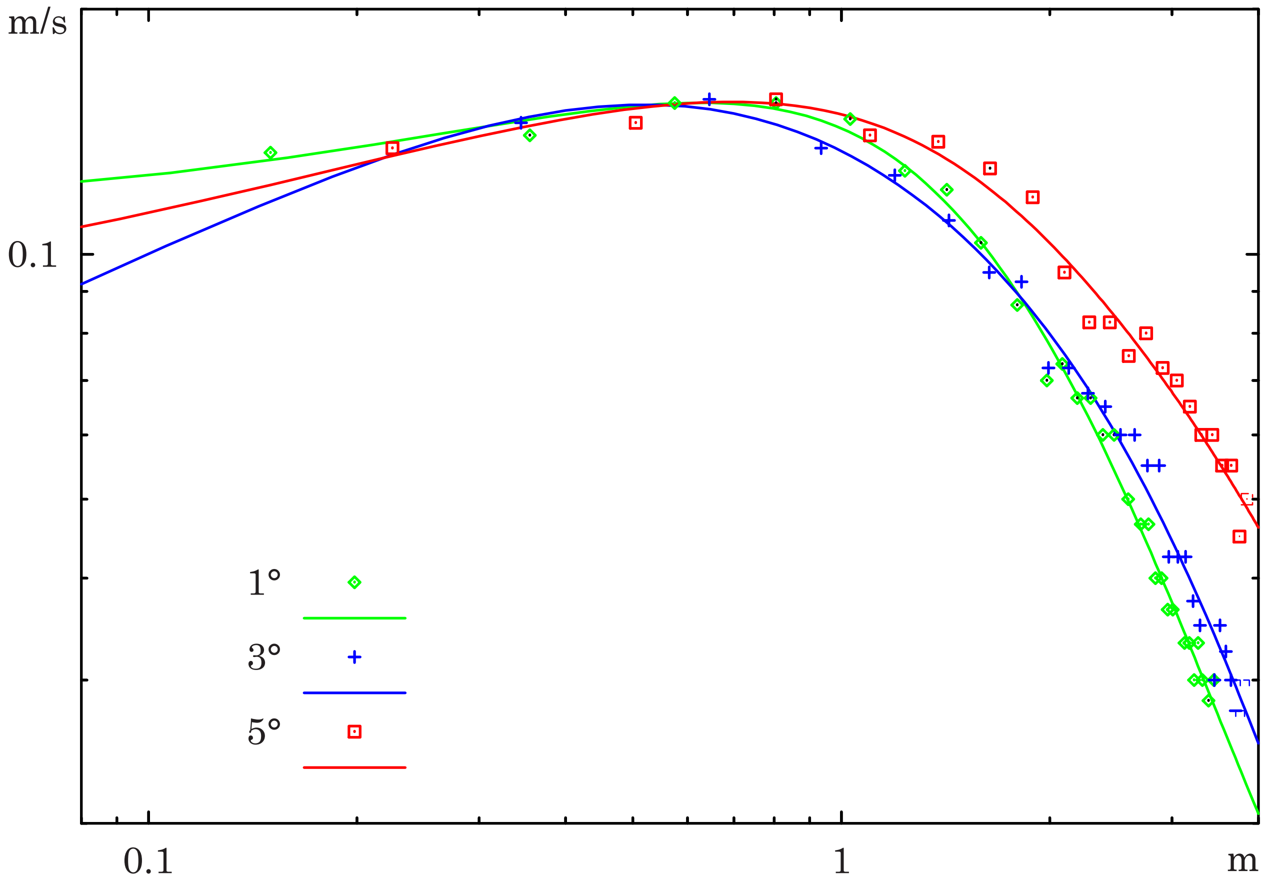
- Permet de lever l'incertitude sur les conditions initiales ;
- Bon comportement quantitatif du modèle.

Modèles Réduits Analogiques

Deux composantes des expériences en canal :

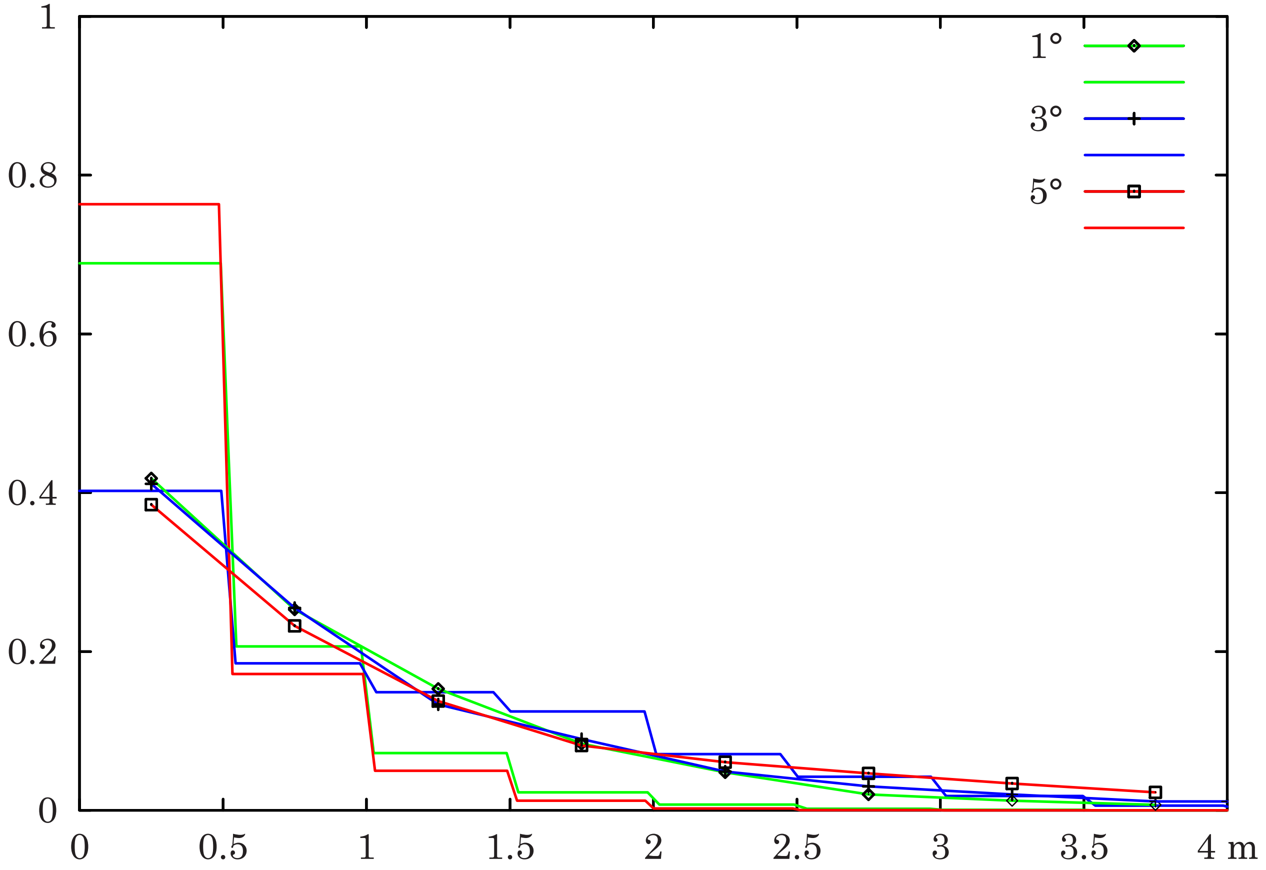
1. **Mesures de vitesses : "Logique modèle"**
   $\Rightarrow$ validation dynamique.
2. **Mesures des hauteurs de dépôt : "Logique dépôt"**
   $\Rightarrow$ validation géologique.

Inversion sur la dynamique



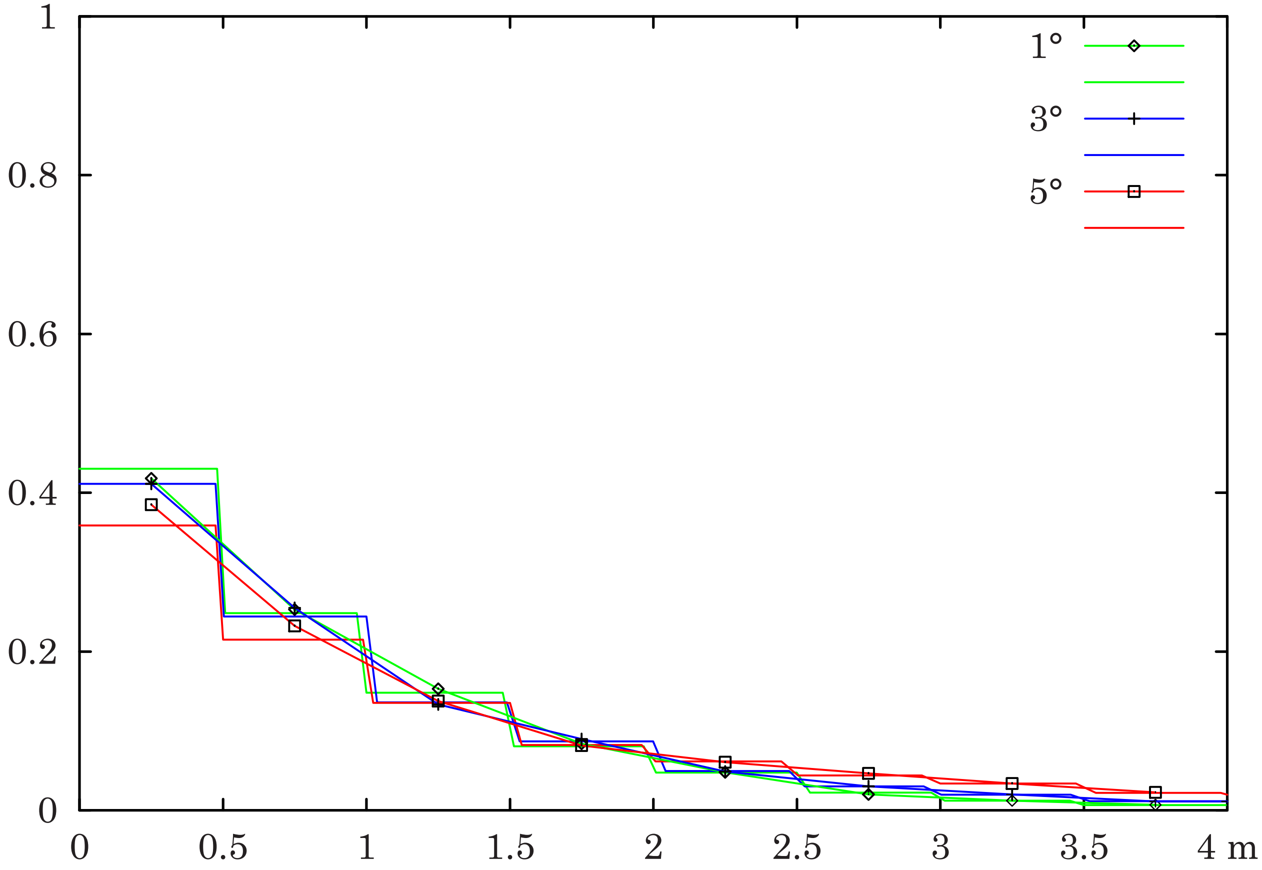
Vitesse du front en fonction de la position : expériences à pente variable.

Inversion sur la dynamique



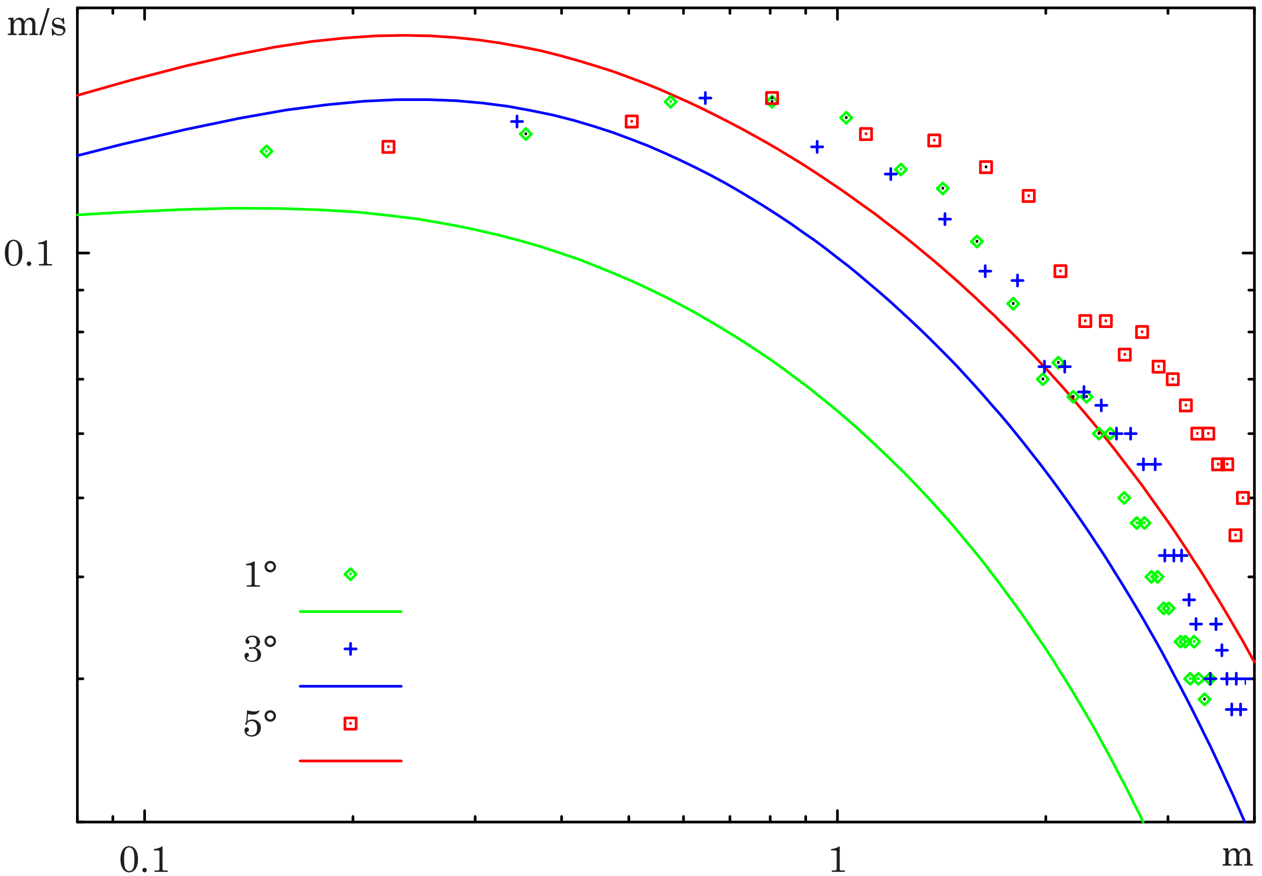
Histogramme de répartition du sable : expériences à pente variable.

Inversion sur le dépôt



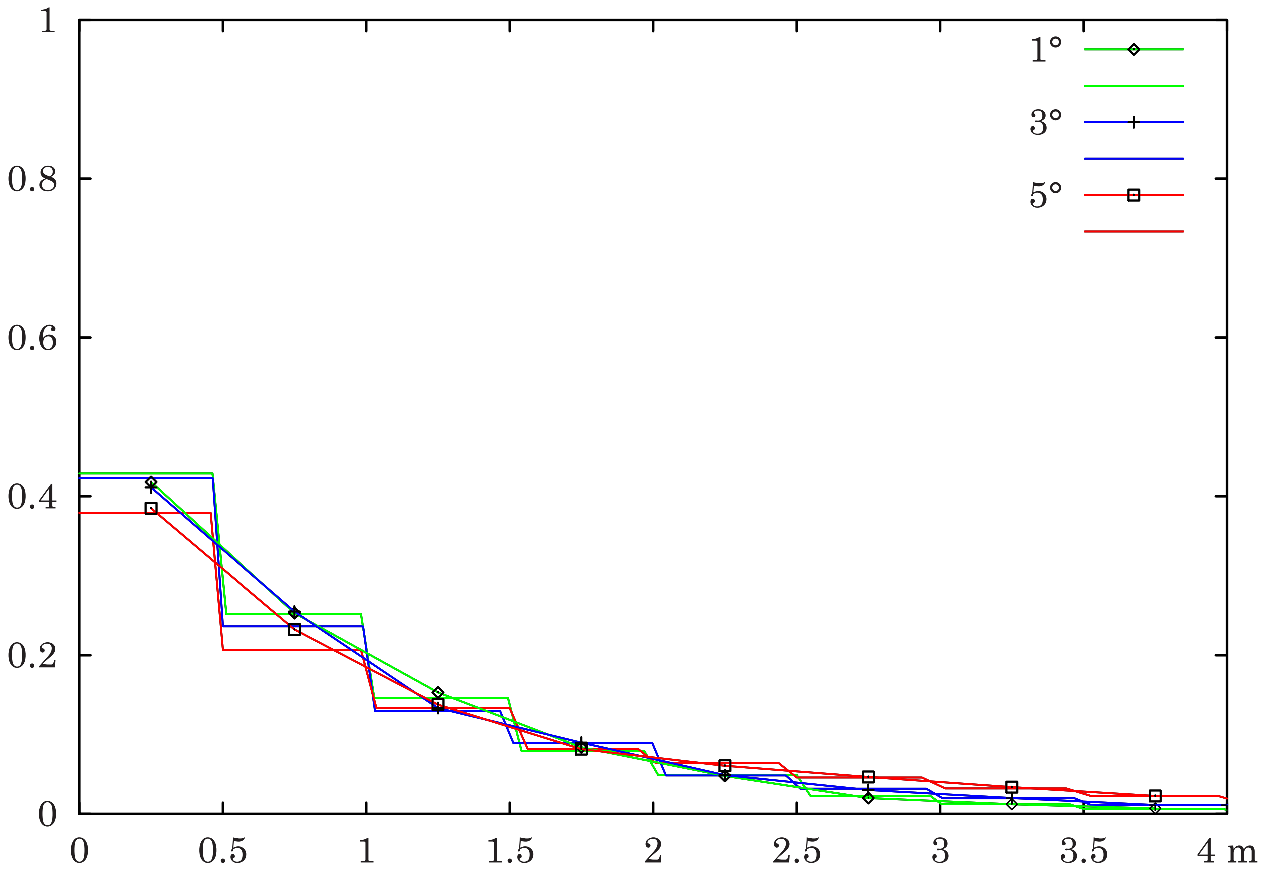
Histogramme de répartition du sable : expériences à pente variable.

Inversion sur le dépôt



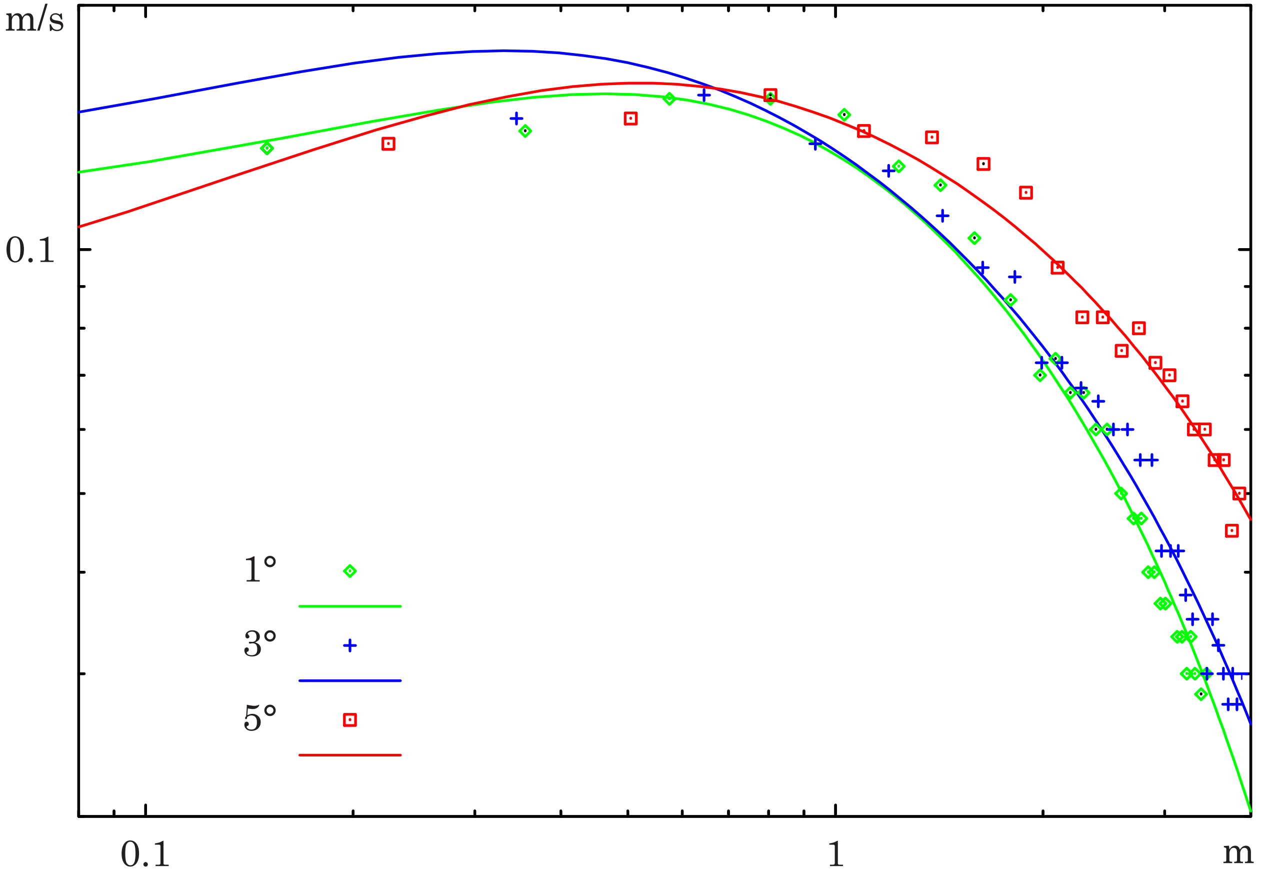
Vitesse du front en fonction de la position : expériences à pente variable.

Inversion simultanée (dynamique + dépôt)



Histogramme de répartition du sable : expériences à pente variable.

Inversion simultanée (dynamique + dépôt)



Vitesse du front en fonction de la position : expériences à pente variable.

Inversion totale

Validation :

1. Composante "dynamique" du modèle numérique par la comparaison aux mesures de la vitesse de l'écoulement ;
2. Composante "dépôt" du modèle numérique par la comparaison aux mesures des hauteurs de dépôt.

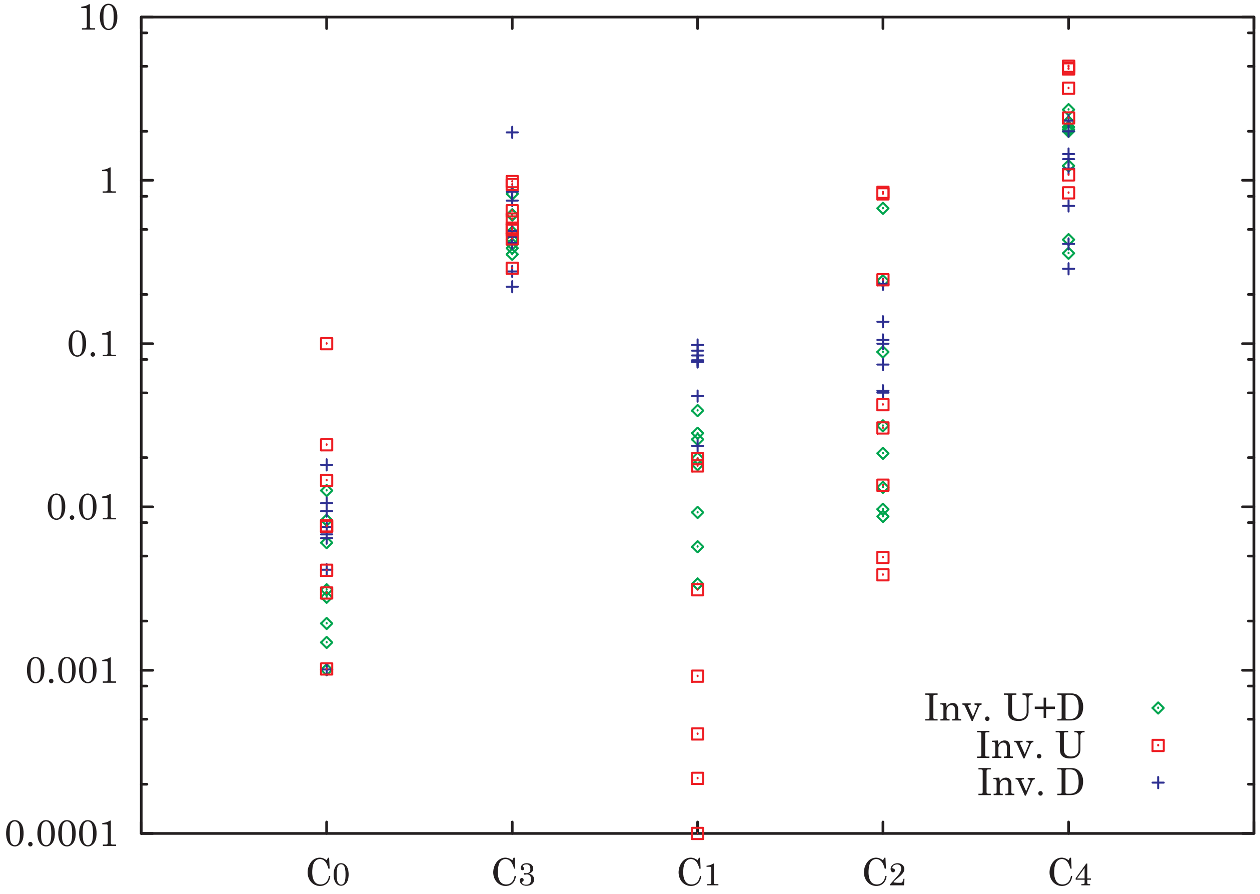
Montre :

- l'inversion simultanée (dynamique et dépôt) est indispensable pour une estimation satisfaisante des paramètres physiques et des conditions initiales.

Permet :

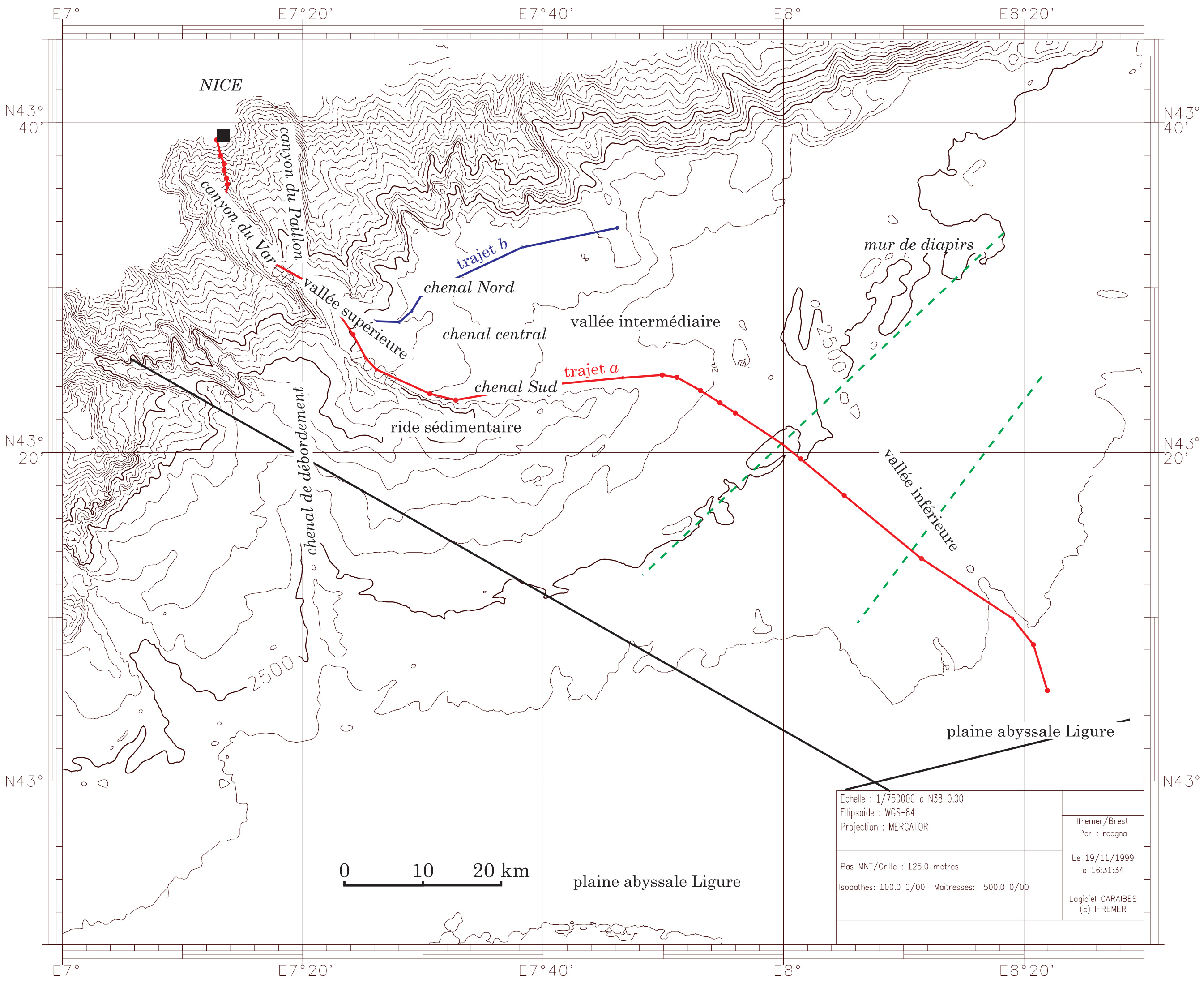
1. lever l'incertitude sur les conditions initiales ;
2. une meilleure estimation des paramètres du modèle.

Estimation des paramètres



Répartition de la valeur des paramètres.

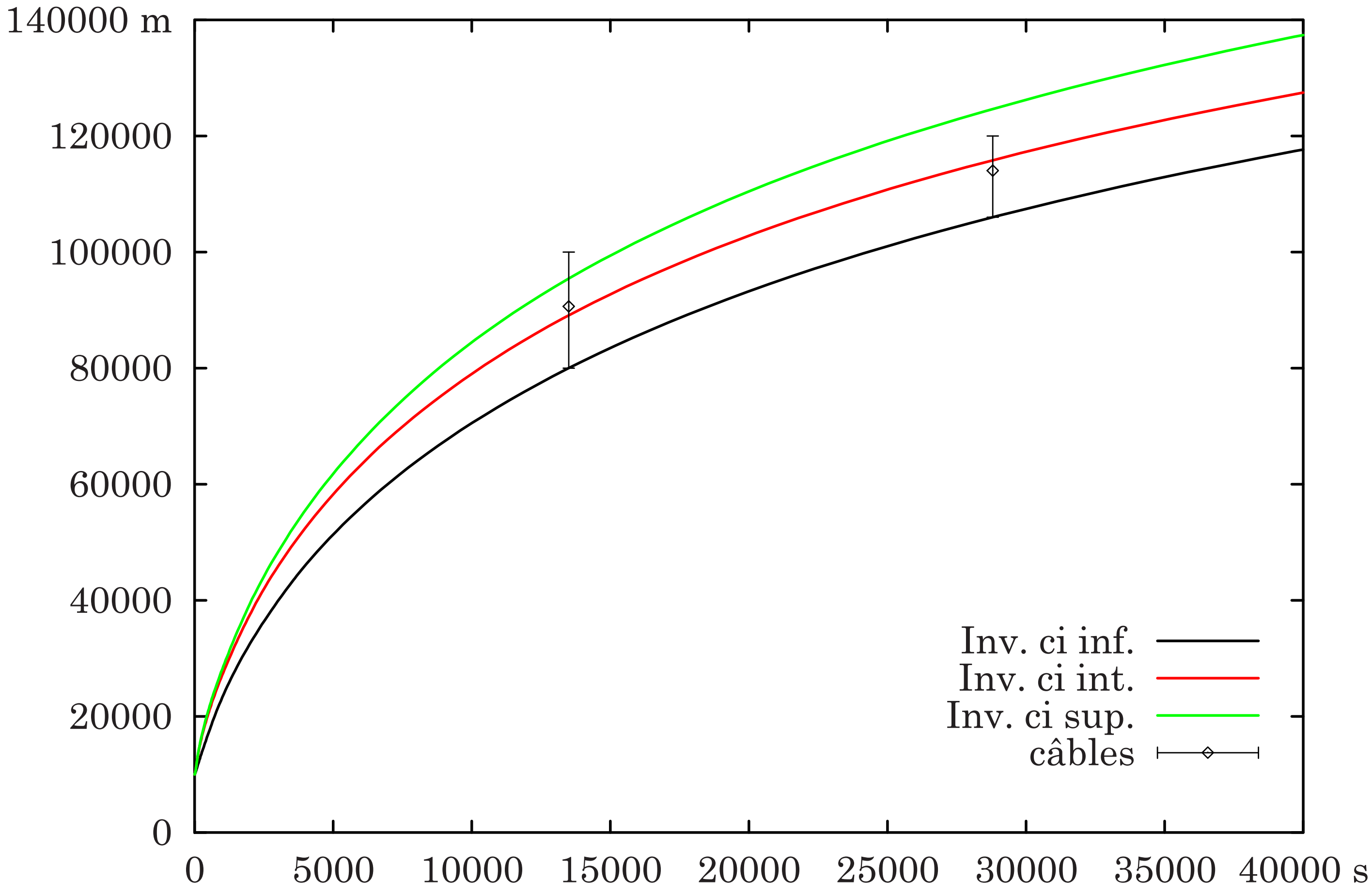
Application à l'événement de Nice, 1979



Données

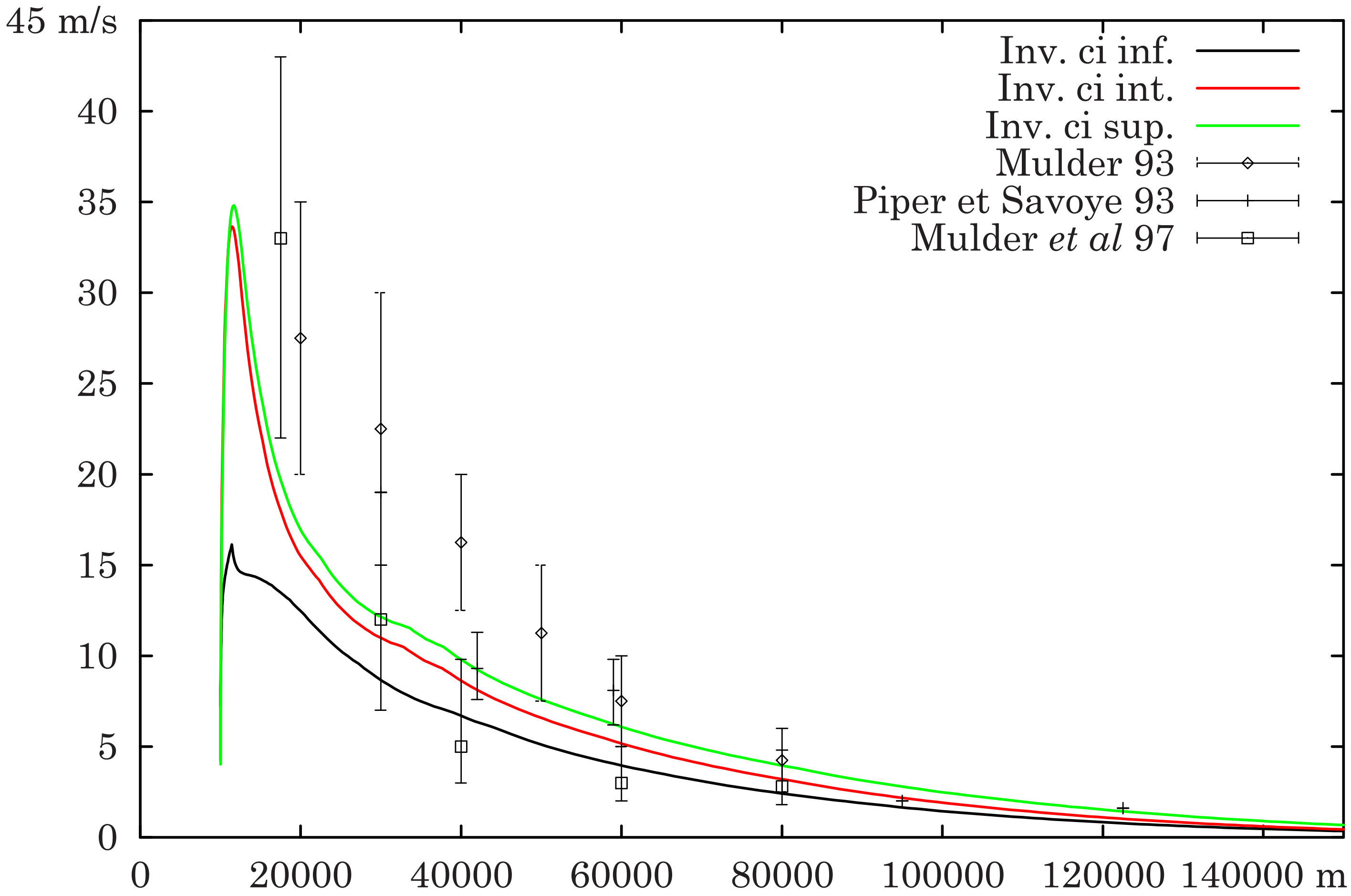
- Trajet (supposé).
- Points de contrainte :
  1. Ruptures de câble (position / temps) ;
  2. Épaisseurs déposées (carottes IFREMER).

Inversions partielles (CI) sur la dynamique



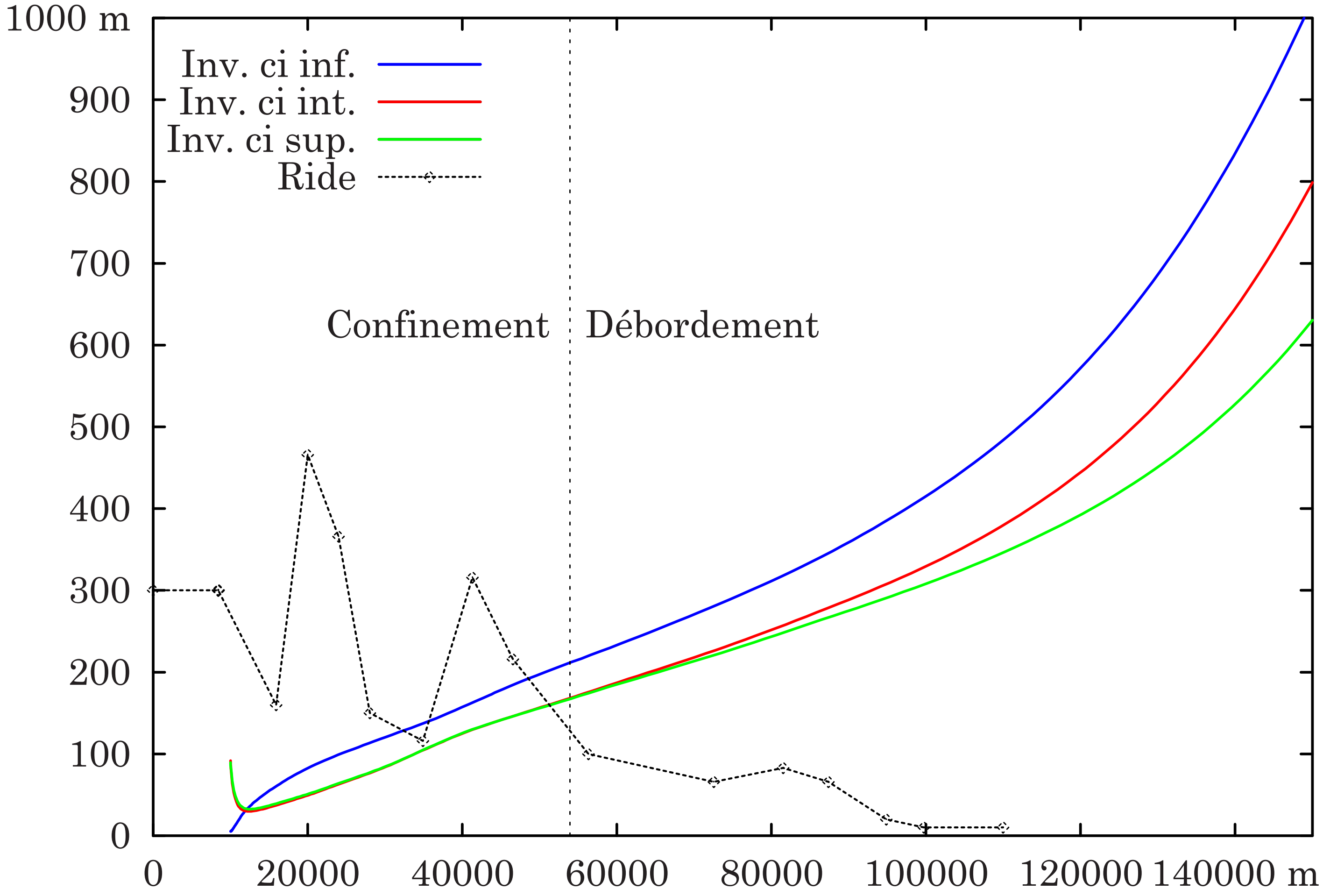
Position du front en fonction du temps

Inversions partielles (CI) sur la dynamique



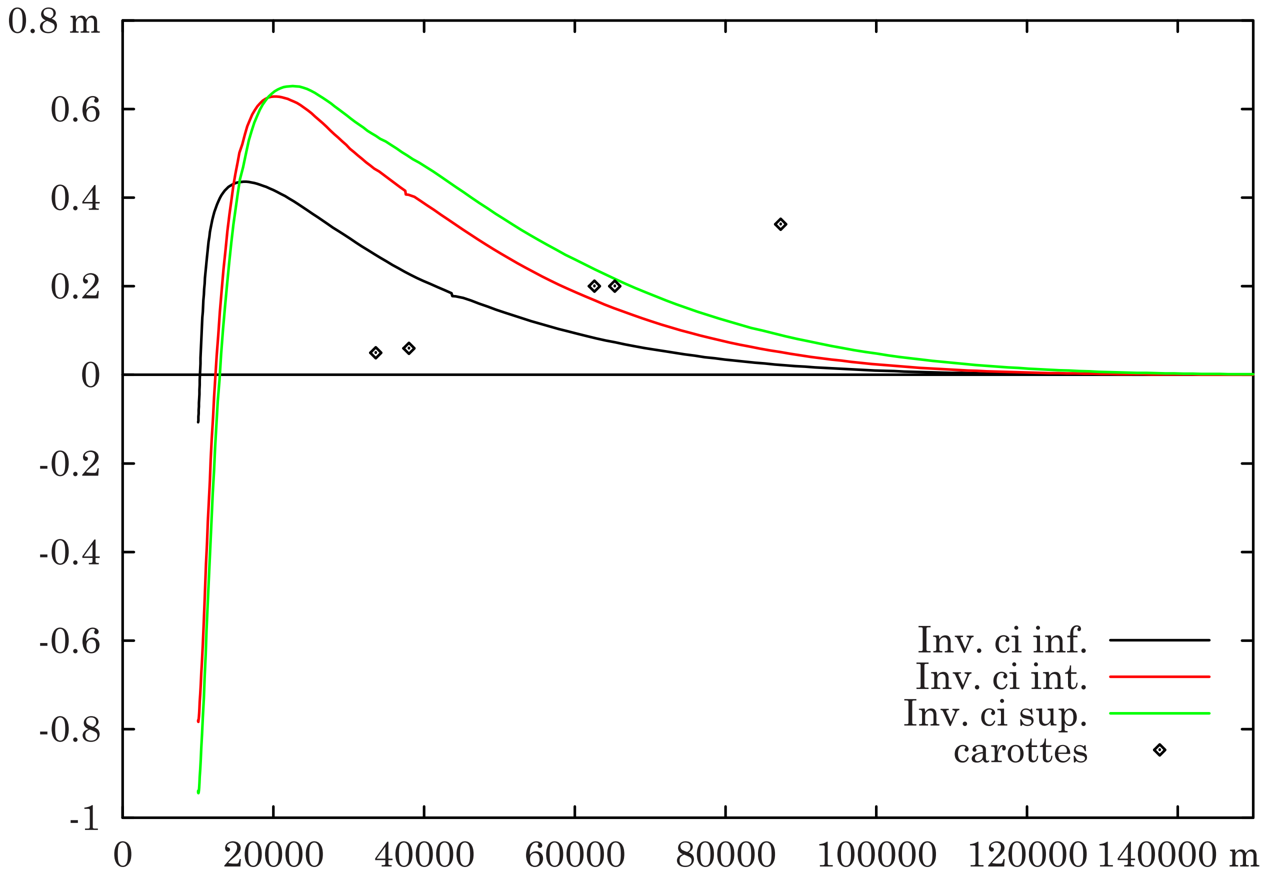
Vitesses en fonction de la position

Inversions partielles (CI) sur la dynamique



Hauteurs en fonction de la position

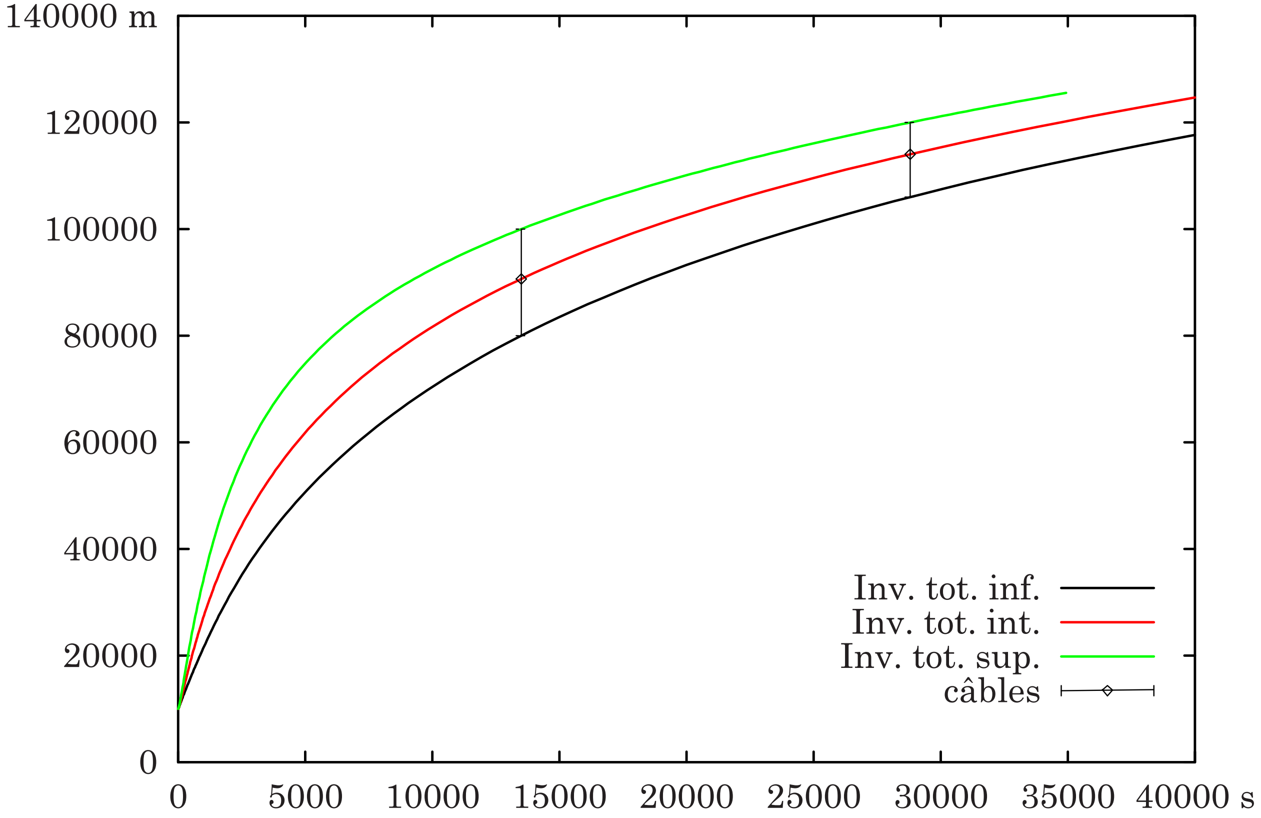
Inversions partielles (CI) sur la dynamique



Hauteurs sédimentées en fonction de la position

$\Rightarrow$ **dépôt non respecté.**

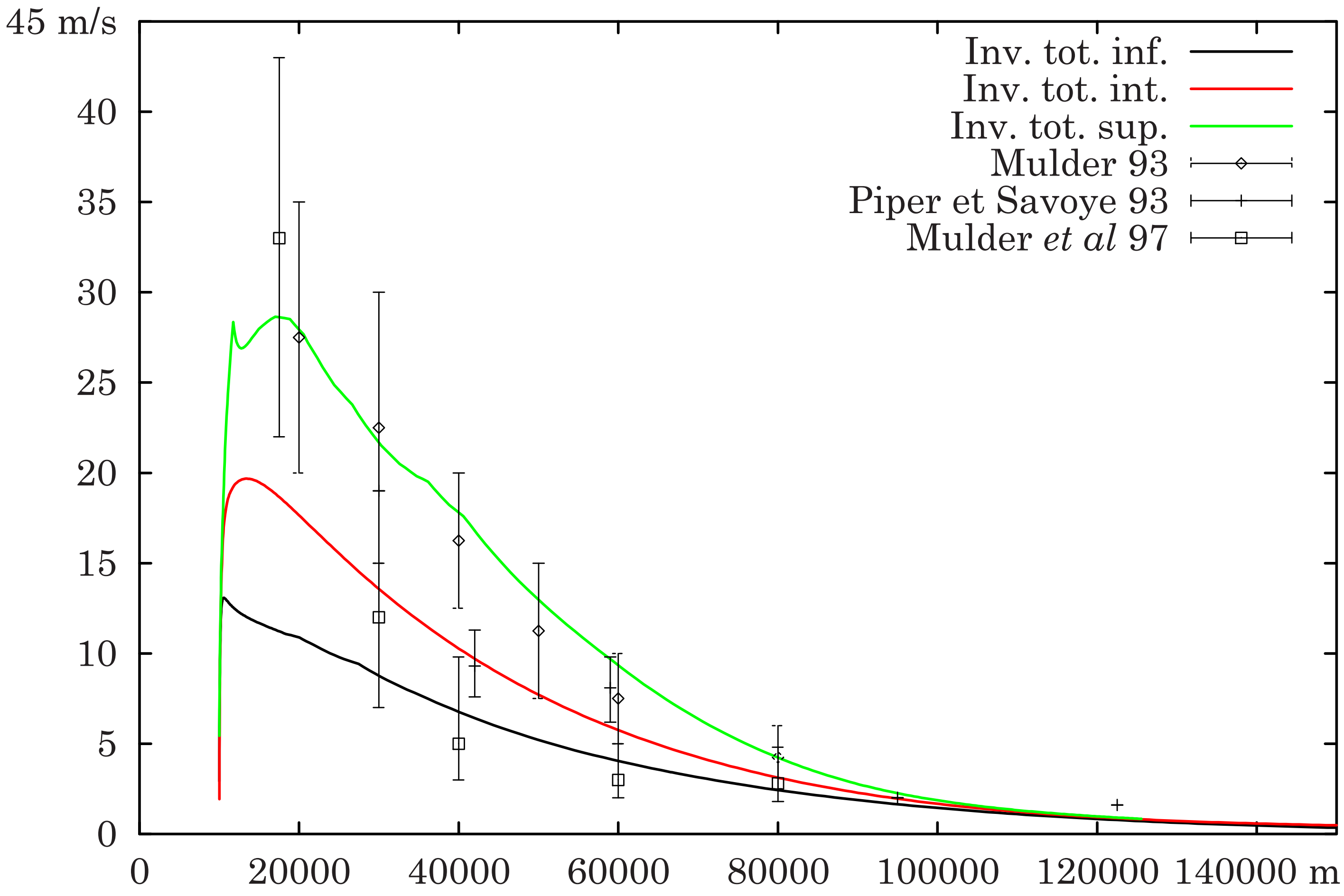
Inversions totales contraintes par la dynamique



Position du front en fonction du temps

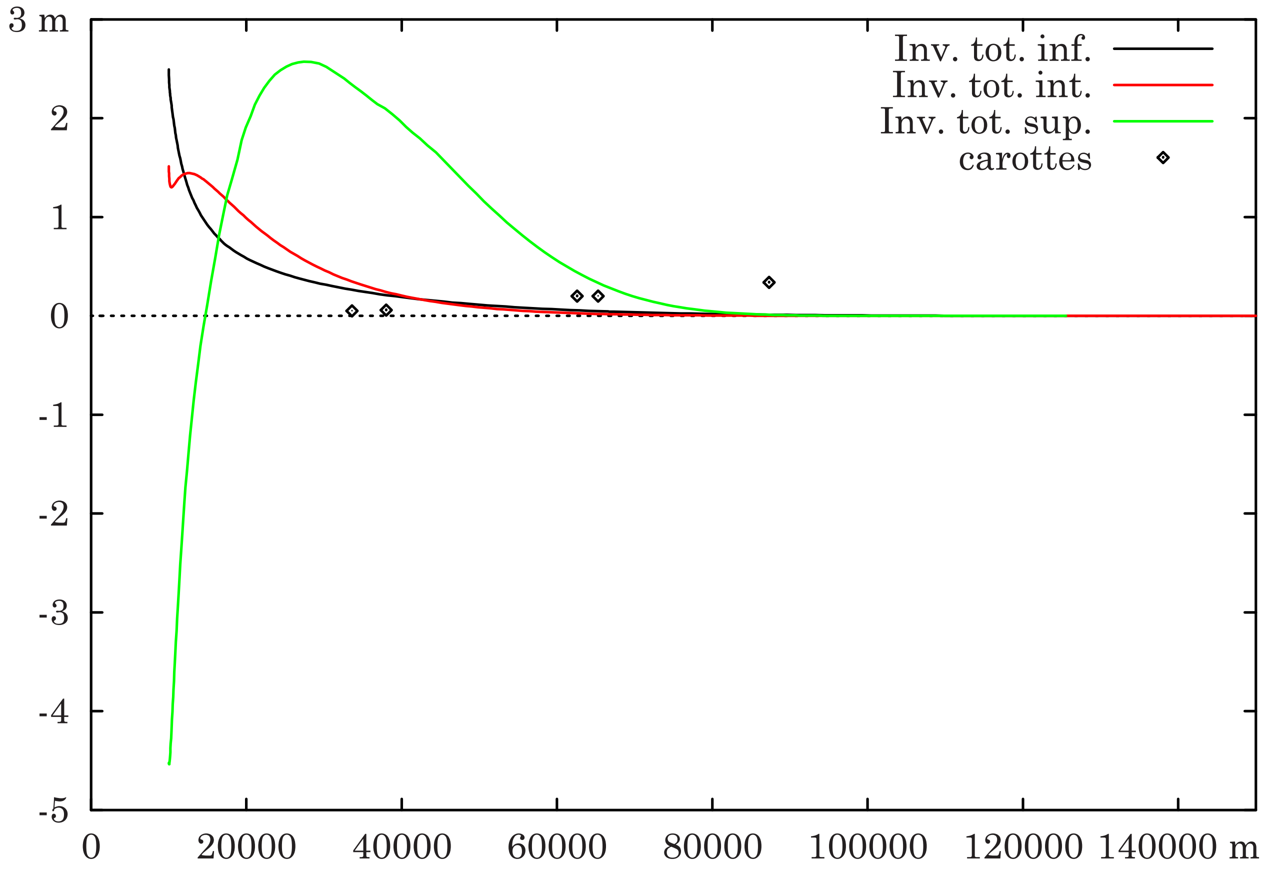
$\Rightarrow$ meilleure reconstruction des données.

Inversions totales contraintes par la dynamique



Vitesses en fonction de la position

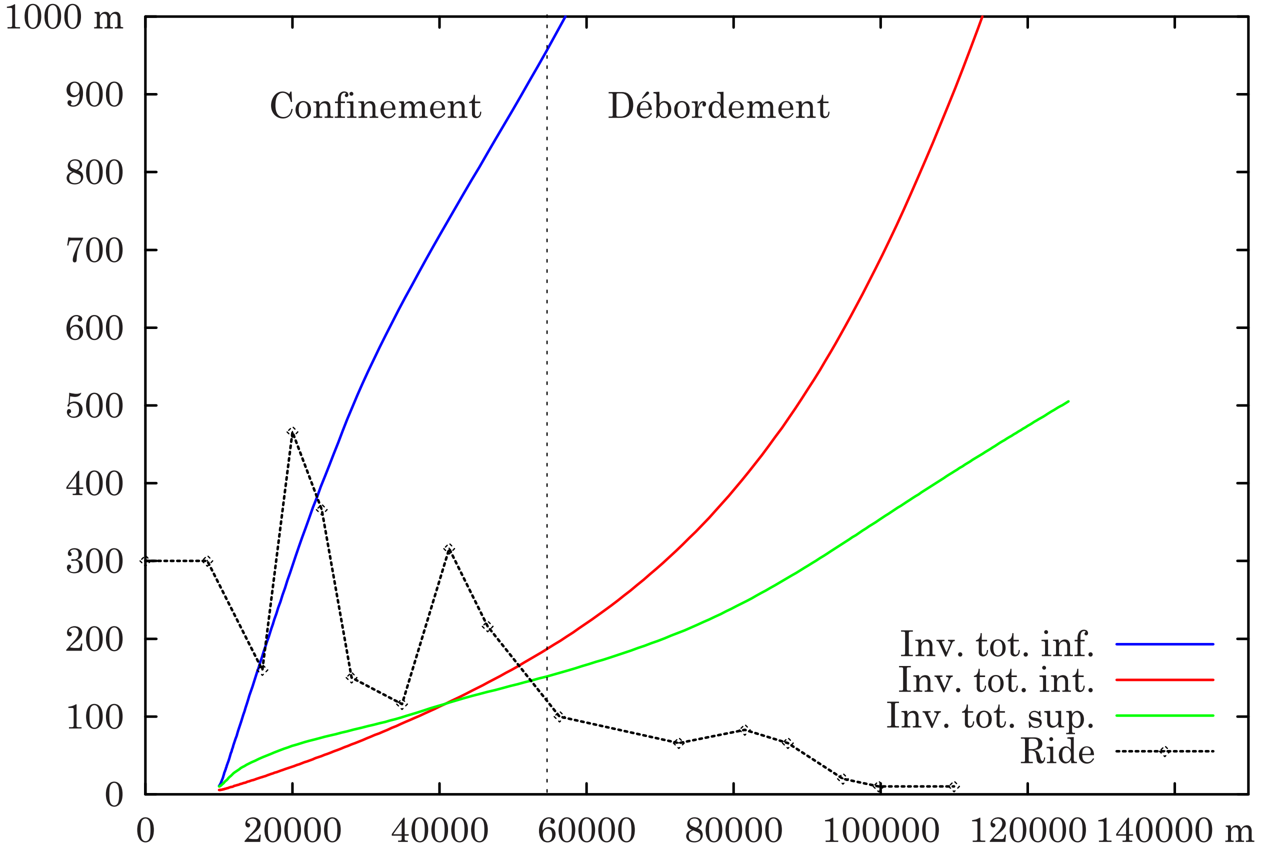
Inversions totales contraintes par la dynamique



Hauteurs sédimentées en fonction de la position

$\Rightarrow$ **dépôt non respecté (manque de contraintes).**

Inversions totales contraintes par la dynamique

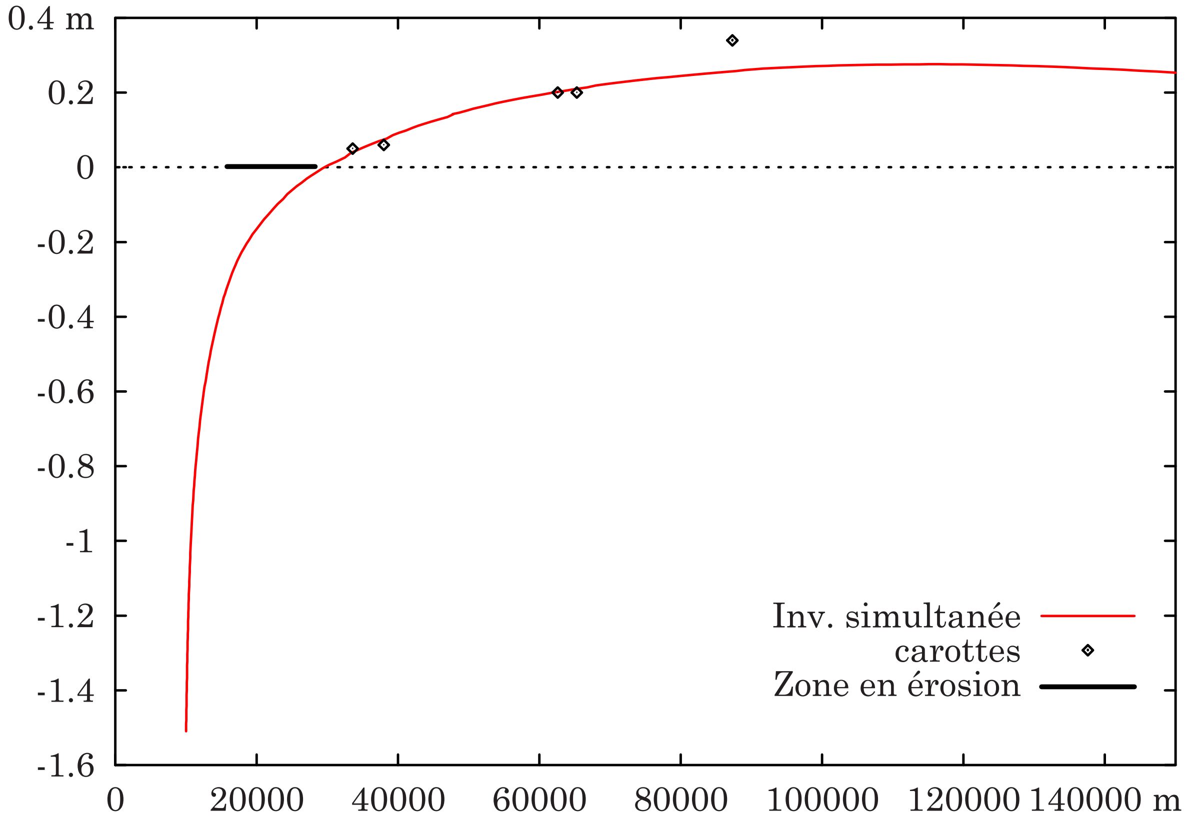


Hauteurs en fonction de la position

⇒ variabilité (manque de contraintes).

Inversions totales simultanées

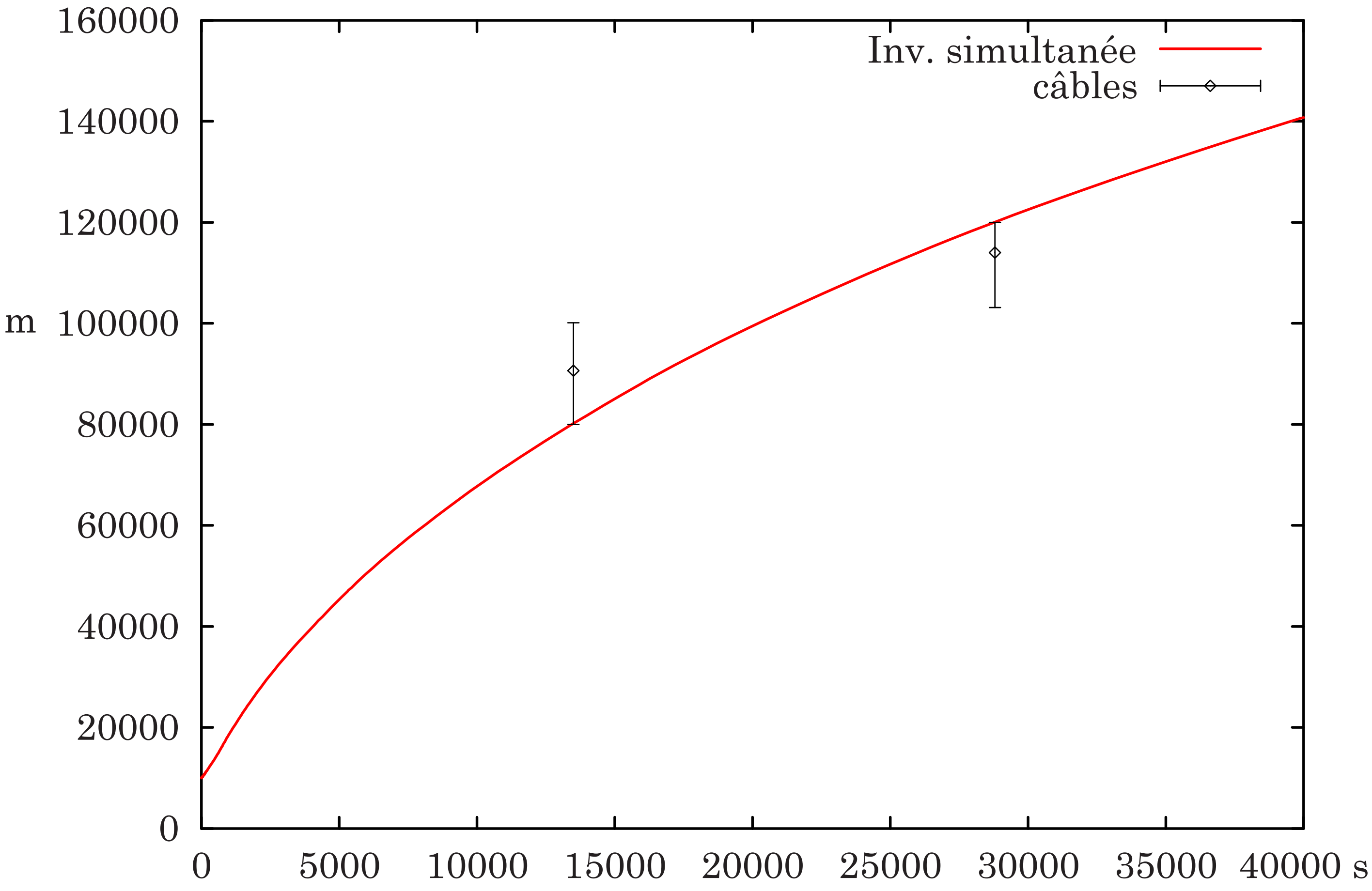
(contraintes par la dynamique et le dépôt)



Hauteurs sédimentées en fonction de la position

$\Rightarrow$ **reconstruction satisfaisante du dépôt.**

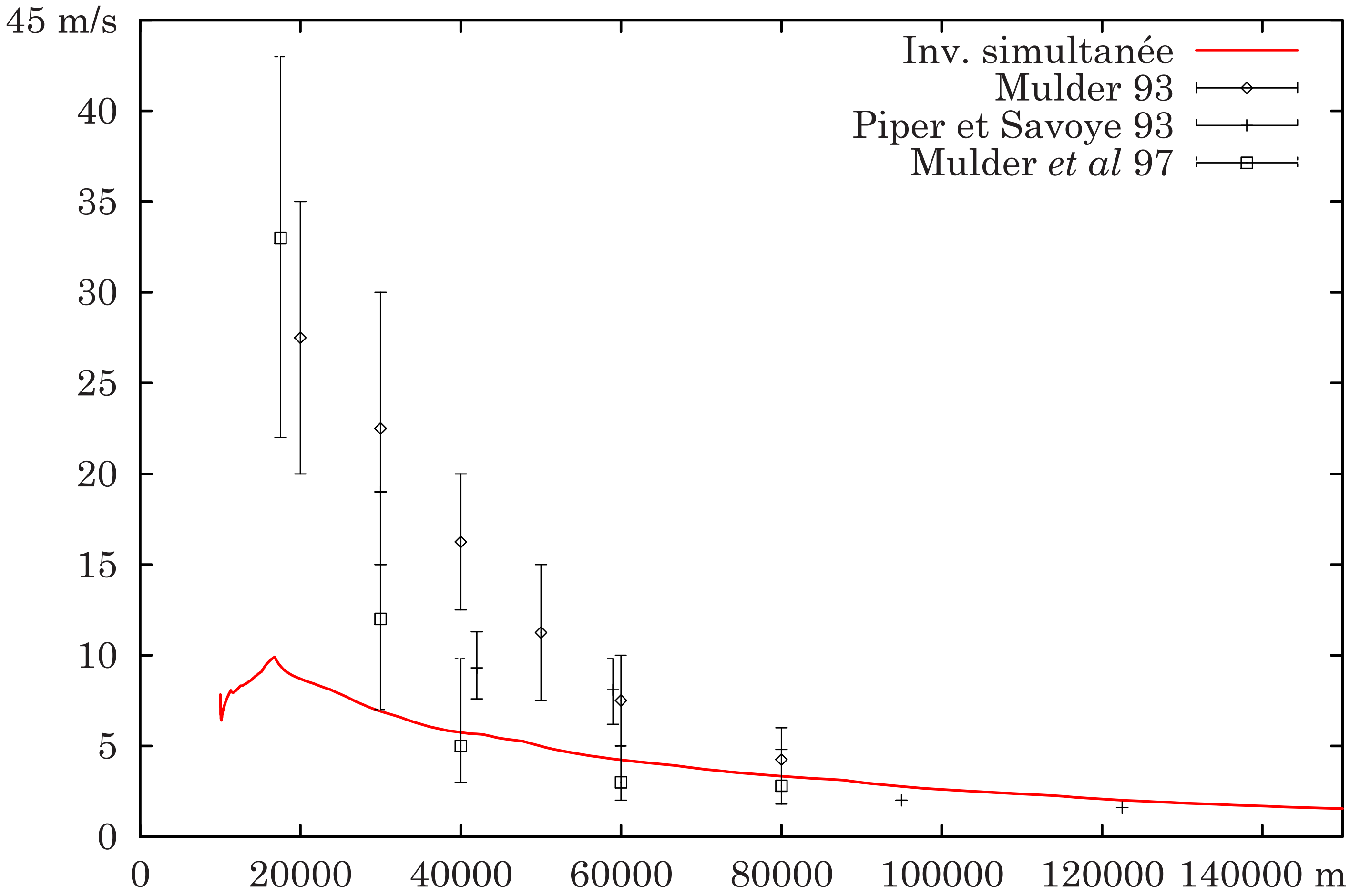
Inversions totales simultanées



Position du front en fonction du temps

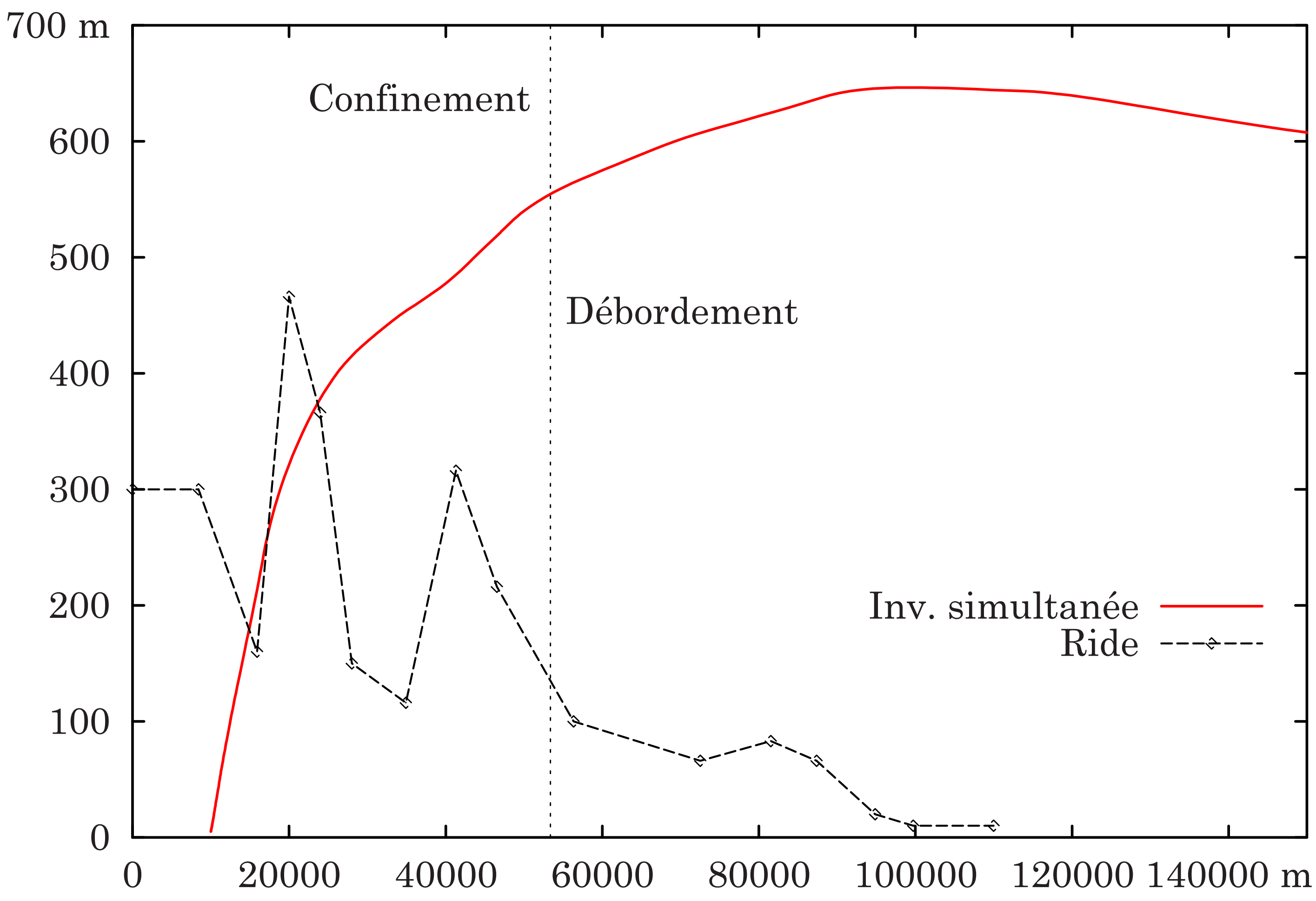
⇒ Scénario d'écoulement réaliste.

Inversions totales simultanées

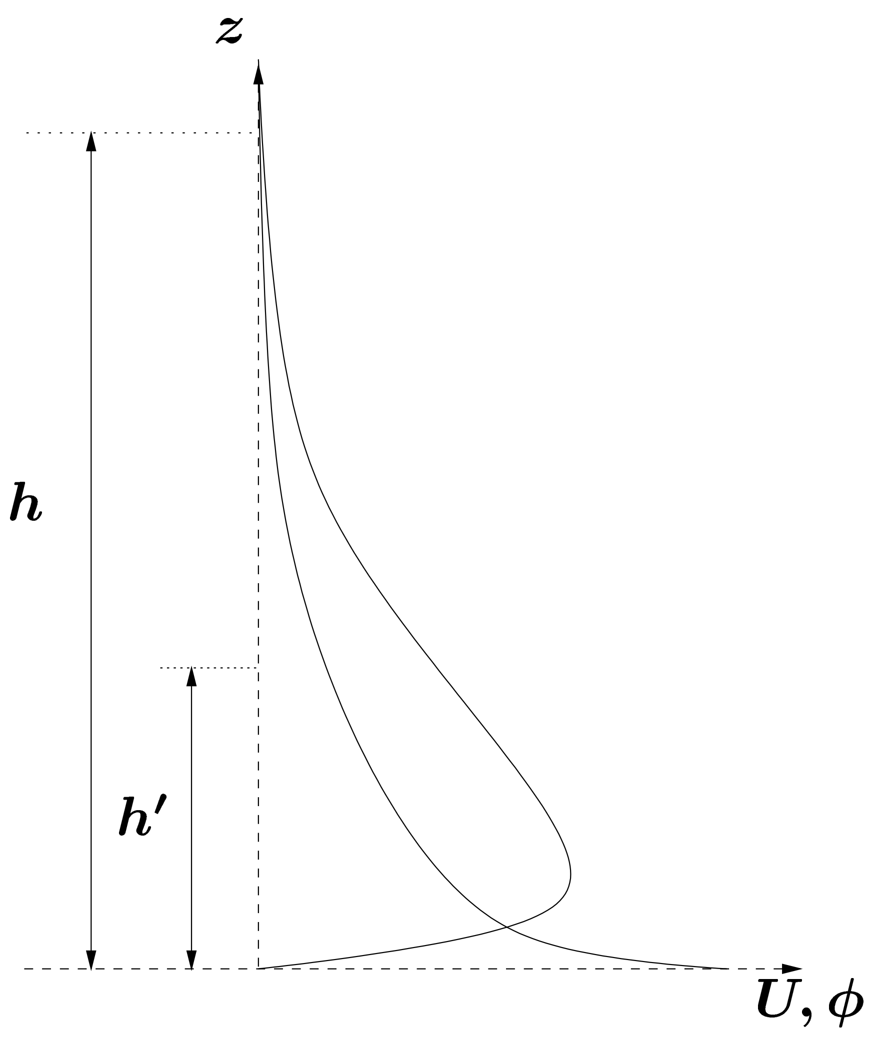


Vitesses en fonction de la position

Inversions totales simultanées



Hauteurs en fonction de la position



Correspondance entre la hauteur de l'écoulement et les profils de fraction volumique ϕ et de vitesse U.

Application à des cas réels

Montre :

1. le bon comportement du modèle (qualitatif & quantitatif) ;
2. l'inversion simultanée (dynamique et dépôt) est indispensable pour une estimation satisfaisante des paramètres physiques et des conditions initiales.

Permet :

1. de tester des hypothèses (volume initial, hauteurs déposées ...) ;
2. des prédictions, avec les paramètres et conditions initiales obtenus lors de l'inversion.

Application à des cas réels

Incertitudes :

1. **limites du modèle**
   (2D, faibles concentrations) ;
2. **fiabilité des observations**
   (positions des carottes . . .).

Conclusions & Développements

Modèle théorique de l'objet écoulement :

- Formulé en lien direct avec les équations de Navier–Stokes à l'aide d'une méthode de décomposition issue de l'aérodynamique ;
- Prend en compte les transferts de masse : la sédimentation mais aussi l'érosion ;
- Prend en compte l'étalement qui est dominant sur des pentes faibles.

$\Rightarrow$ Conserve une description physique des processus dynamiques et des transferts de masse.

Conclusions

Modèle de l'objet écoulement permet :

- **Simuler des événements catastrophiques importants qui mènent à des dépôts significatifs ;**
- **Très peu coûteux en temps calcul :**
  - **Inversion automatique qui permet de tester des scénarios (détermination des conditions initiales et des paramètres) ;**
  - **Envisageable de simuler des séries d'événement et de former des séquences de dépôt multi-événementielles.**

Développements

- **Modèle :**

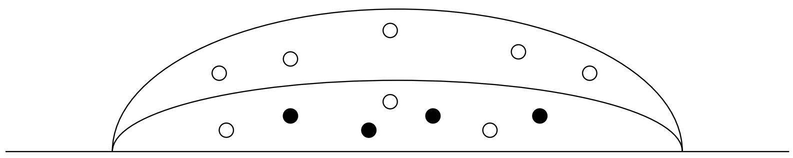
1. **Implémenter les écoulements haute densité (lois de comportement) ;**
2. **Formulations pour d'autres types d'objets géométriques.**
3. **Modèle de conditions initiales ;**
4. **Équation de l'énergie.**

Développements

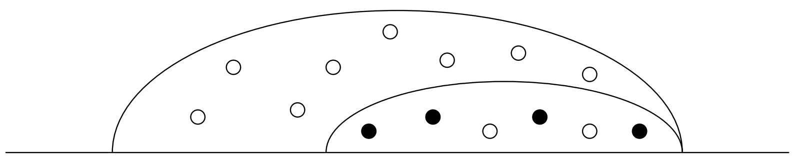
- **Lien avec le modèle stratigraphique IFP :**
  1. **Trouver des macro-lois à l'aide :**
     - **solutions analytiques ;**
     - **simulation de séries d'événement.**
  2. **Simuler directement des événements catastrophiques.**

Multilithology

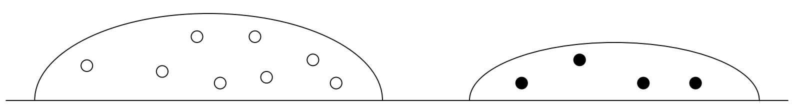
In phase :



Out of phase :



Independent :

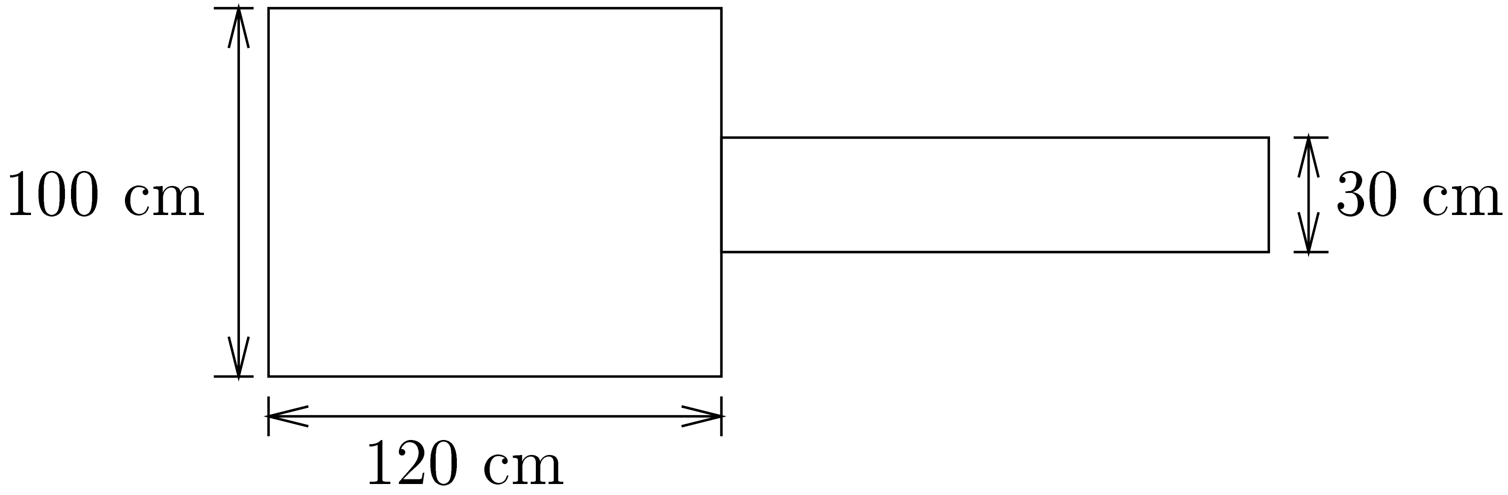


Apport de la Modélisation Analogique

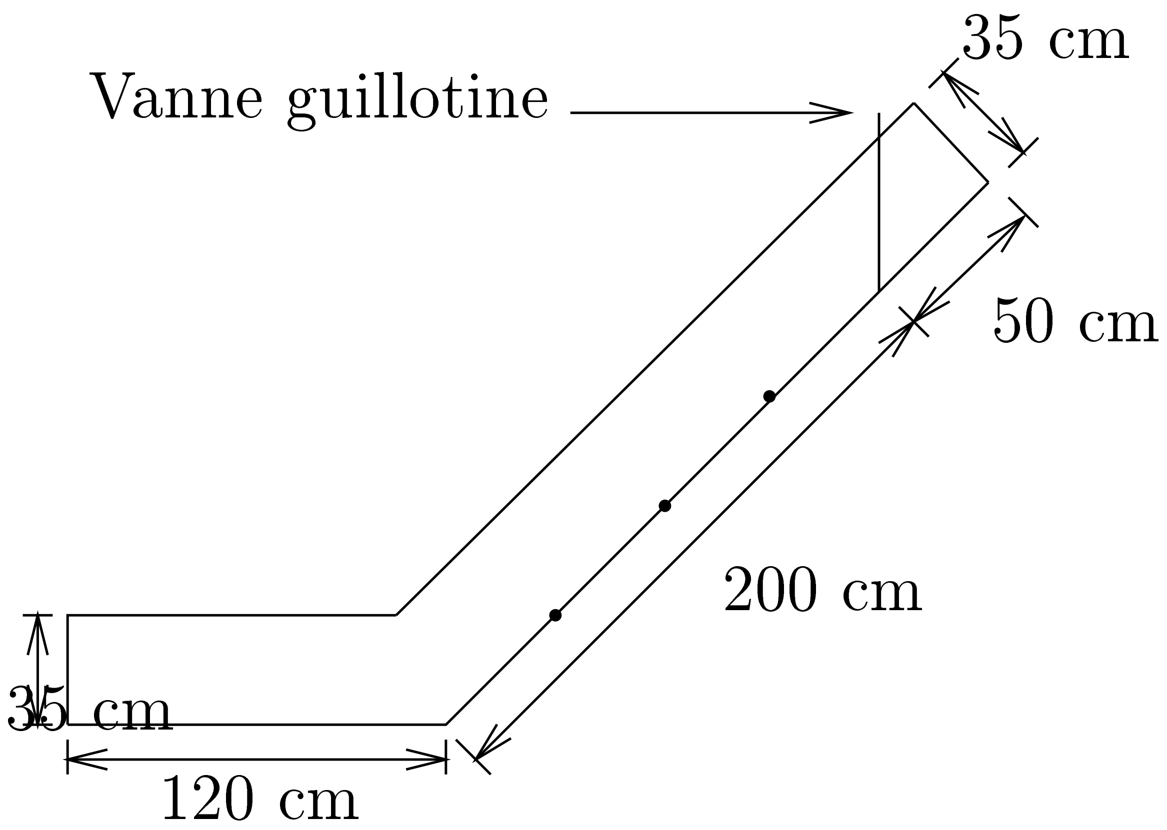
Deux types d'expériences en canal :

1. **Classique : "Logique modèle"**
   $\Rightarrow$ validation dynamique
   (mesures de vitesses, hauteurs, longueurs...)
2. **Multi-granulométrique : "Logique dépôt"**
   $\Rightarrow$ validation géologique
   (mesures des hauteurs de dépôt, stratifications internes...)

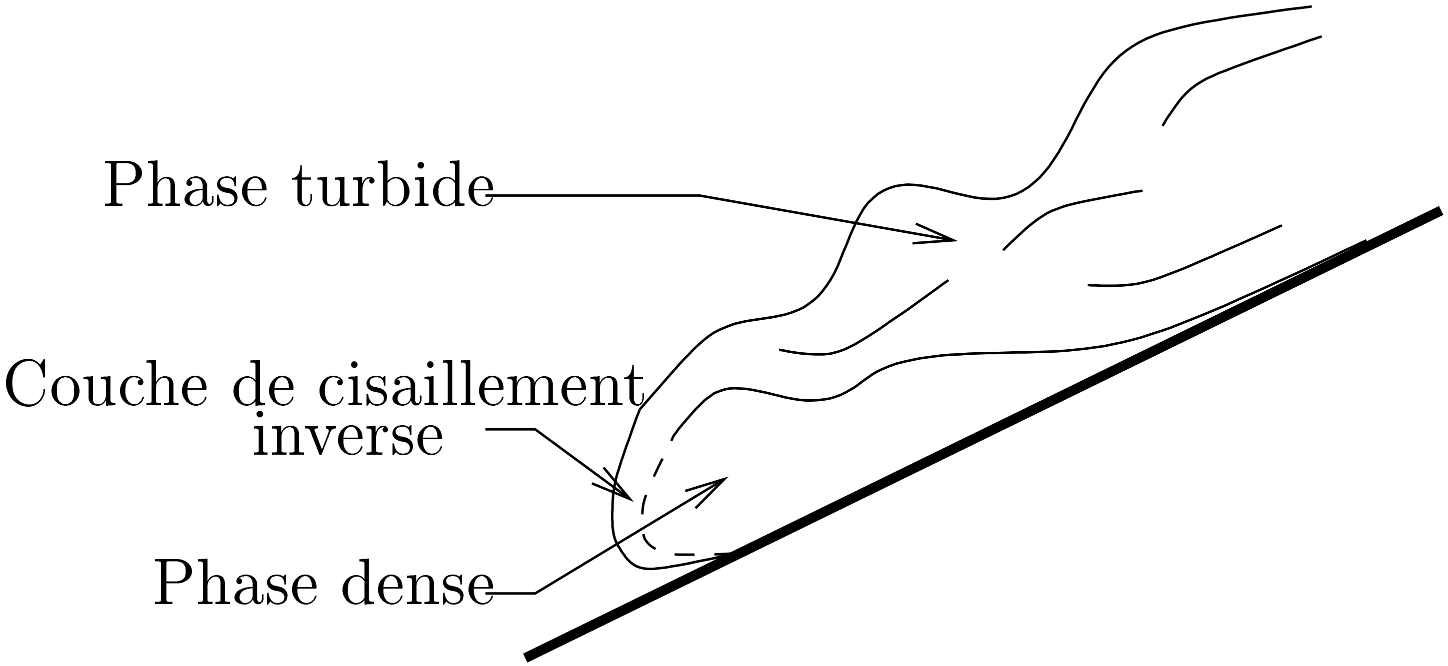
Dispositif Expérimental : Dessus



Dispositif Expérimental : Profil

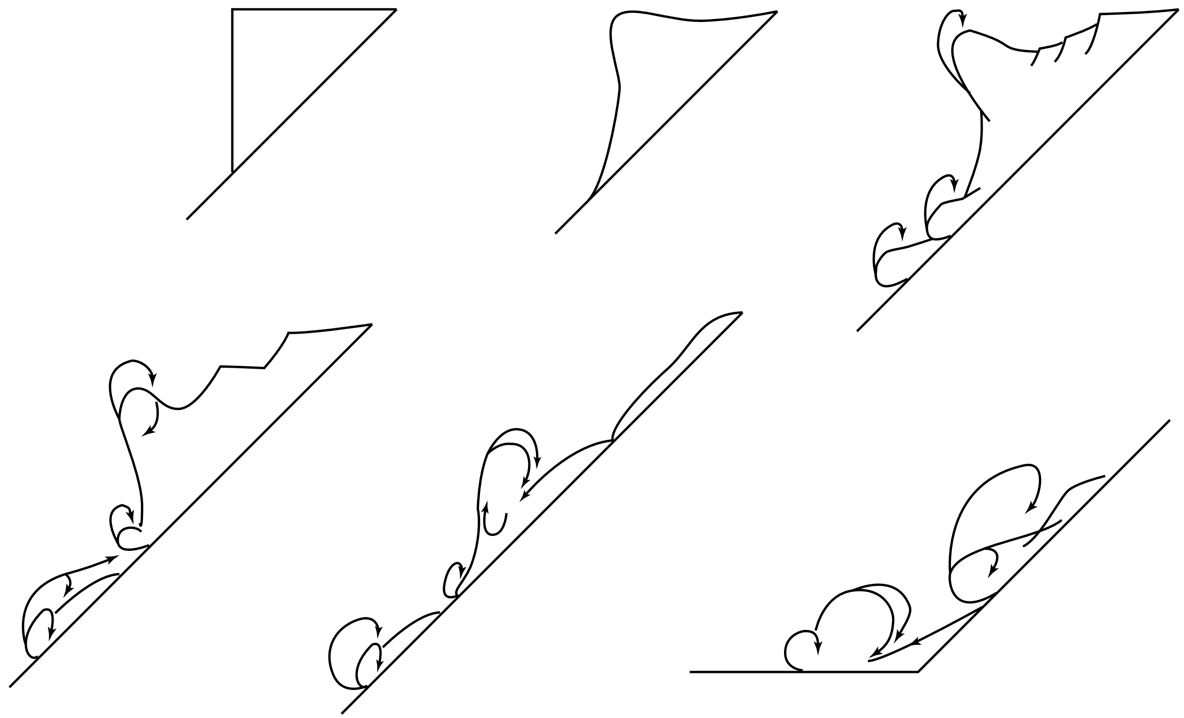


Structure des Écoulements



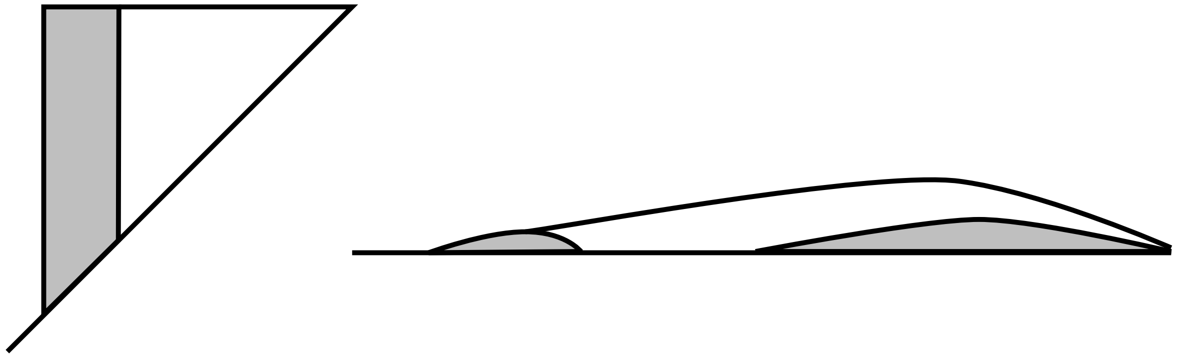
⇒ **Importance des lois de comportement.**

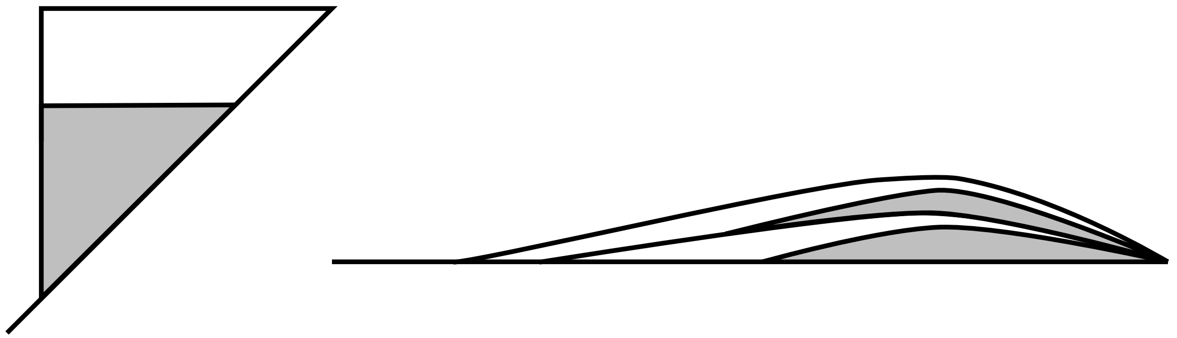
Évolution des Écoulements



⇒ **Importance des déformations des écoulements.**

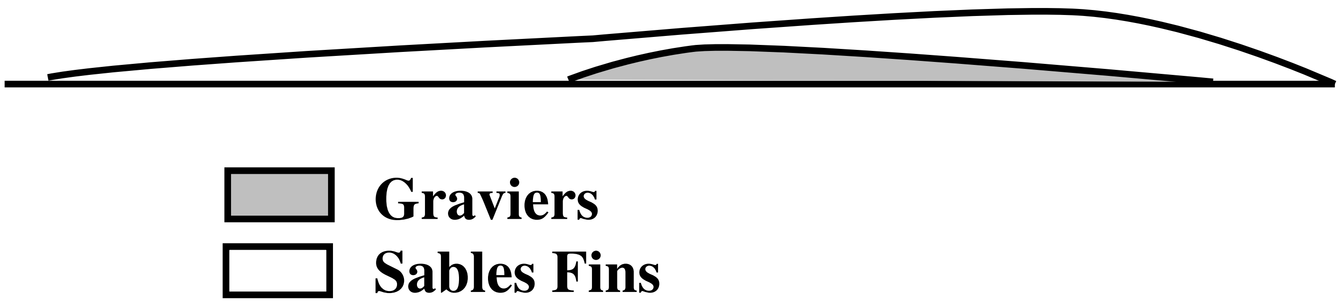
Corrélations Conditions Initiales / Dépôt





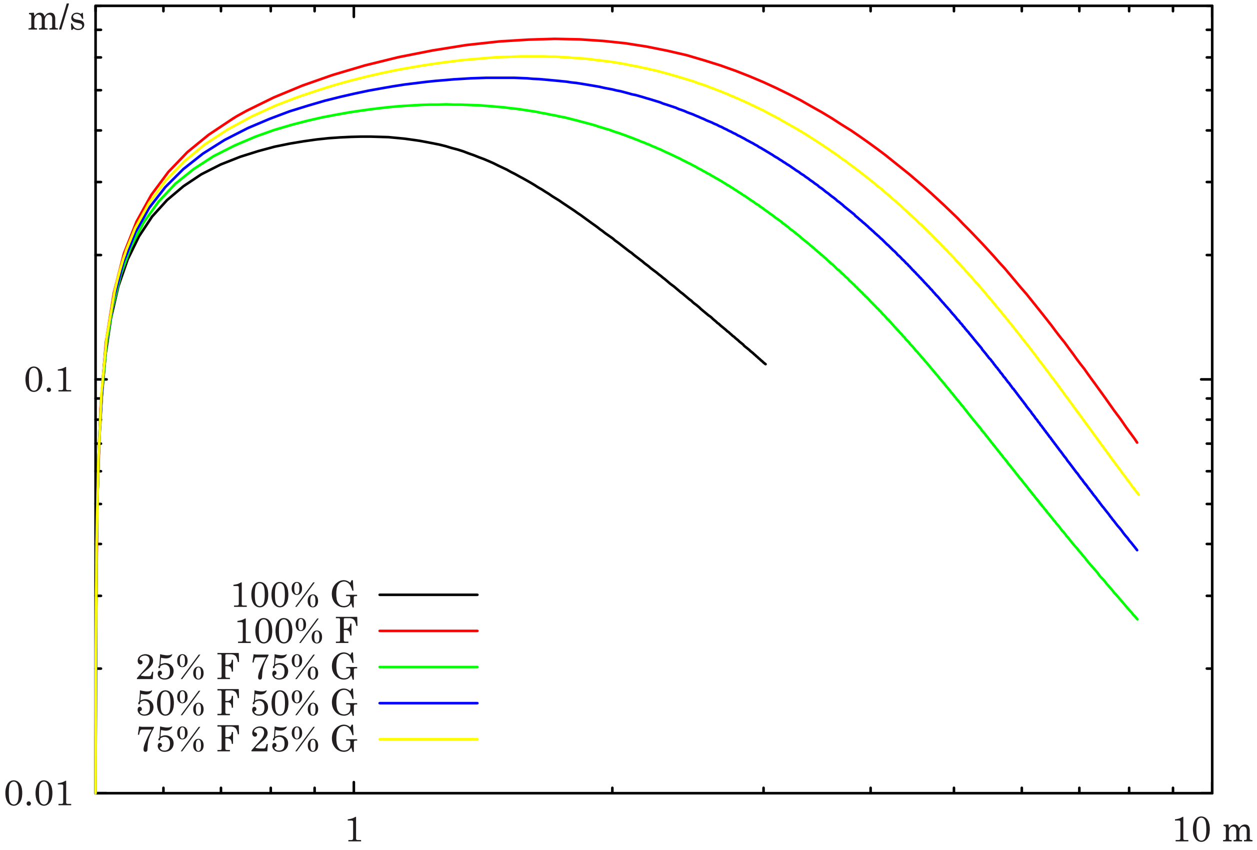
⇒ **Importance des Conditions Initiales.**

Mise en Évidence de la Ségrégation

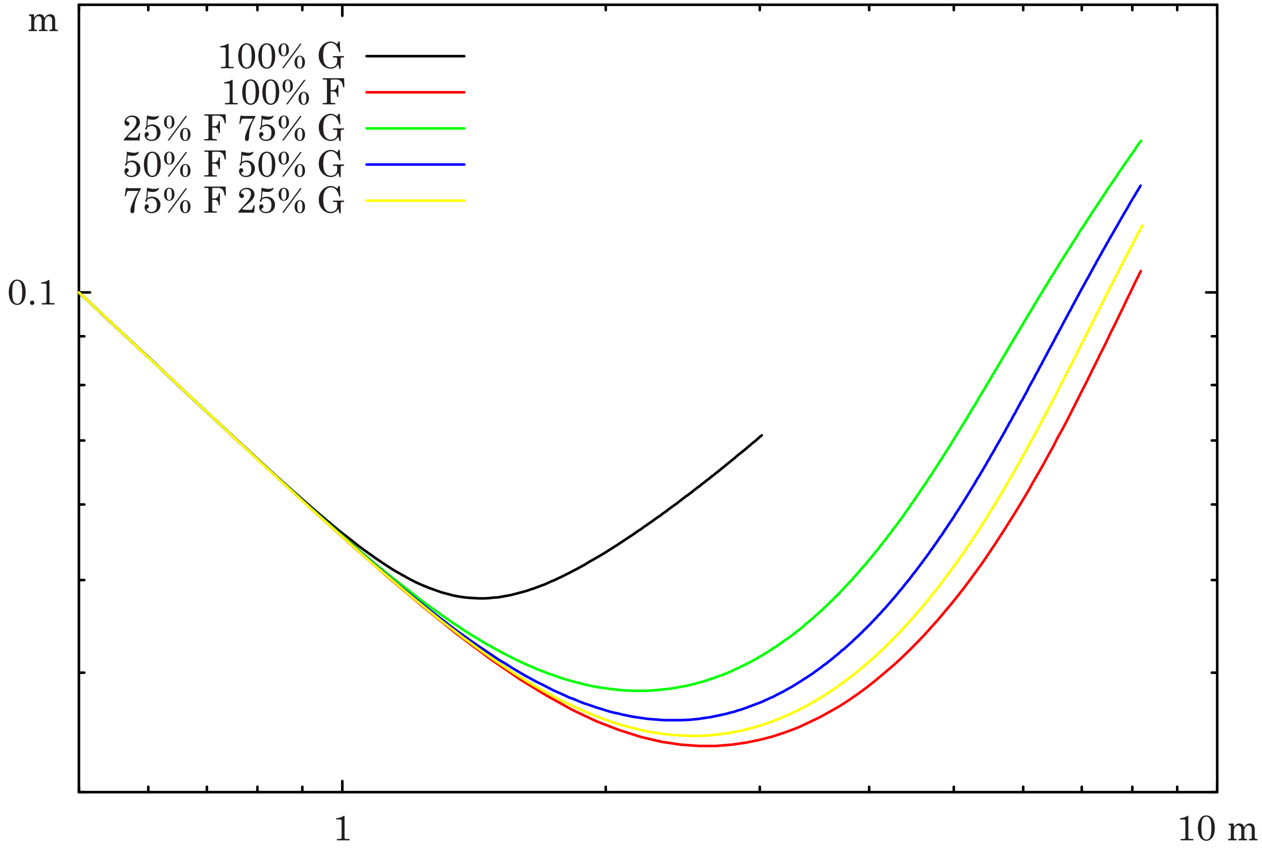


⇒ **Importance de la Multi-granulométrie.**

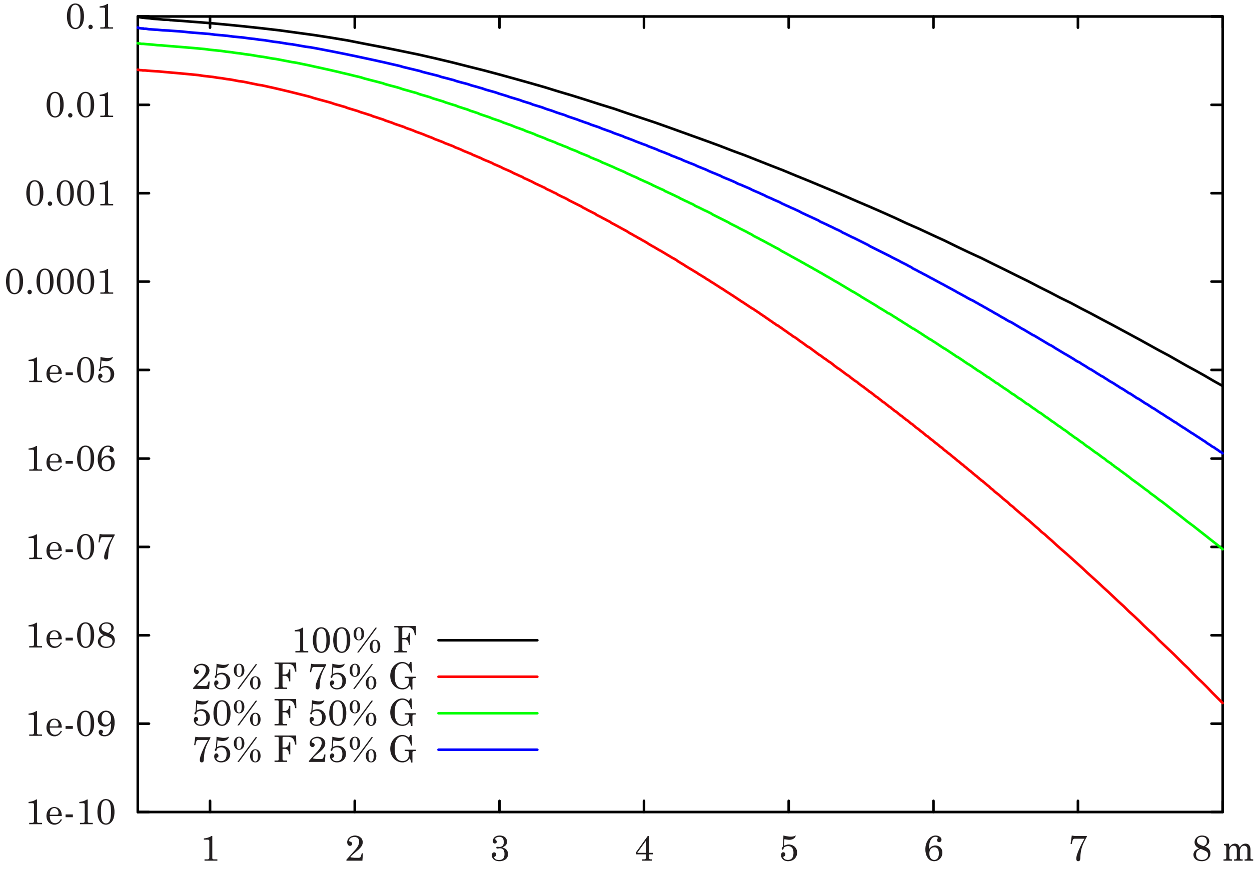
Multi-granulométrie



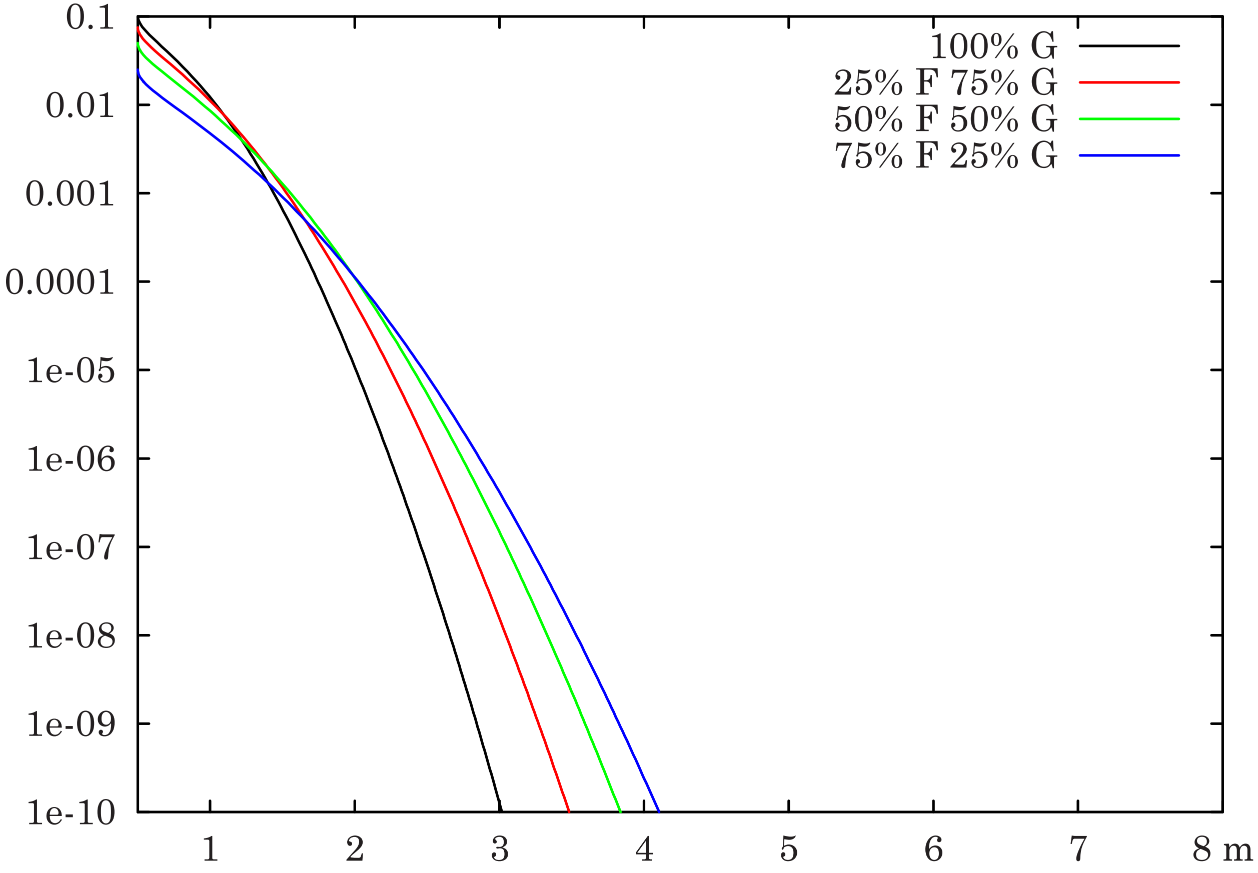
Vitesse en fonction de la position du front. Mélange de deux tailles de particules. % G = pourcentage de particules de 500 μm, % F = pourcentage de particules de 100 μm.



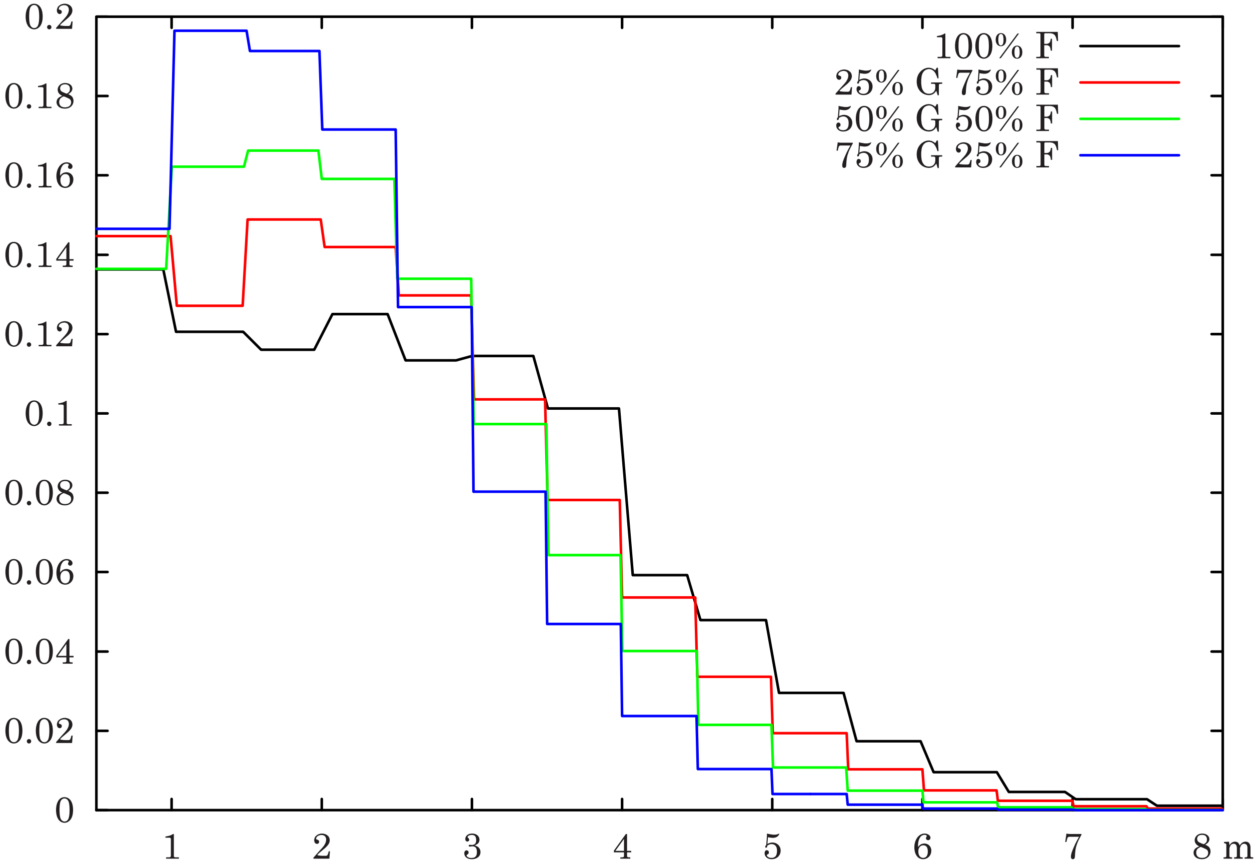
Hauteur en fonction de la position. Mélange de deux tailles de particules. % G = pourcentage de particules de 500 μm, % F = pourcentage de particules de 100 μm.



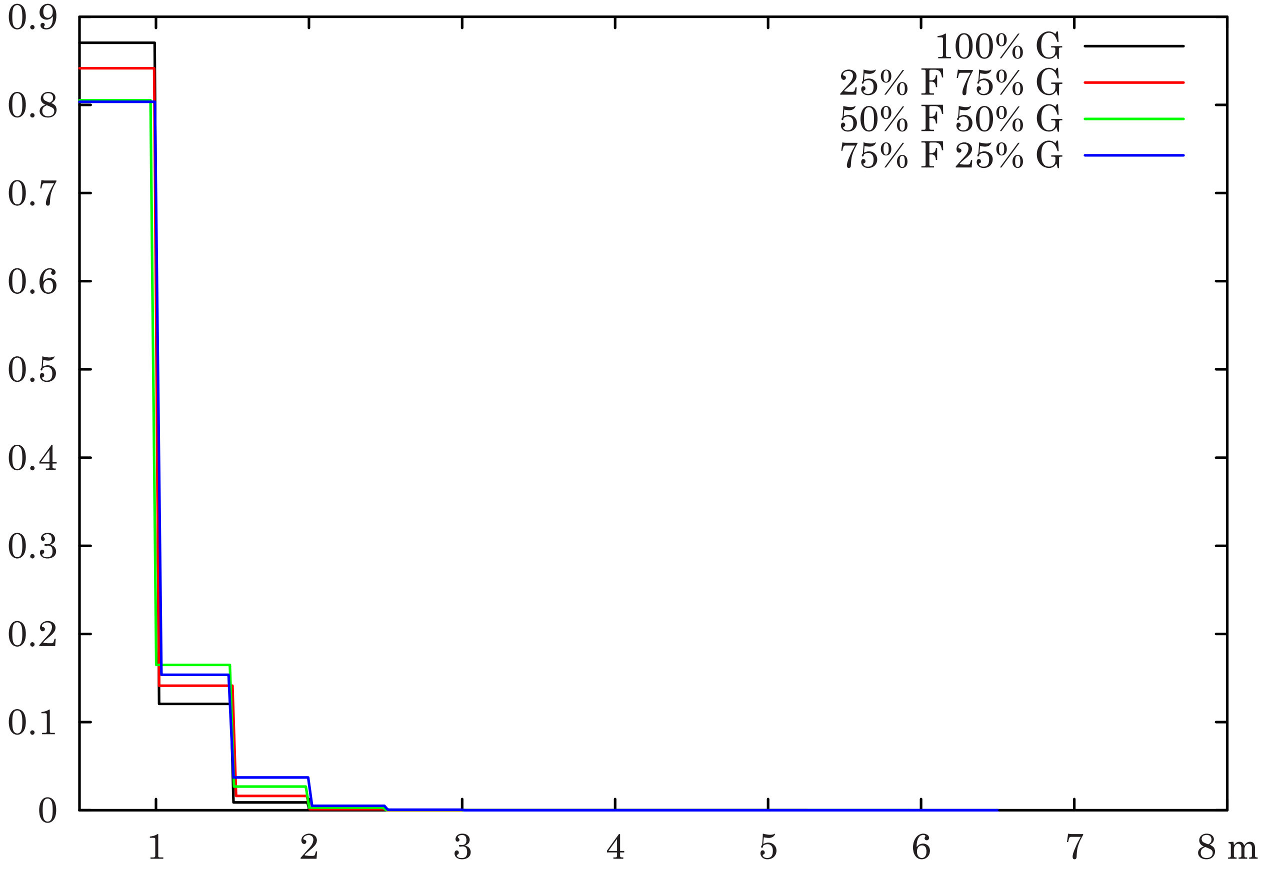
Évolution de la fraction volumique en fonction de la position. Particules fines. % G = pourcentage de particules de 500 μm, % F = pourcentage de particules de 100 μm.



Évolution de la fraction volumique en fonction de la position. Particules grossières. % G = pourcentage de particules de 500 μm, % F = pourcentage de particules de 100 μm.

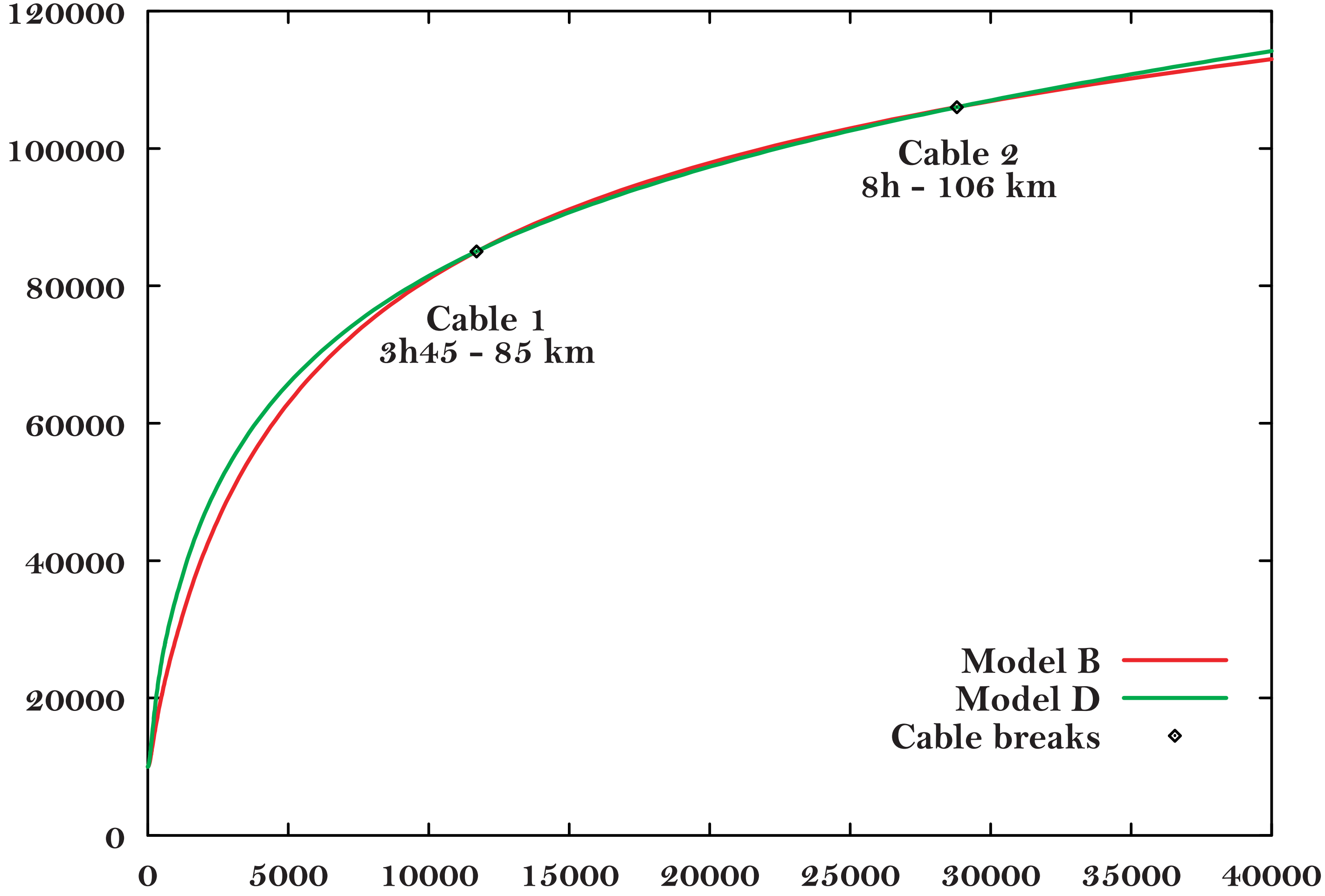


Histogramme de répartition du sable. Particules fines. % G = pourcentage de particules de 500 μm, % F = pourcentage de particules de 100 μm.

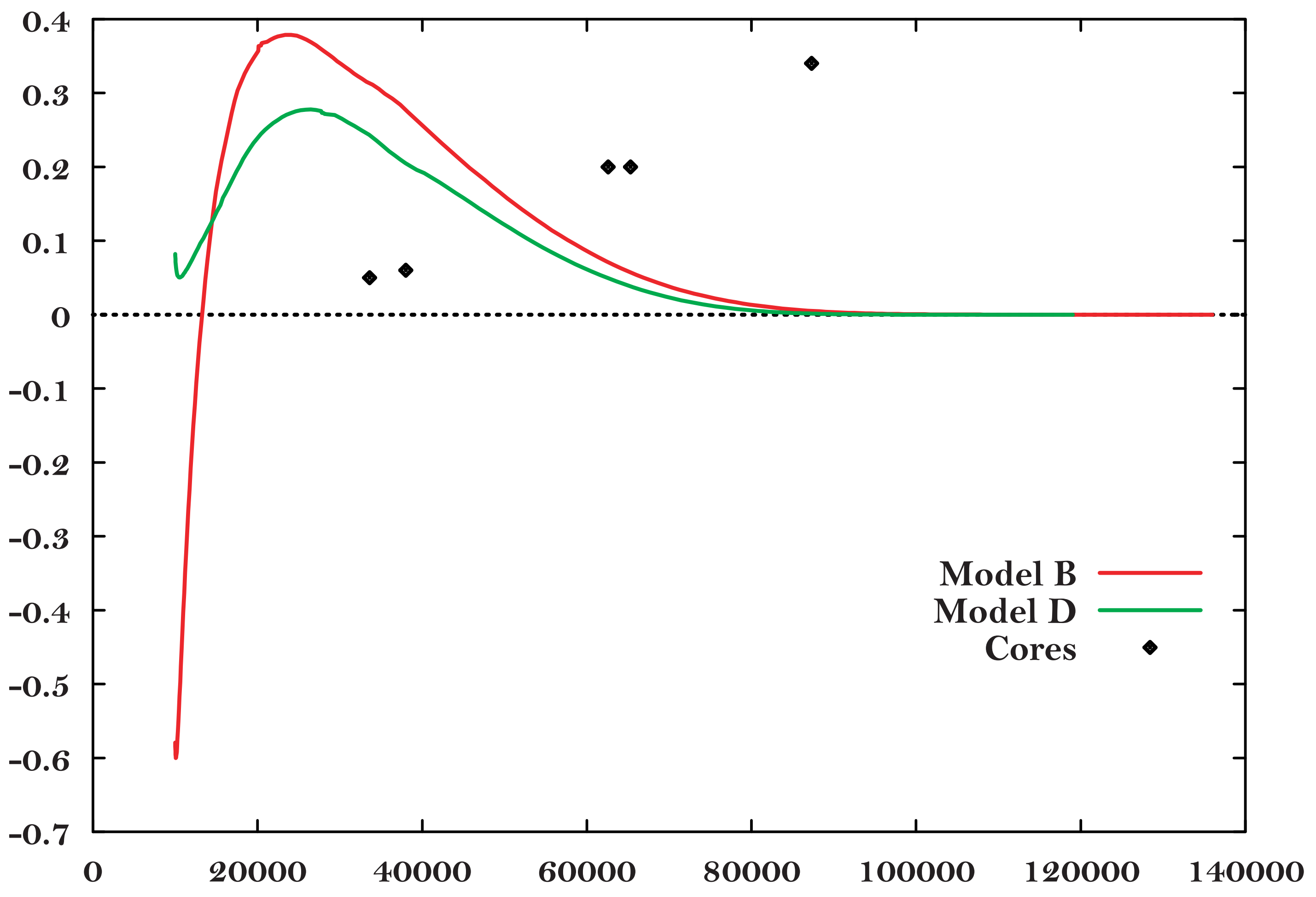


Histogramme de répartition du sable. Particules grossières. % G = pourcentage de particules de 500 μm, % F = pourcentage de particules de 100 μm.

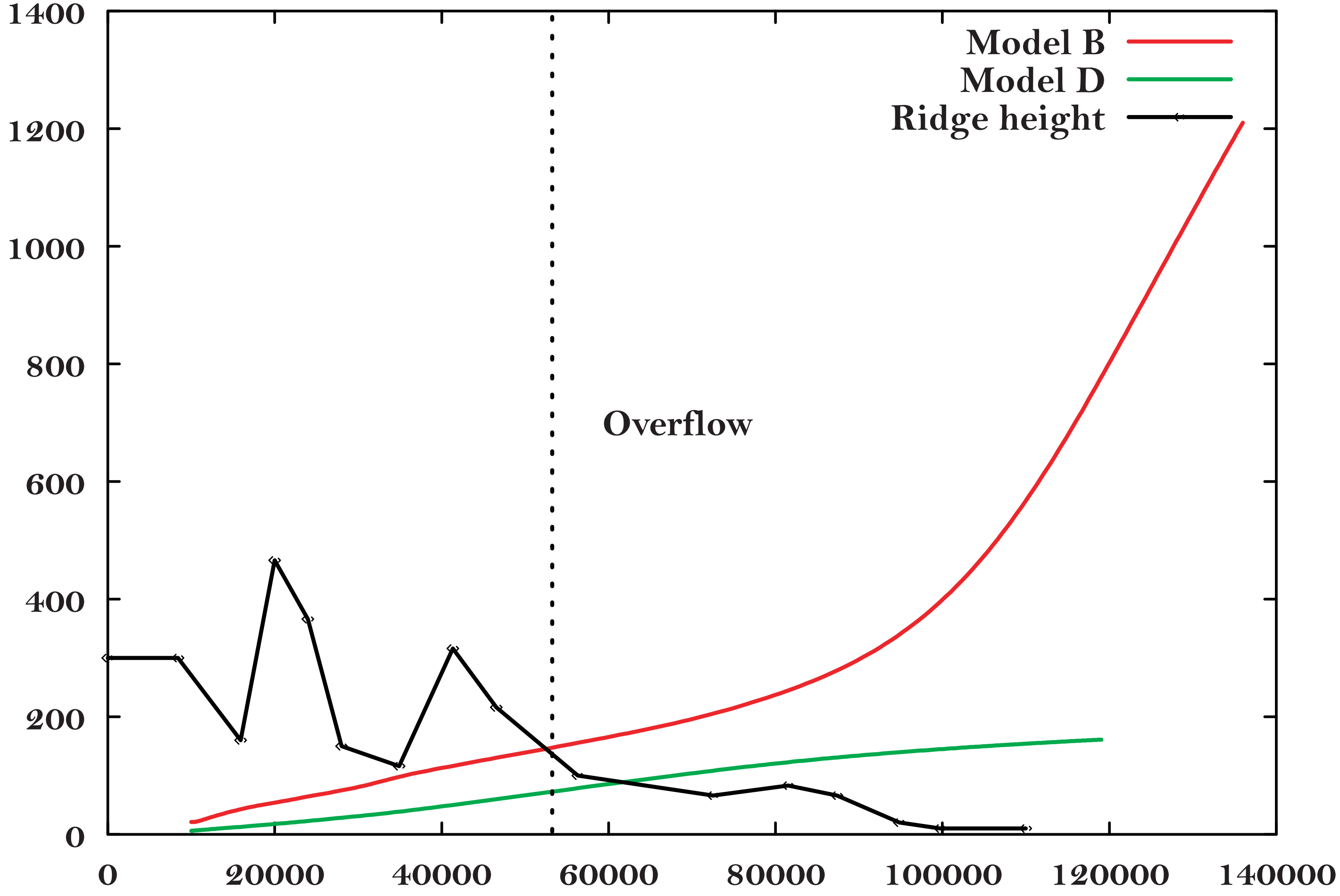
Position du front en fonction du temps



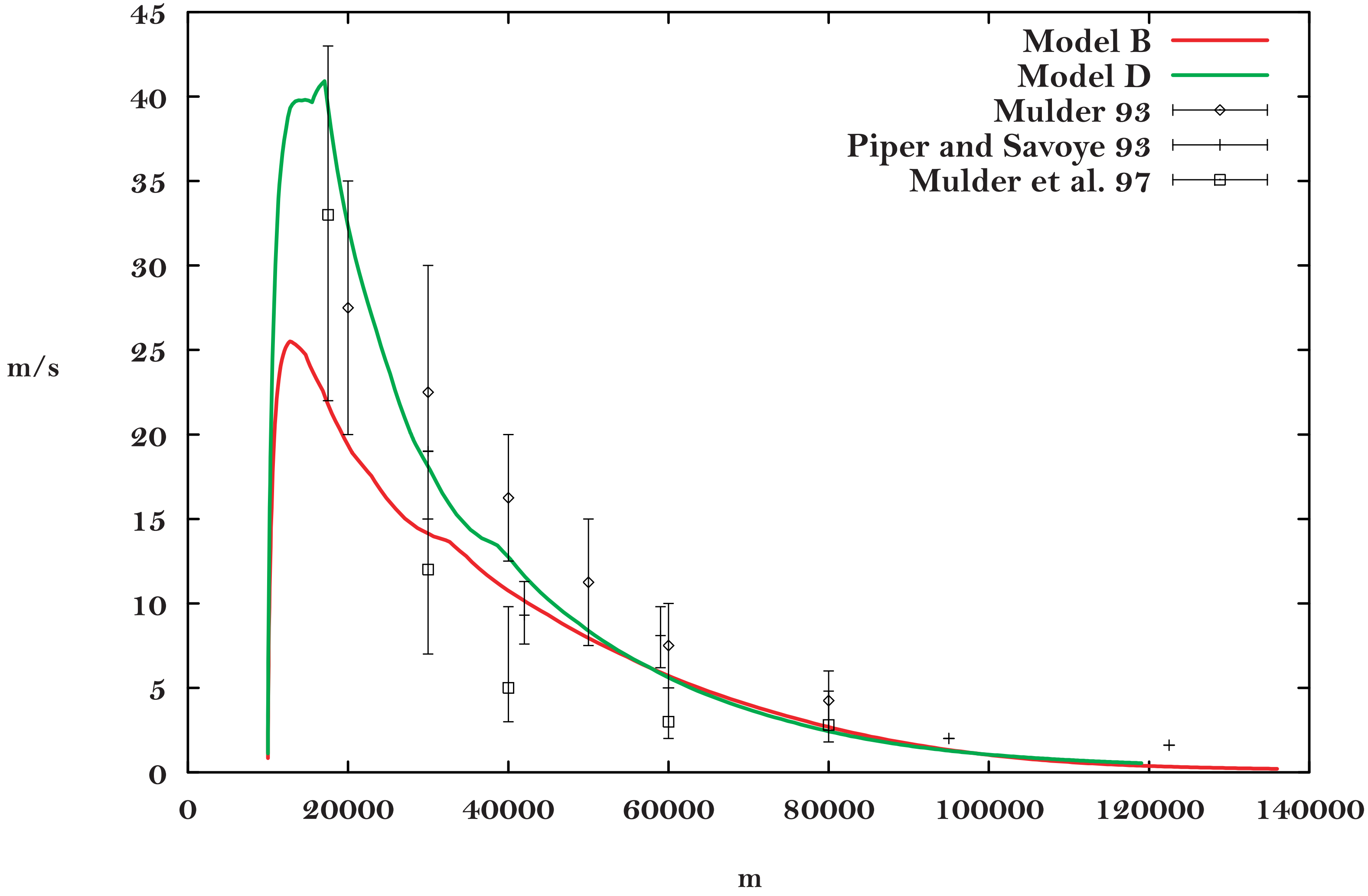
Hauteurs sédimentées en fonction de la position



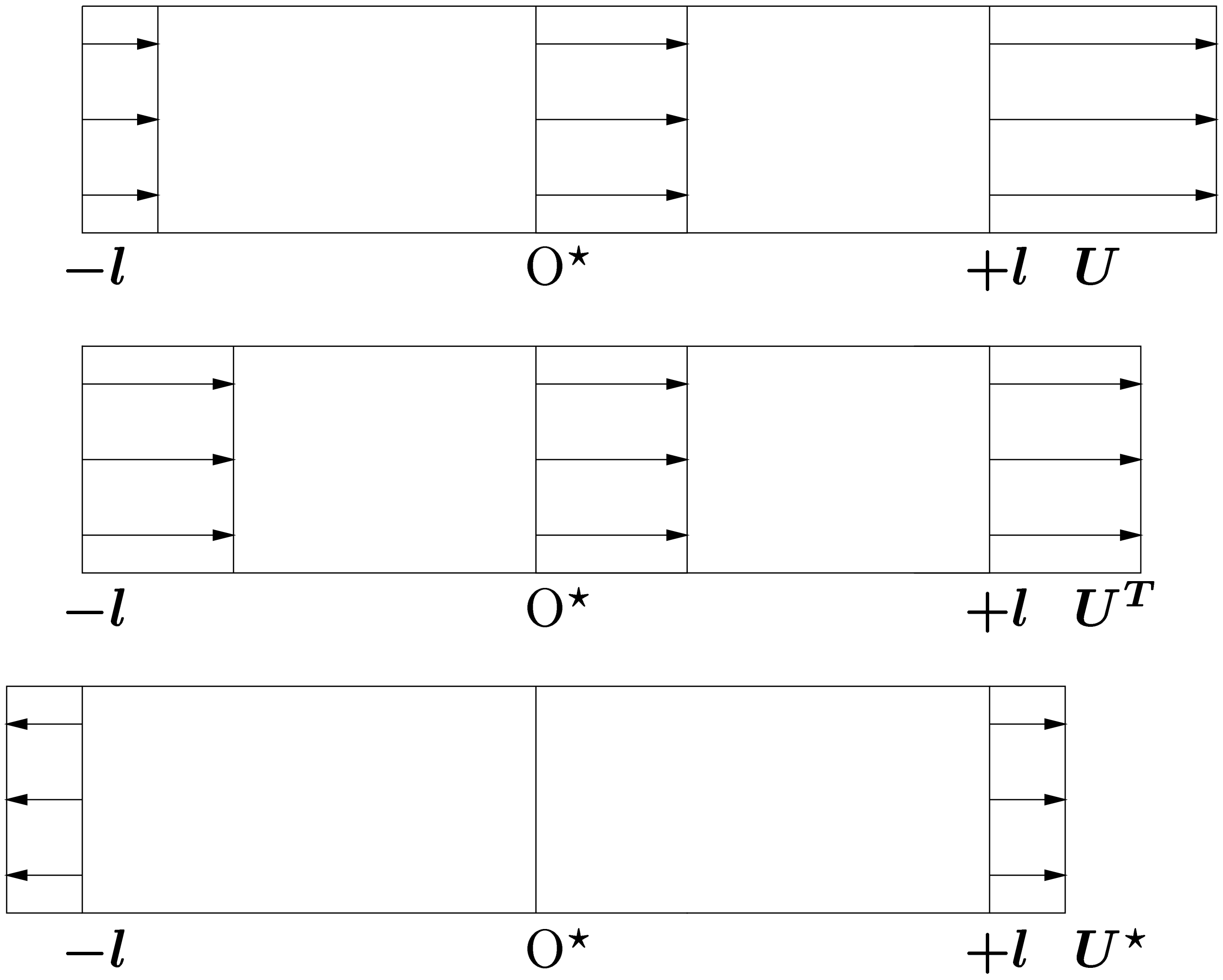
Hauteurs en fonction de la position



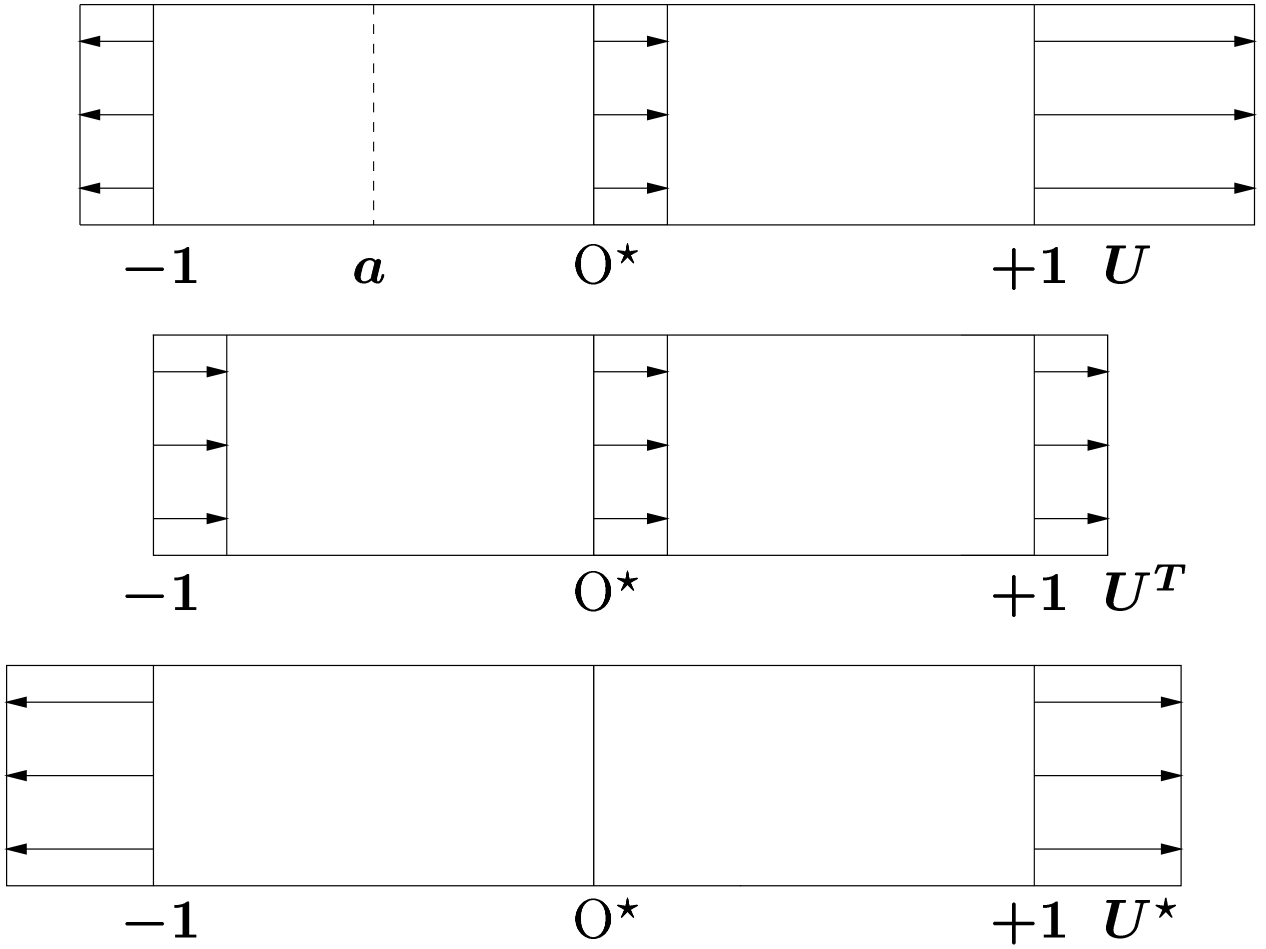
Vitesses en fonction de la position



Décomposition du champ de vitesse $(U > 0)$



Décomposition du champ de vitesse



Système T (1/2)

Problème sur la hauteur $h(t)$:

$$\frac{\pi}{2}\frac{\mathrm{d}lh}{\mathrm{d}t} = \frac{C_1}{C_2 + \mathrm{Ri}}\left((1-a^2)U^\star - 2aU^T\right) l$$

Problème sur la fraction volumique $\Phi(t)$:

$$\frac{\pi}{2}\frac{\mathrm{d}\Phi lh}{\mathrm{d}t} = \Phi l \left(C_0 C_4 \left((1-a^2)U^\star - 2aU^T\right) - 2v_s C_3\right)$$

Problème sur la vitesse du barycentre $U^T(t)$:

$$\frac{\pi}{2}\frac{\mathrm{d}U^T hl}{\mathrm{d}t} = \frac{\pi}{2} hl g'_x \Phi[1-\gamma] - 2lC_0\left(\left(1-a^2\right)U^\star U^T - \frac{1}{3}a^3 U^{\star 2} - aU^{T2}\right)$$

Système T (2/2)

Problème sur la vitesse de déformation $U^\star(t)$:

$$\frac{1}{3}\frac{\mathrm{d}U^\star lh}{\mathrm{d}t} - hU^{T2} = \frac{1}{2} g'_z h^2 \Phi[1-\gamma]$$
$$- lC_0 \left(a^2 U^\star U^T + \frac{1}{3}\left(1+a^3\right) U^{\star 2} + (1+a)\, U^{T2} \right)$$

et

$$a = \begin{cases} -1 & \text{si } 1 \leq \frac{U^T}{U^\star} \\ 1 & \text{si } 1 \leq -\frac{U^T}{U^\star} \\ -\frac{U^T}{U^\star} & \text{sinon} \end{cases}$$