

**Modélisation des Écoulements Gravitaires  
Catastrophiques**

*par une*

**Approche Objet Dynamique :  
Érosion – Transport – Dépôt**

**A. Hugot**

**2 Février 2000**

## Les écoulements gravitaires

PROCESSUS	CARACTÉRISTIQUES	DÉPÔTS	
<i>Resédimentation</i>			
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  $\Leftrightarrow$  Boues & argiles

### 2. Concentrations :

Faibles  $\Leftrightarrow$  Élevées

$\Rightarrow$  Mécanismes de support des particules :

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

$\Rightarrow$  Rhéologie :

Plastique  $\Leftrightarrow$  Fluide visqueux

## Grande variabilité des échelles caractéristiques

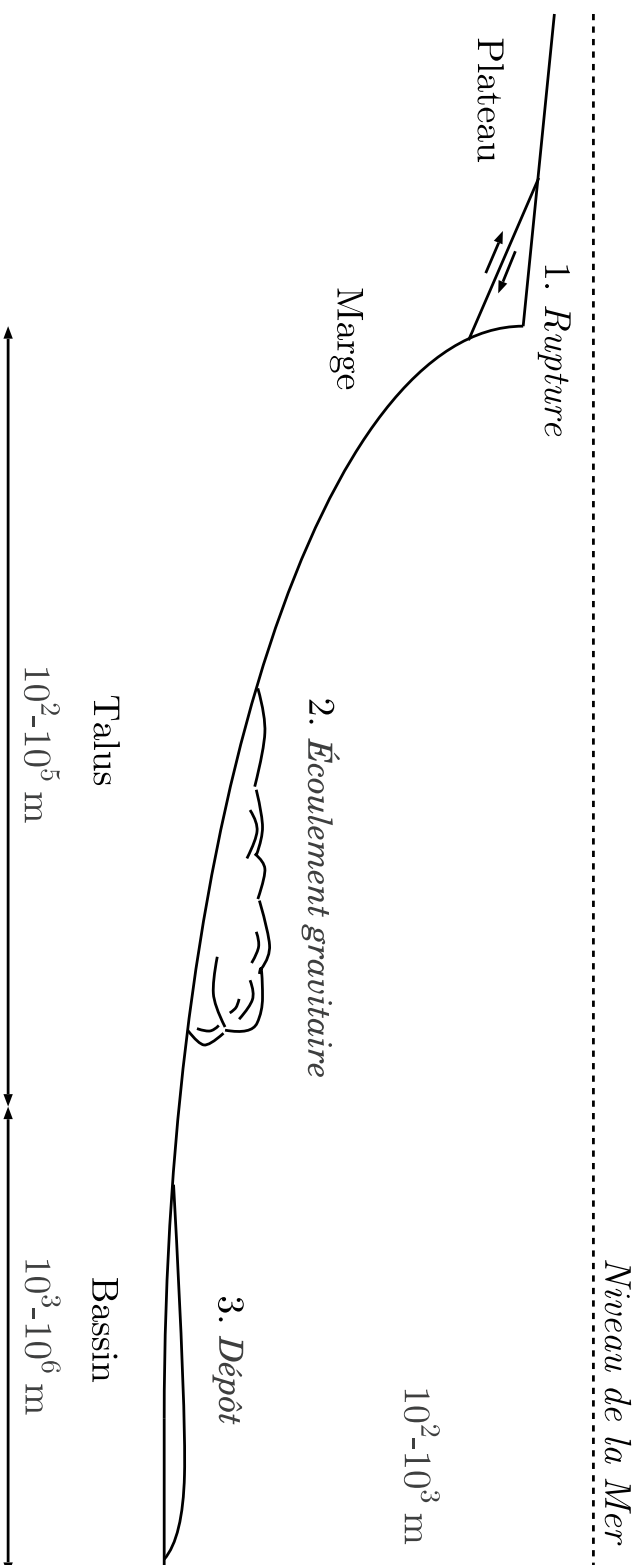
### 1. Échelles d'espace :

- 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

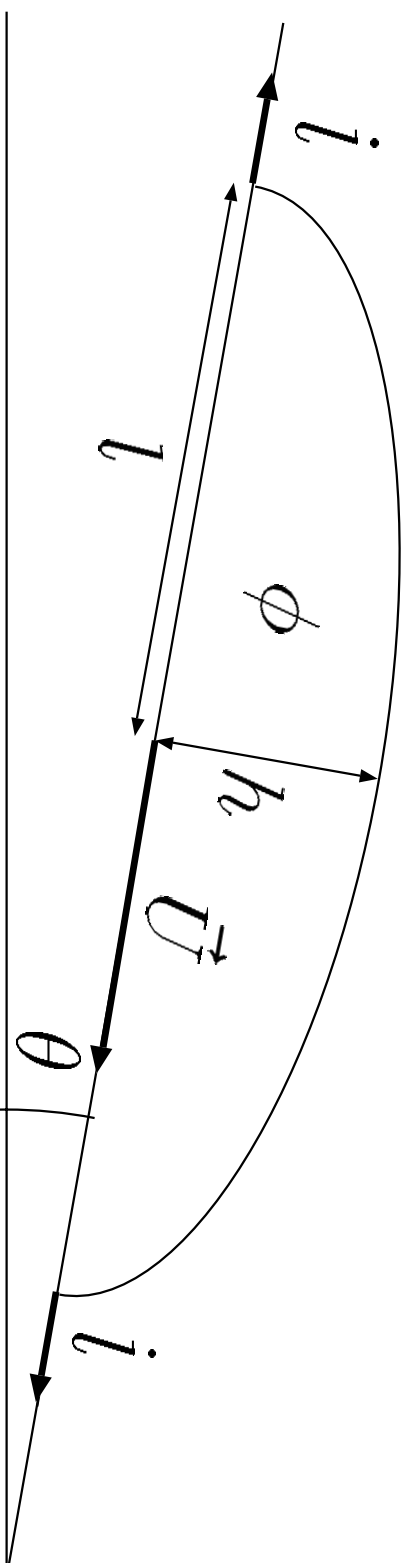
- Étude bibliographique de l'état des connaissances ;
- Développement d'un modèle & Bases physiques ;
- Validation à l'aide :
  - de solutions analytiques ;
  - de tests qualitatifs.
- Méthodologie de calage des résultats :
  - Modèles réduits analogiques ;
  - Analogie actuel : Nice, 1979.
- Conclusions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



## Techniques de Modélisation Existantes

- Dynamique Moléculaire  
(microscopique : simulation directe sur les particules)  
⇒ **Petit nombre de particules simulé (CPU  $\sim$  jours).**
  - Mécanique des Milieux Continus  
(macroscopique : Navier–Stokes, théorie de la couche limite)  
⇒ **Petit nombre d'écoulements simulé (CPU  $\sim$  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:  $\phi$

### L'écoulement est :

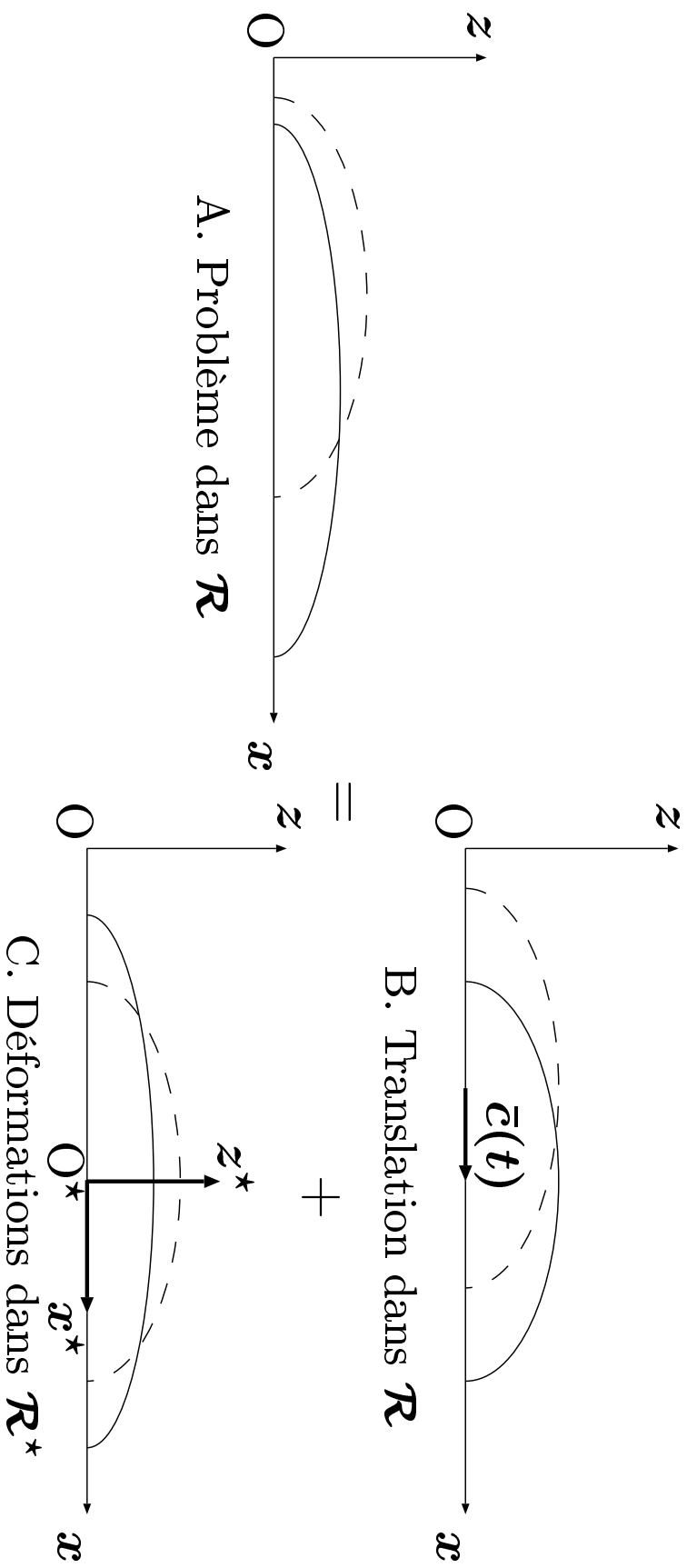
1. Mince :  $h \ll l$  (Hypothèse de la couche limite) ;
2. Dilué :  $\phi < 0.1$  ( $\phi \ll 1$  Approximation “de Boussinesq”) ;
3. Turbulent :  $Re \sim \left(\frac{h}{l}\right)^{-3/2}$ .

## 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 :  $(Uhl)' = g' \phi h l \sin \theta - C_0 l f_1(U^2, i^2, U i)$

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

Incorporation de fluide :  $(hl)' = \frac{C_1}{C_2 + Ri} l f(i, U)$

Érosion & Sédimentation :  $(\phi h l)' = (C_4 C_0 f(i, U) - C_3 V_s) \phi l$

$U$  : vitesse moyenne;  $h$  : hauteur;  $l$  : longueur;  $\phi$  : fraction volumique;

$\theta$  : 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 :

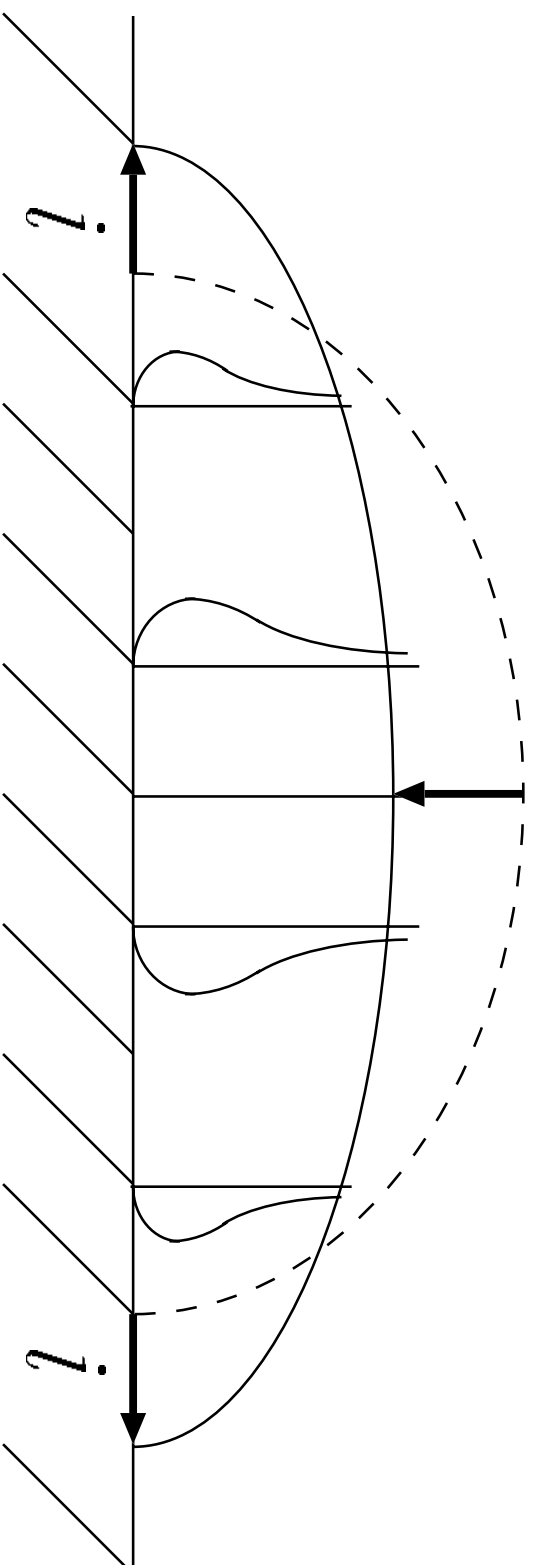
$$(Uhl)' = g' \phi h l \sin \theta - C_0 l f_1(U^2, i^2, U i) \\ \dot{X} = U$$

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

$U$  : vitesse moyenne;  $h$  : hauteur;  $l$  : longueur;  $\phi$  : 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

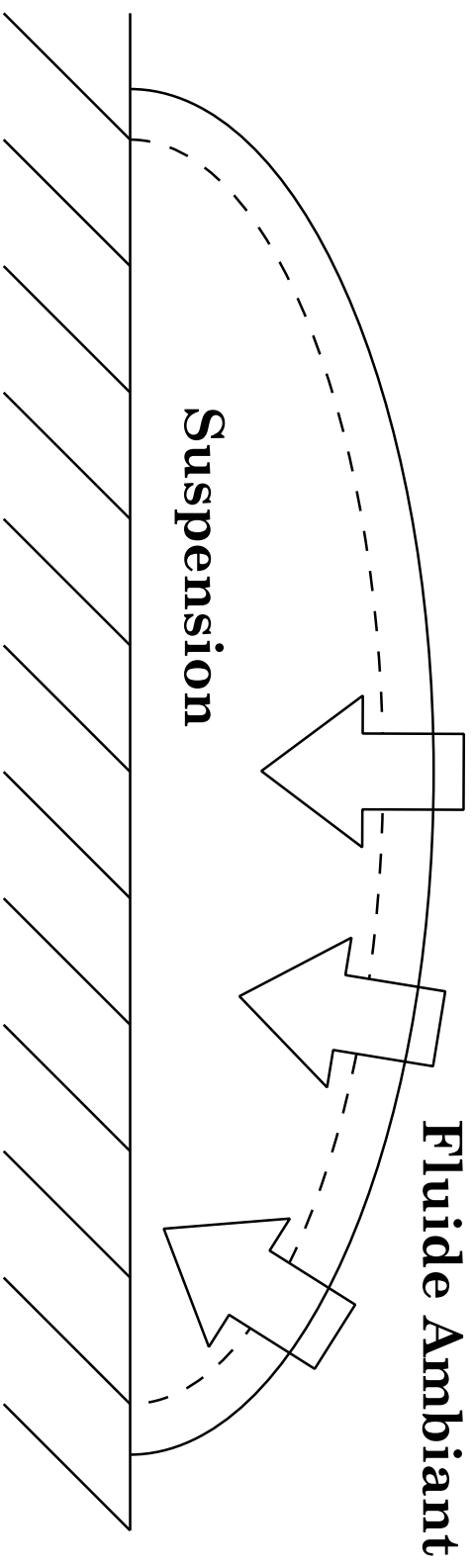
$$(ihl)' = \frac{1}{2}g' \phi h^2 \cos \theta - C_0 l f_2(i^2, U^2, U i)$$

⇒ *Résolution* : Calcul de la vitesse d'étalement de l'écoulement  $i$ .

$i$  : 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

$$(hl)' = \frac{C_1}{C_2 + Ri} l f(i, U)$$

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

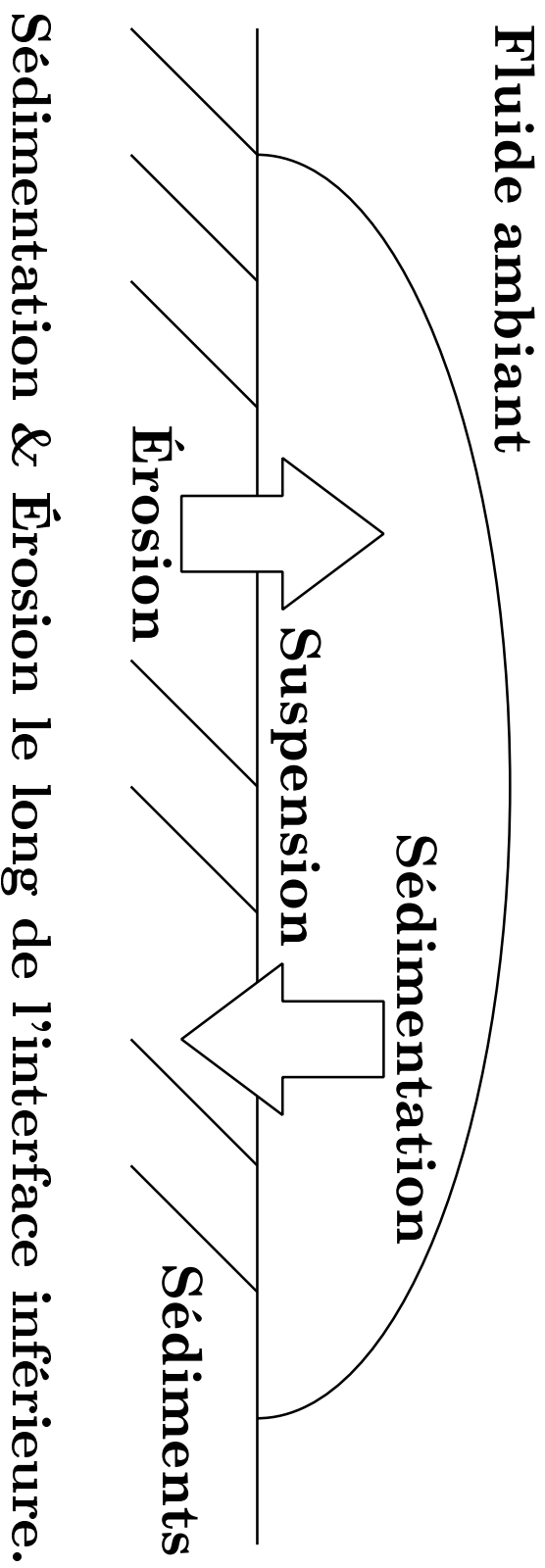
$U$  : vitesse moyenne;  $l$  : vitesse d'étalement;

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

$Ri$  : nombre de Richardson modifié;

$f$  : fonction linéaire des vitesses.

## Transferts de particules



## Transferts de particules

Deux flux :

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

Modélisés par :

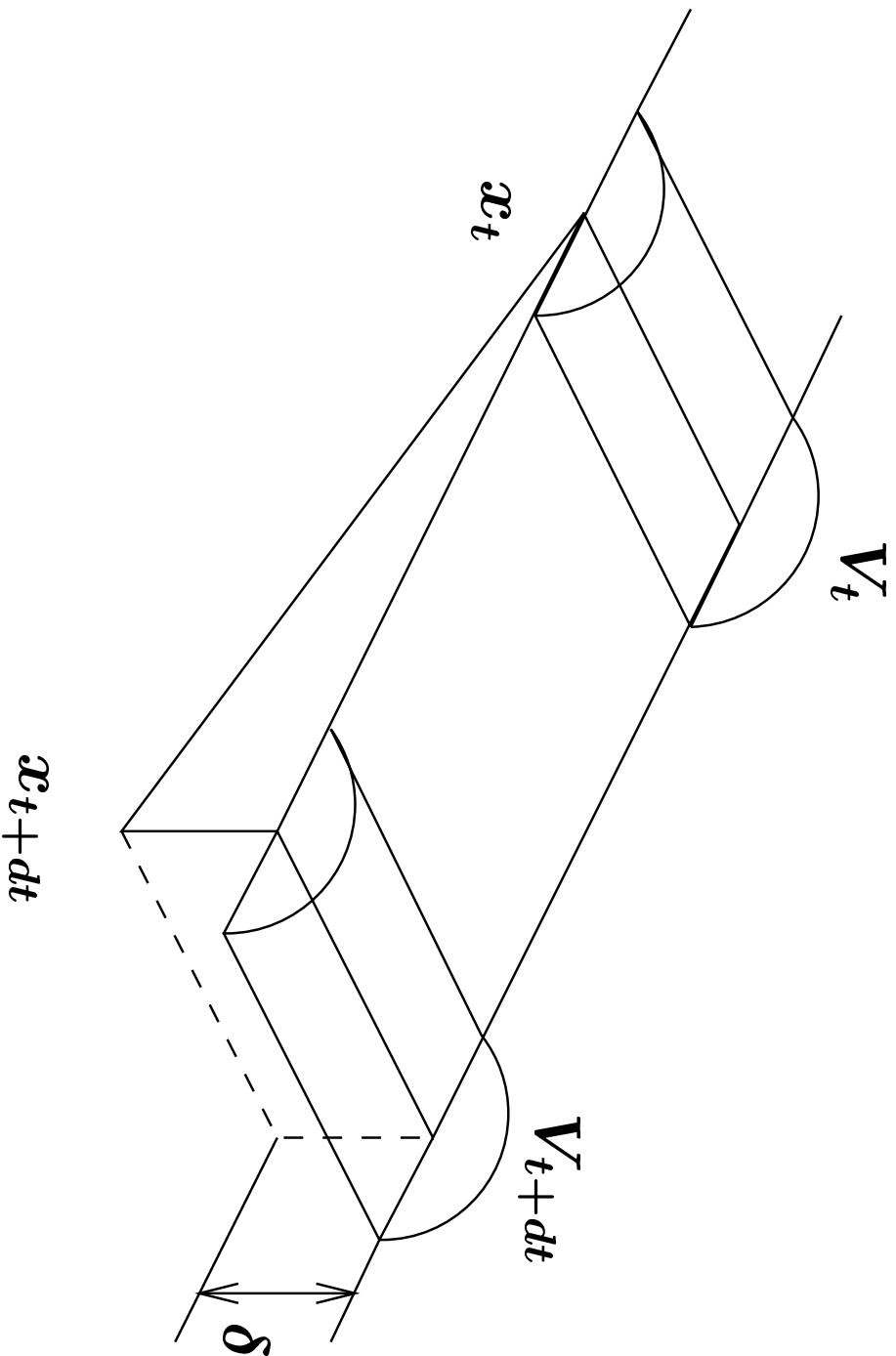
$$(\phi h)' = (C_4 C_0 f(i, U) - C_3 V_s) \phi h$$

⇒ *Résolution* : Calcul de la fraction volumique des sédiments  $\phi$ .

$C_4$ : 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 :*

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

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{Érosion} & \text{si } \Delta(\phi hl) > 0, \\ \text{Conservation} & \text{si } \Delta(\phi hl) = 0, \\ \text{Dépôt} & \text{si } \Delta(\phi hl) < 0. \end{array} \right.$$

⇒ *Résolution* : Calcul de la hauteur du dépôt  $\delta$ .

$V_{\text{dépôt}}$ : Volume déposé pendant un pas de temps;

$V_t$ : Volume de particules à l'instant  $t$ ;

$\delta$ : 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  $X^{\gamma}$ :

- **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  $t \rightarrow \infty$ , des solutions de la forme\* :

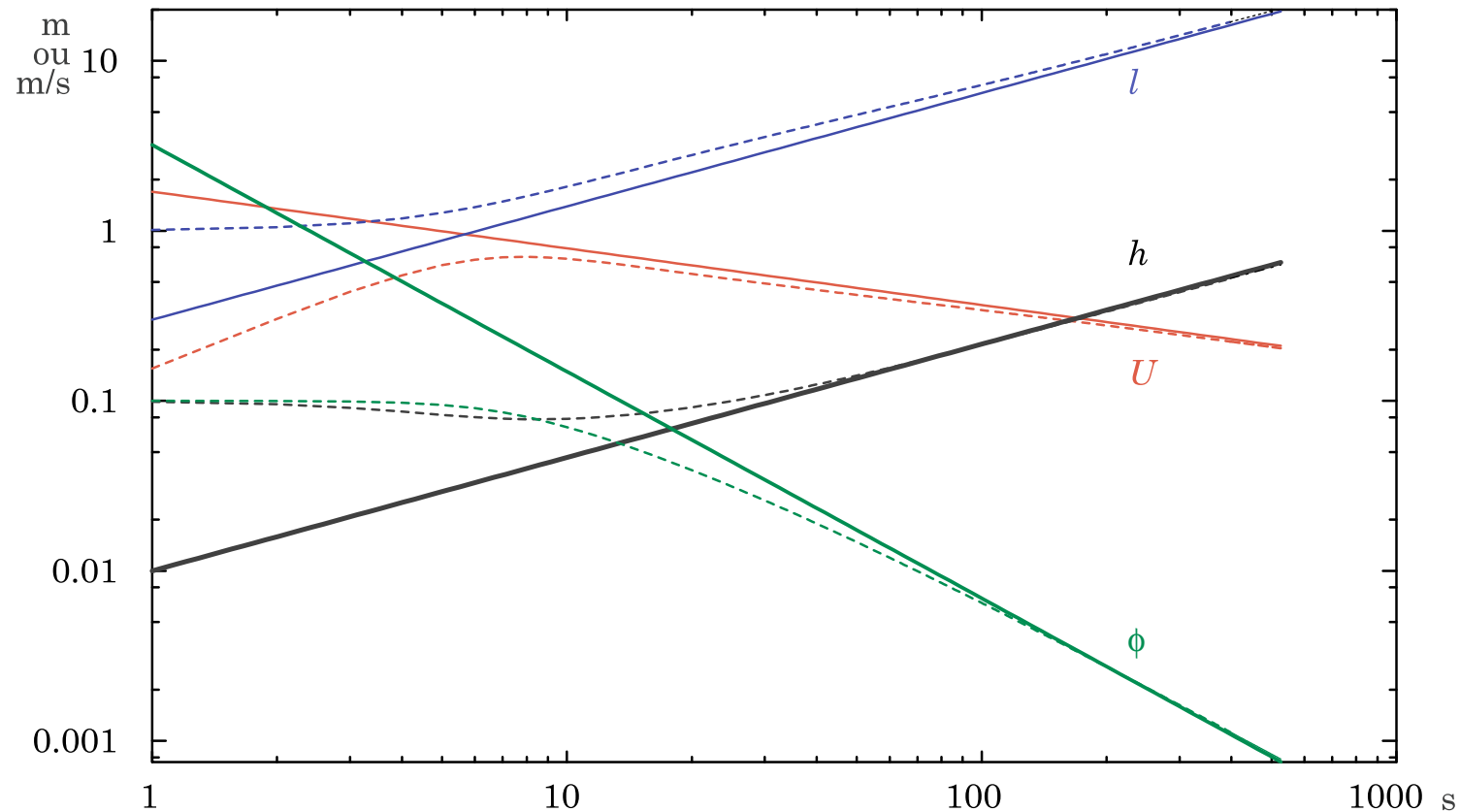
$$U \sim t^{\alpha_U} \quad l \sim t^{\alpha_l} \quad h \sim t^{\alpha_h} \quad \phi \sim t^{\alpha_\phi} f_\phi(t)$$

	$\alpha_U$	$\alpha_l$	$\alpha_h$	$\alpha_\phi$	$f_\phi$
Cas A	$\frac{-3+4\gamma}{9-4\gamma}$	$\frac{6-2\gamma}{9-4\gamma}$	$\frac{6}{9-4\gamma}$	$\frac{2-6+\gamma}{9-4\gamma}$	1
Cas B	$\alpha - 1$	$\alpha$	$\alpha$	$-2\alpha$	$\exp(C_i, \alpha, v_s)$

$$\text{avec } \alpha = \frac{1}{3 + \frac{4G_0}{E}}.$$

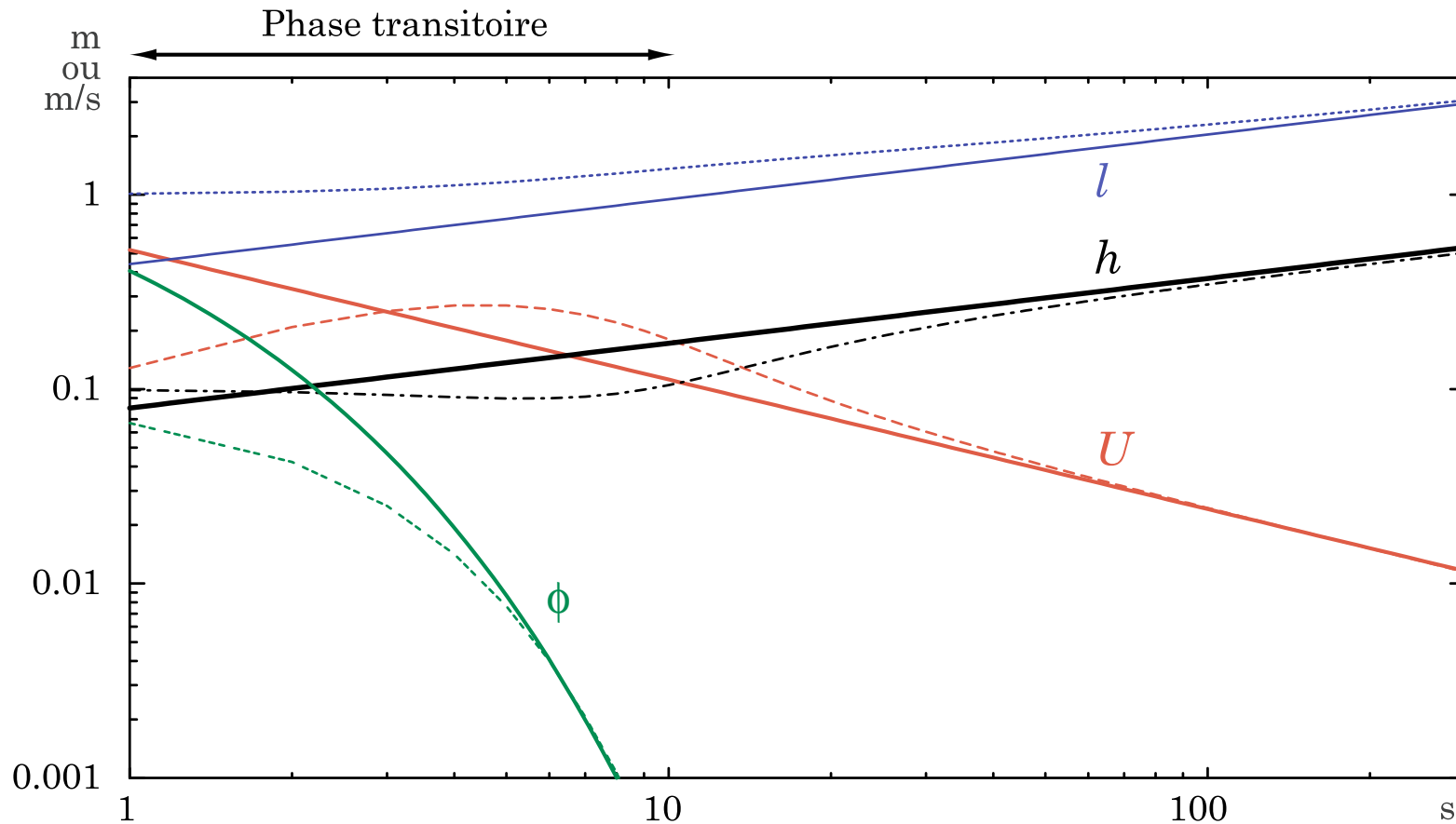
\*termes du premier ordre de la série en temps  $\sum_{n=0}^{\infty} a_n t^{\alpha-n}$ .

## 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

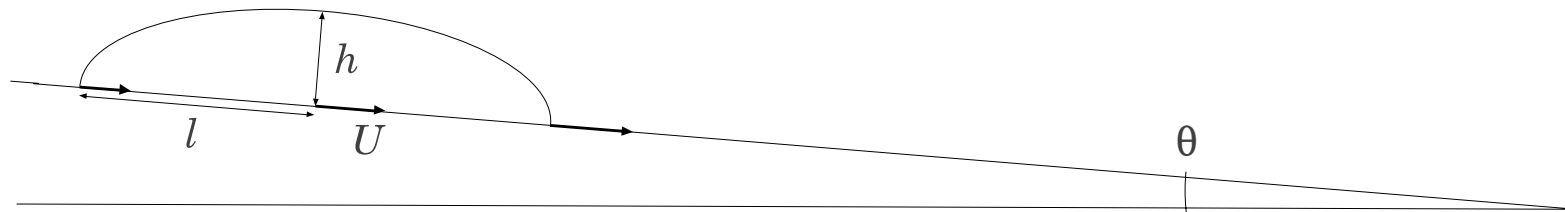
### Tests Qualitatifs

#### Tester l'influence :

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

## Tests Qualitatifs

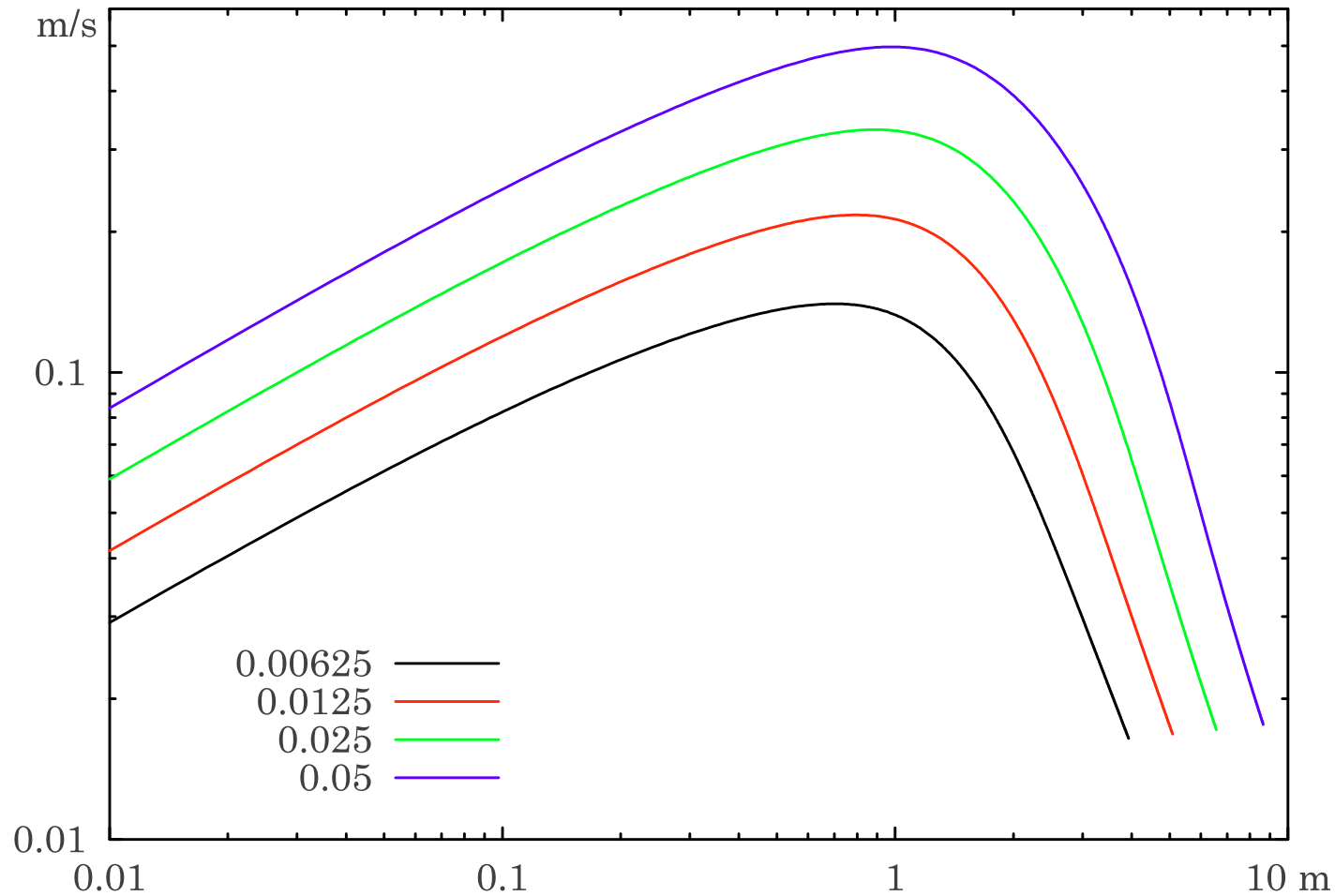
### Géométrie test



---

$$U_0 \equiv 0; \quad \phi_0 \equiv 0,05; \quad h_0 \equiv 0,01\text{m}; \quad \theta \equiv 5^\circ.$$

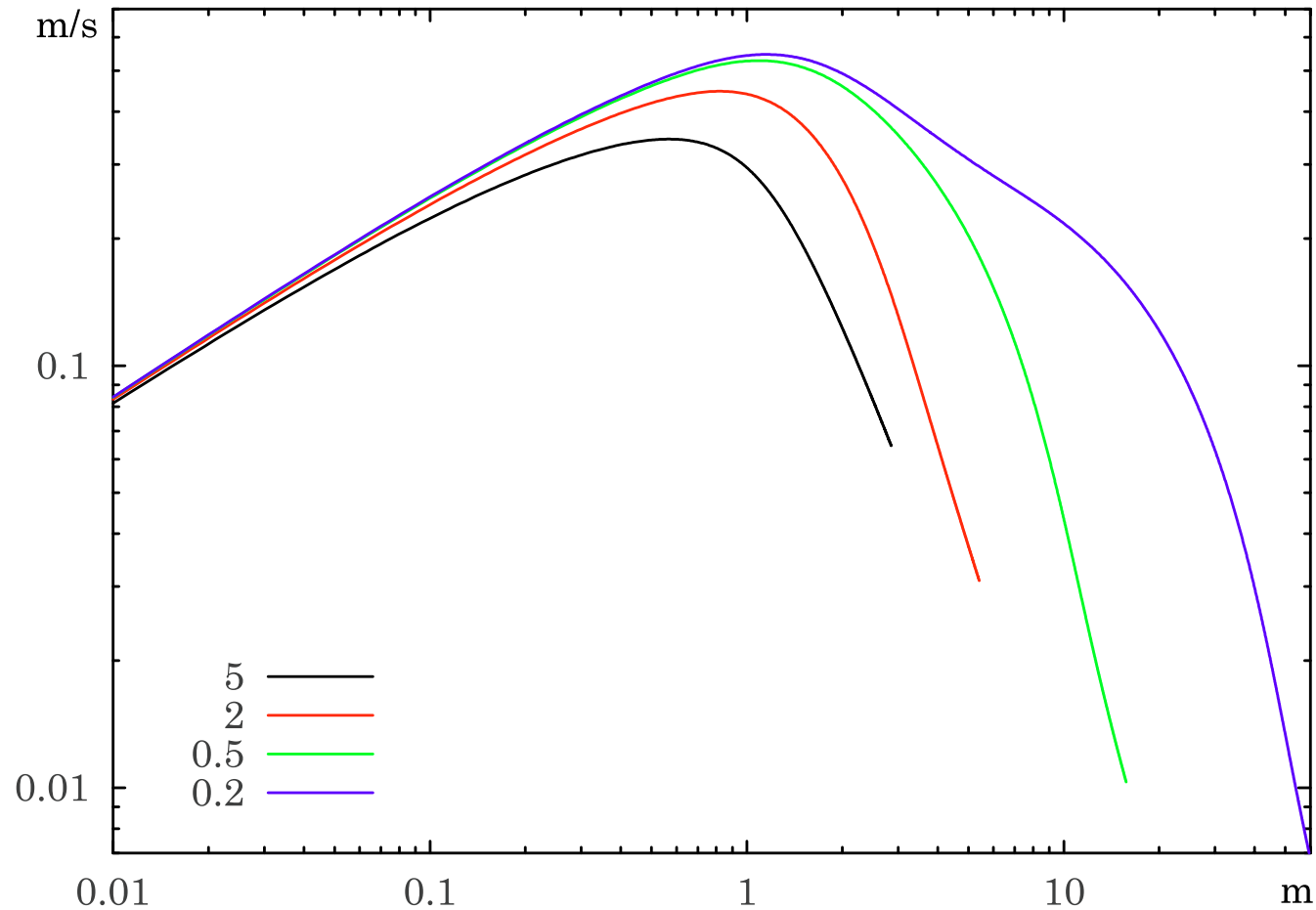
## Influence quantitative



Vitesse du front en fonction de la position du front :  
influence de la fraction volumique initiale  $\phi_0$ .

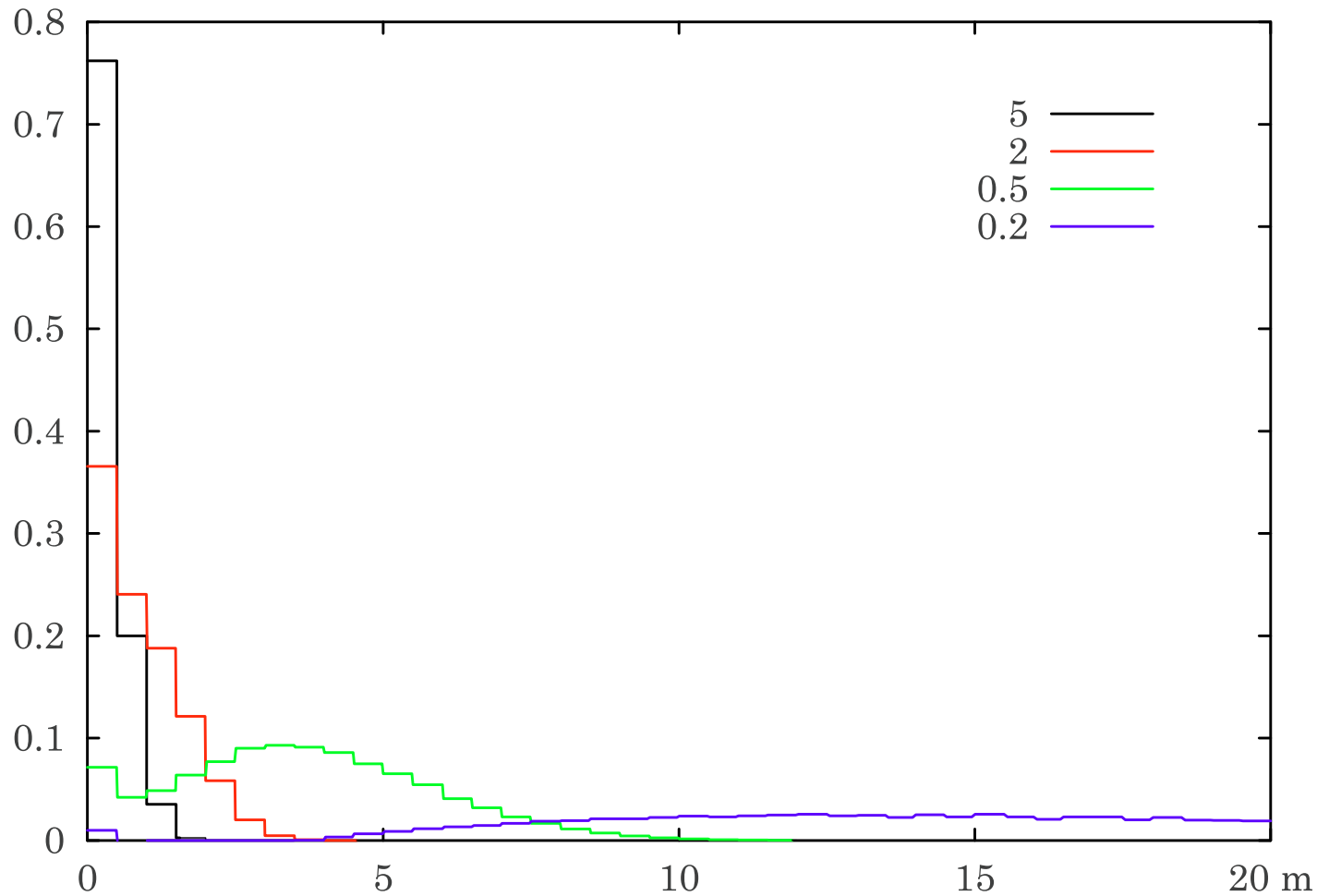


## Influence qualitative



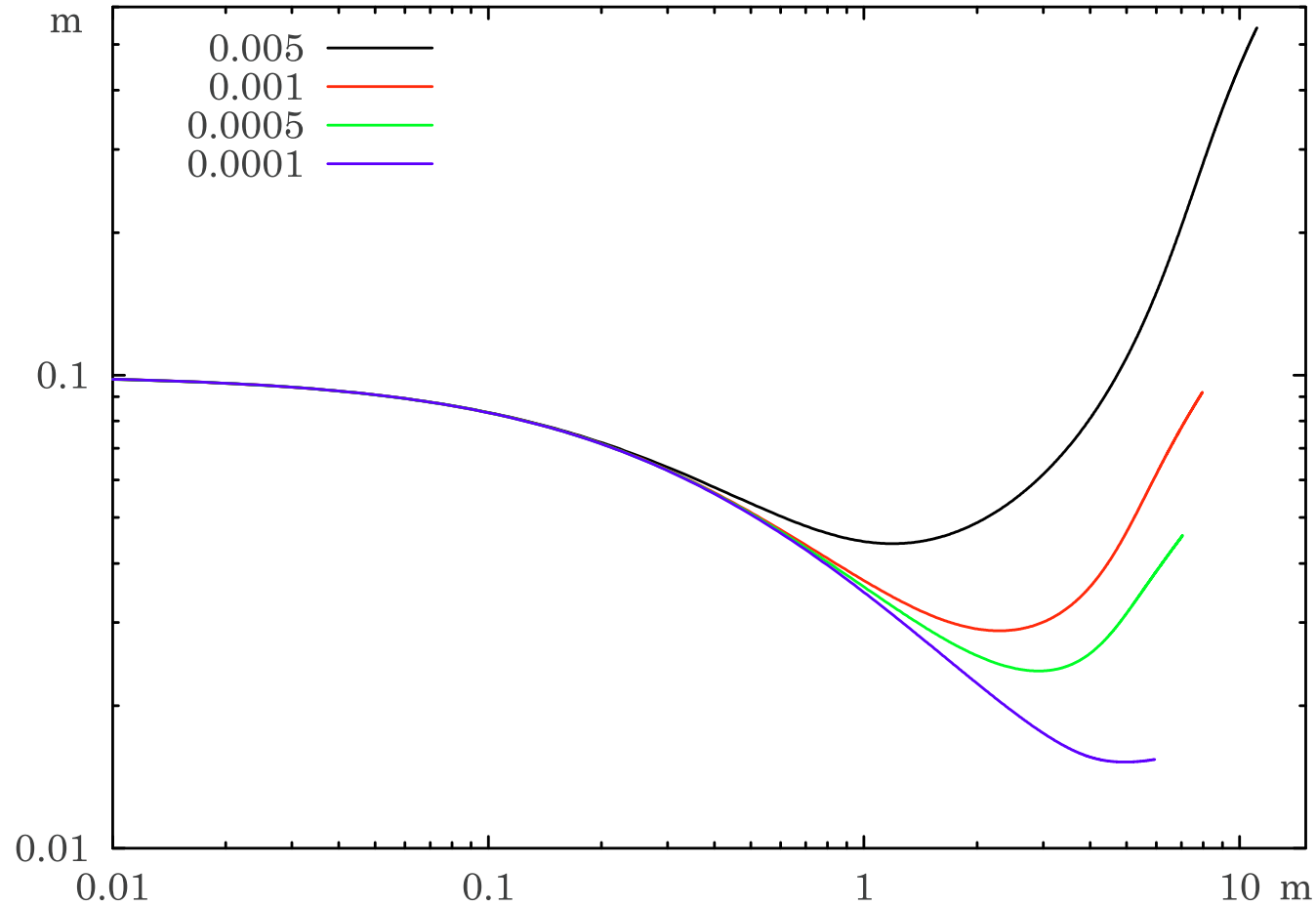
Vitesse du front en fonction de la position du front :  
 influence du coefficient de fraction volumique basale  $C_3$  ( $\phi_b = C_3 \phi$ ).

## Influence qualitative



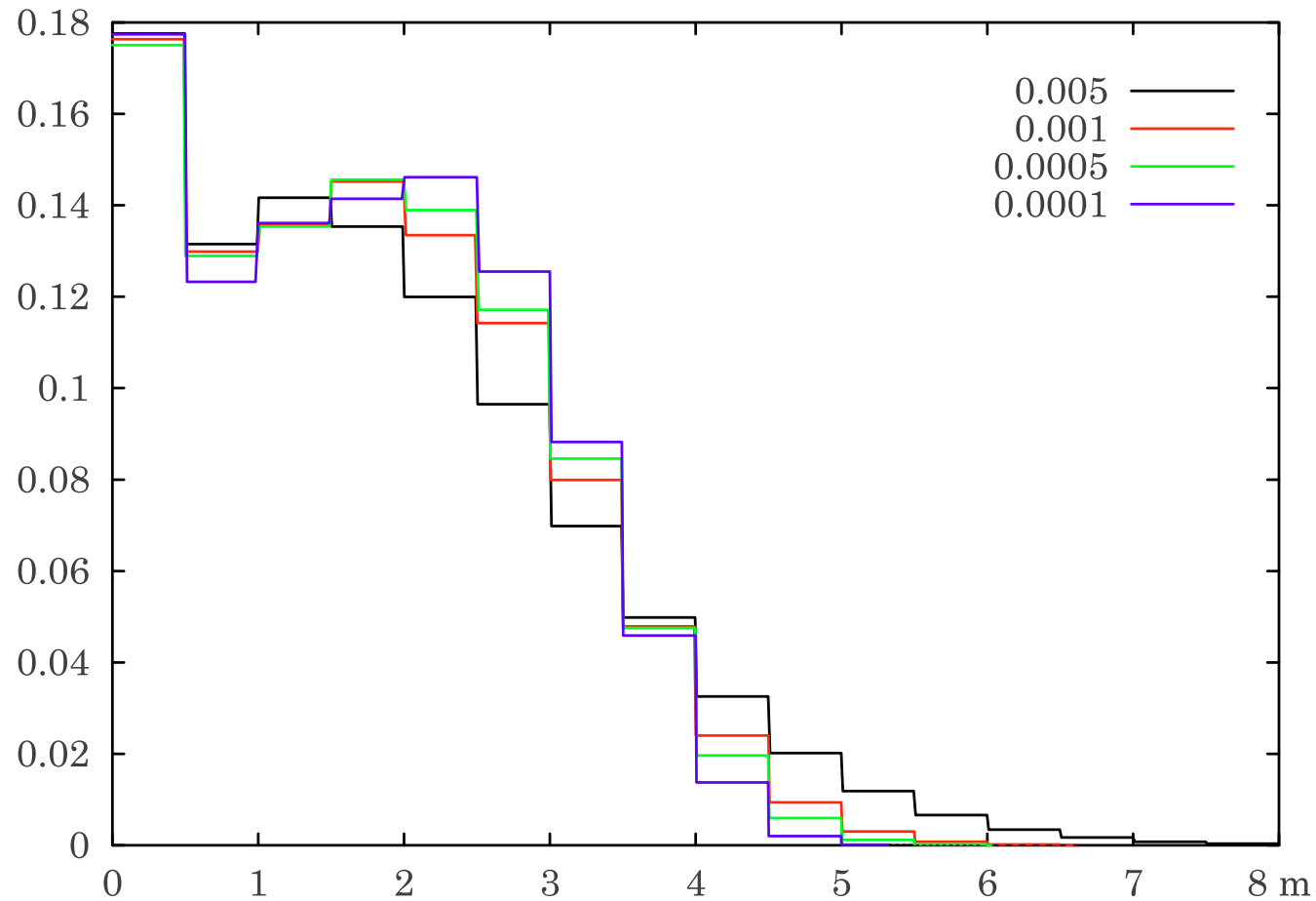
Histogramme de répartition du sable :  
 influence du coefficient de fraction volumique basale  $C_3$  ( $\phi_b = C_3 \phi$ ).

## Type de variable



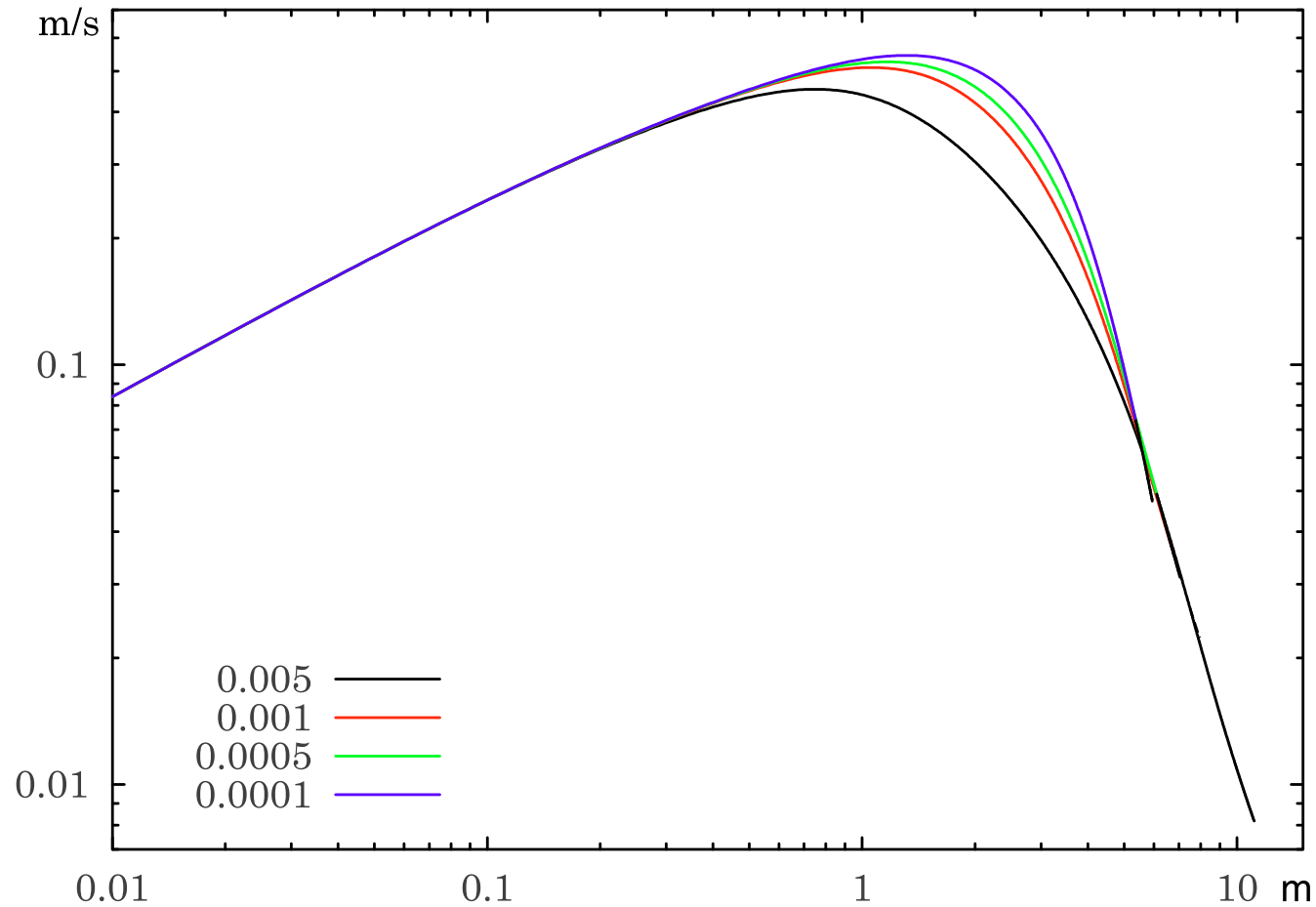
Hauteur de l'écoulement en fonction de la position :  
influence du coefficient d'incorporation d'eau  $C_1$ .

## 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 ( $U_0, \phi_0, h_0$  et  $l_0$ ).

### 2. Totale :

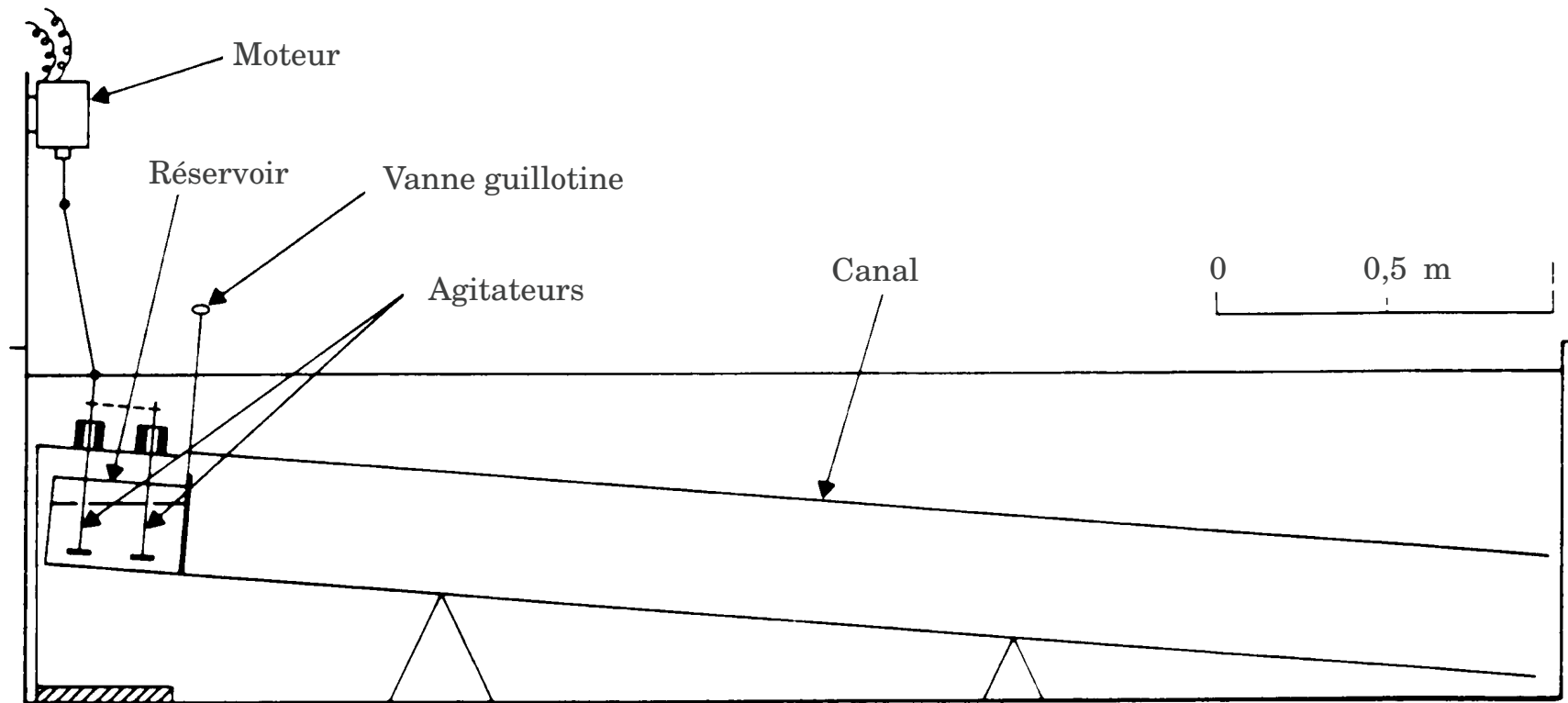
⇒ Estimation des constantes du modèle ( $C_i$ )  
et des conditions initiales ( $U_0, \phi_0, h_0$  et  $l_0$ ).

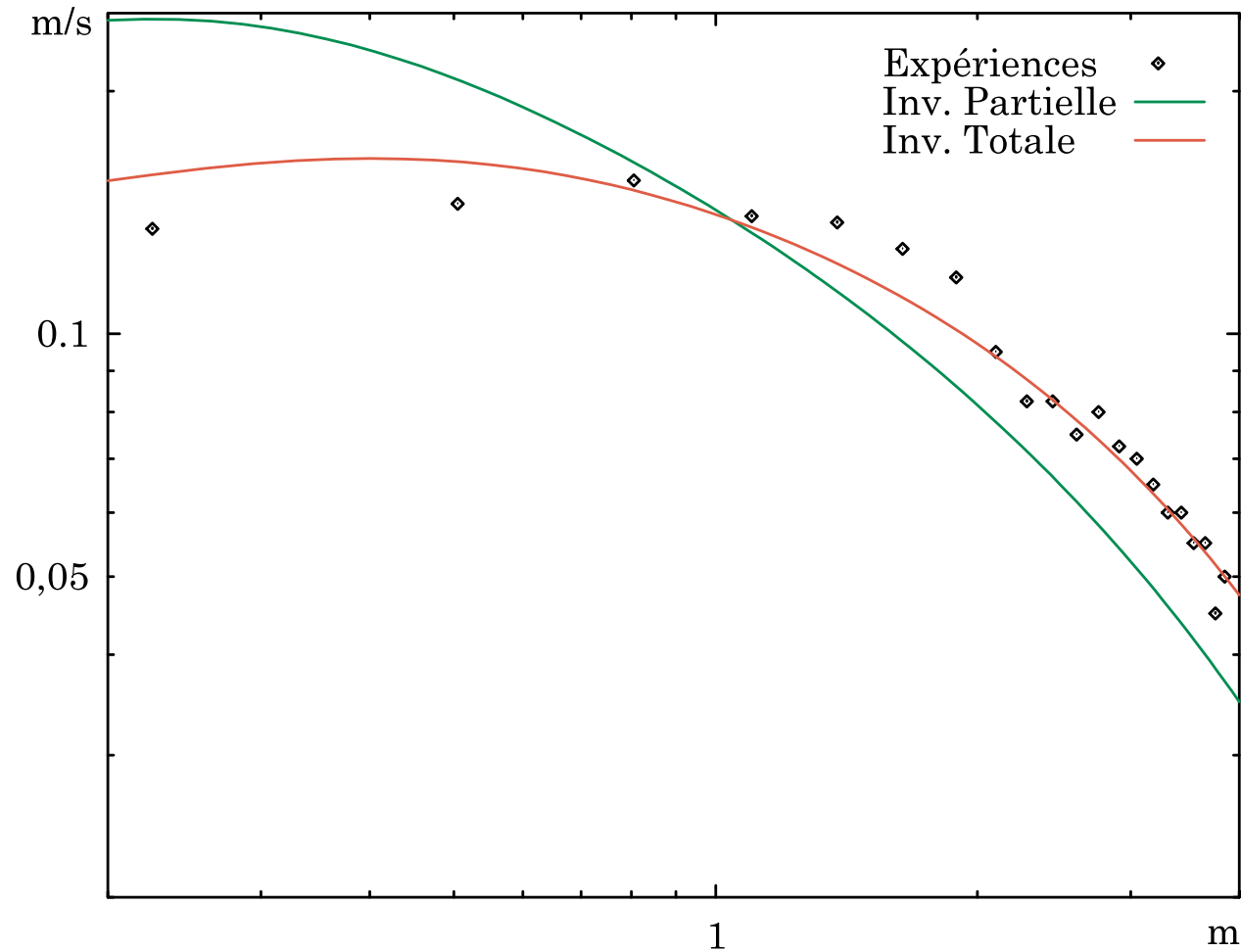
Elles permettent :

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

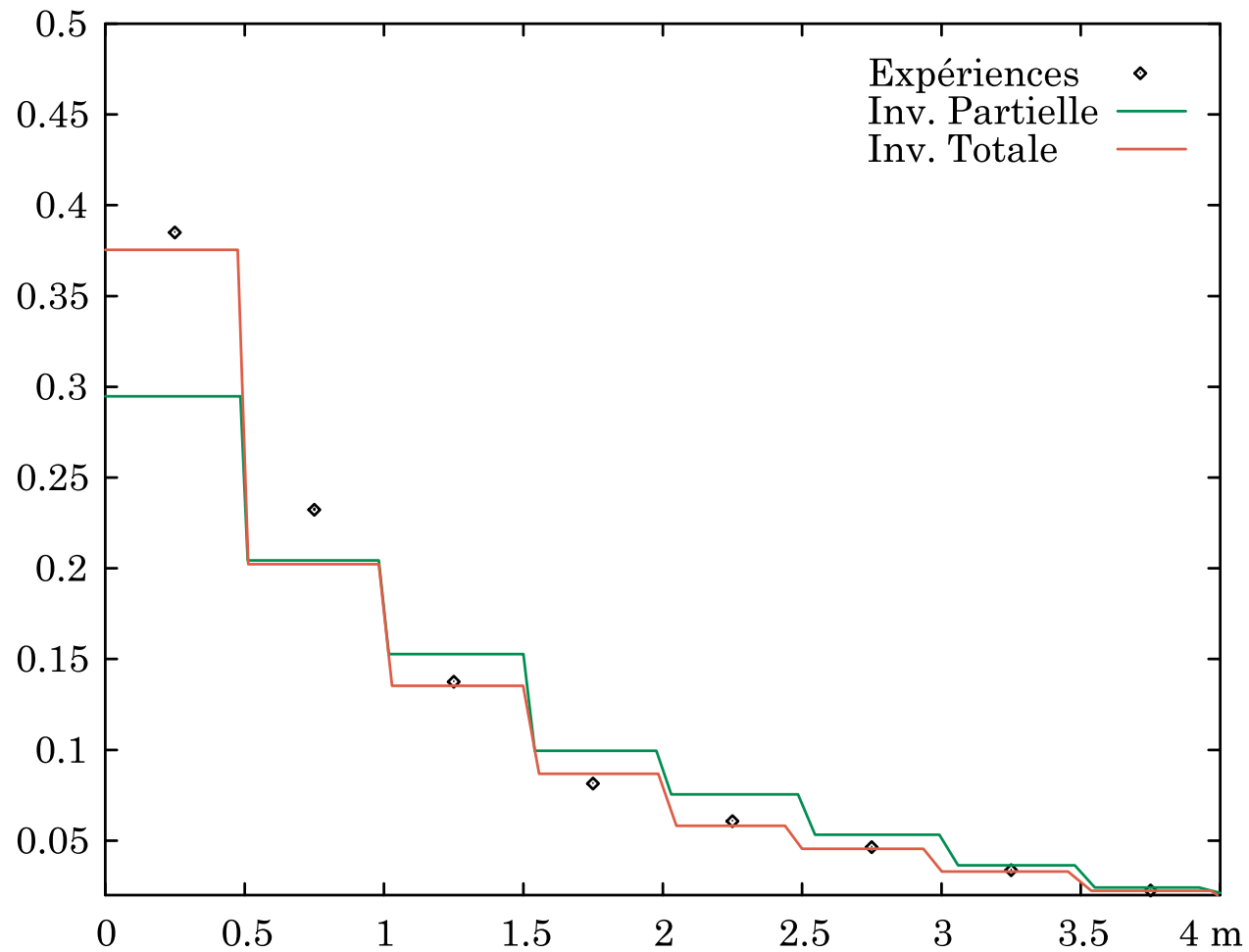


## Modèle réduit de Laval (1988)





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 :**

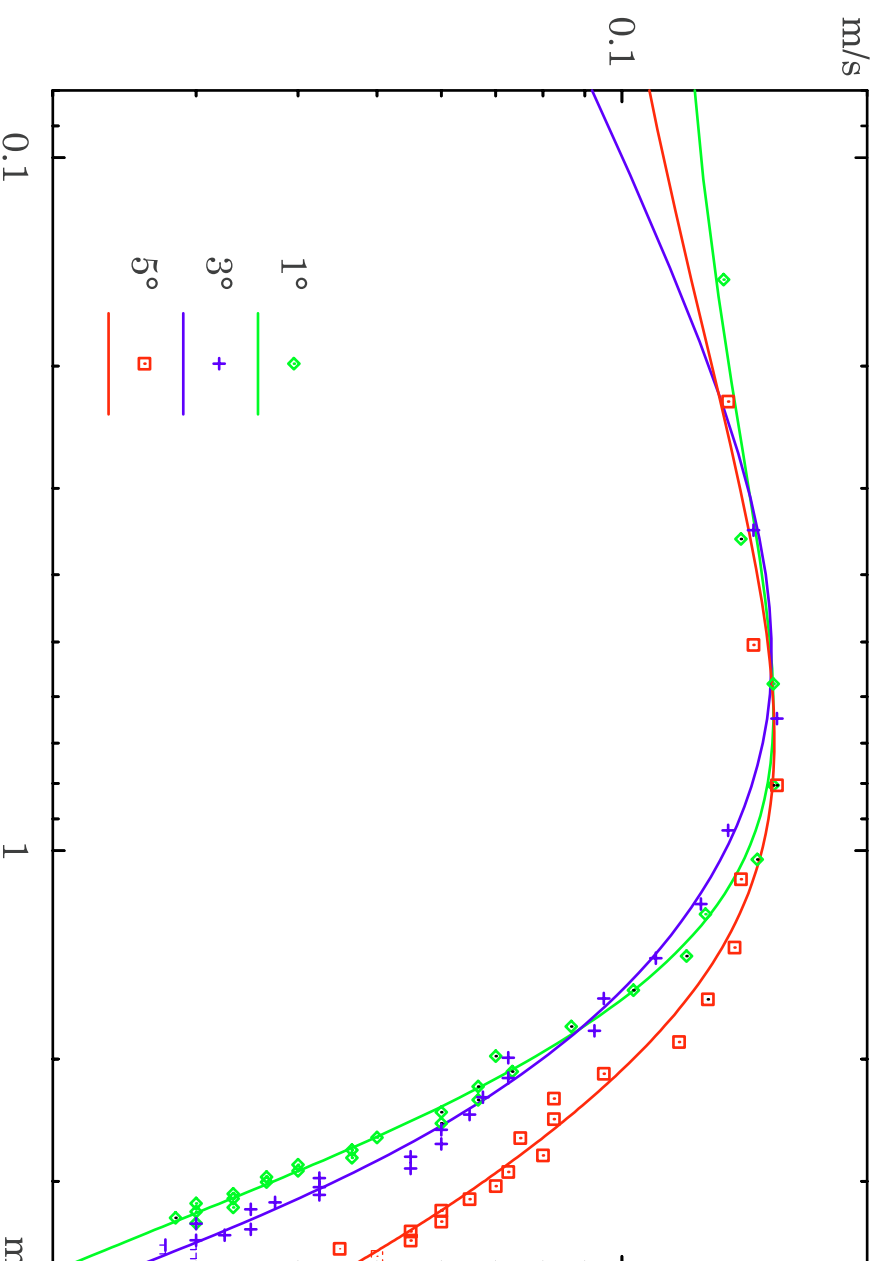
- Permet de lever l'incertitude sur les conditions initiales ;
- Bon comportement quantitatif du modèle.

## Modèles Réduits Analogiques

*Deux composantes des expériences en canal :*

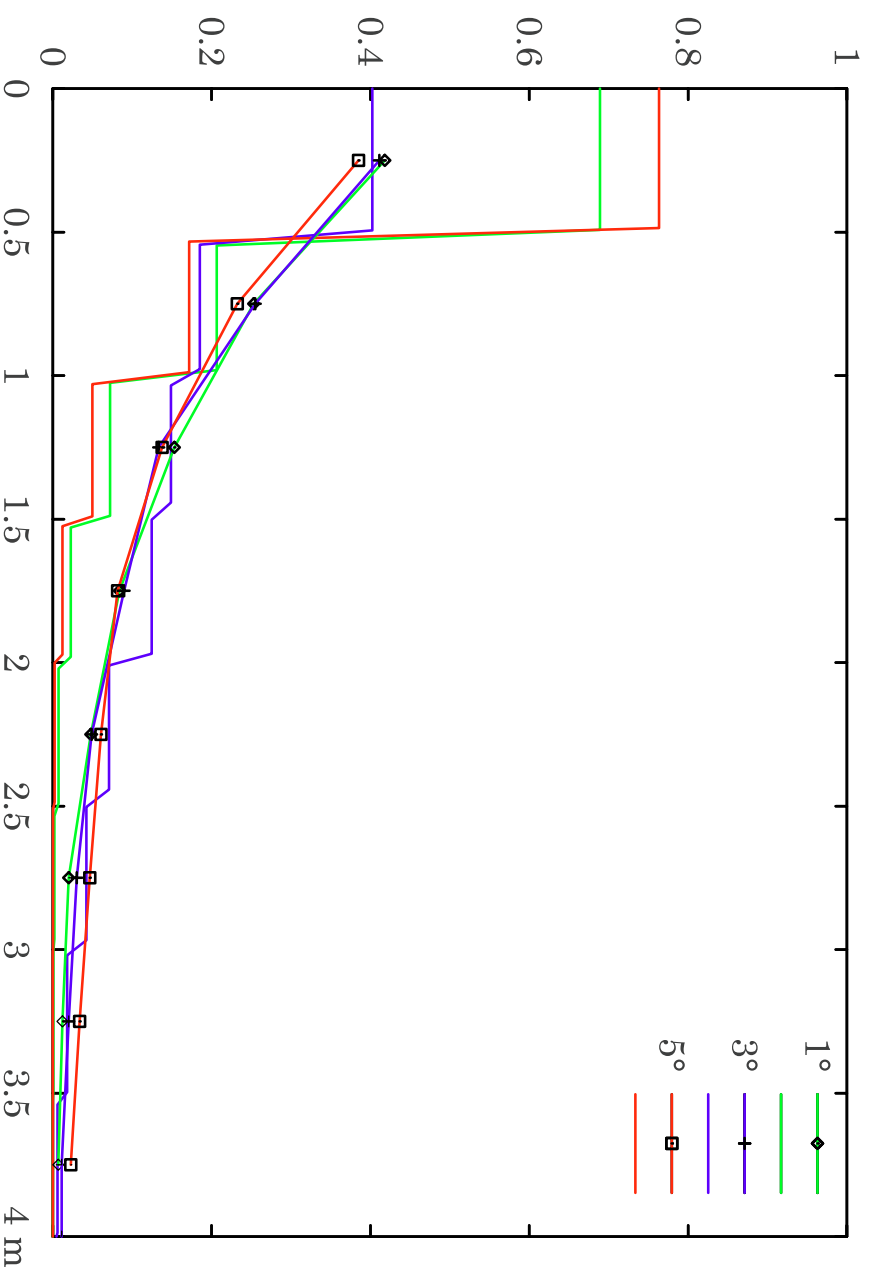
1. Mesures de vitesses : “Logique modèle”  
⇒ validation dynamique.
2. Mesures des hauteurs de dépôt : “Logique dépôt”  
⇒ validation géologique.

## Inversion sur la dynamique



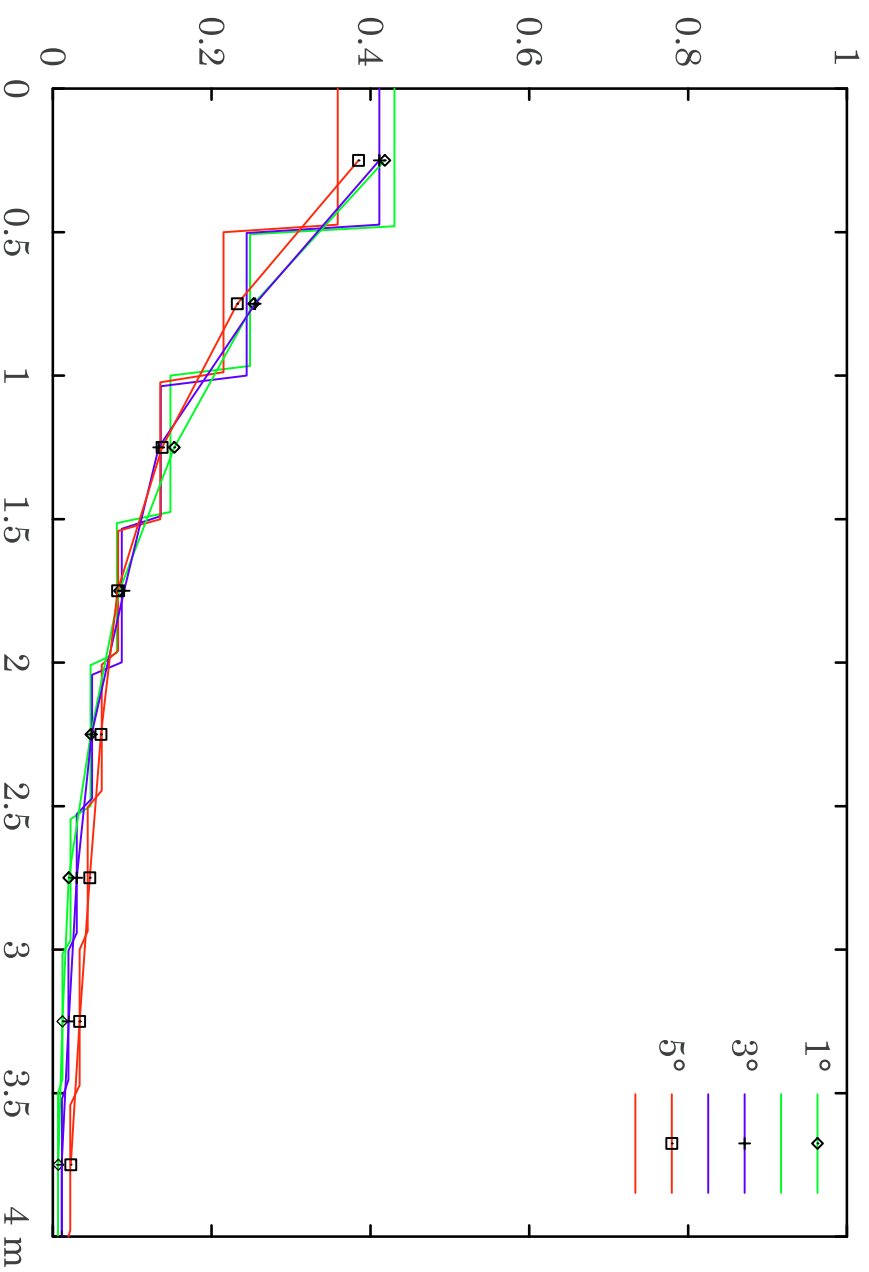
Vitesse du front en fonction de la position : expériences à pente variable.

# Inversion sur la dynamique



Histogramme de répartition du sable : expériences à pente variable.

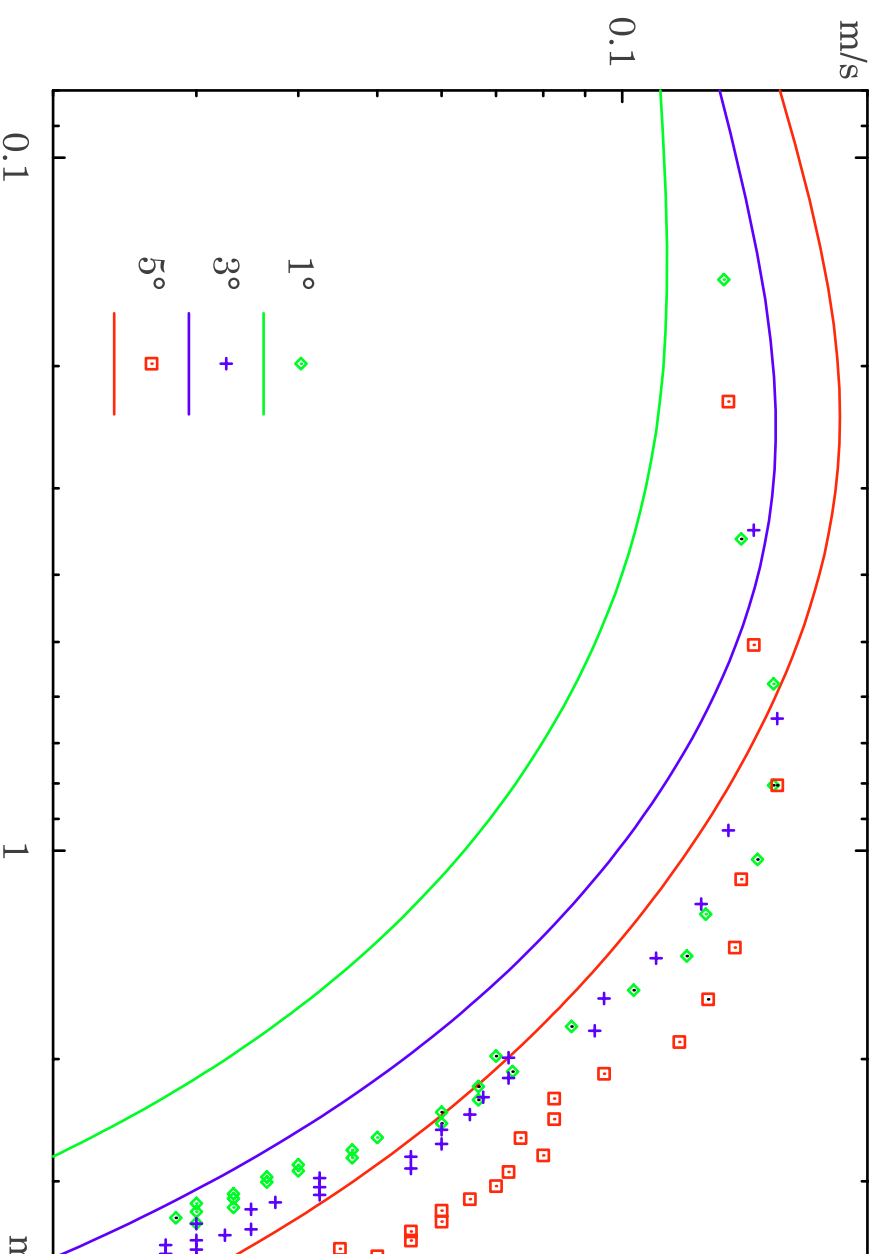
## Inversion sur le dépôt



Histogramme de répartition du sable : expériences à pente variable.

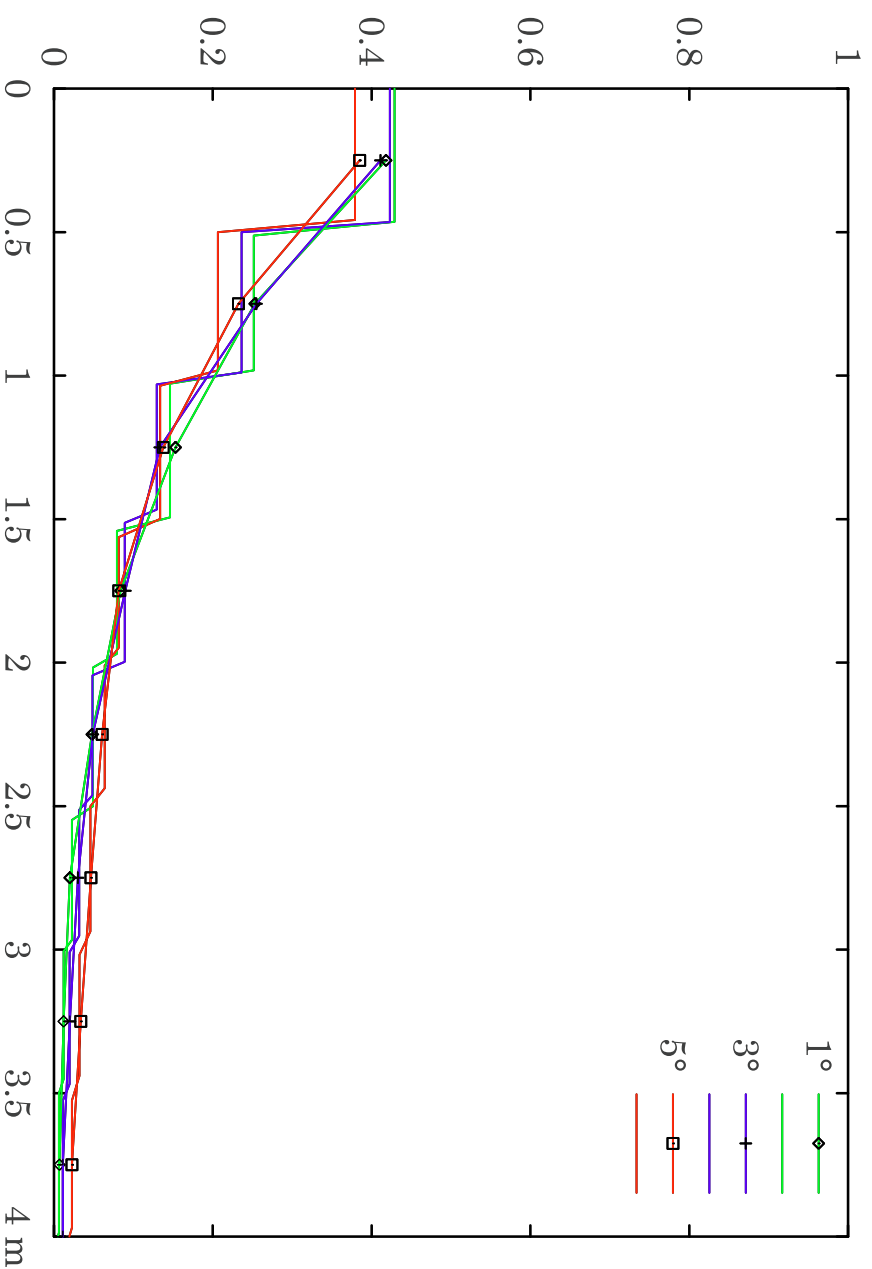


## Inversion sur le dépôt



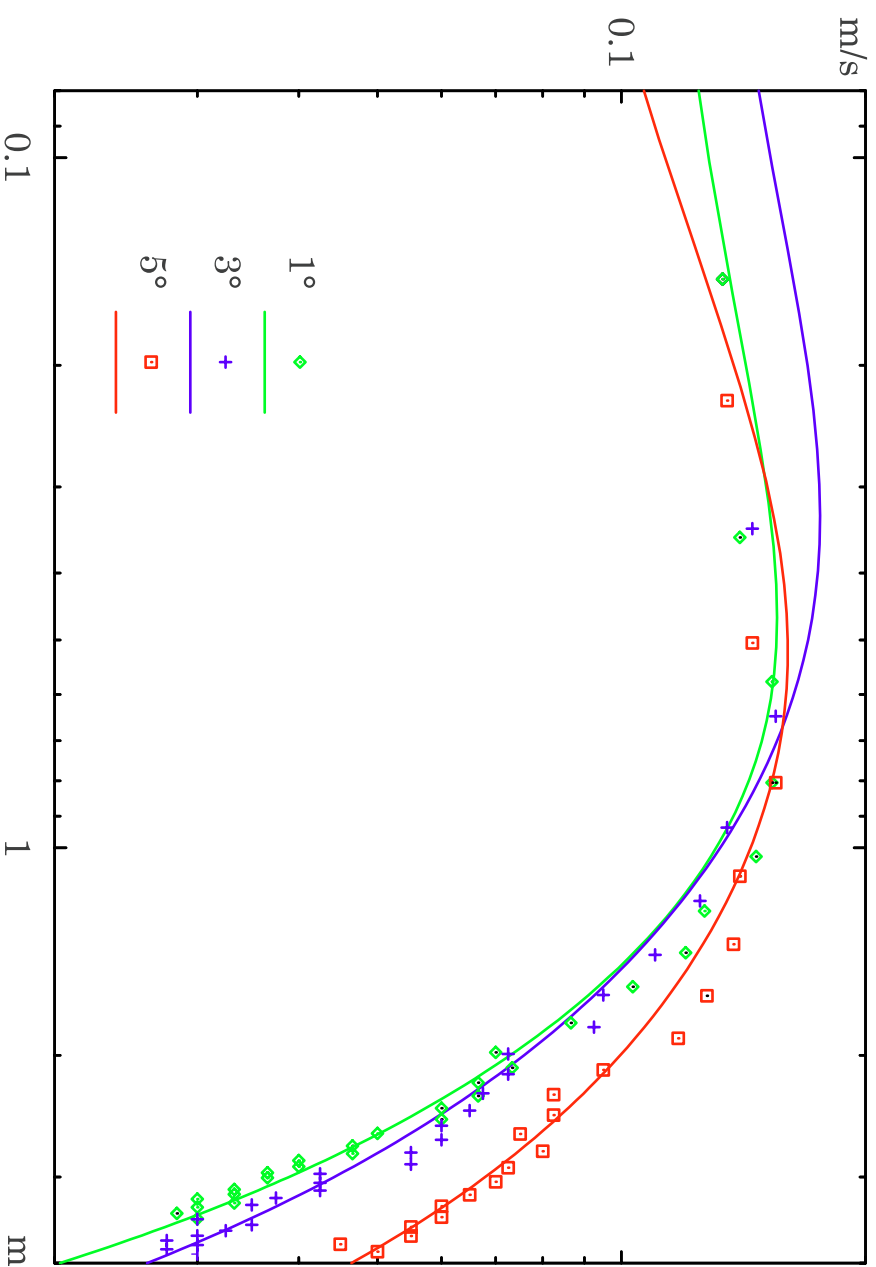
Vitesse du front en fonction de la position : expériences à pente variable.

## 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.

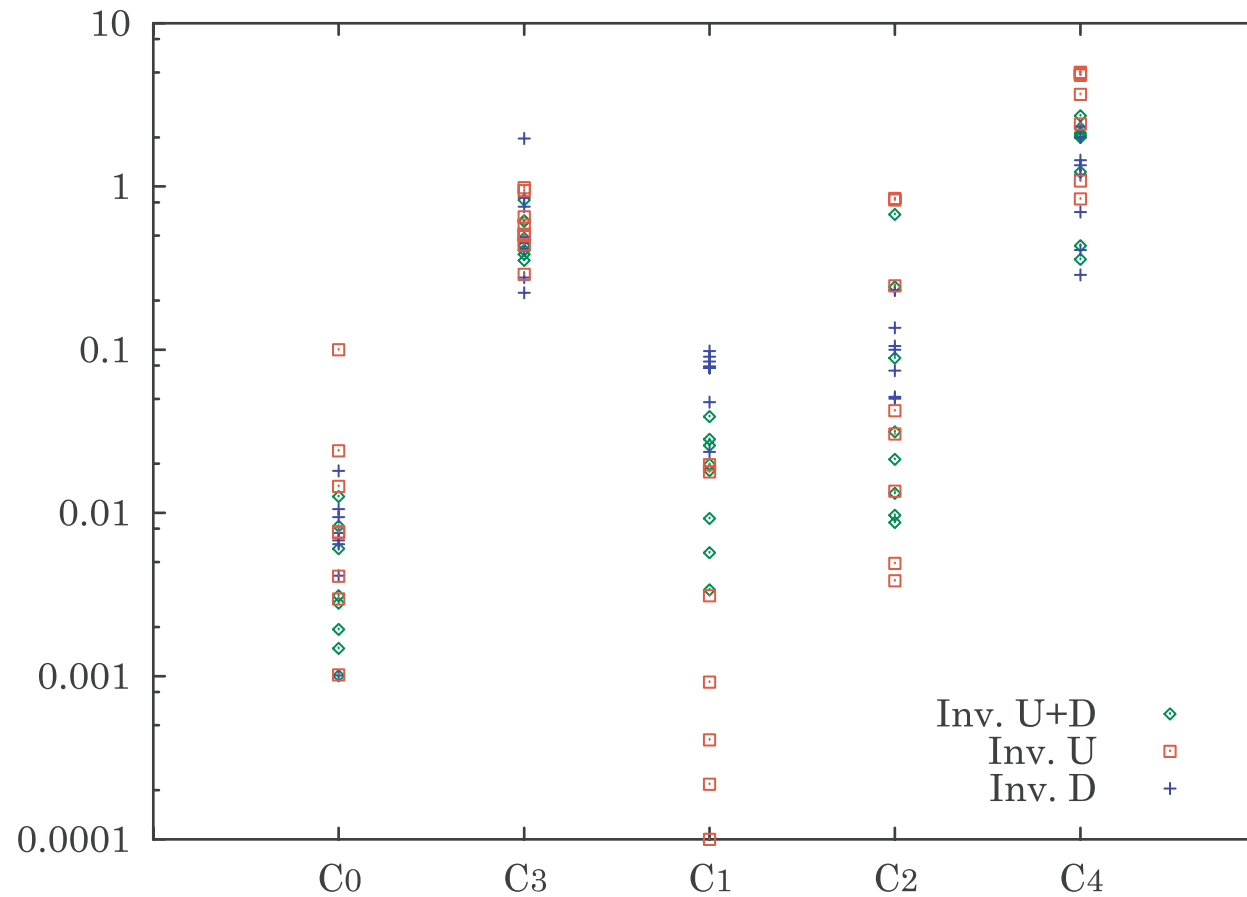
### Montre :

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

### Permet :

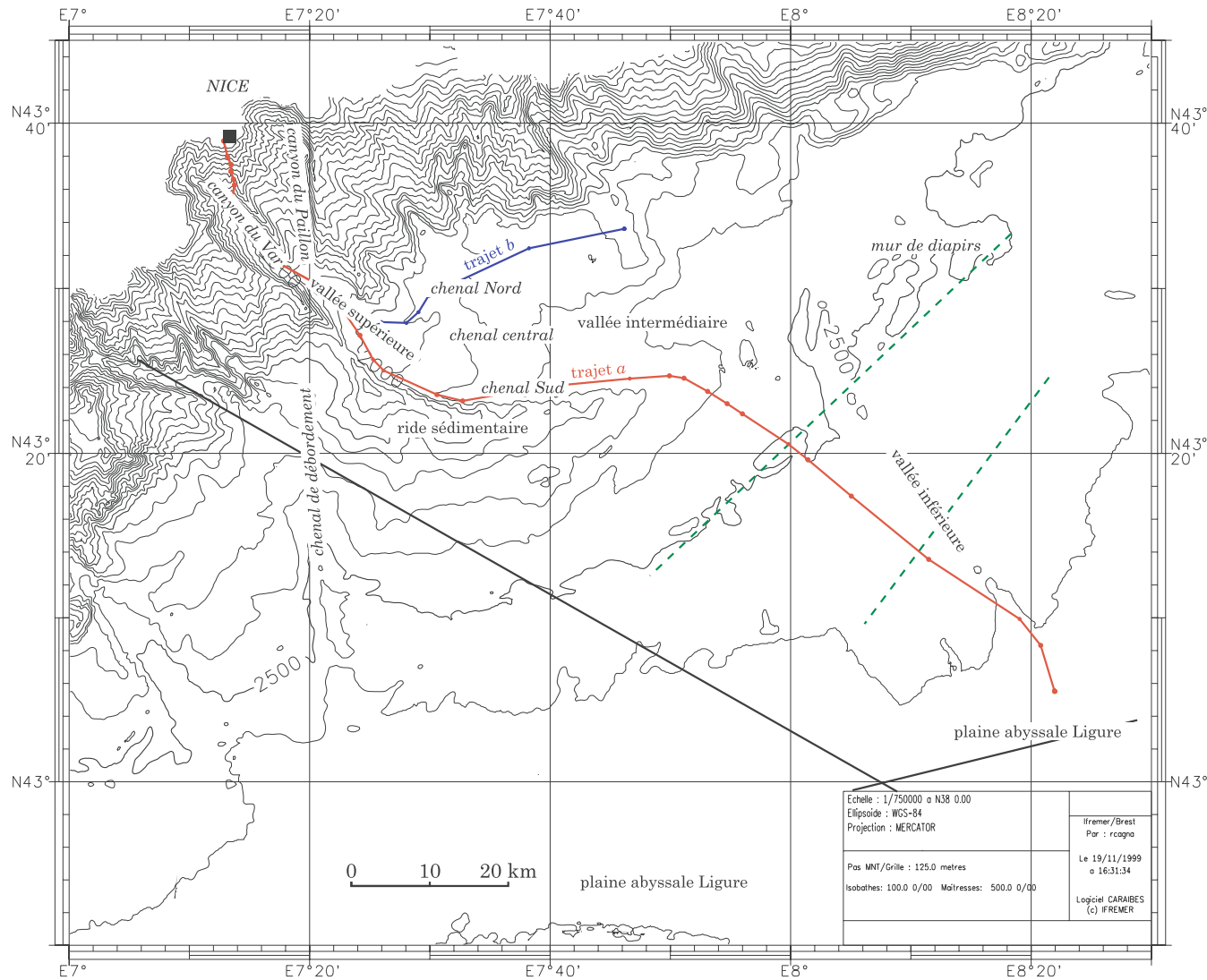
1. lever l’incertitude sur les conditions initiales ;
2. une meilleure estimation des paramètres du modèle.

## Estimation des paramètres



Répartition de la valeur des paramètres.

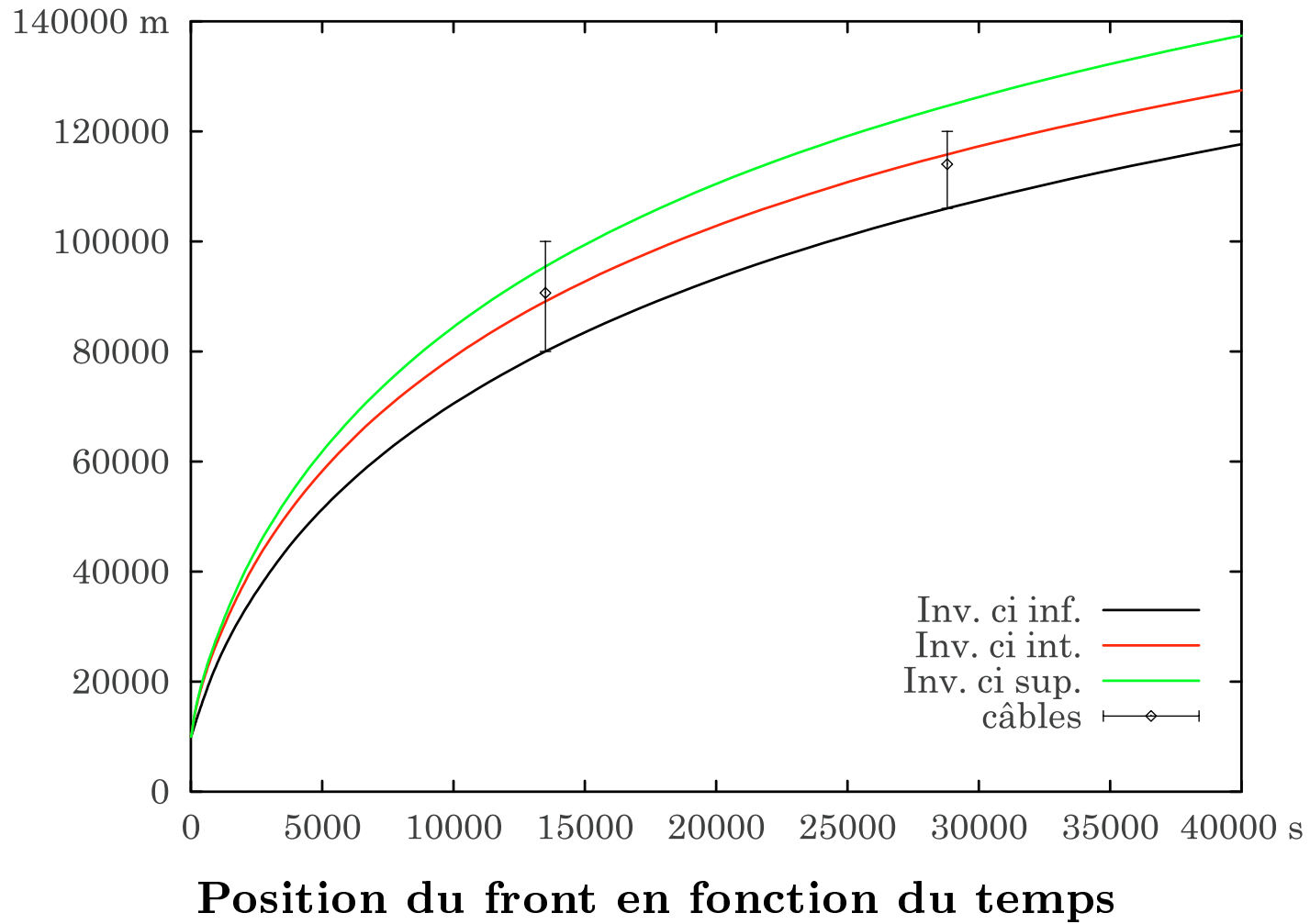
# Application à l'événement de Nice, 1979



## Données

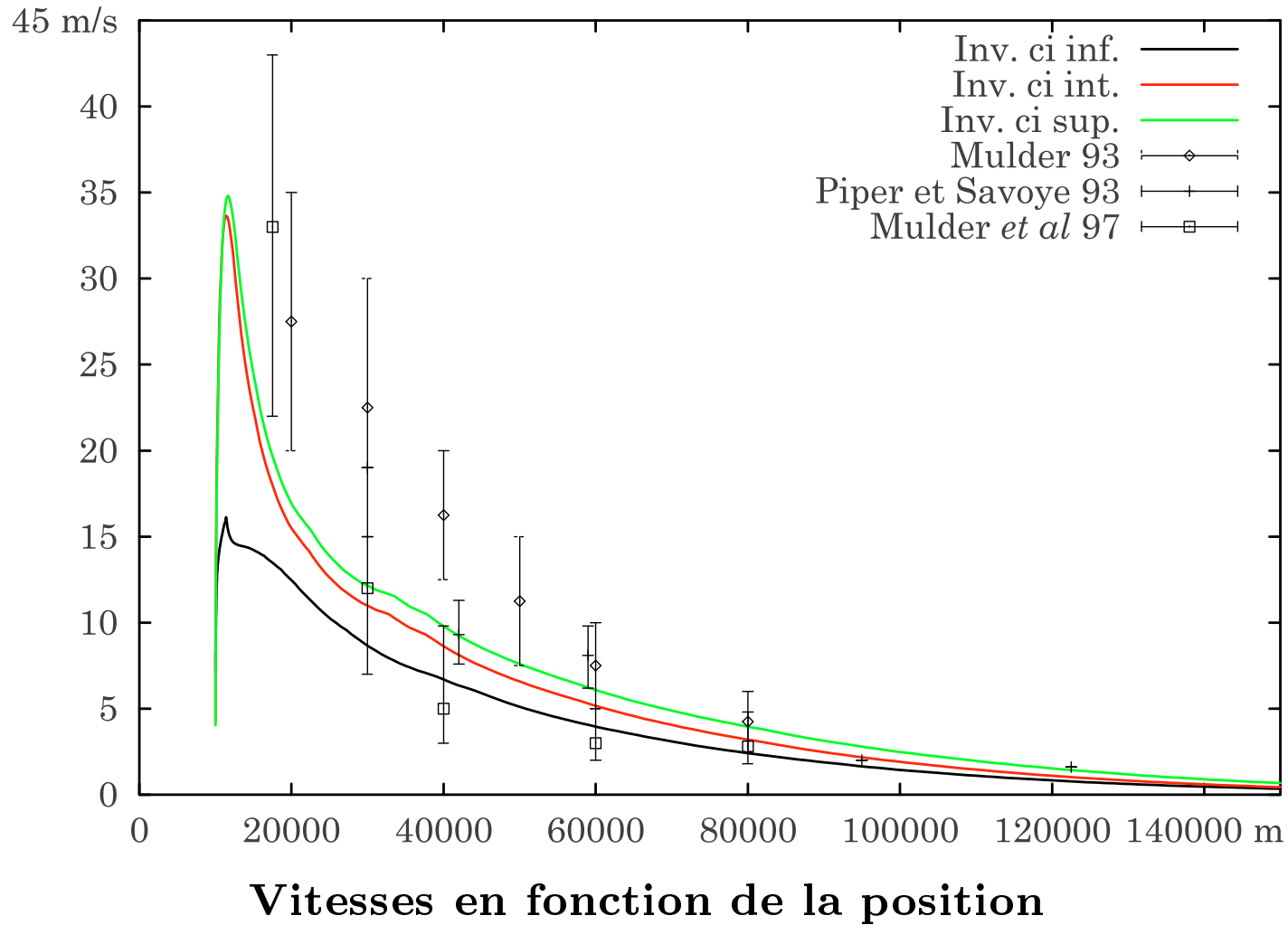
- **Trajet (supposé).**
- **Points de contrainte :**
  1. **Ruptures de câble (position / temps) ;**
  2. **Épaisseurs déposées (carottes IFREMER).**

## Inversions partielles (CI) sur la dynamique

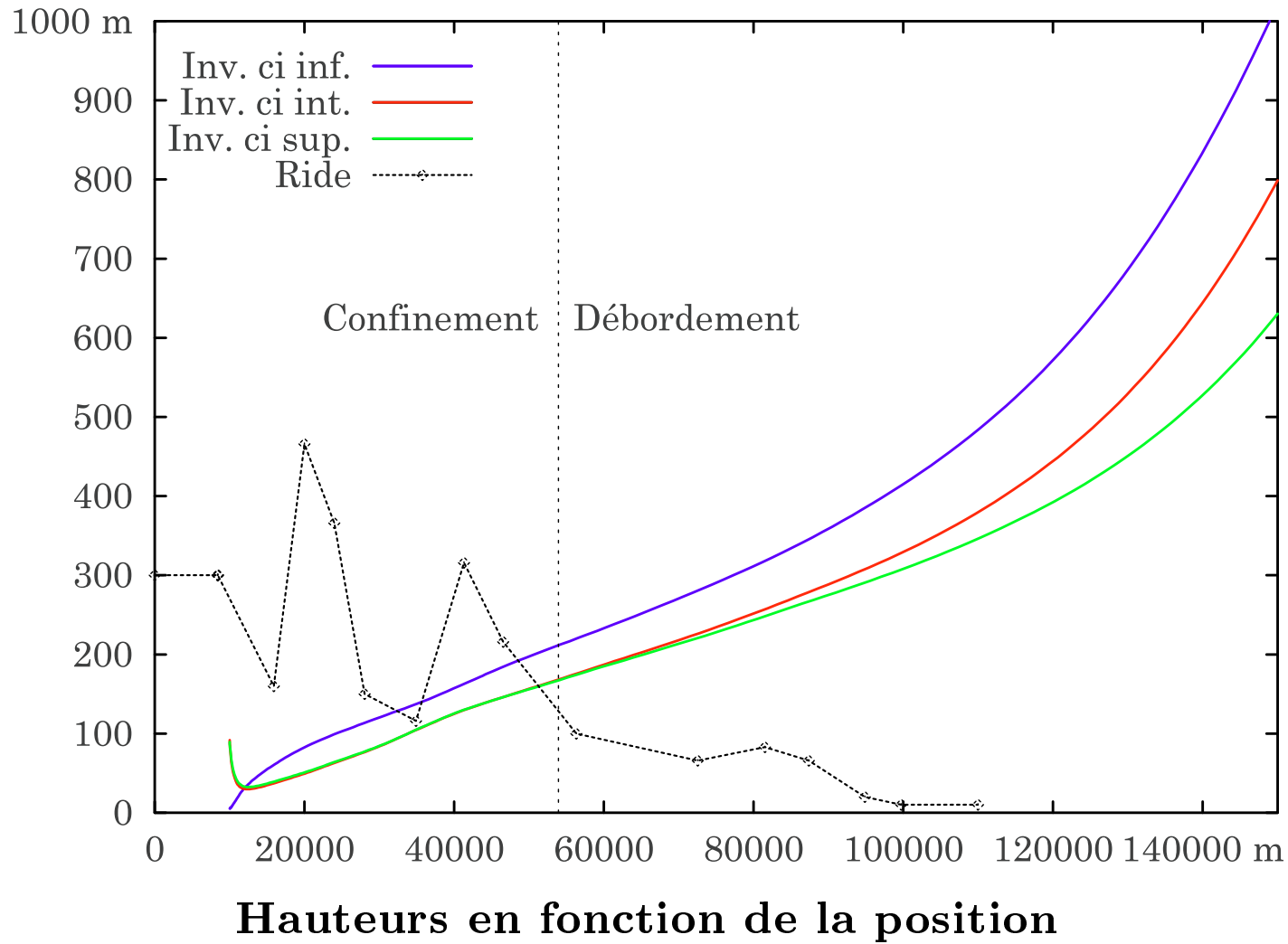




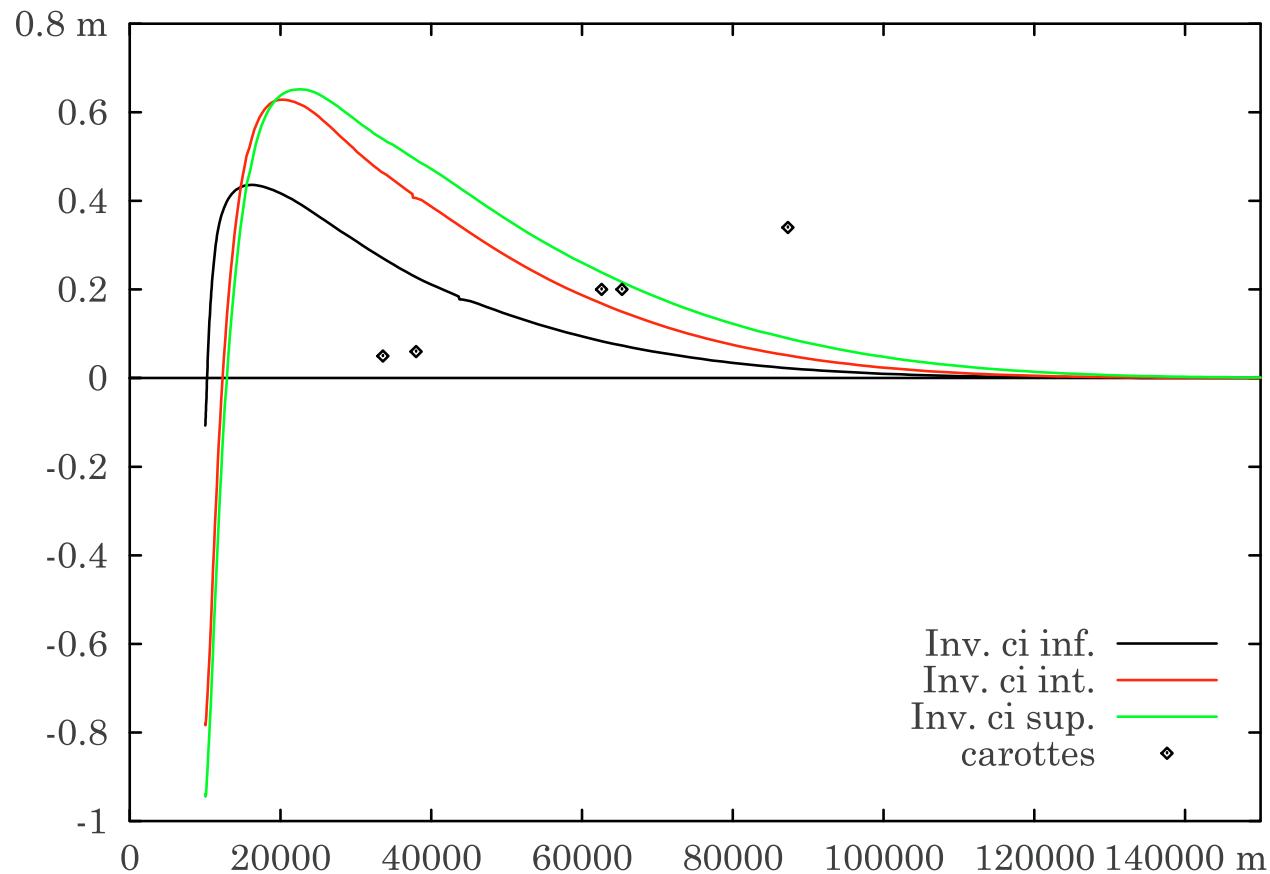
## Inversions partielles (CI) sur la dynamique



## Inversions partielles (CI) sur la dynamique



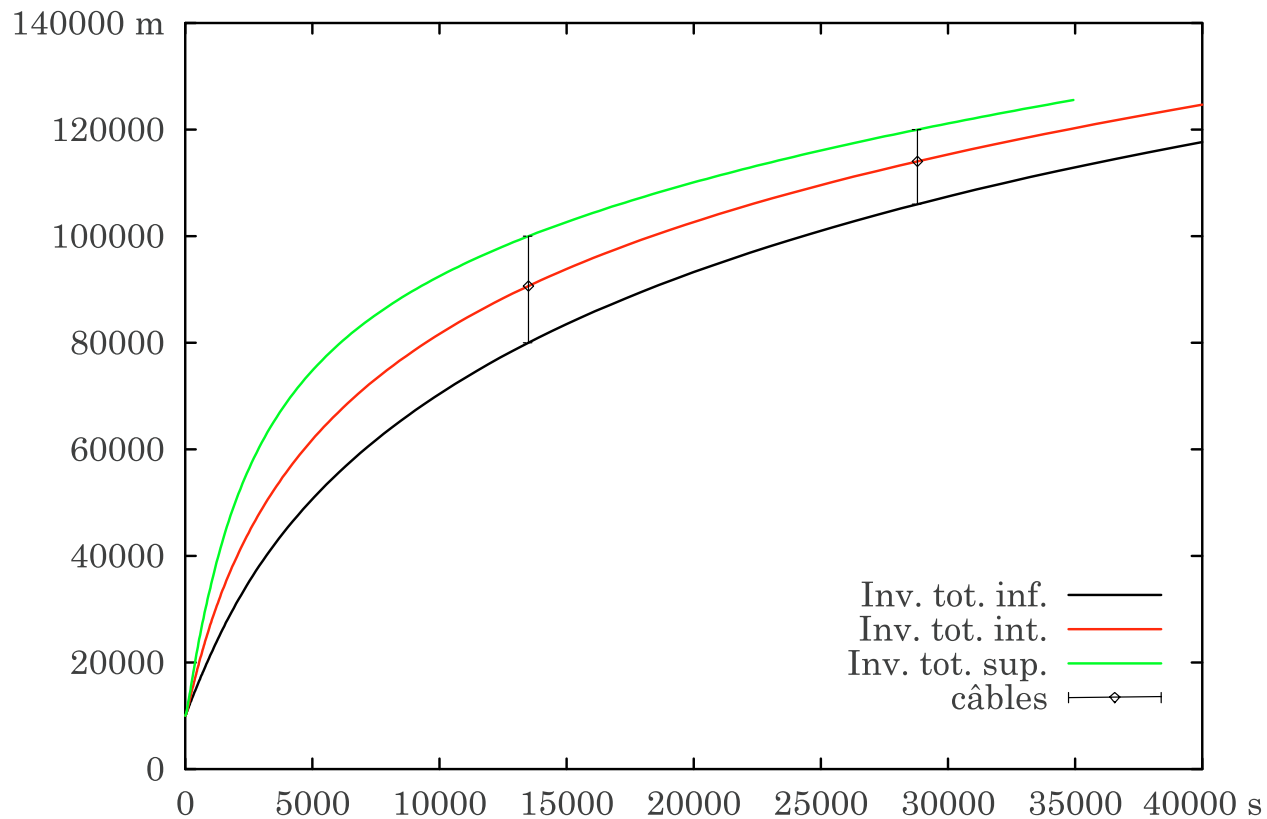
## Inversions partielles (CI) sur la dynamique



Hauteurs sédimentées en fonction de la position

⇒ dépôt non respecté.

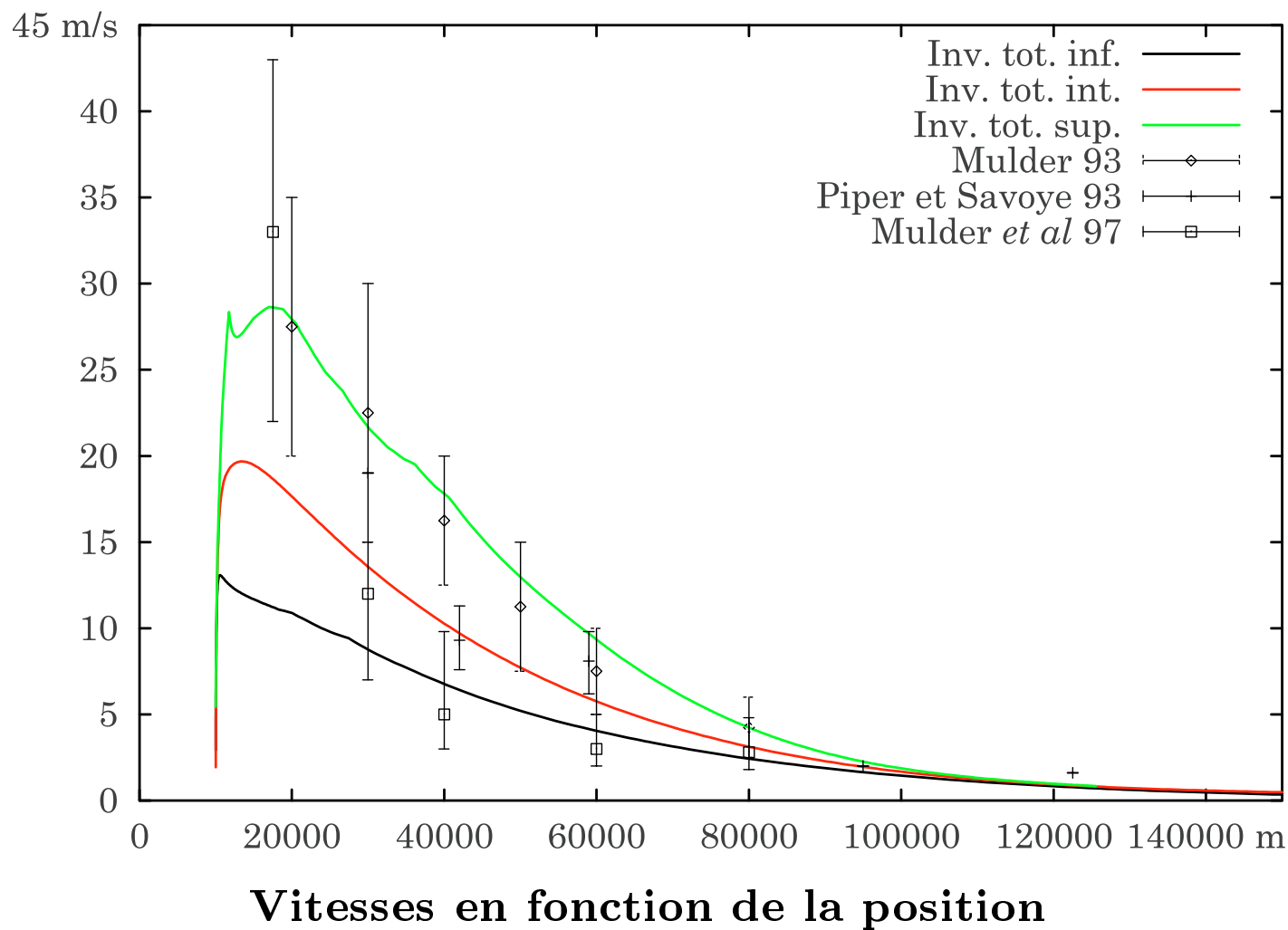
## Inversions totales contraintes par la dynamique



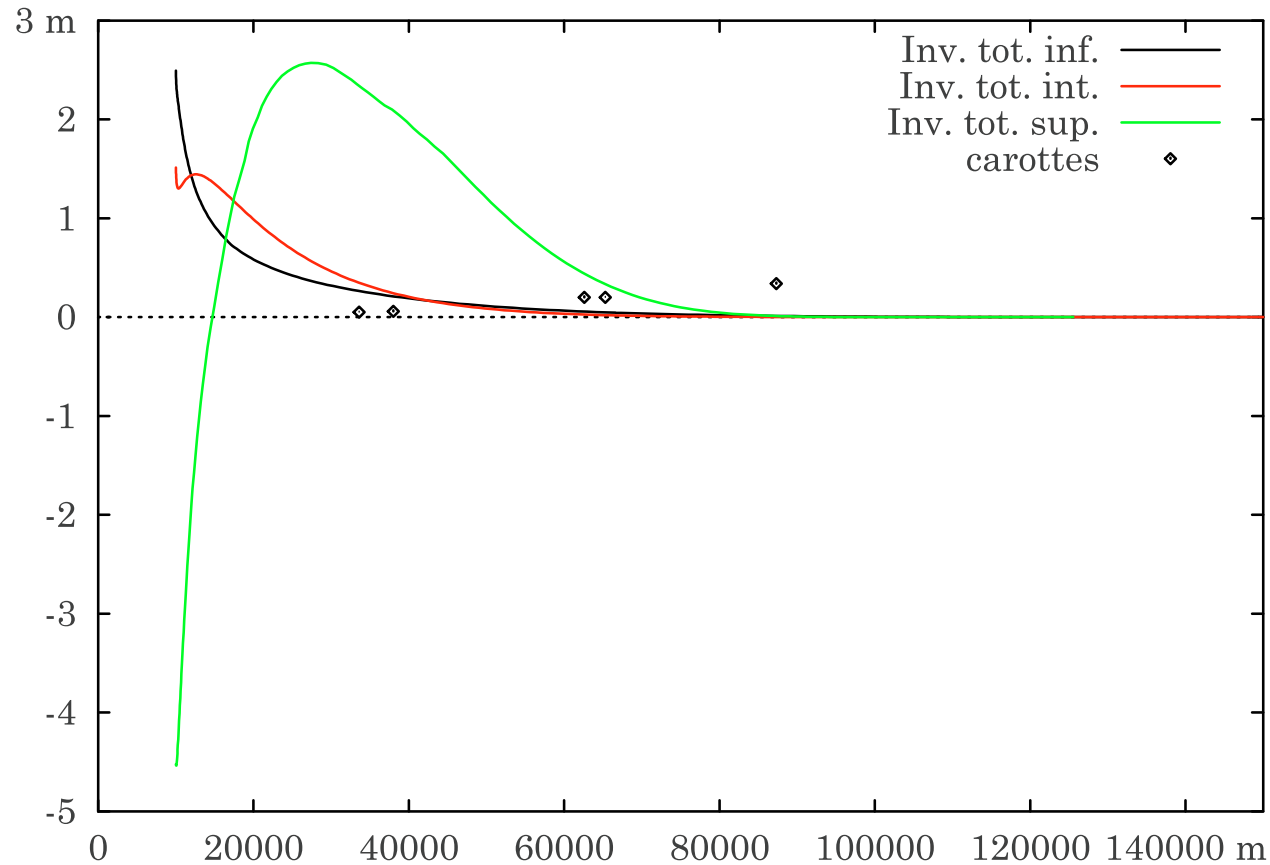
Position du front en fonction du temps

⇒ meilleure reconstruction des données.

## Inversions totales contraintes par la dynamique



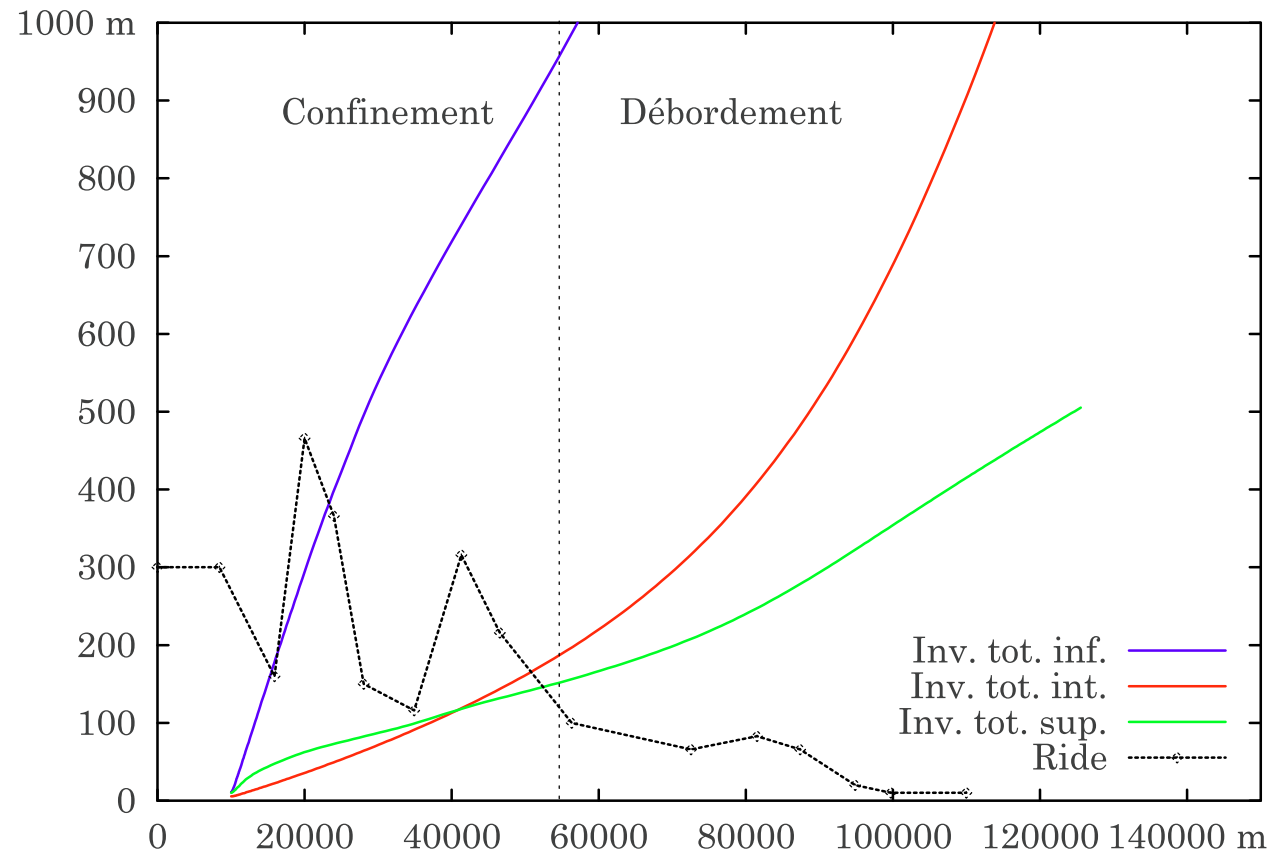
## Inversions totales contraintes par la dynamique



Hauteurs sédimentées en fonction de la position

⇒ dépôt non respecté (manque de contraintes).

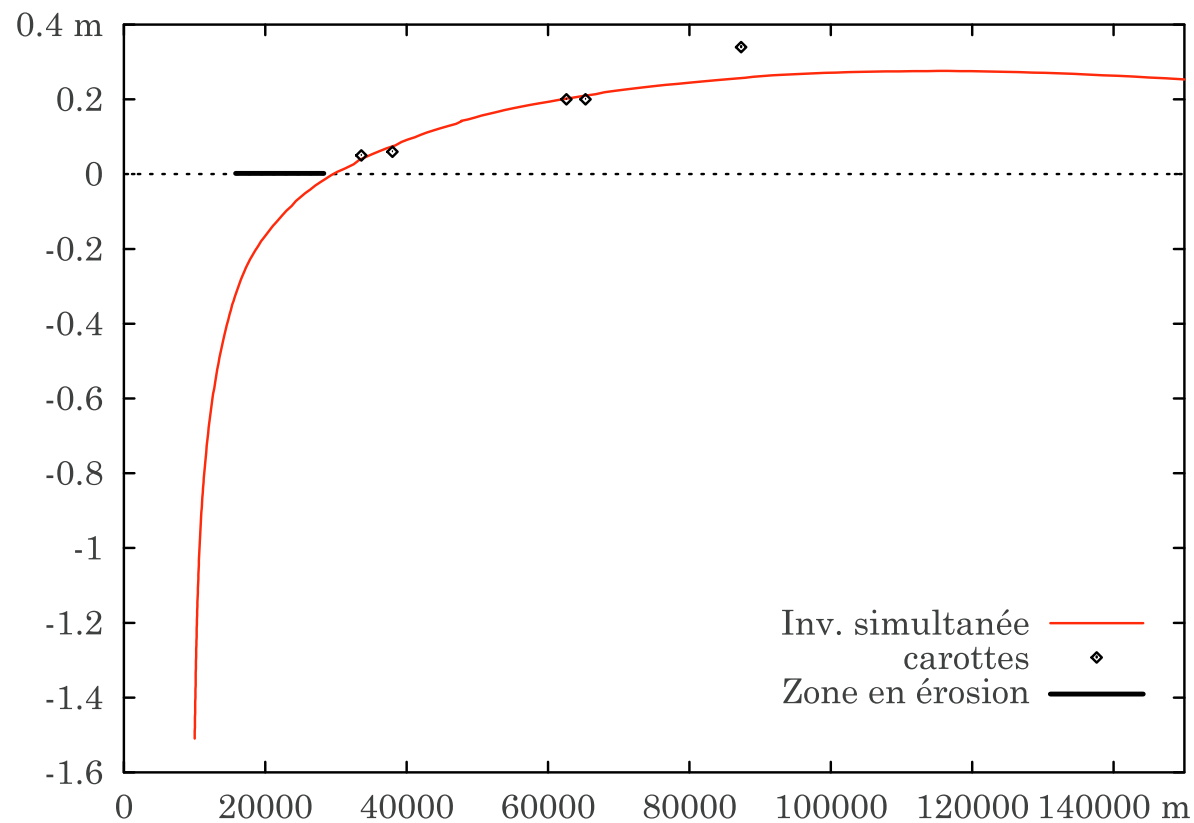
## Inversions totales contraintes par la dynamique



Hauteurs en fonction de la position

⇒ variabilité (manque de contraintes).

## Inversions totales simultanées (contraintes par la dynamique et le dépôt)

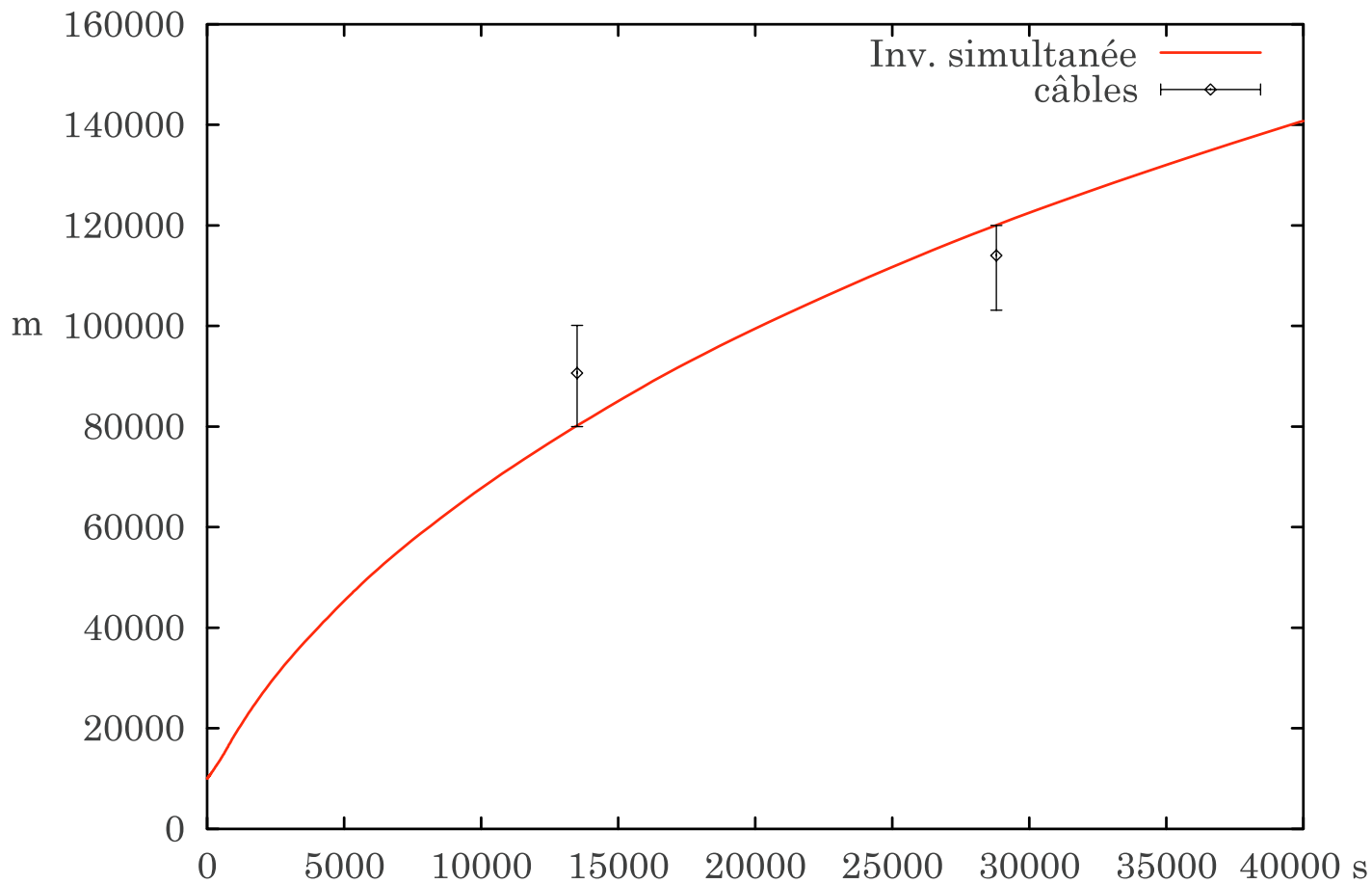


Hauteurs sédimentées en fonction de la position

⇒ reconstruction satisfaisante du dépôt.



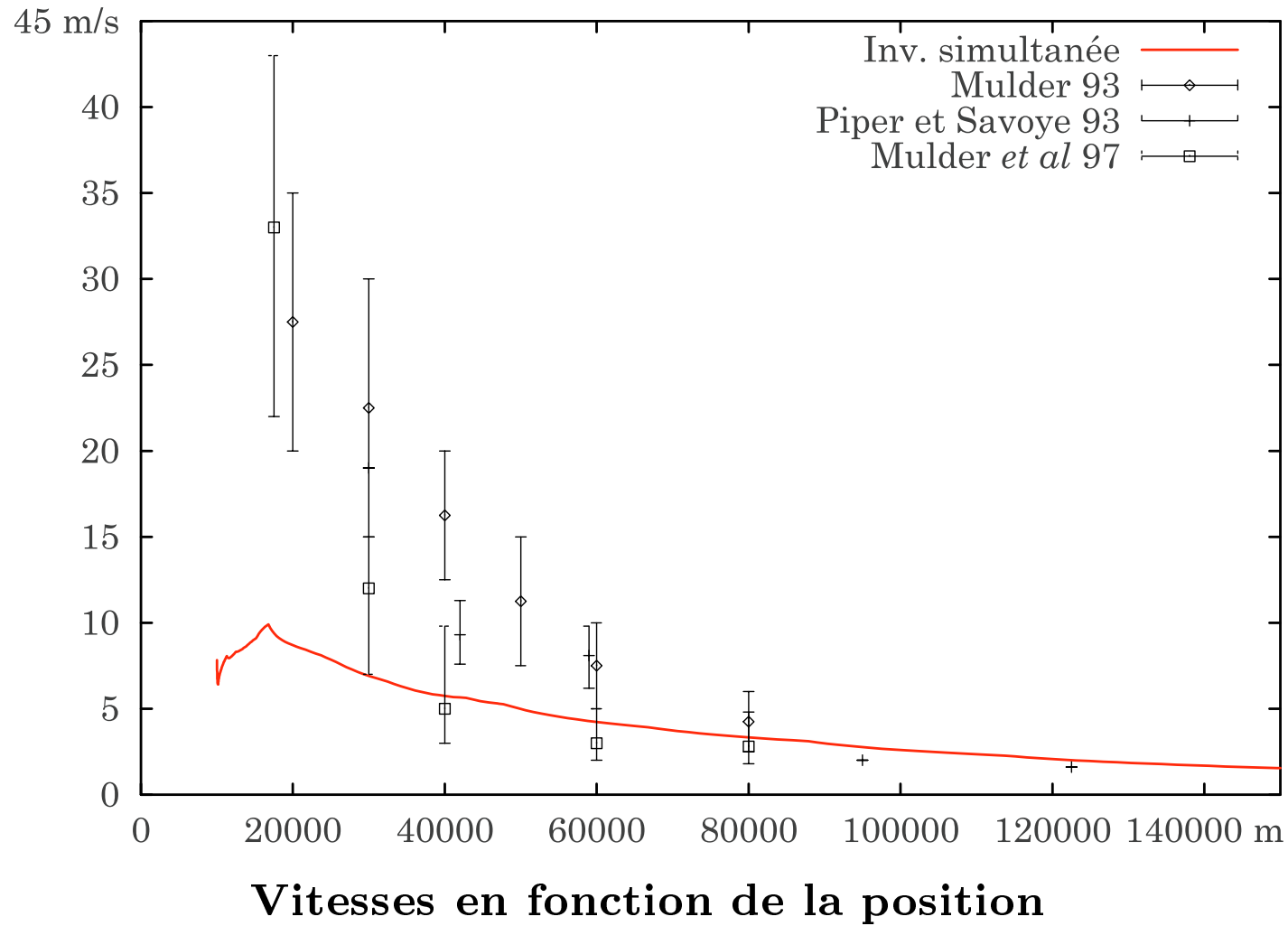
## Inversions totales simultanées



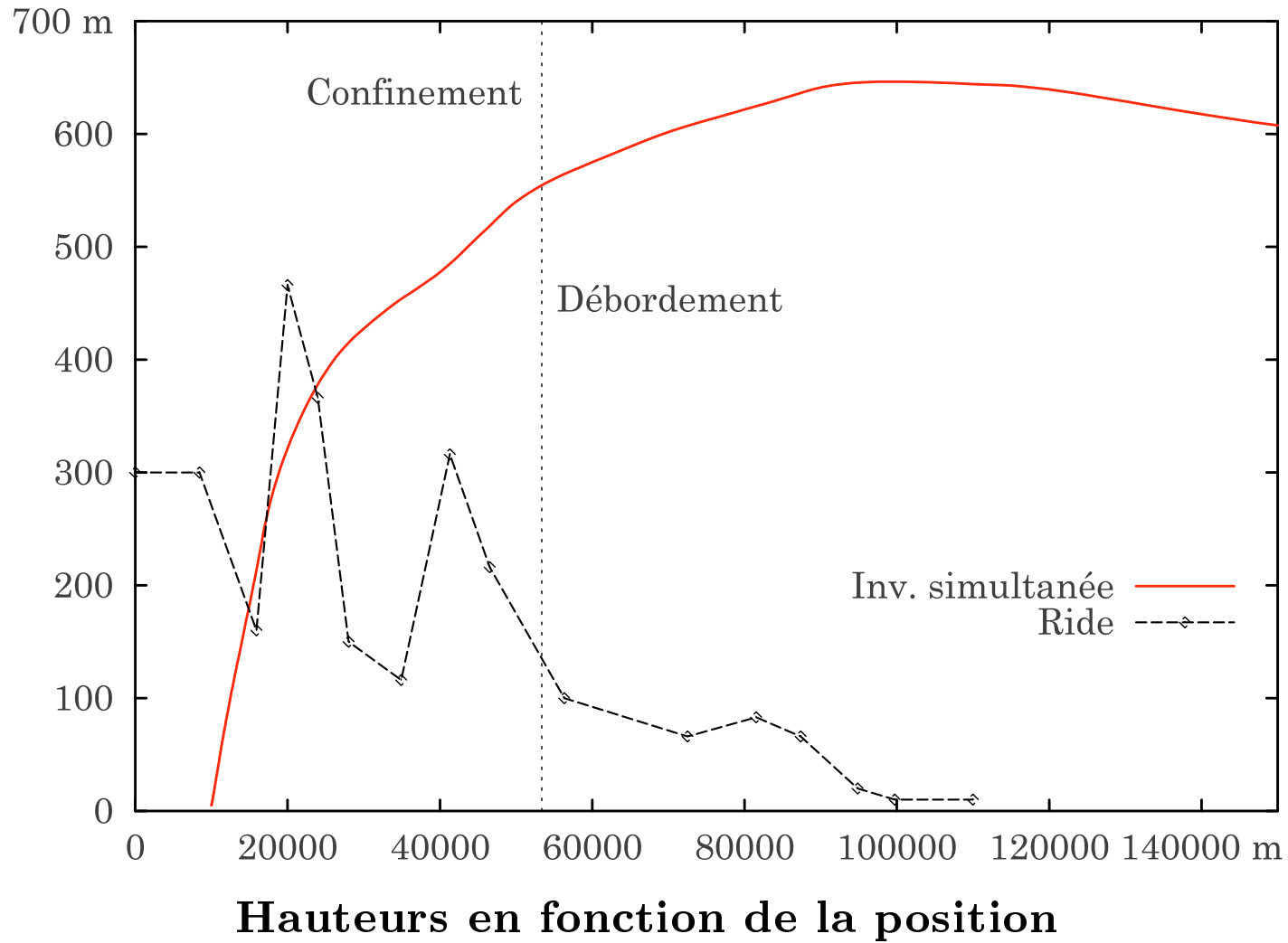
Position du front en fonction du temps

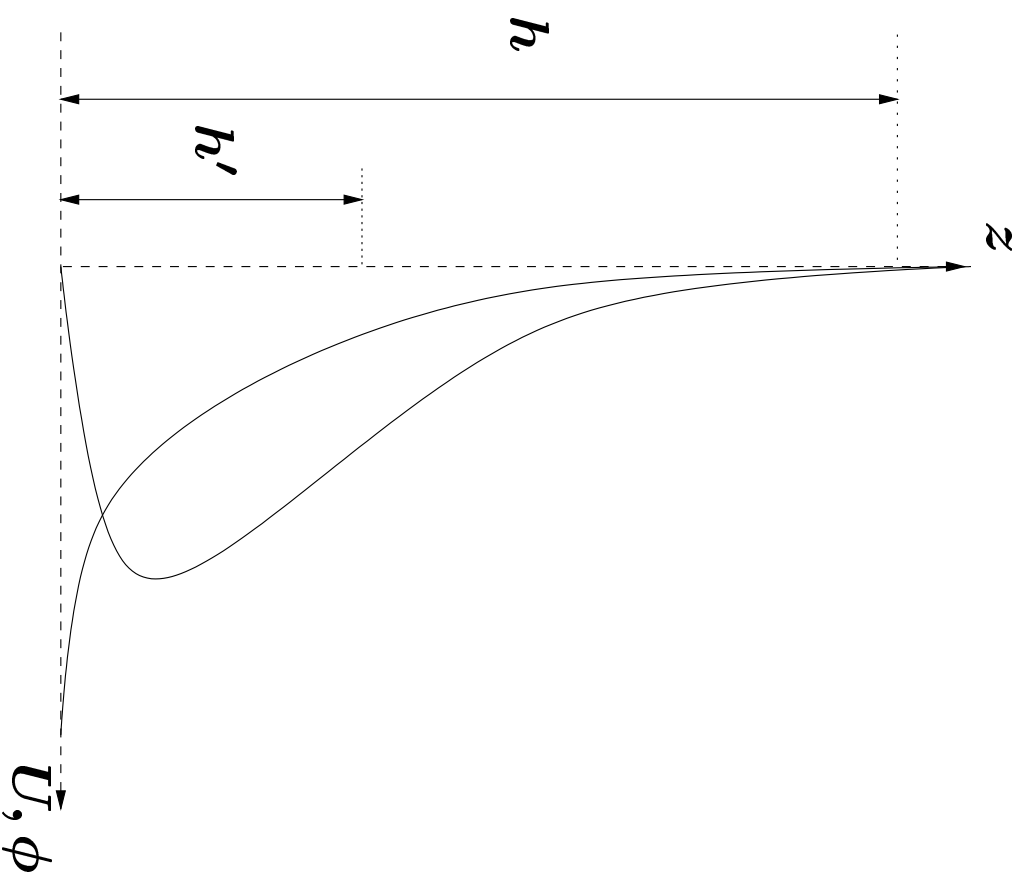
⇒ Scénario d'écoulement réaliste.

## Inversions totales simultanées



## Inversions totales simultanées





Correspondance entre la hauteur de l'écoulement et les profils de fraction volumique  $\phi$  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.

⇒ 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

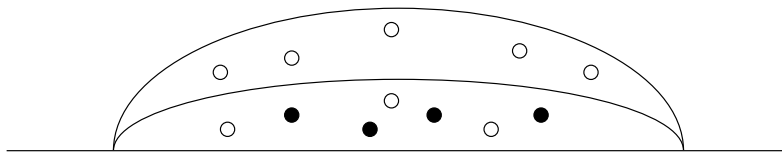
- **Modèle :**
  1. Implémenter les écoulements haute densité (lois de comportement) ;
  2. Formulations pour d'autres types d'objets géométriques.
  3. Modèle de conditions initiales ;
  4. Équation de l'énergie.

## Développements

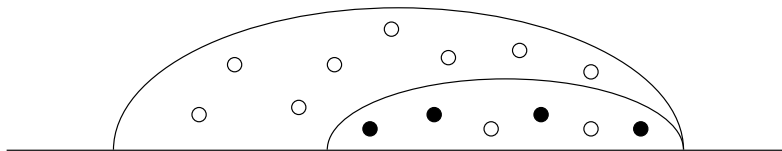
- **Lien avec le modèle stratigraphique IFP :**
  1. **Trouver des macro-lois à l'aide :**
    - solutions analytiques ;
    - simulation de séries d'événement.
  2. **Simuler directement des événements catastrophiques.**

# Multilithology

*In phase :*



*Out of phase :*



*Independent :*

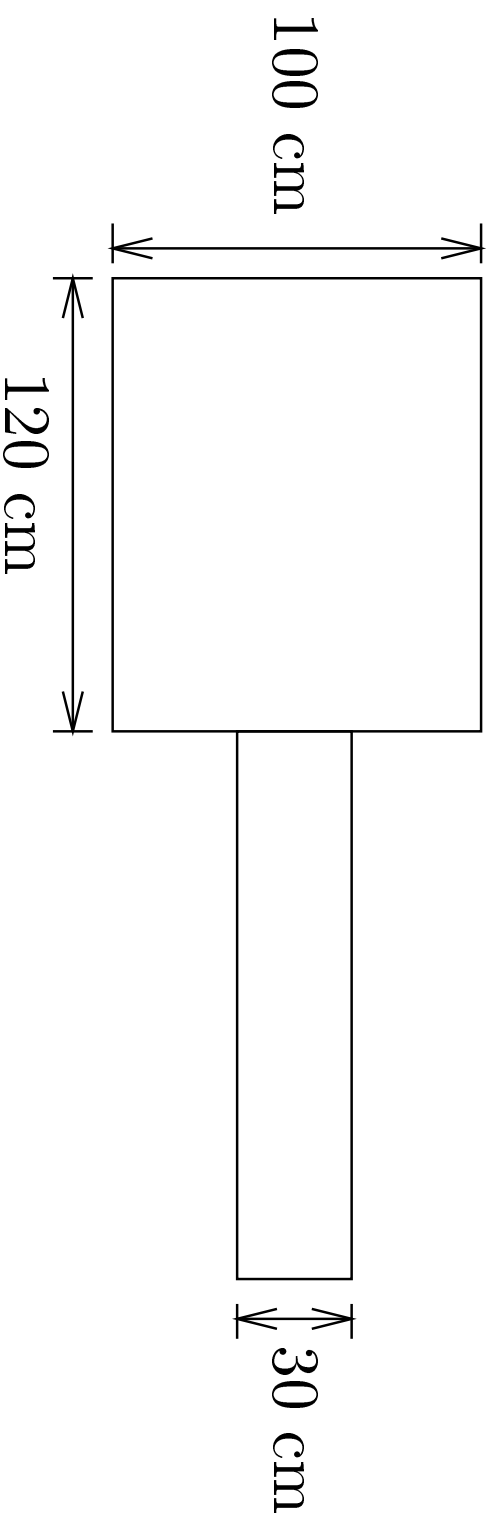


## Apport de la Modélisation Analogique

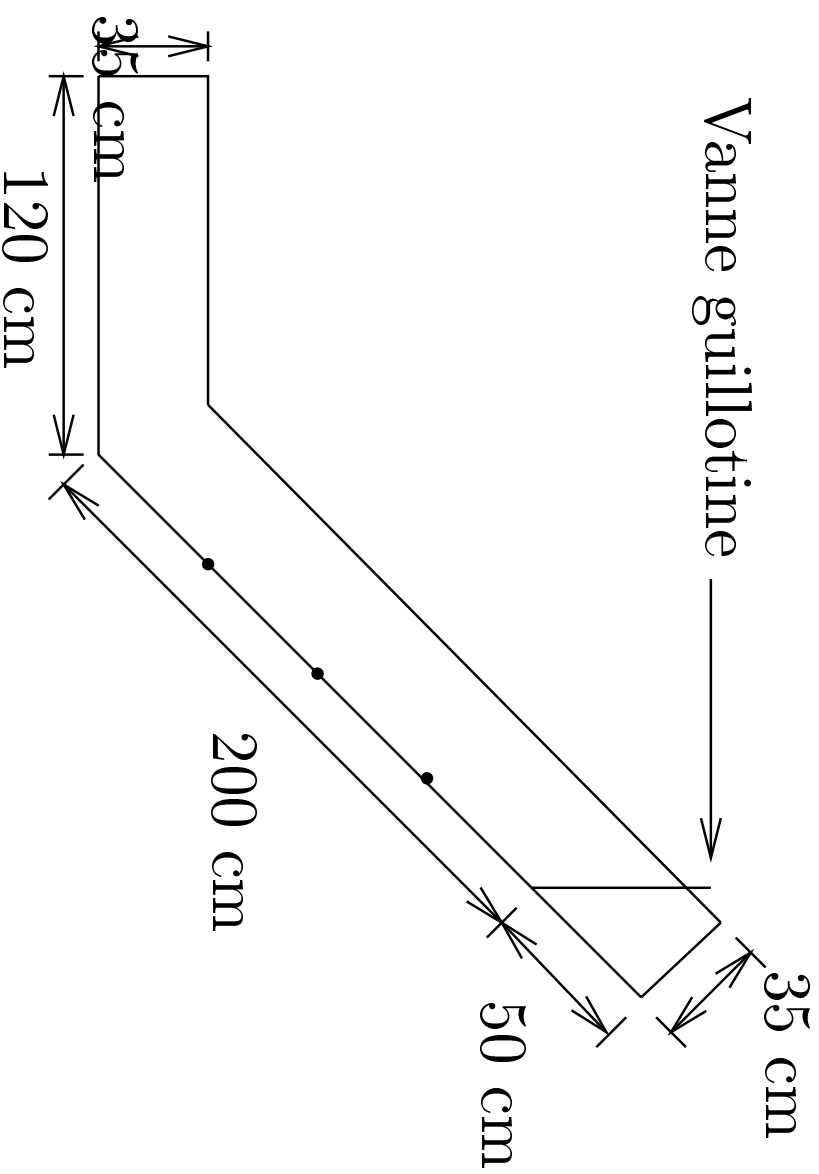
*Deux types d'expériences en canal :*

1. **Classique : “Logique modèle”**  
⇒ validation dynamique  
(mesures de vitesses, hauteurs, longueurs...)
2. **Multi-granulométrique : “Logique dépôt”**  
⇒ validation géologique  
(mesures des hauteurs de dépôt, stratifications internes...)

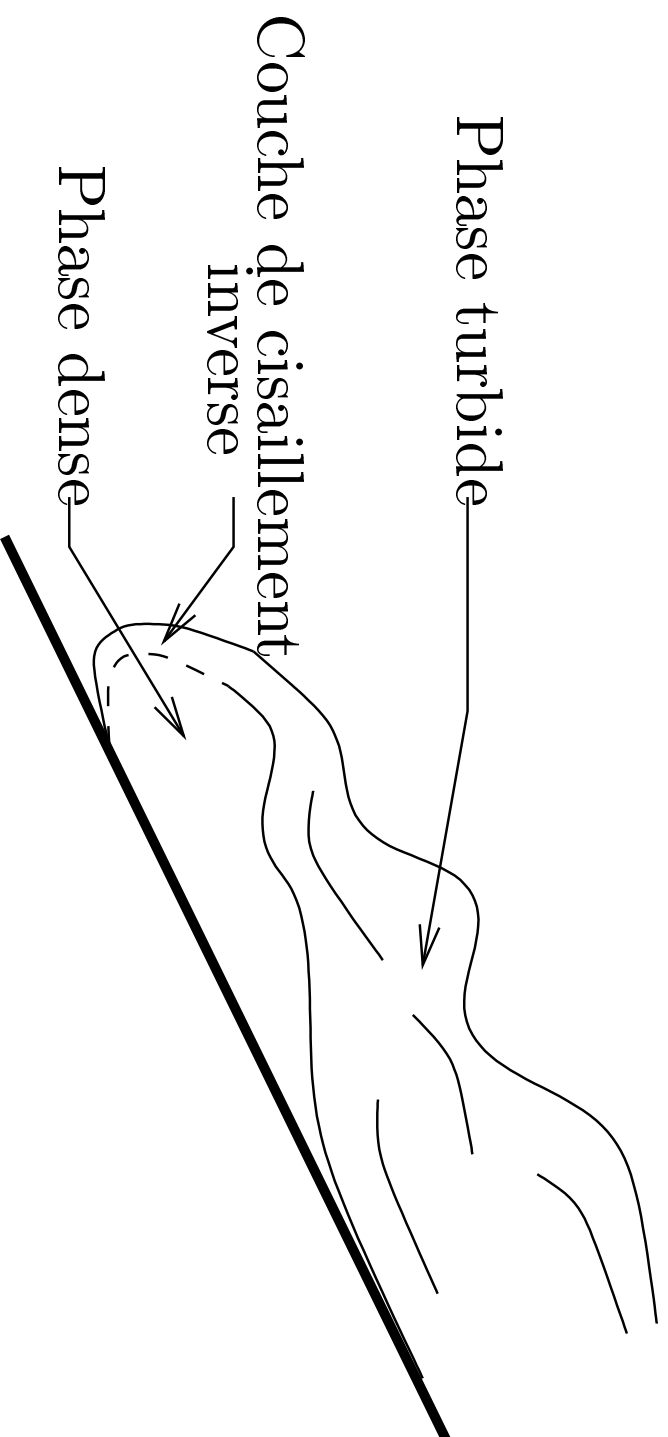
## Dispositif Expérimental : Dessus



## Dispositif Expérimental : Profil

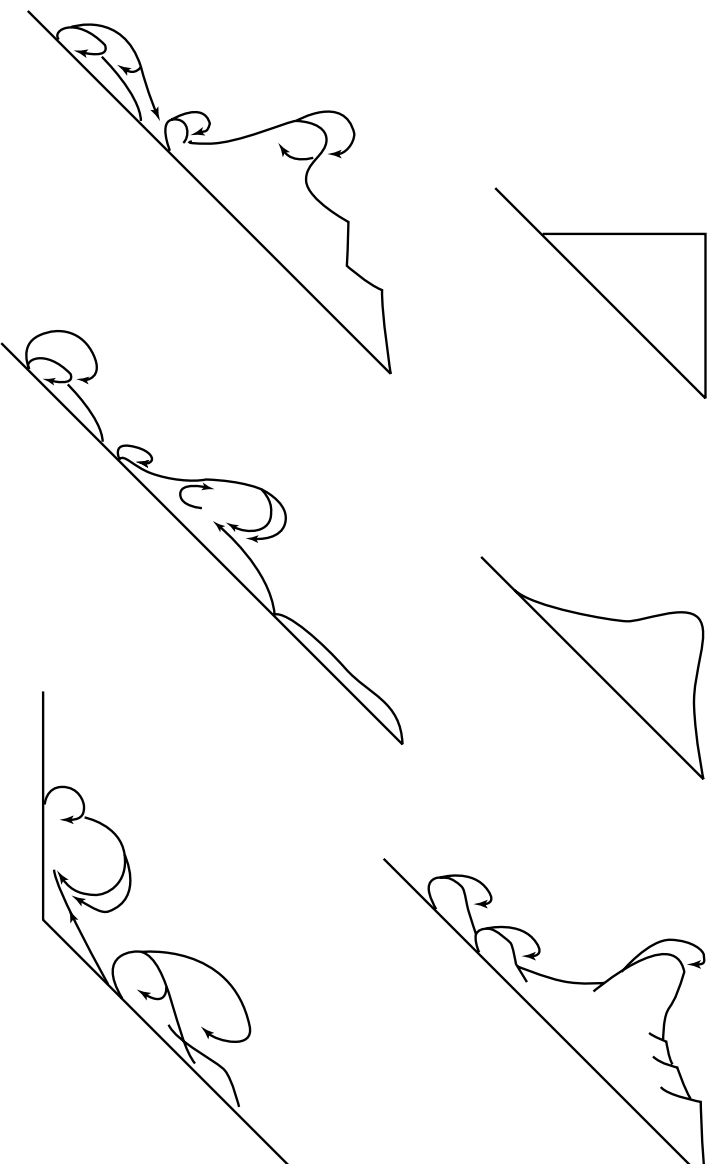


## Structure des Écoulements



⇒ Importance des lois de comportement.

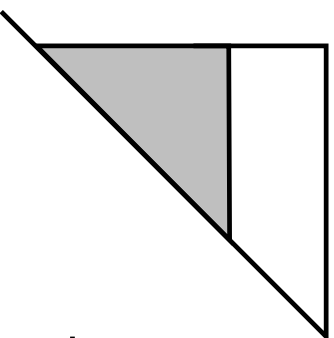
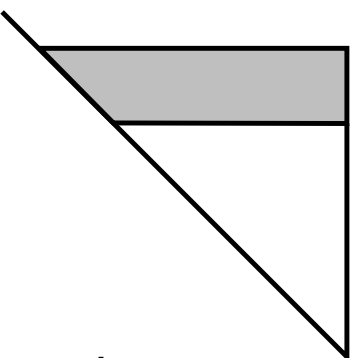
## Évolution des Écoulements



⇒ Importance des déformations des écoulements.



## Corrélations Conditions Initiales / Dépôt



⇒ Importance des Conditions Initiales.

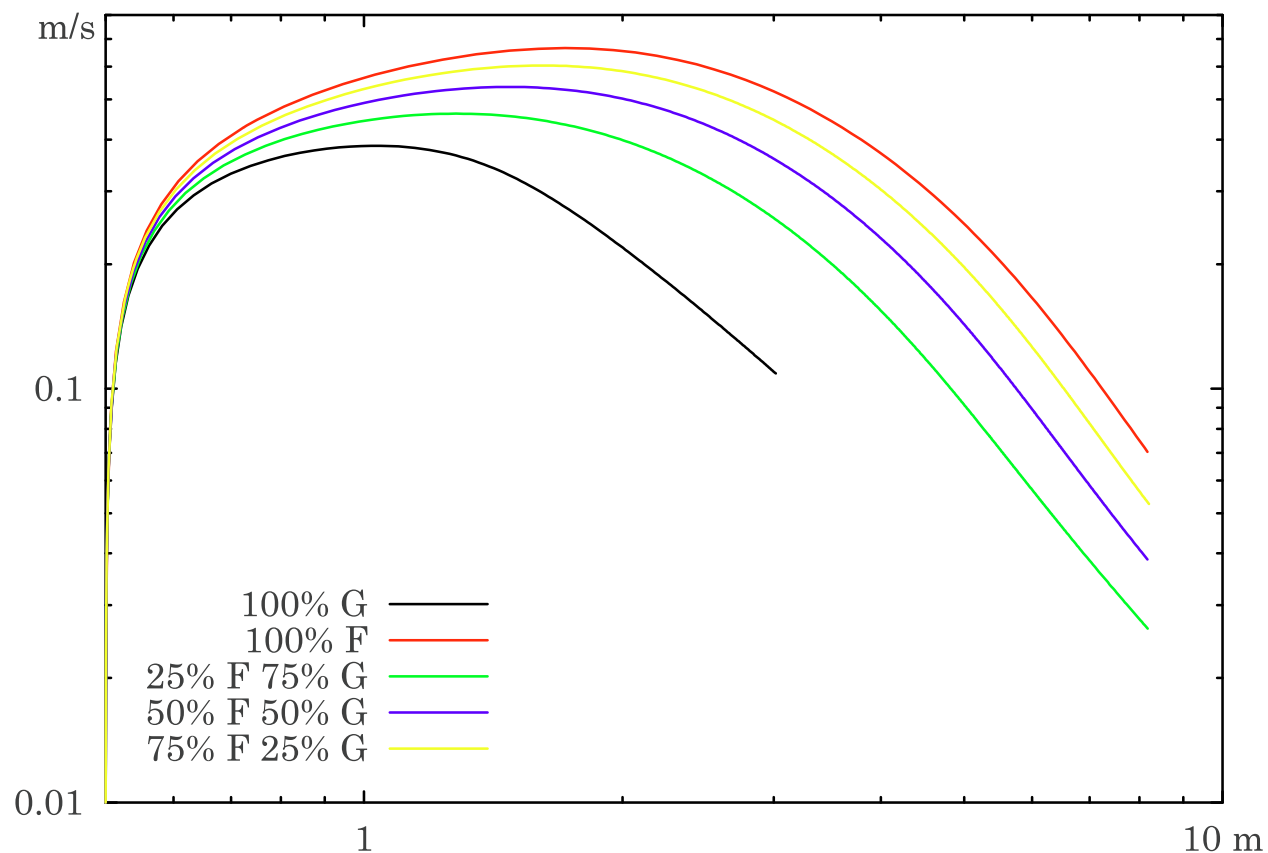
## Mise en Évidence de la Ségrégation



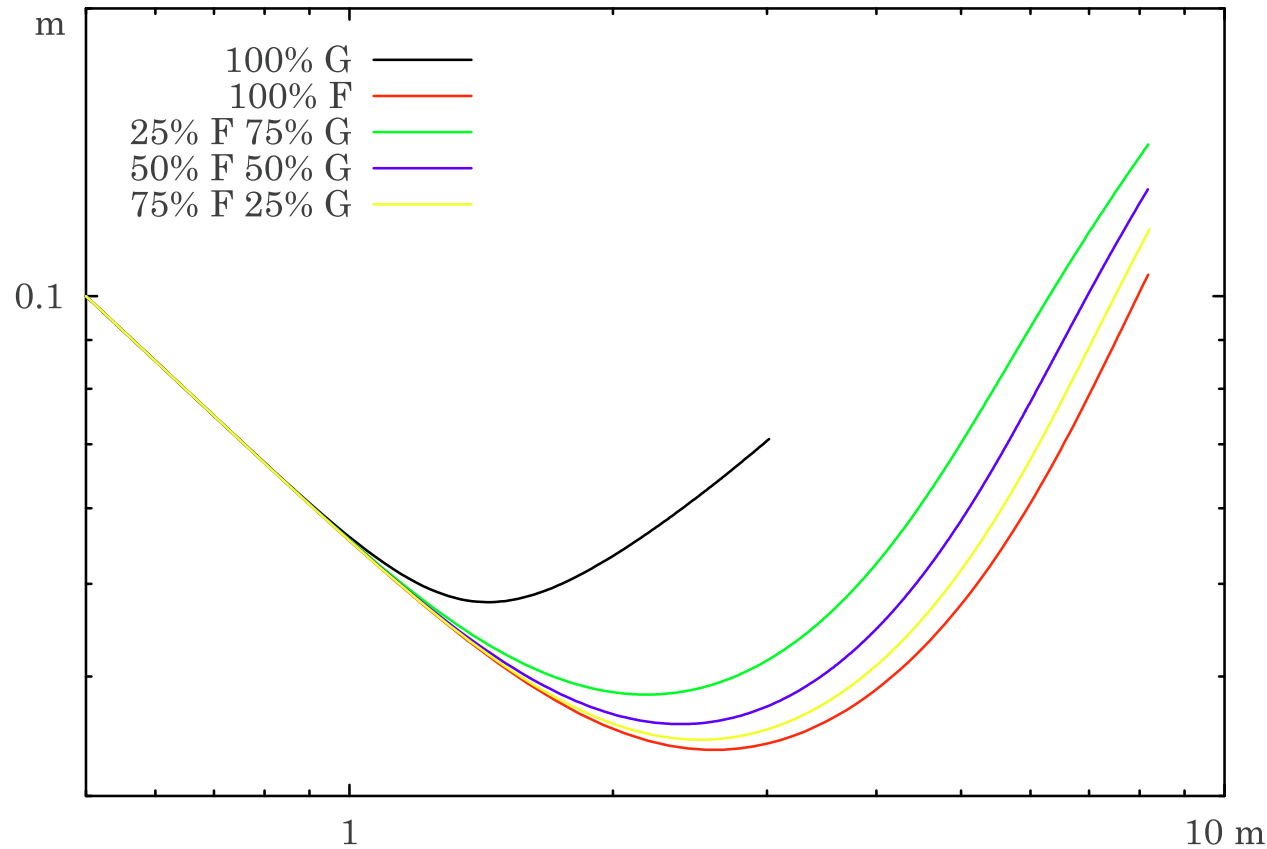
■ G r a v i e r s  
□ S a b l e s F i n s

⇒ Importance de la Multi-granulométrie.

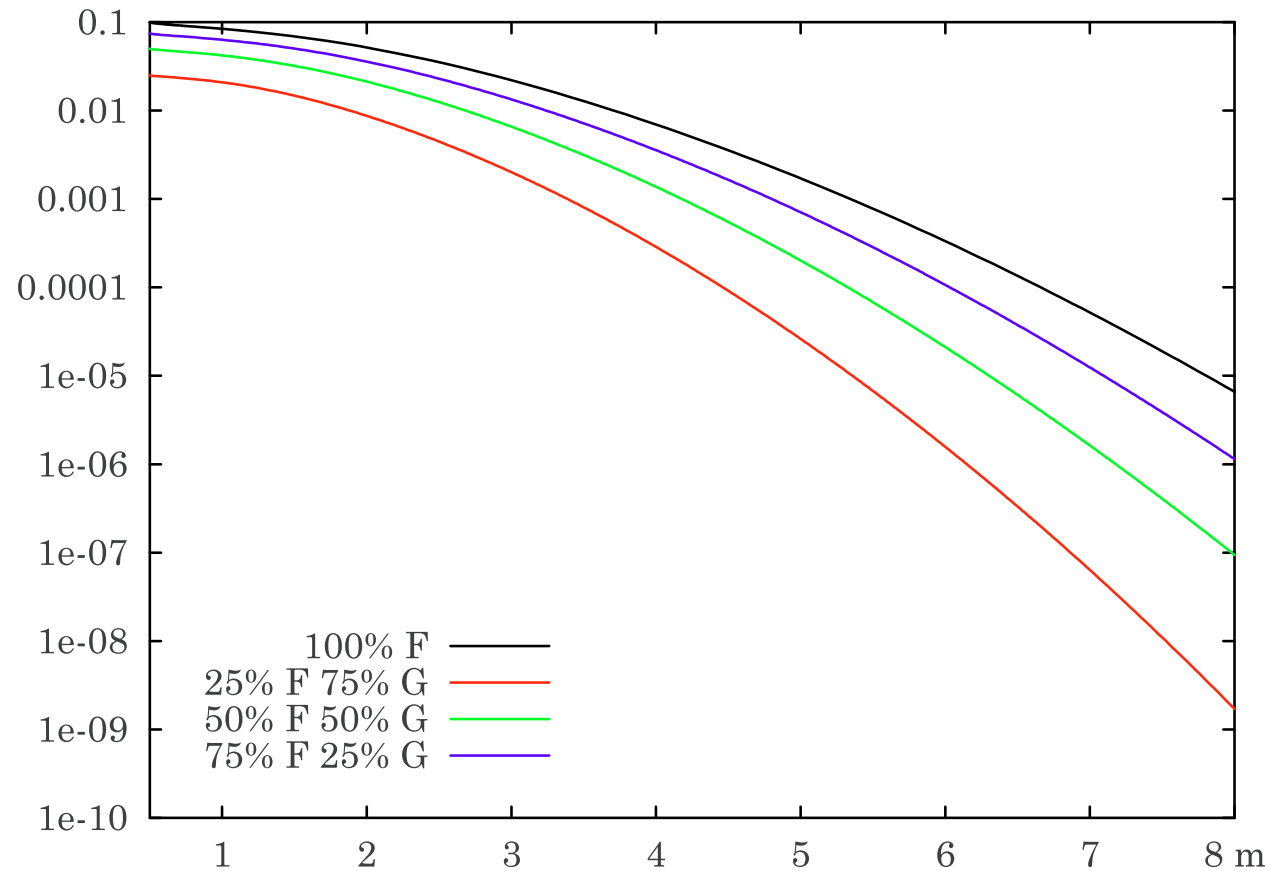
## Multi-granulométrie



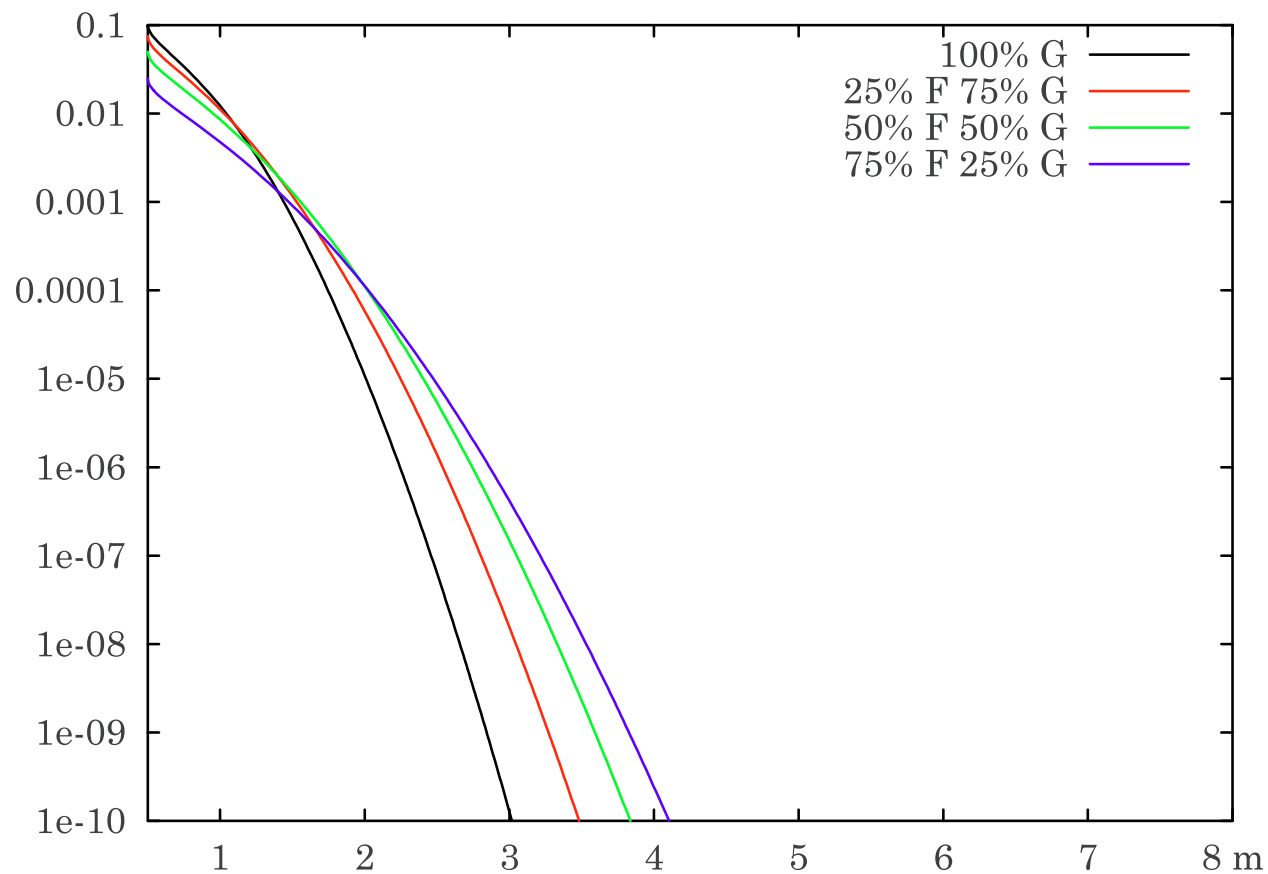
Vitesse en fonction de la position du front. Mélange de deux tailles de particules. % G = pourcentage de particules de  $500 \mu\text{m}$ , % F = pourcentage de particules de  $100 \mu\text{m}$ .



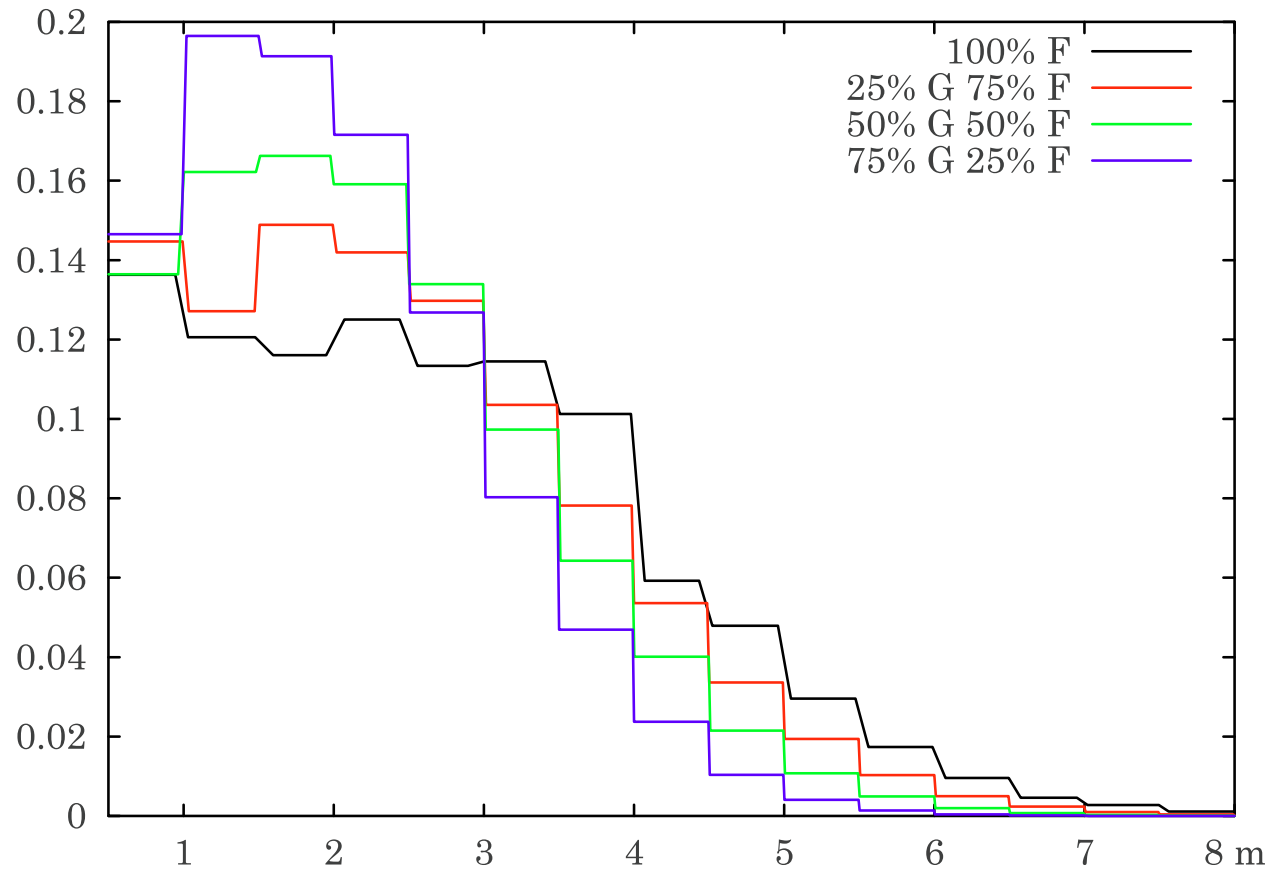
Hauteur en fonction de la position. Mélange de deux tailles de particules. % G = pourcentage de particules de  $500 \mu\text{m}$ , % F = pourcentage de particules de  $100 \mu\text{m}$ .



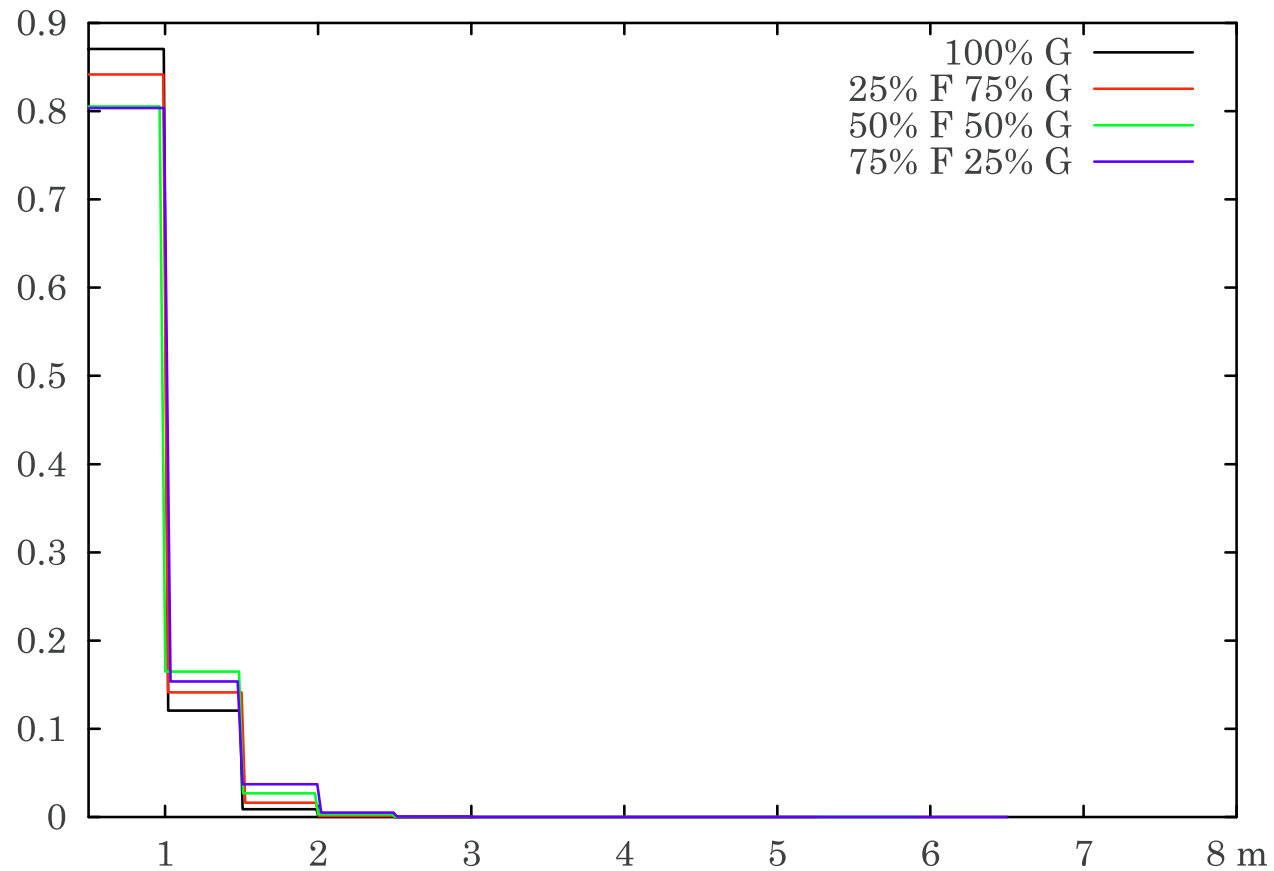
Évolution de la fraction volumique en fonction de la position. Particules fines. % G = pourcentage de particules de  $500 \mu\text{m}$ , % F = pourcentage de particules de  $100 \mu\text{m}$ .



Évolution de la fraction volumique en fonction de la position. Particules grossières. % G = pourcentage de particules de 500  $\mu\text{m}$ , % F = pourcentage de particules de 100  $\mu\text{m}$ .



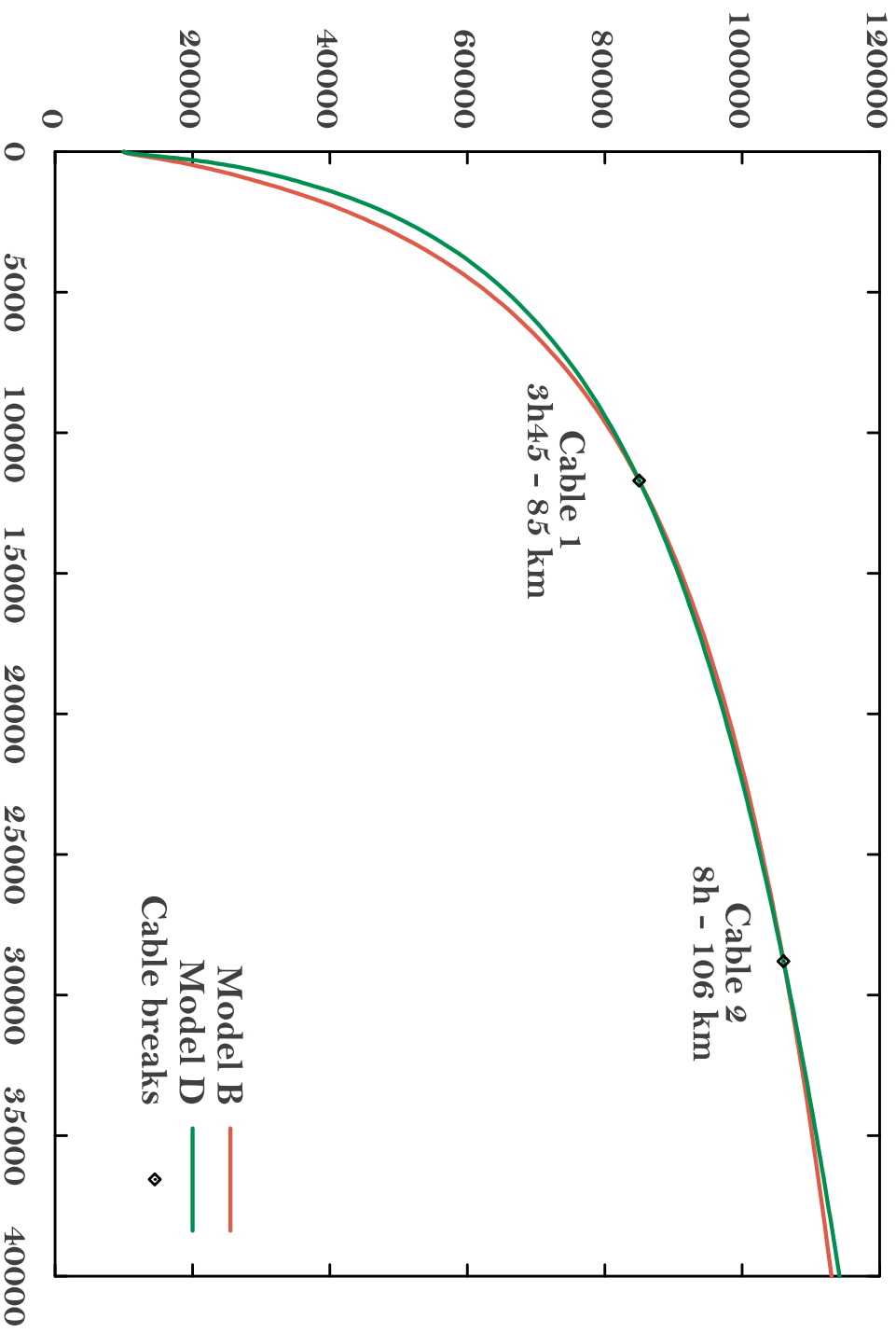
**Histogramme de répartition du sable. Particules fines. % G = pourcentage de particules de 500  $\mu\text{m}$ , % F = pourcentage de particules de 100  $\mu\text{m}$ .**



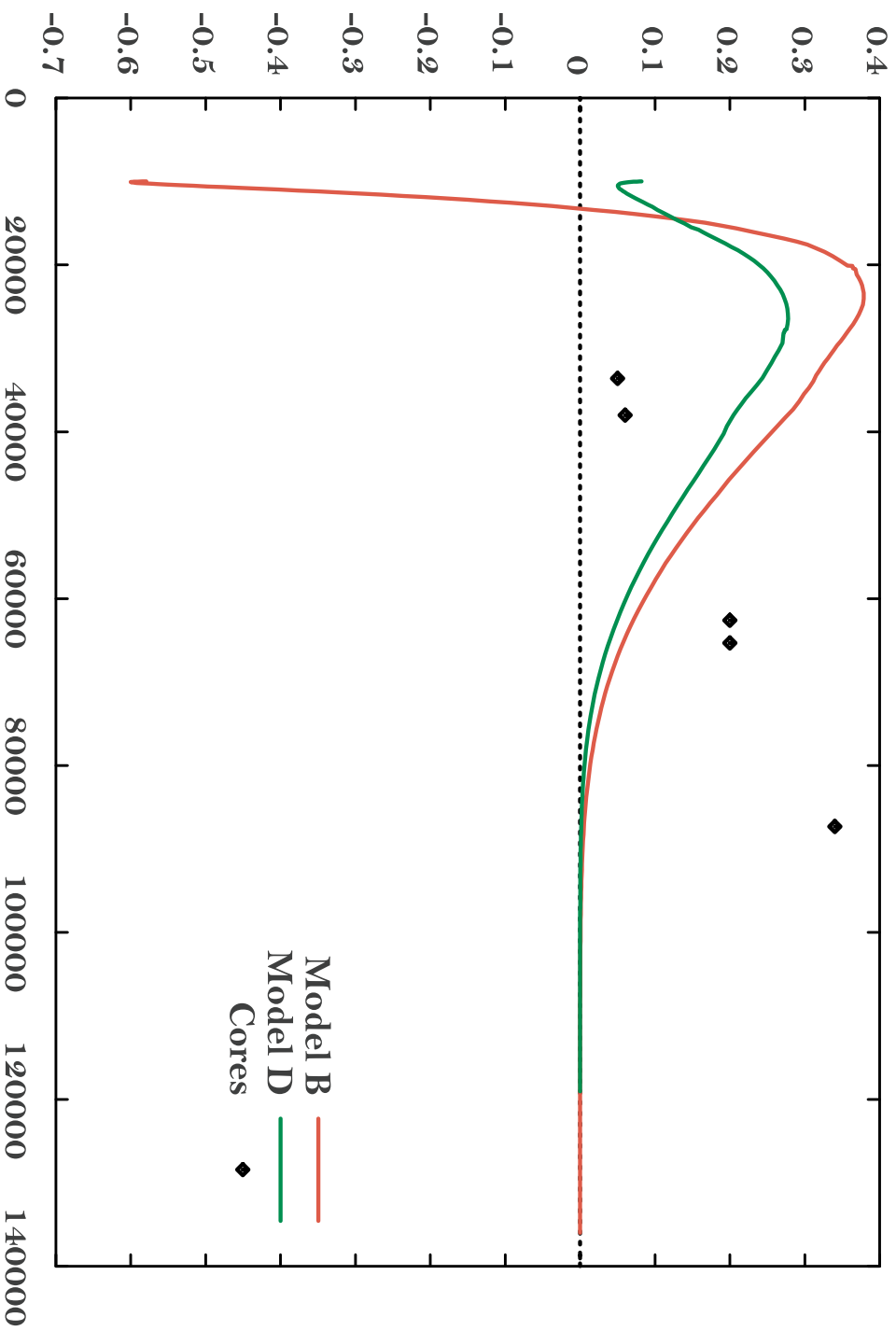
Histogramme de répartition du sable. Particules grossières. % G = pourcentage de particules de  $500 \mu\text{m}$ , % F = pourcentage de particules de  $100 \mu\text{m}$ .



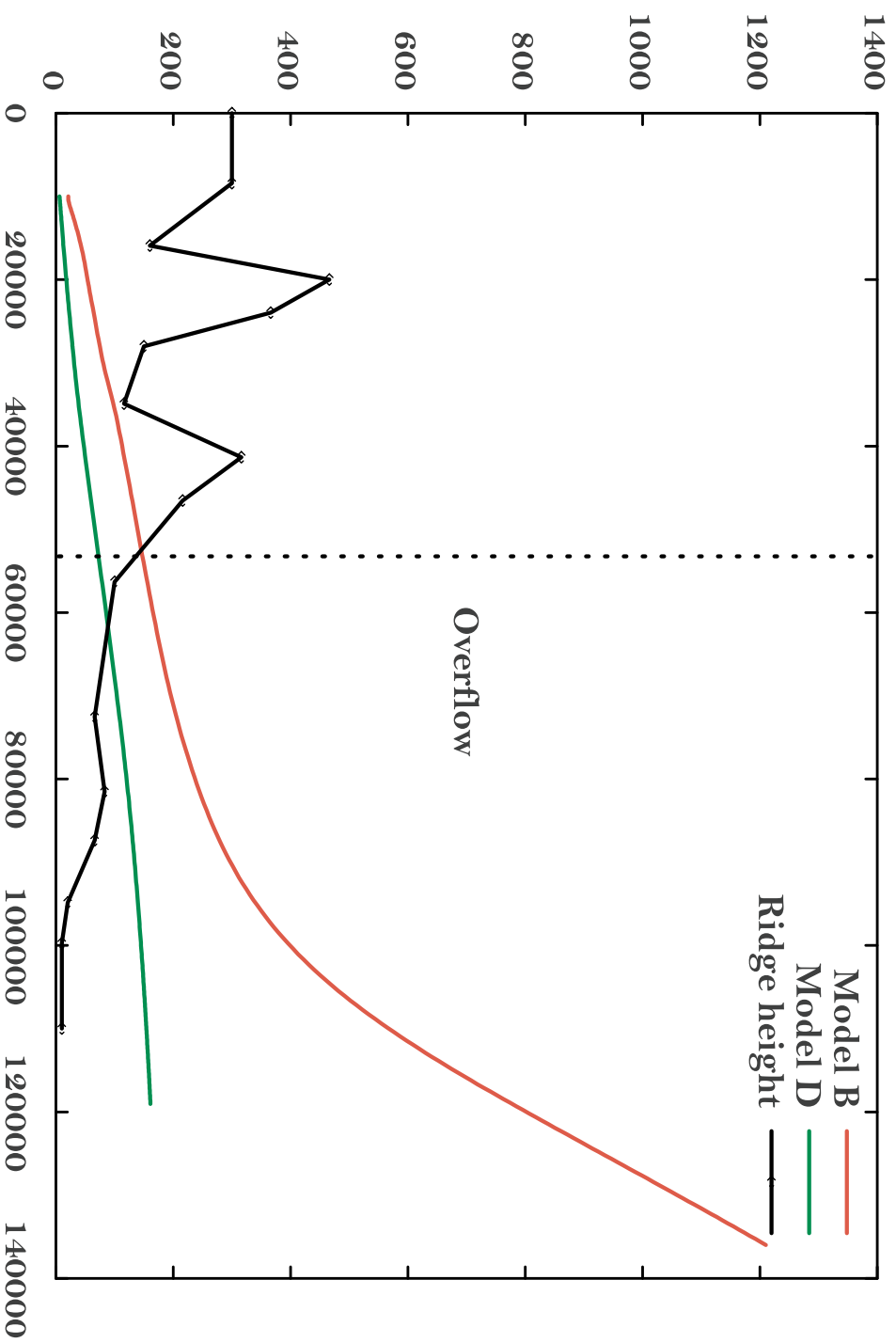
# Position du front en fonction du temps



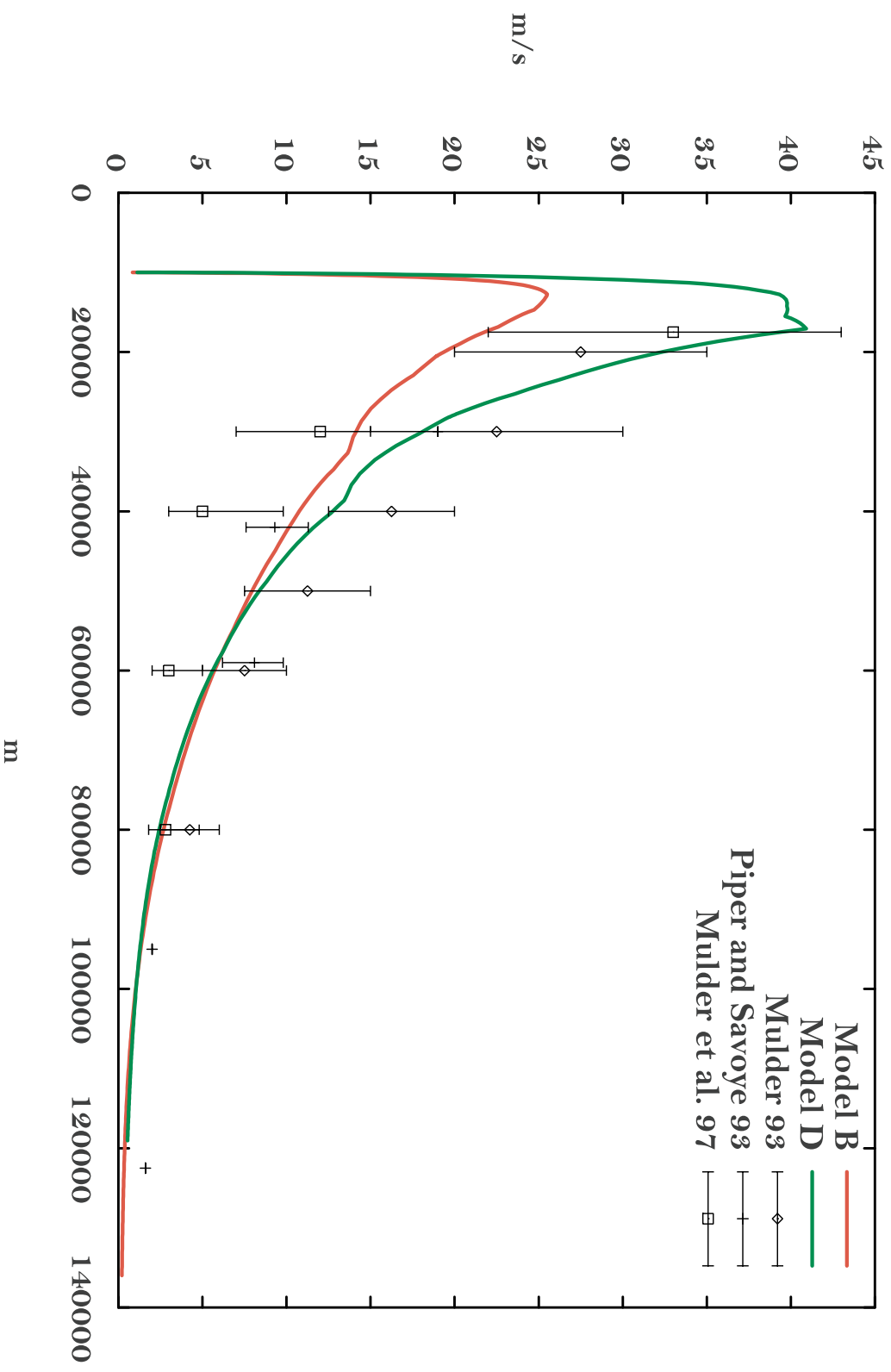
## Hauteurs sédimentées en fonction de la position



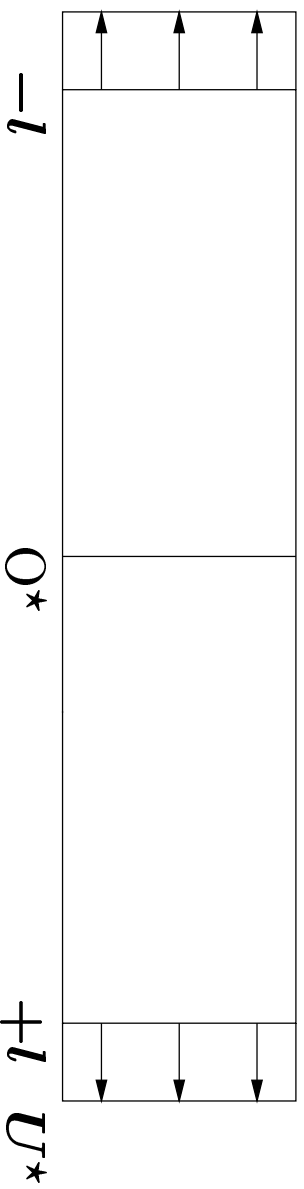
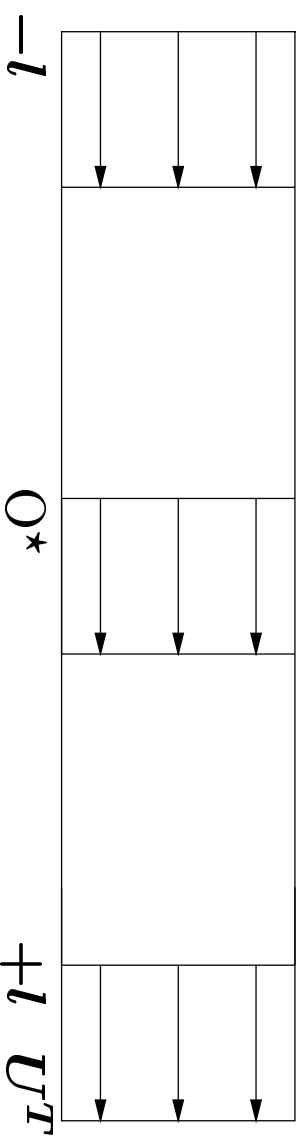
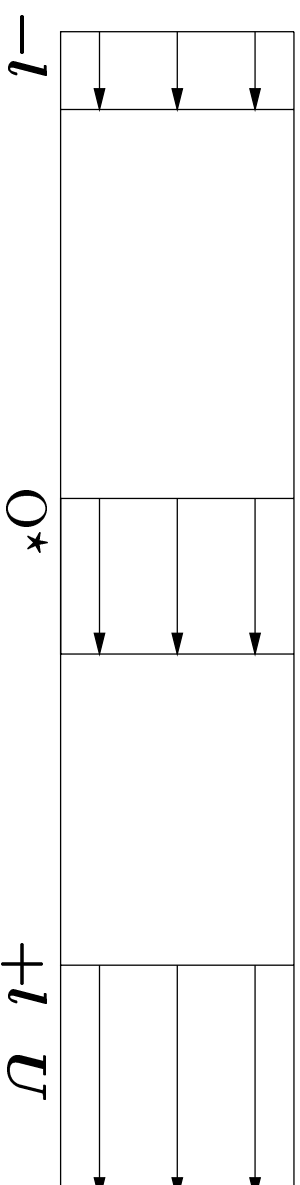
## Hauteurs en fonction de la position



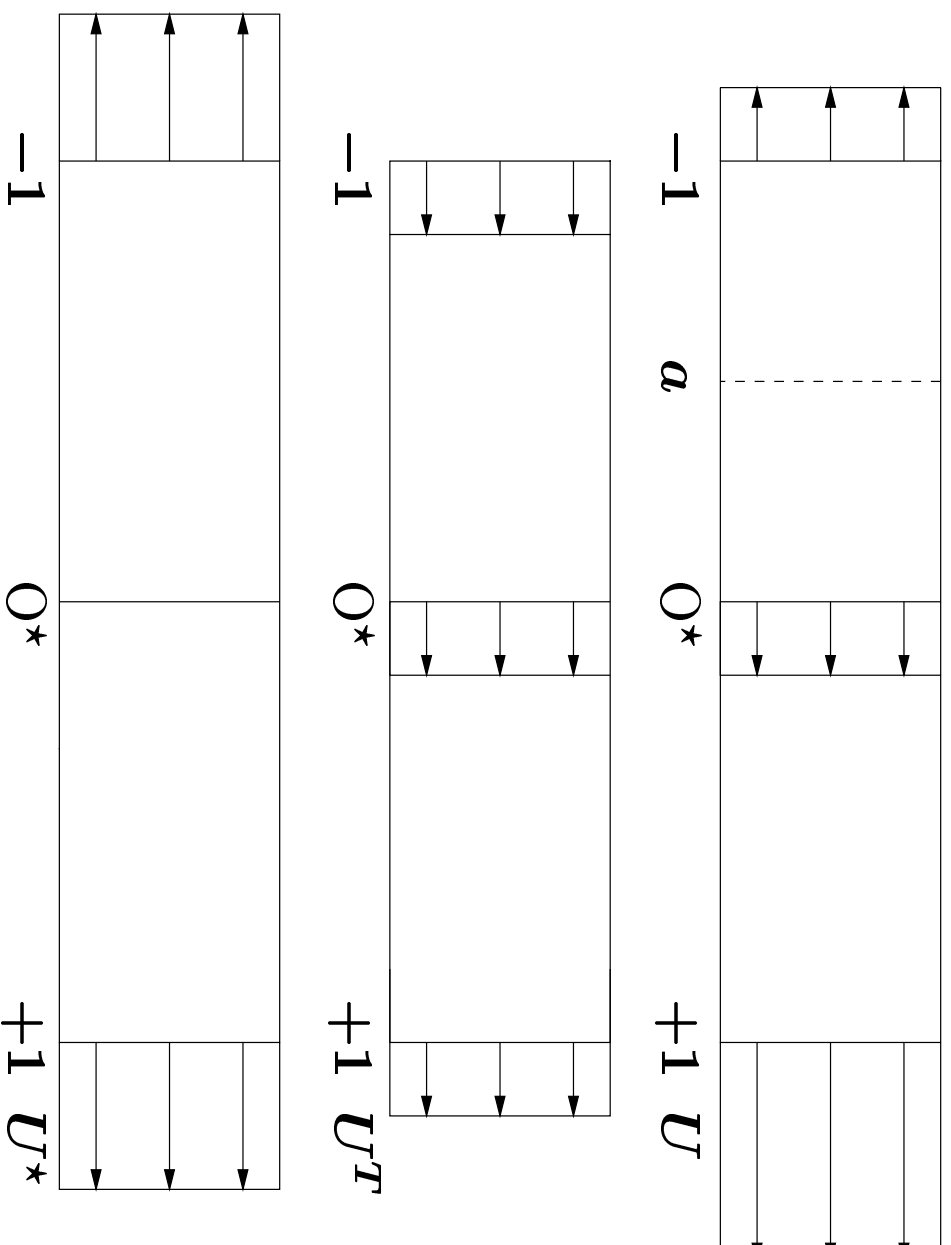
## Vitesse en fonction de la position



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



## Décomposition du champ de vitesse



## Système T (1/2)

Problème sur la hauteur  $h(t)$  :

$$\frac{\pi}{2} \frac{dh}{dt} = \frac{C_1}{C_2 + \text{Ri}} \left( (1 - a^2)U^* - 2aU^T \right) l$$

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

$$\frac{\pi}{2} \frac{d\Phi}{dt} h = \Phi l \left( C_0 C_4 \left( (1 - a^2)U^* - 2aU^T \right) - 2v_s C_3 \right)$$

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

$$\frac{\pi}{2} \frac{dU^T}{dt} h l = \frac{\pi}{2} h l g'_x \Phi [1 - \gamma] - 2l C_0 \left( (1 - a^2) U^* U^T - \frac{1}{3} a^3 U^{*2} - a U^{T^2} \right)$$

## Système T (2/2)

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

$$\frac{1}{3} \frac{dU^* t h}{dt} - h U^{T2} = \frac{1}{2} g'_z h^2 \Phi [1 - \gamma]$$

$$- l C_0 \left( a^2 U^* U^T + \frac{1}{3} (1 + a^3) U^{*2} + (1 + a) U^{T2} \right)$$

et

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