

8<sup>èmes</sup> Journées  
Fiabilité des  
MATÉRIAUX & DES STRUCTURES  
Aix-en-Provence,  
9 et 10 avril 2014



ECOSYSTEMES CONTINENTAUX  
ECCOREV  
ET RISQUES ENVIRONNEMENTAUX



# Modélisation probabiliste du rebond d'un bloc sur un sol dans le contexte de l'analyse de la trajectographie des chutes de blocs

F. Bourrier<sup>1</sup>, N. Eckert<sup>2</sup>, F. Berger<sup>1</sup>, F. Nicot<sup>2</sup>, F. Darve<sup>3</sup>

1 Irstea – Grenoble - UR EMGR

2 Irstea - Grenoble - UR ETGR

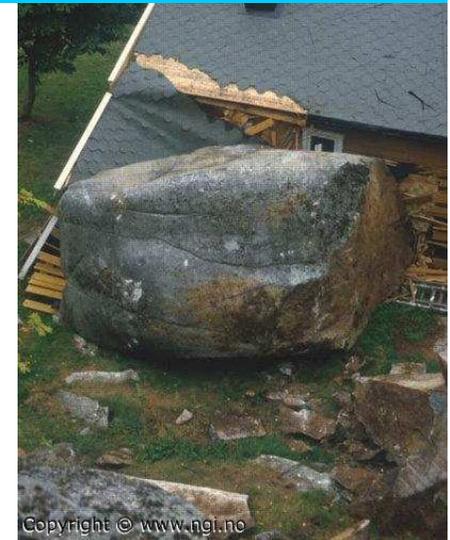
3 Laboratoire 3SR - Grenoble

# Chute de bloc: contexte général

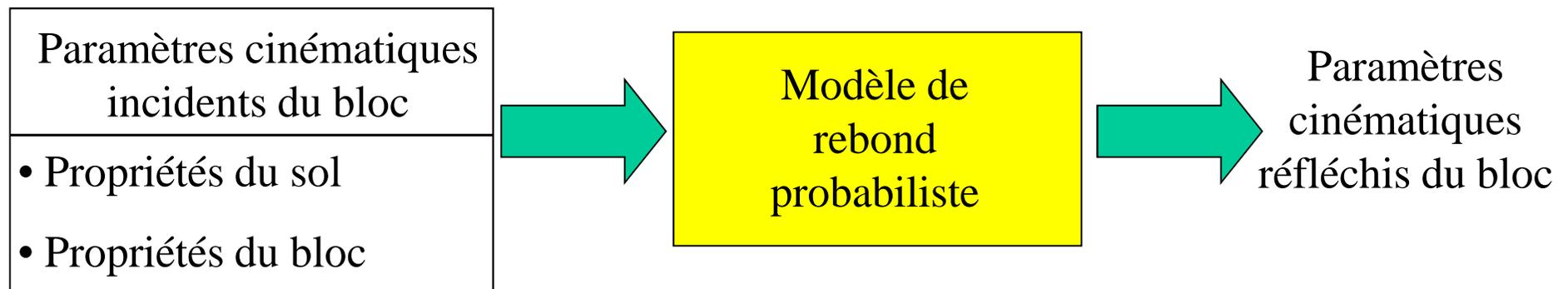
- Prédiction du risque de chute de blocs par analyse trajectographique :

⇒ **Difficulté principale : Modélisation du rebond**

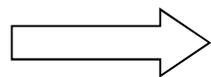
- Limitations :
  - ✓ Formulation simplifiée
  - ✓ Sources de variabilité



- **But : Etablir un modèle de rebond probabiliste**



Méthodologie:



- Modèle DEM d'impact
- Calibration du modèle DEM
- Construction du modèle probabiliste de rebond
- Validation du modèle probabiliste de rebond

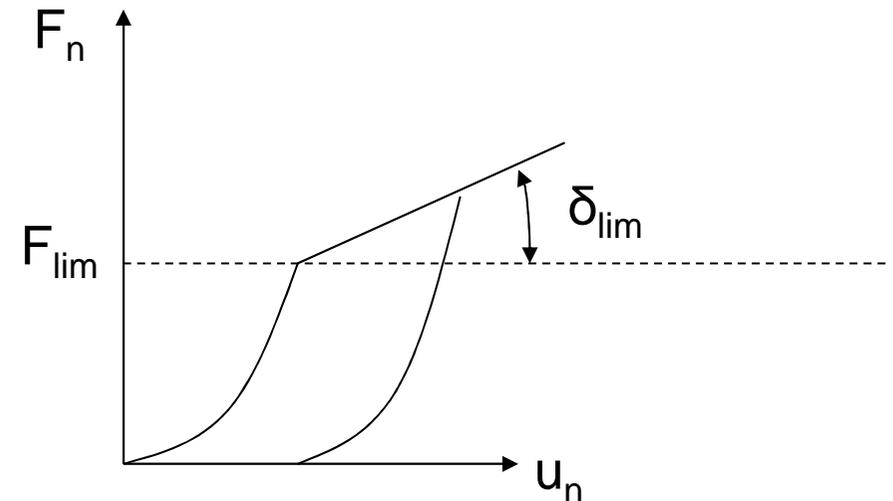
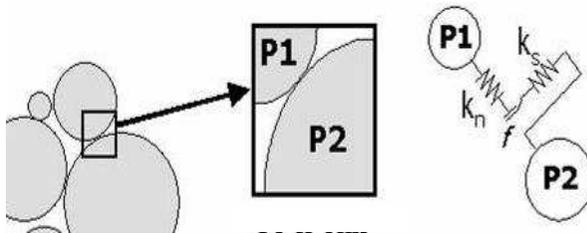
# Modélisation numérique de l'impact

## Méthode des Eléments Discrets :

Loi de contact : Modèle élasto-plastique

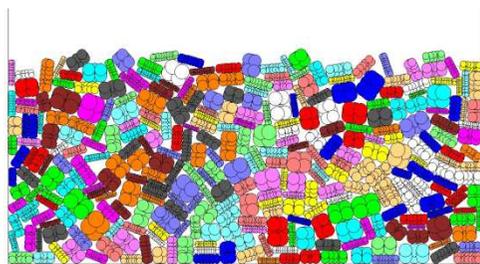
+

Frottement de Coulomb



## Propriétés du sol :

- Eboulis = milieu granulaire 2D



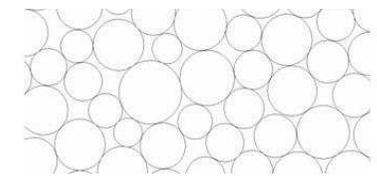
o Propriétés mécaniques :

$$G=40\text{GPa}; \nu =0.25; \varphi=30^\circ$$

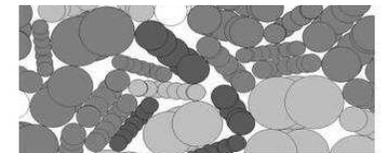
o Poly-dispersité:

$$0.1 \text{ m}^3 < V_{\text{particule}} < 1 \text{ m}^3$$

o Particules sphériques ou « clumps »



Spherical particles



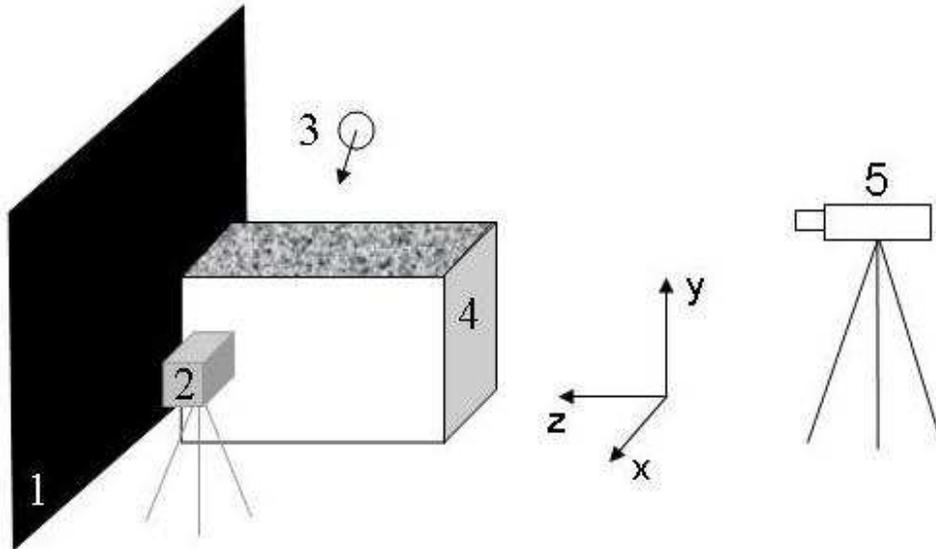
«Clumps» particles

- Bloc sphérique :  $R_{\text{particule}} < R_{\text{bloc}} < 5 R_{\text{particule}}$

⇒ Paramètres à calibrer : porosité ;  $F_{\text{lim}}$  ;  $\delta_{\text{lim}}$

# Calibration des simulations d'impact

Essais « échelle réduite » :



- 1 - Black screen.
- 2 - VHS camera.
- 3 - Quasi-spherical projectile.
- 4 - Soil sample.
- 5 - High speed camera.

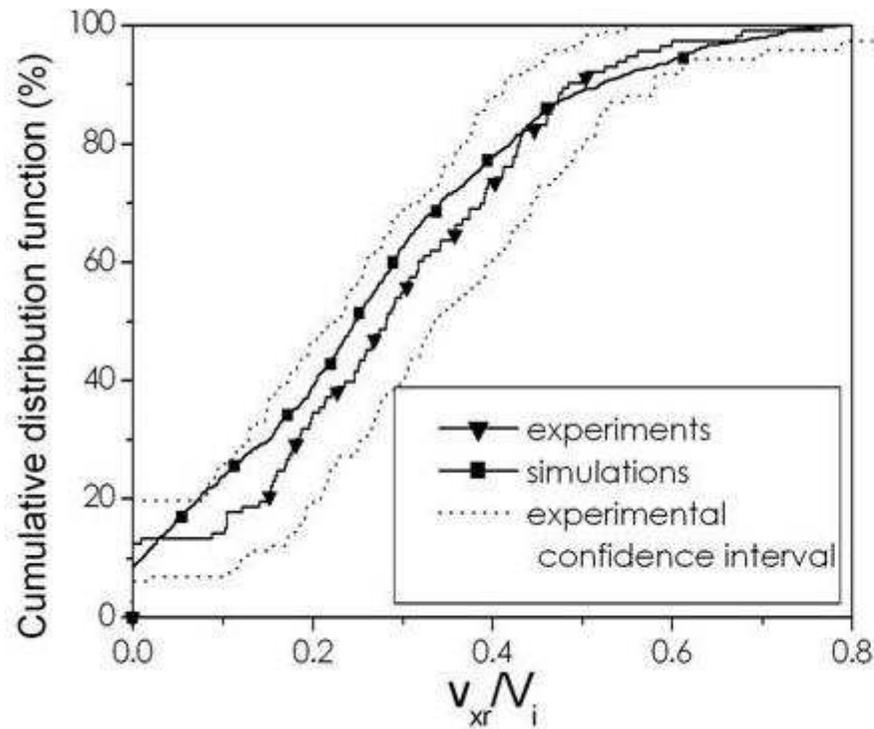


- $R_{\text{bloc}} \sim R_{\text{particule}}$
- Conditions incidentes contrôlées
- 300 essais

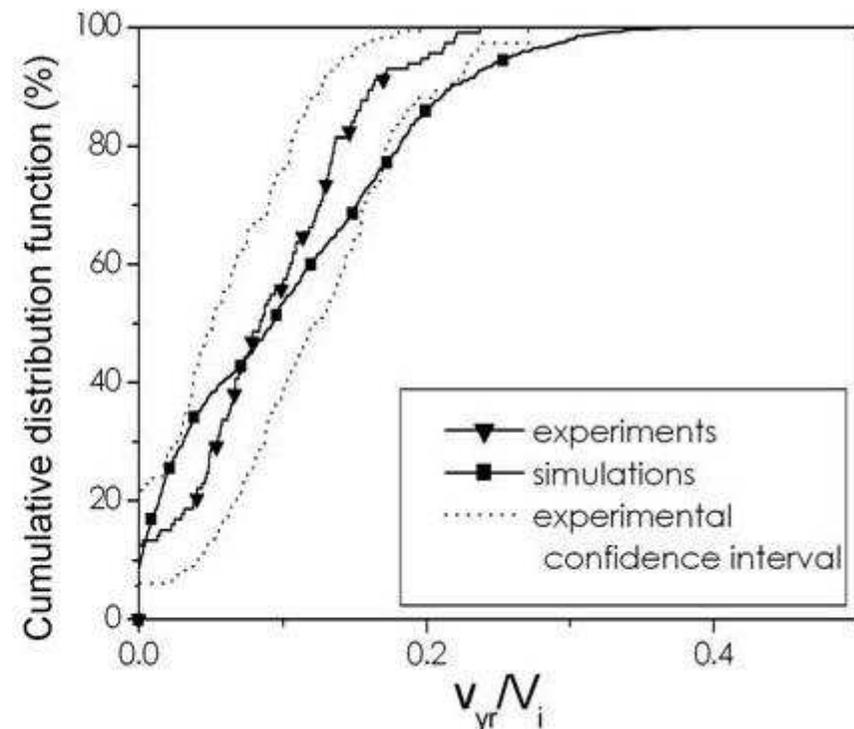
# Calibration des simulations d'impact

## *Vitesse réfléchi*

### Composante tangentielle



### Composante normale



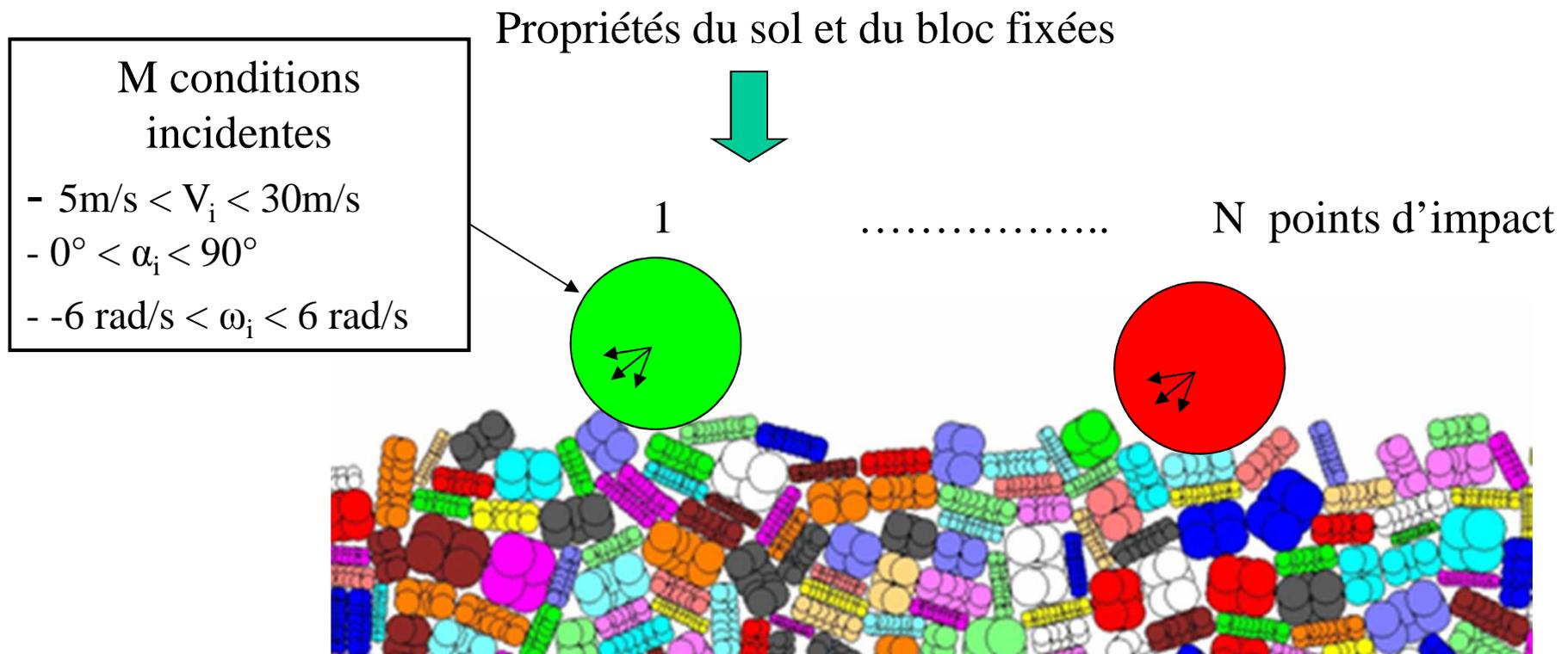
⇒ Calibration des simulations numériques :

- Porosité du sol
- Modèle de contact:  $F_{lim}$ ,  $\delta_{lim}$

# Modèle probabiliste de rebond

## Protocole de simulation:

N points d'impact x M conditions incidentes = NxM impacts simulés



## Modèle probabiliste de rebond

- Analyse statistique des résultats de simulation :

*Modèle hiérarchique*

$$\begin{bmatrix} v_x^{re} \\ v_y^{re} \\ R_b \omega^{re} \end{bmatrix} \sim \mathbf{N}^3 \left( \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ a_4 & a_5 & a_6 \\ a_7 & a_8 & a_9 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x^{in} \\ v_y^{in} \\ R_b \omega^{in} \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \Sigma_{xx} & \Sigma_{xy} & \Sigma_{x\omega} \\ \Sigma_{xy} & \Sigma_{yy} & \Sigma_{y\omega} \\ \Sigma_{x\omega} & \Sigma_{y\omega} & \Sigma_{\omega\omega} \end{bmatrix} \right)$$

$$\begin{bmatrix} a_1 \\ \dots \\ a_9 \end{bmatrix} \sim \mathbf{N}^9 \left( \begin{bmatrix} m_1^a \\ \dots \\ m_9^a \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} \Sigma_{11}^a & \dots & \Sigma_{19}^a \\ \dots & \dots & \dots \\ \Sigma_{19}^a & \dots & \Sigma_{99}^a \end{bmatrix} \right)$$

- Identification des paramètres : méthodes MCMC

## Modèle probabiliste de rebond

- Interprétation physique du modèle statistique:

Quel que soit le point d'impact  $p$ ,

$$\begin{bmatrix} V_{x,r} \\ V_{y,r} \\ R_b \omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}(p) & a_{12}(p) & a_{13}(p) \\ a_{21}(p) & a_{22}(p) & a_{23}(p) \\ a_{31}(p) & a_{32}(p) & a_{33}(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{x,i} \\ V_{y,i} \\ R_b \omega_i \end{bmatrix}$$

Avec  $a_{ij}(p) \in N(m_{ij}, \sigma_{ij})$

- ✓ Si  $p$  est fixé, relation déterministe entre  $V_i$  et  $V_r$
- ✓ Phénomènes physiques similaires quel que soit le point d'impact  $p$

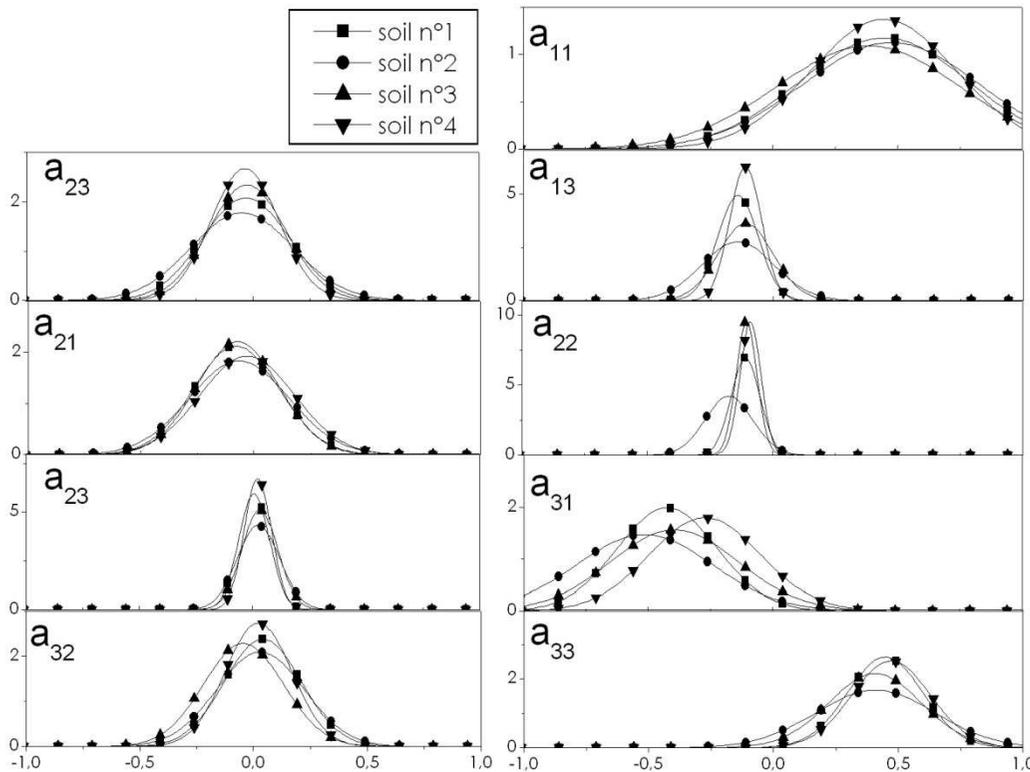
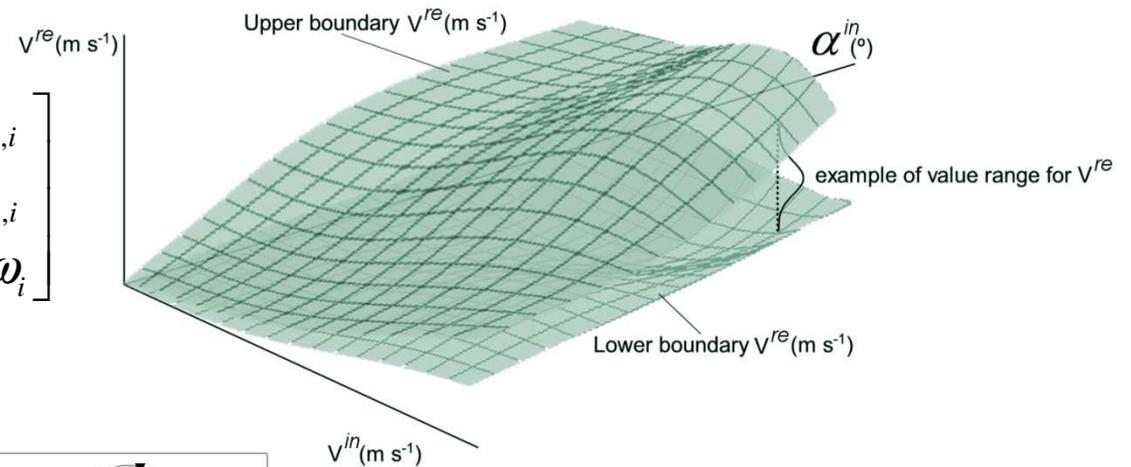
- Qualité du modèle :

$$R = \text{Moyenne} \left( \frac{\text{Variabilité expliquée par } \Delta \mathbf{V}^{\text{in}}(p)}{\text{Variabilité totale } (p)} \right)$$

⇒ **R > 0,75**

# Modèle probabiliste de rebond

$$\begin{bmatrix} V_{x,r} \\ V_{y,r} \\ R\omega_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}(p) & a_{12}(p) & a_{13}(p) \\ a_{21}(p) & a_{22}(p) & a_{23}(p) \\ a_{31}(p) & a_{32}(p) & a_{33}(p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{x,i} \\ V_{y,i} \\ R\omega_i \end{bmatrix}$$

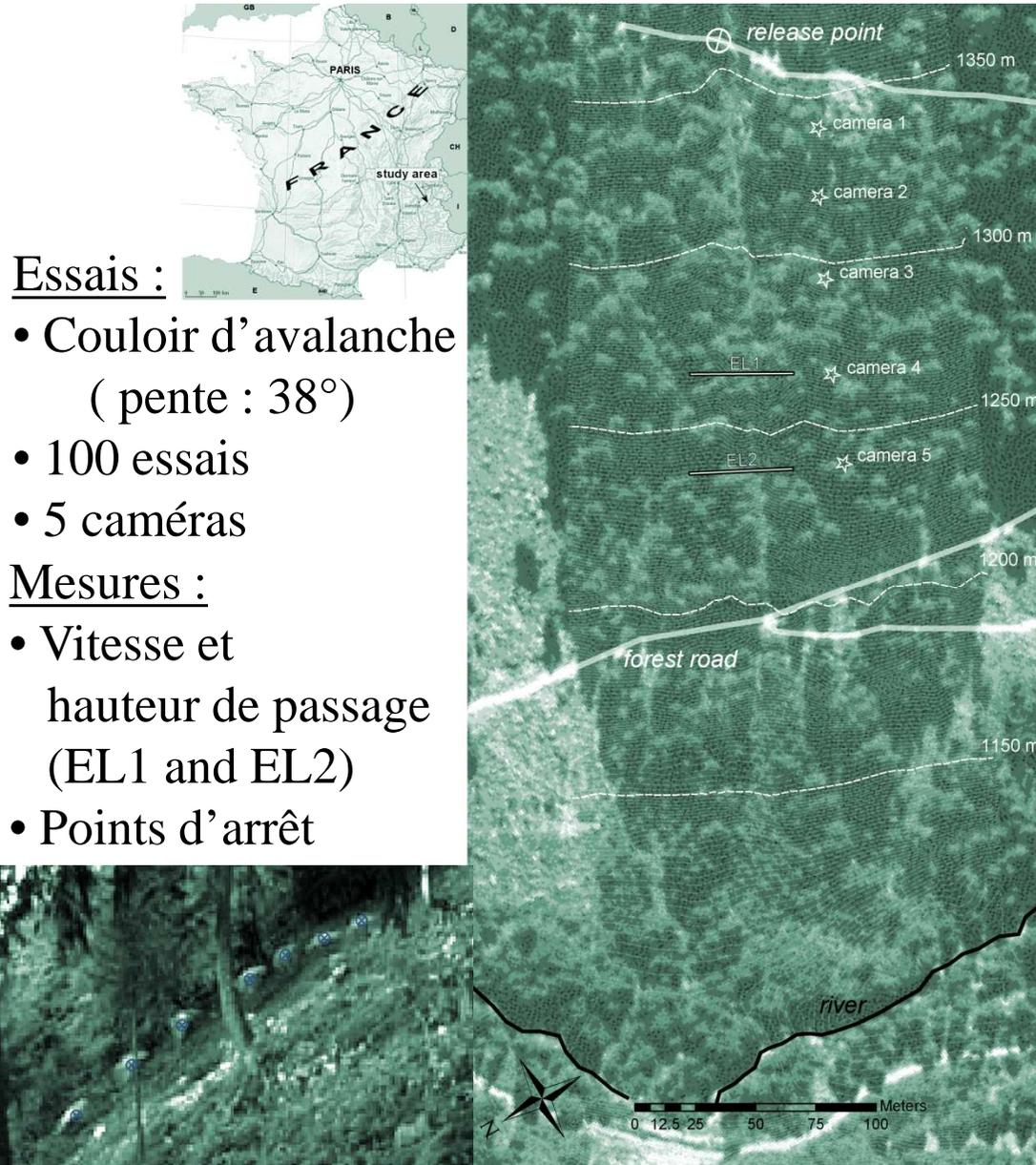


## Paramètres prépondérants :

- $R_{\text{bloc}} / R_{\text{particule}}$
- Forme des particules
- Porosité du sol
- Profondeur du sol

# Validation du modèle de rebond

Essais d'impact grandeur réelle (Berger et al. 2001):



## Essais :

- Couloir d'avalanche ( pente :  $38^\circ$  )
- 100 essais
- 5 caméras

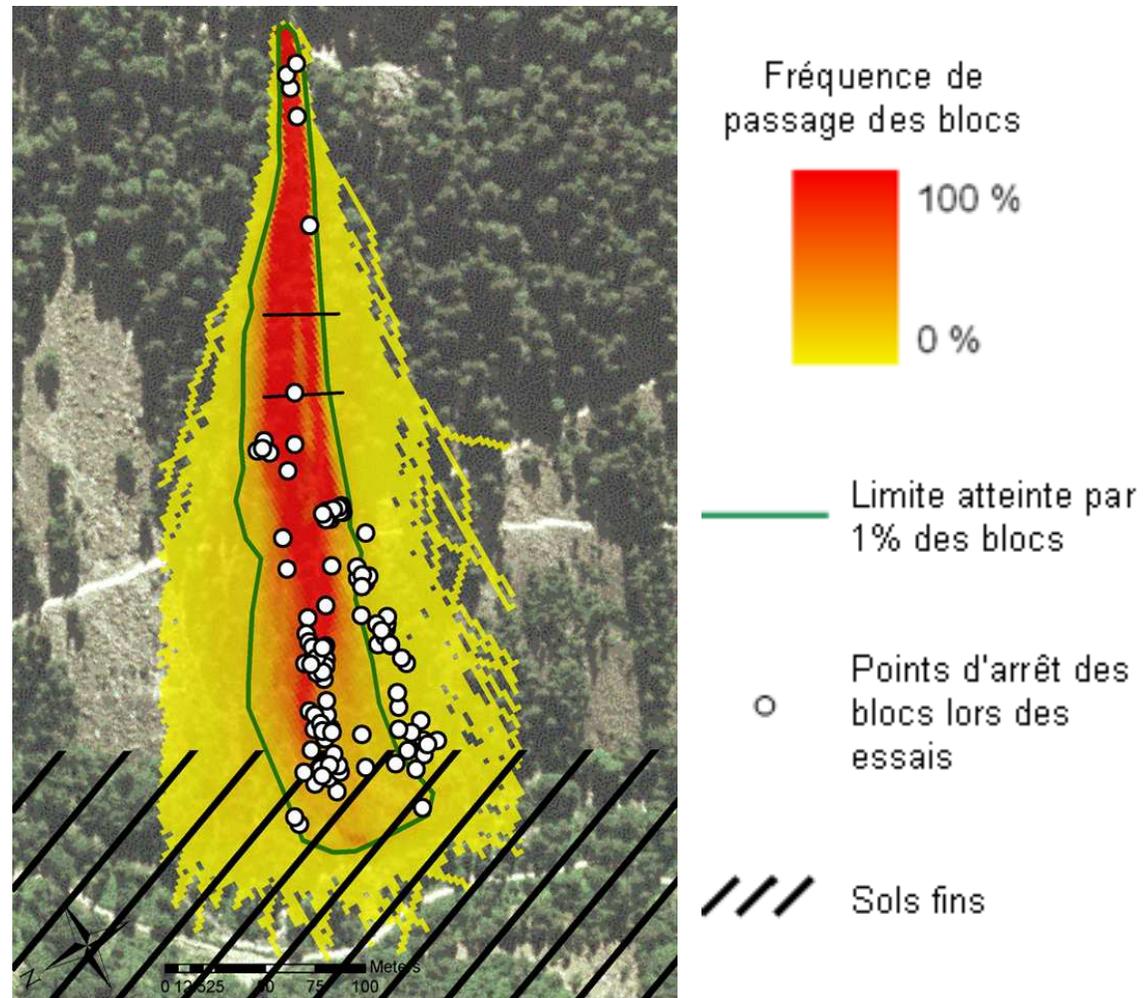
## Mesures :

- Vitesse et hauteur de passage (EL1 and EL2)
- Points d'arrêt

*Simulation des trajectoires des blocs*  
**Intégration de la loi dans Rockyfor (Dorren 2004)**

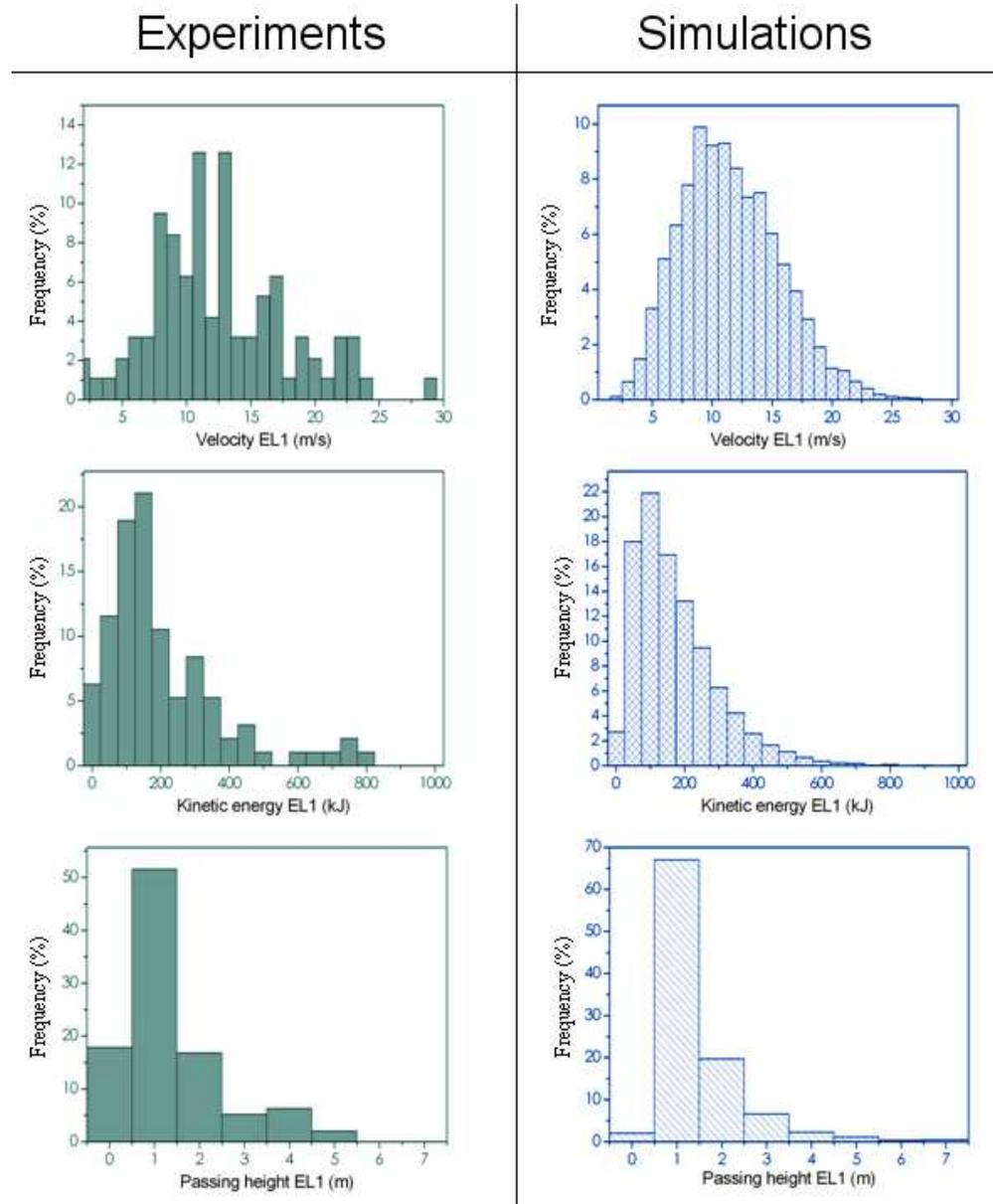


# Validation du modèle de rebond



⇒ **Zones d'arrêt similaires**

# Validation du modèle de rebond



⇒ Distributions similaires (différence exp./sim. < 20%) 12/13

# Conclusion

## Modèle de rebond probabiliste :

- ✓ Intégrant les phénomènes régissant l'impact
- ✓ Cadre de travail probabiliste
- ✓ Couplages cinématiques

## Simulations d'essais grandeur réelle :

- ✓ Prédiction pertinentes : vitesses, hauteurs de passage, points d'arrêt
- ✓ Procédure simplifiée de collecte des données de terrain