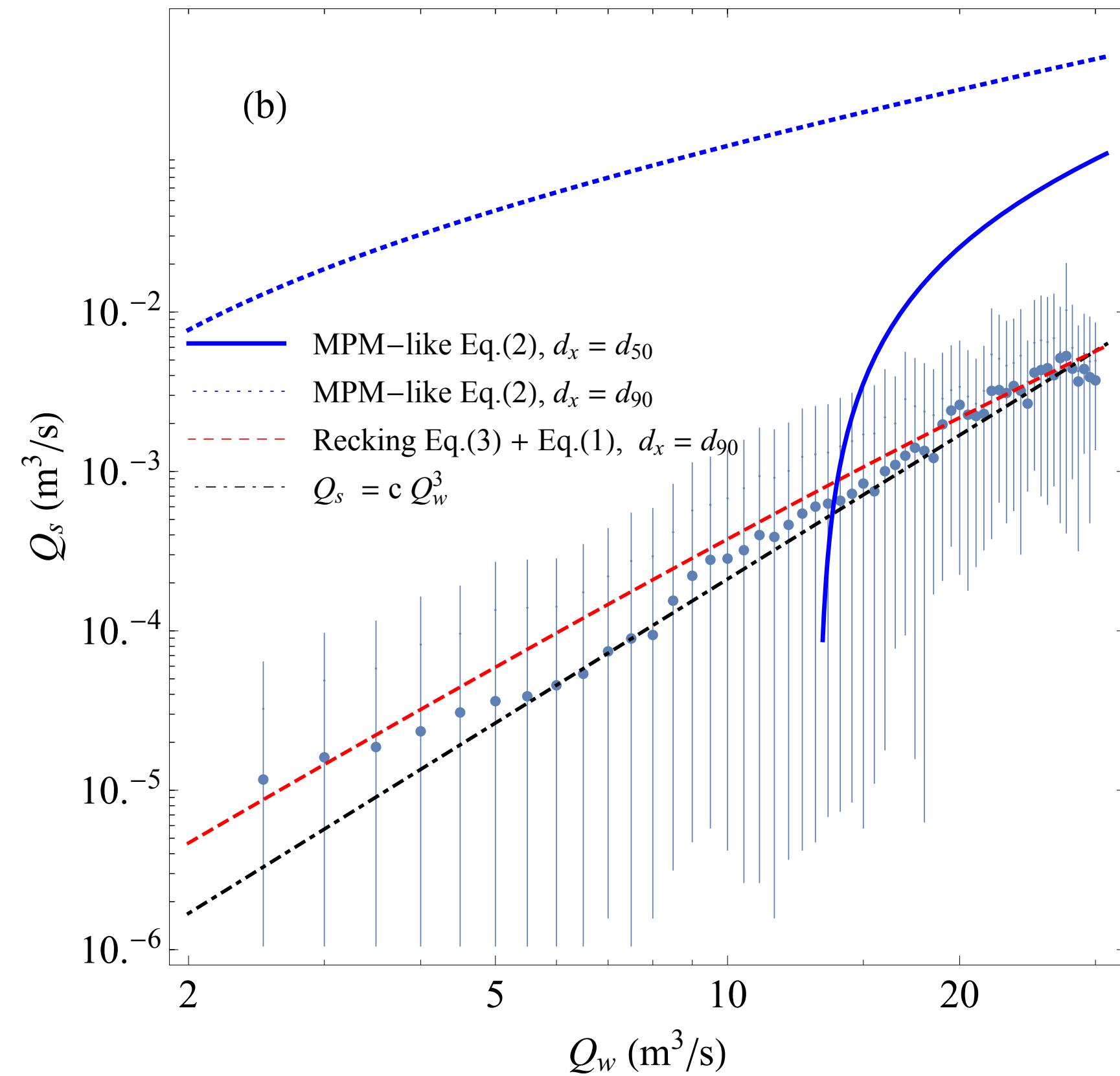
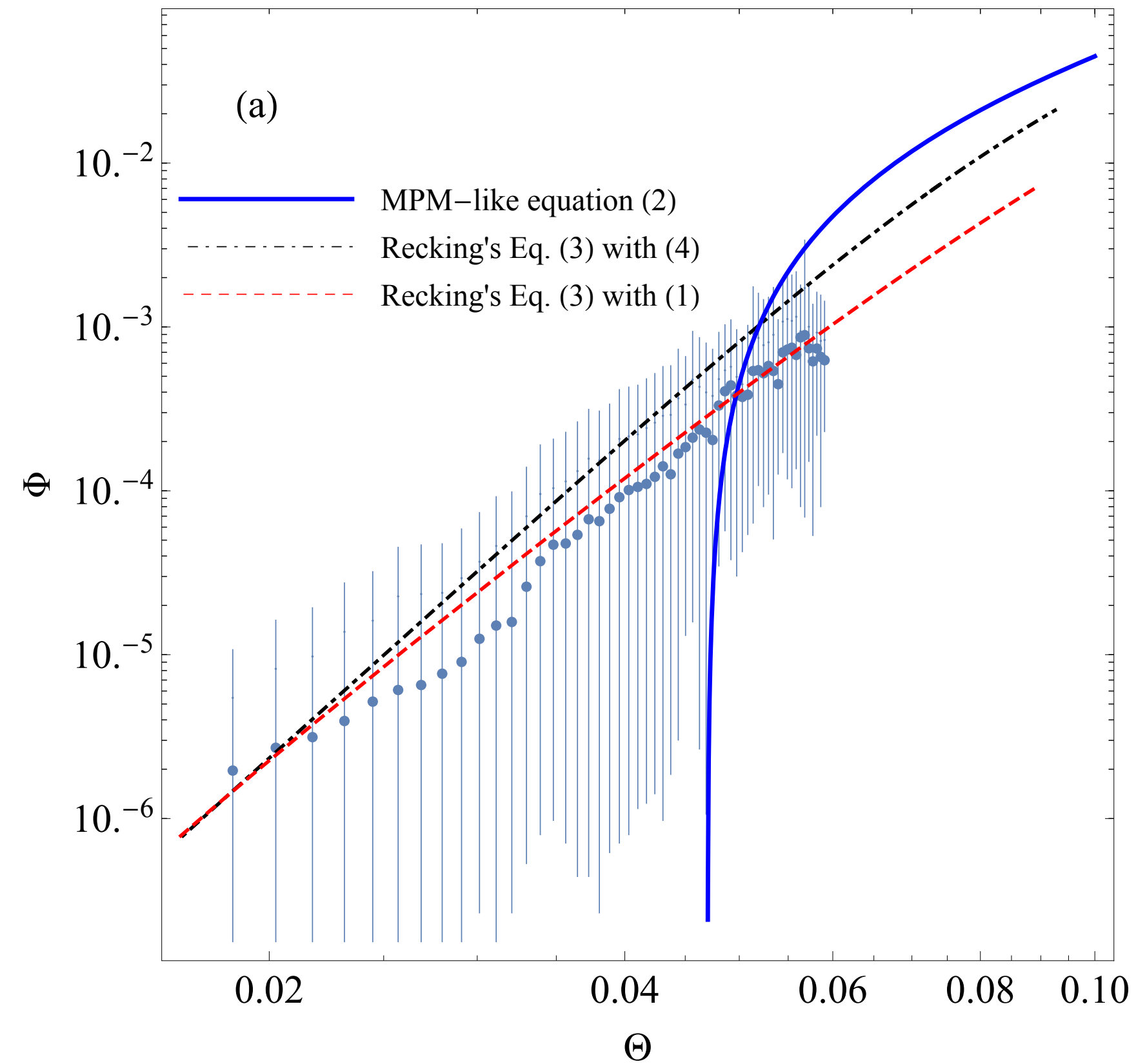




Chapitre 6 : crues avec transport solide

Risques hydrologiques et aménagement du territoire

Christophe Ancely



Ancy, C., Bedload transport : a walk between randomness and determinism. Part 2 : Challenges and prospects, *Journal of Hydraulic Research*, 58, 18-33, 2020.

Équations de Saint-Venant

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}}{\partial x} = 0,$$
$$\frac{\partial h\bar{u}}{\partial t} + \frac{\partial h\bar{u}^2}{\partial x} = gh \sin \theta - gh \cos \theta \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{\tau_p}{\rho}.$$

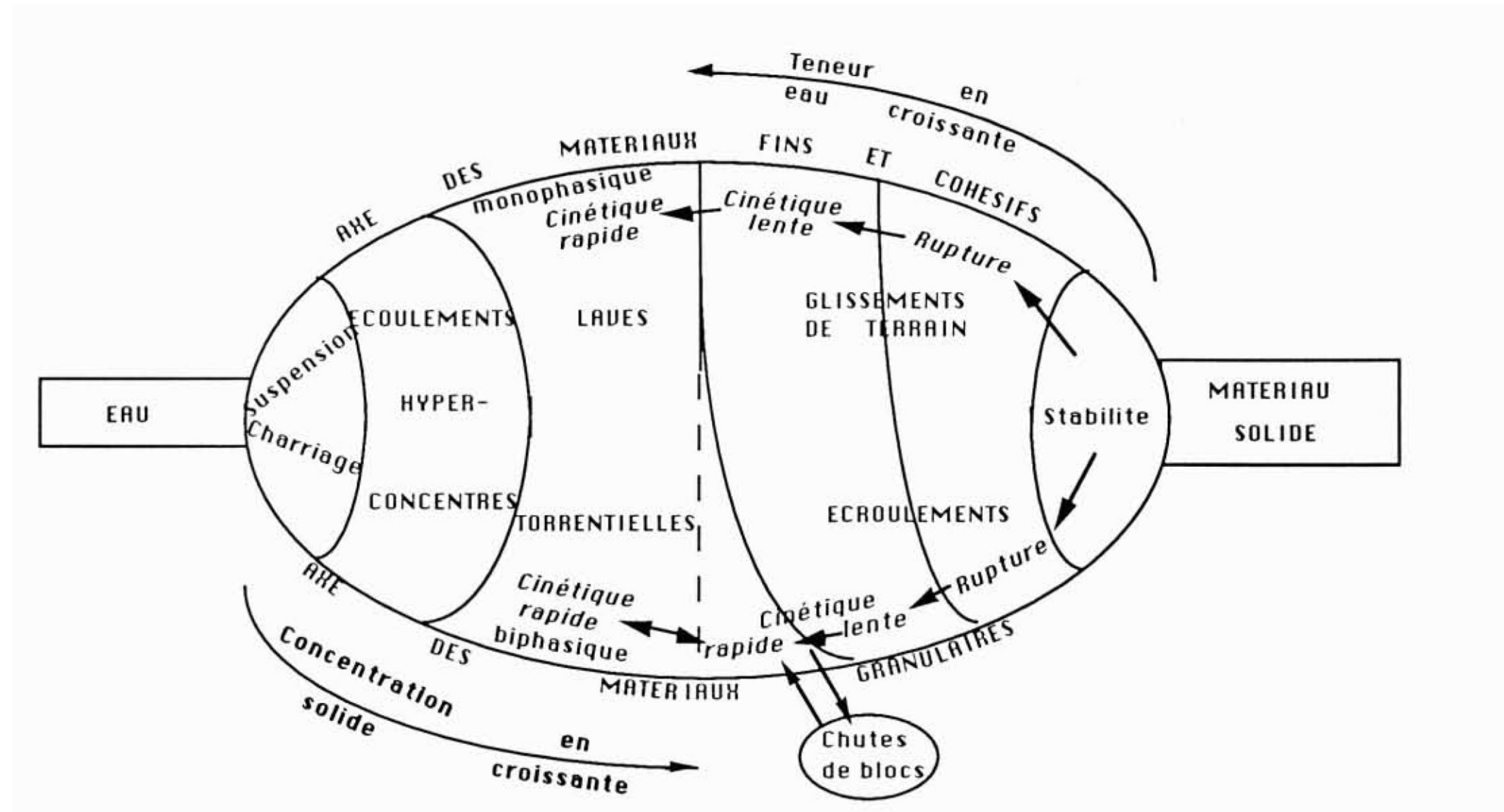
Exner

$$(1 - \zeta_b) \frac{\partial b}{\partial t} = D - E = -\frac{\partial q_s}{\partial x},$$

h hauteur d'eau, $\bar{u}$ vitesse moyenne, θ pente, τ_p contrainte pariétale, b cote du lit, ζ_b porosité du lit, D taux de déposition, E taux d'entraînement, q_s débit solide

Les formes de transport solide

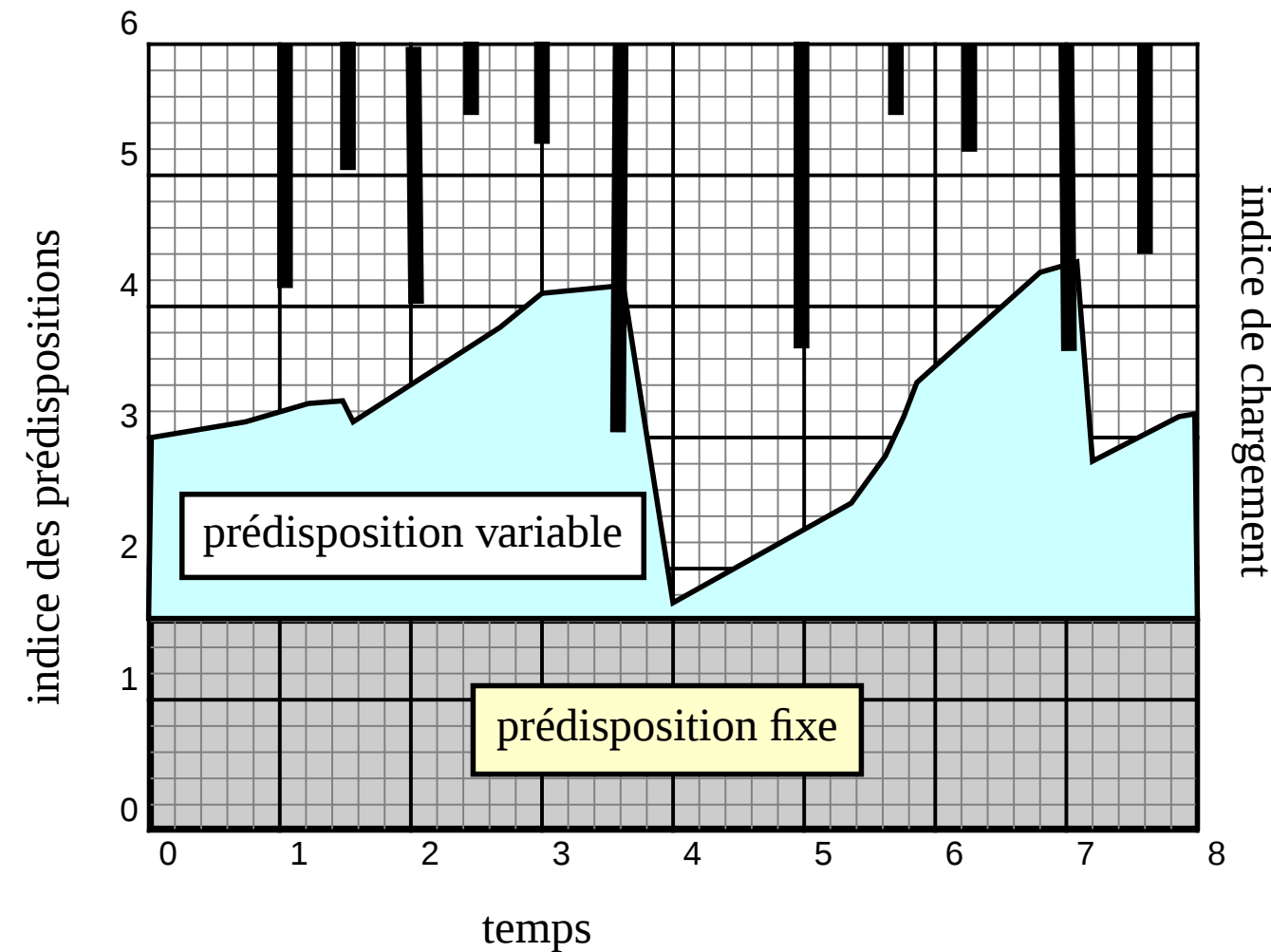
Un continuum de formes de transport



Meunier, M., Les progrès de la connaissance et les méthodes d'étude des phénomènes torrentiels, *La Houille Blanche*, 1994/ 3, 25-31, 1994.

	Caractéristiques phénoménologiques	Caractéristiques mécaniques
Lave torrentielle	• écoulement en masse, avec zone de dépôt nette sur le cône de déjection • parfois des formes particulières de dépôts : bourrelets latéraux, lobes frontaux • capacité de transport de gros blocs	• à l'échelle macroscopique, un fluide <i>monophasique</i> • concentration volumique solide supérieure à 60 % • fluide non newtonien, lois de comportement de type viscoplastique, ou frictionnel-visqueux, frictionnel-collisionnel
Transport solide par charriage	• transport de blocs, dont le diamètre maximal correspond <i>grosso modo</i> à la hauteur d'écoulement • pente de quelques dixièmes de % à plusieurs %	• écoulement biphasique (nette séparation de la phase liquide et solide, vitesses des deux phases différentes) • concentration solide en débit inférieure à 30 %

Formation des laves torrentielles



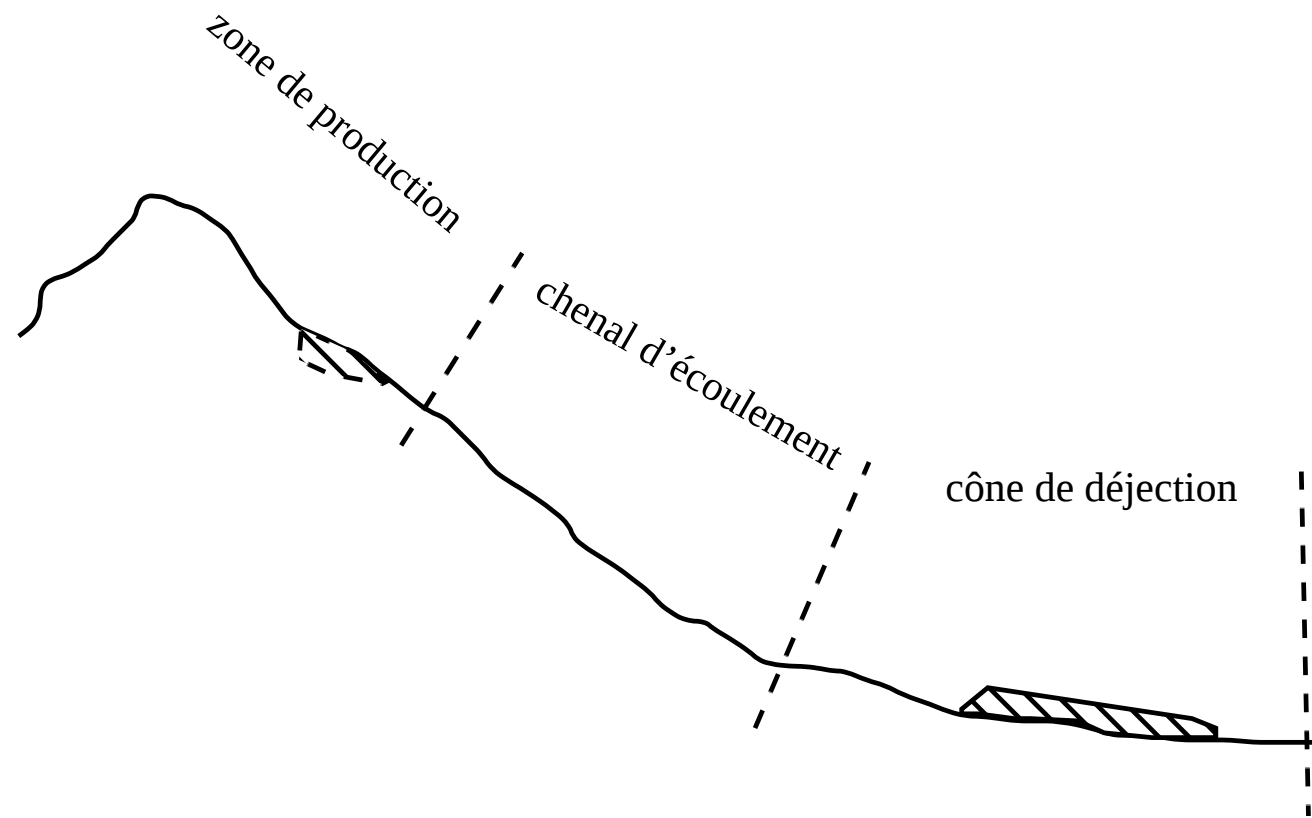
Zimmermann et al., Murganggefahr und Klimaänderung - ein GIS-basierter Ansatz, VDF, Zürich, 1997.

Des conditions de formation variables dans le temps :

- une *prédisposition fixe*, essentiellement d'ordre géographique et géologique, qui constitue une condition *sine qua non* à la formation d'une lave torrentielle
- une *prédisposition variable*, qui englobe tous les processus à échelle de variation lente (de quelques mois à quelques dizaines d'années comme temps caractéristique). Par exemple, la formation d'un éboulis
- des phénomènes déclencheurs qui déstabilisent le bassin-versant. Ces épisodes sont de courtes durées et peuvent provoquer des événements de grande ampleur dans le bassin-versant : pluies intenses (orage d'été), des périodes prolongées de pluie, la fonte des neiges, ou des concours de circonstances défavorables (apport brutal d'eau, rupture de moraine, etc.).

Zone de départ : Caractéristiques du chenal et volume de matériaux (V)		Classe de risque
pente $J > 25 \%$	Chenal constitué de matériaux mobilisables, potentiel élevé de rupture de pente ($V > 10\,000\text{ m}^3$)	A1
	Chenal majoritairement constitué de matériaux sans cohésion, potentiel élevé de rupture de pente ($V = 1000 - 10\,000\text{ m}^3$)	A2
	Lit majoritairement en rocher ($V < 1000\text{ m}^3$)	B
$15\% < J < 25\%$	Lit composé de rochers schisteux ou de type flysch, rupture potentielle de versant ($V > 10\,000\text{ m}^3$)	A1
	Autres types de rochers, lit avec possibilité d'embâcle ($V > 10\,000\text{ m}^3$)	A2
	Lit sans possibilité d'embâcle ($V = 1000 - 10\,000\text{ m}^3$)	B
	Lit majoritairement en rocher	C
$J < 15 \%$	Non pertinent	C

Rickenmann, D., Beurteilung von Murgängen, *Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein*, 48, 1104-1108, 1996.



- une zone de départ : haut du bassin-versant (forte pente, important stock en matériaux mobilisables) ;
- une zone d'écoulement : souvent dans le lit d'un torrent. Son volume grossit grâce à l'apport généralement substantiel en matériaux fournis par le lit torrentiel et les berges. Parfois la lave torrentielle peut quitter le lit du torrent et forcer/créer son propre chenal d'écoulement ;
- une zone d'arrêt : pour les laves torrentielles *extrêmes* qui nous intéressent ici, l'arrêt se produit dans des zones à faible pente (cône de déjection).

- Modèle Coulombien (Iverson)

$$\tau_p = \sigma'_p \tan \varphi,$$

$\tan \varphi$ l'angle de frottement et $\sigma'_p = \sigma_p - p$ la contrainte normale effective avec $\sigma'_p = \rho g h \cos \theta$ (contrainte normale totale) et p la pression interstitielle ;

- Modèle viscoplastique (Coussot). Modèle viscoplastique de type Herschel-Bulkley

$$\tau_p = K \left(\frac{1+p}{p} \right)^n \frac{\bar{u}^n}{h_c^{n+1} [(1+p)h - h_c]^n},$$

avec $p = 1/n + 1$ et $h_c = h - \tau_c/(\rho g \sin \theta)$; $n \approx 0,3$, τ_c dans la fourchette large 0,5–15 kPa, τ_c/K dans la plage 3–10.

- Paramétrisation empirique : $\tau_p = C + K\bar{u}^2$.

