



Centre de Géosciences - Mines ParisTech

## Travaux de recherche dans le domaine de la géologie de l'ingénieur engineering geology

Roger Cojean  
roger.cojean@mines-paristech.fr

4-02-2011

1



## Centre de Géosciences

Créé le 1<sup>er</sup> janvier 2006, il rassemble des unités de recherche préexistantes impliquées dans les domaines des sciences de la terre et de l'environnement

Il est constitué de 6 Equipes de recherche rassemblées en 2 Groupes:

Le Groupe Géosystèmes

- > Géologie
- > Géophysique
- > Géostatistiques

Le Groupe Hydro-Géo-Ingénierie

- > Systèmes hydrologiques et réservoirs
- > Hydrodynamique et réactions
- > Géologie de l'ingénieur et Géomécanique

Il compte environ 70 chercheurs séniors, 30 personnels techniques et administratifs, 70 étudiants en PhD, 80 étudiants en formations postgraduées

Les activités de recherche couvrent de nombreux domaines, en rapport avec la recherche académique ou la recherche orientée vers l'industrie, concernant les sciences de la terre et de l'environnement

### Laboratoire de Pétrophysique. Propriétés des sols et des roches

- Caractérisation de la porosité par résonance magnétique nucléaire ;
- Analyse de la micro-fissuration des argillites (applications au stockage des déchets nucléaires) ;
- Caractérisation des roches réservoirs pour le stockage de gaz à effet de serre.



X-Ray powder Diffractometry



Nuclear Magnetic Resonance



Scanning Electron Microscopy (S.E.M.)  
and Energy Dispersive X-ray spectrometer (E.D.X.)

3

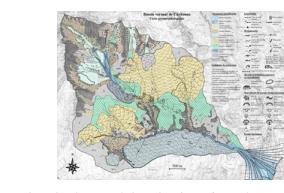
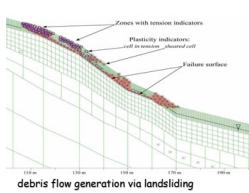
### Laboratoire de Géomécanique. Propriétés des sols et des roches

- Propriétés mécaniques des sols ;
- Propriétés mécaniques des roches ;
- Bancs d'essai d'usure orienté vers les applications du forage pétrolier à grande profondeur.

4

### NATURAL HAZARDS: Debris flows, landslides and rockslides

- Debris flow triggering: predisposition factors, hazard mapping ;
- Rock slides and rock avalanches ;
- Influence of man-caused alterations of the environment in mountainous areas responsible for torrential activity modifications ;
- Consequences of drought events on the behaviour of clayey soils.

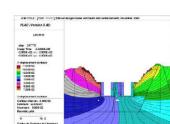


Geological and geomorphological analysis of a catchment (map devoted to erosive and landslide processes)

5

### GEOMECHANICS: Slope deformation and failure processes

- Progressive deformation and failure processes ;
- Site effects and topographic amplifications in slopes under dynamic loadings in seismic areas ;
- Long term displacements of excavated rock slopes (permanent shiplock at the Three Gorges dam in China) ;
- General applications to civil engineering and opencast mines and quarries.



6

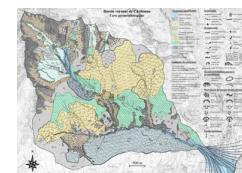
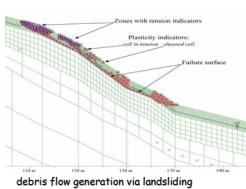
## OPENCAST MINING AND QUARRYING

- Slope design ;
- Rock fragmentation by blasting (transmission of the blast energy to the rock mass) ;
- Mine planning and ore management ;
- Mine subsidence processes and "Post-mining" expertise.



7

## NATURAL HAZARDS: Debris flows, landslides and rockslides

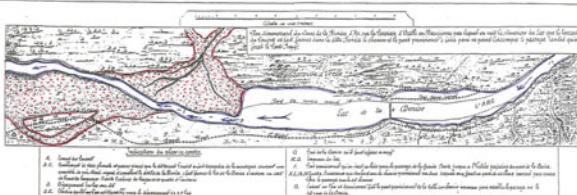


Geological and geomorphological analysis of a catchment (map devoted to erosive and landslide processes)

8

## Debris flows (laves torrentielles)

Poucet catchment : debris flow and torrential flood of the Arc river (French Alps) (June 1741 archive, in P. Mougin, Les torrents de Savoie, 1914)



9

Damage due to a debris flow event in the Maurienne valley. Poucet catchment October 1994

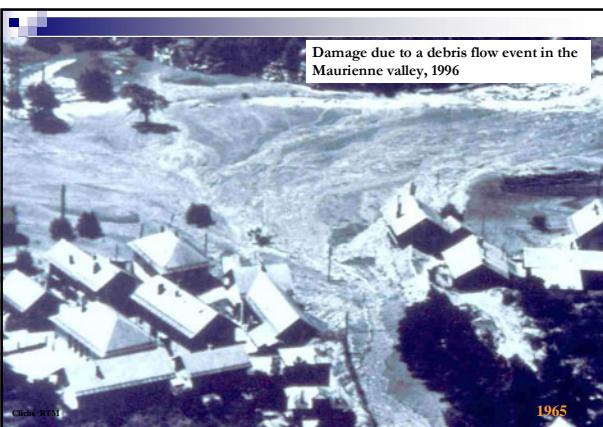


Cliché Revue Travaux



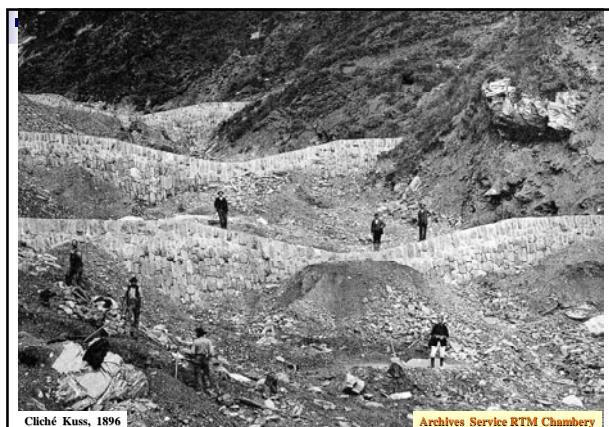
Cliché Revue Travaux

Damage due to a debris flow event in the Maurienne valley, 1996



1965

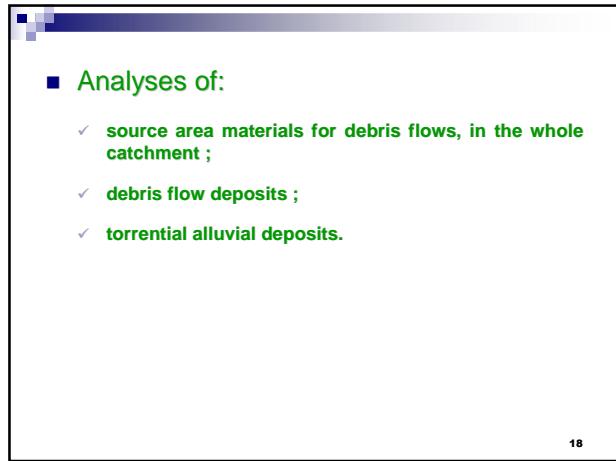
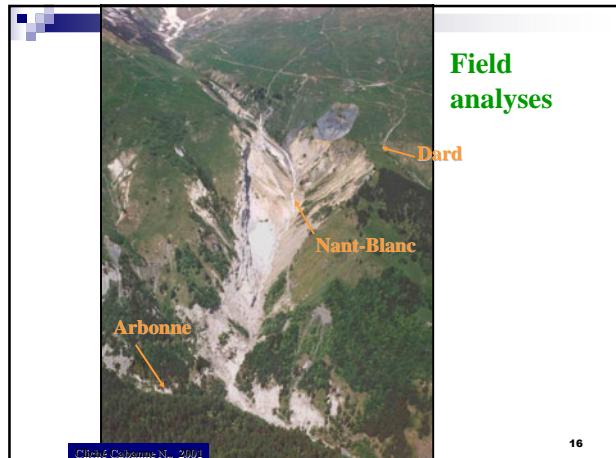
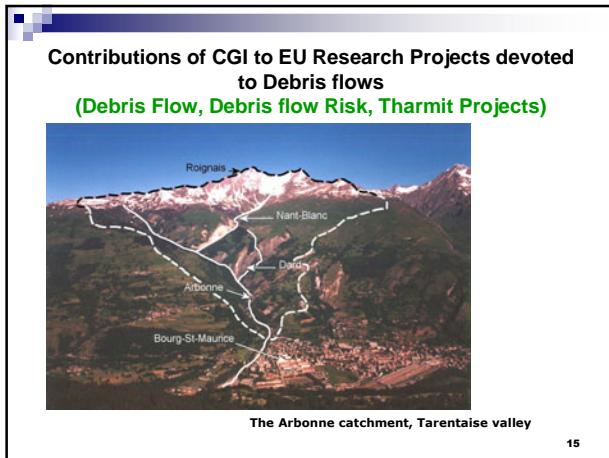
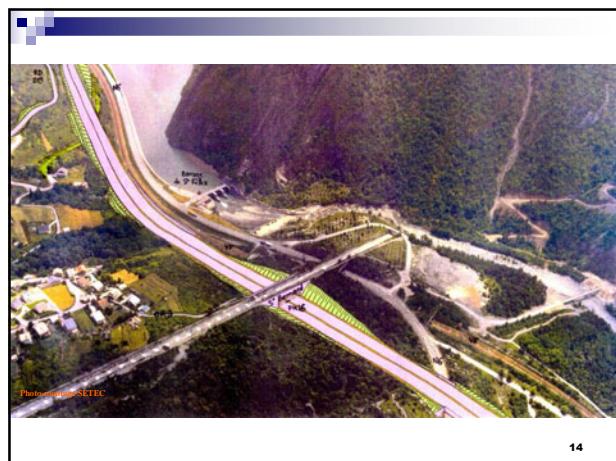
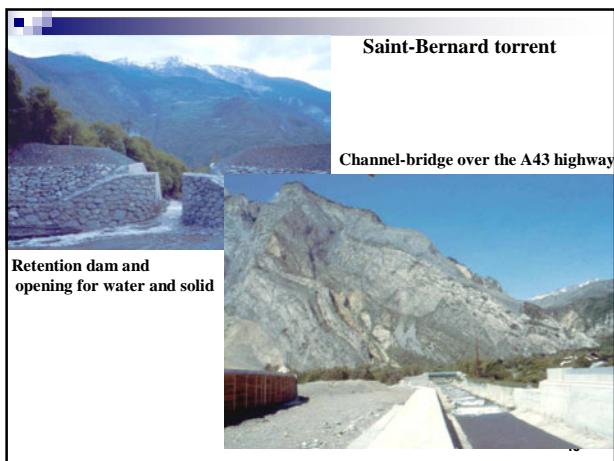
11



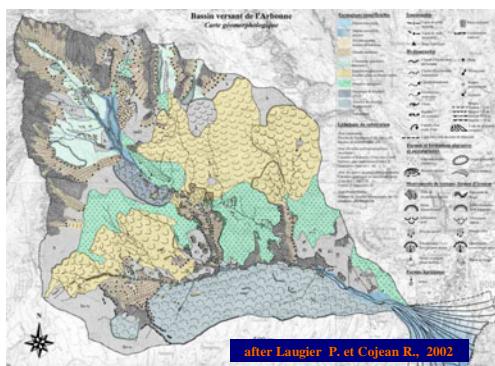
Cliché Kuss, 1896

Archives Service RTM Chambéry

12



### Geological and geomorphological analysis of the catchment (devoted to erosive and landslide processes)

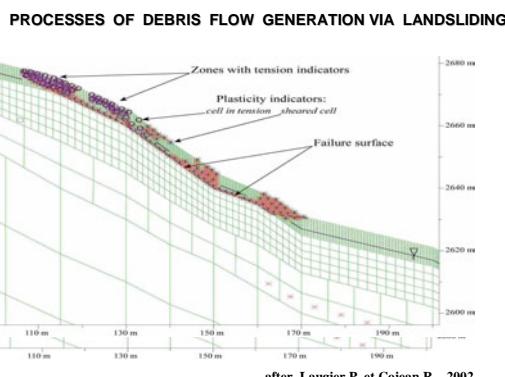


after Laugier P. et Cojean R., 2002

19

- Type 1 :** Raindrop and hailstone impacts ;
- Type 2 :** Runoff with erosive water flows, rill and gully erosion ;
- Type 3 :** Failure of glacial meltwater pockets ;
- Type 4 :** Permafrost and ice melting in frozen grounds ;
- Type 5 :** Liquefaction of granular slope deposits ;
- Type 6 :** Landsliding ;
- Type 7 :** Failure of emergence points of karstic underground flow paths ;
- Type 8 :** Impact of滑ed masses on saturated torrent deposits and liquefaction ;
- Type 9 :** rockfall, rockslide or sudden landslide blocking the torrent channel and mobilized into debris flow ;
- Type 10 :** Undermining and failure of high and unstable torrent banks ;
- Type 11 :** Mobilization of previous debris flow deposits in the torrent channel due to the rising of the watertable ;
- Type 12 :** Break of a natural dam in the torrent bed, wave impact on downstream saturated torrent deposits.

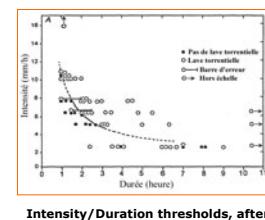
20



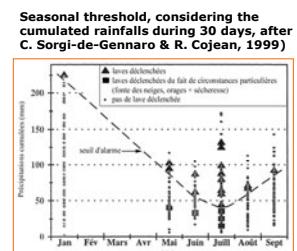
after Laugier P. et Cojean R., 2002

21

### Identification of triggering factors



Intensity/Duration thresholds, after Wieczorek & Sarmiento, 1988



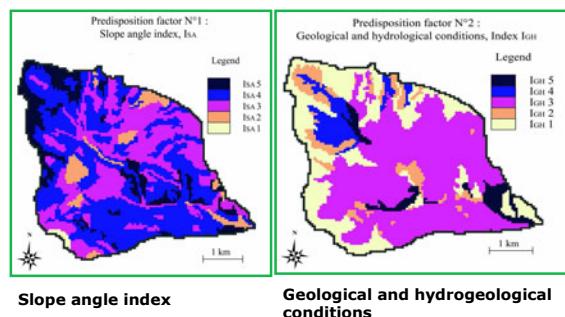
22

### Mapping of predisposition factors

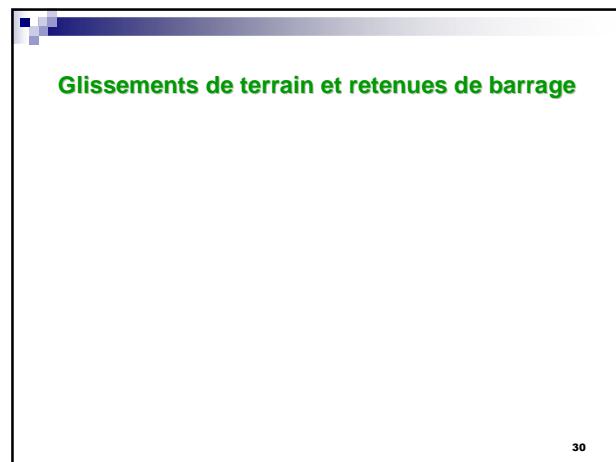
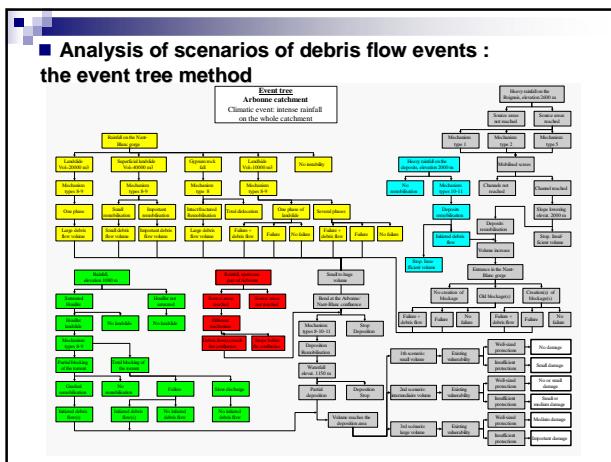
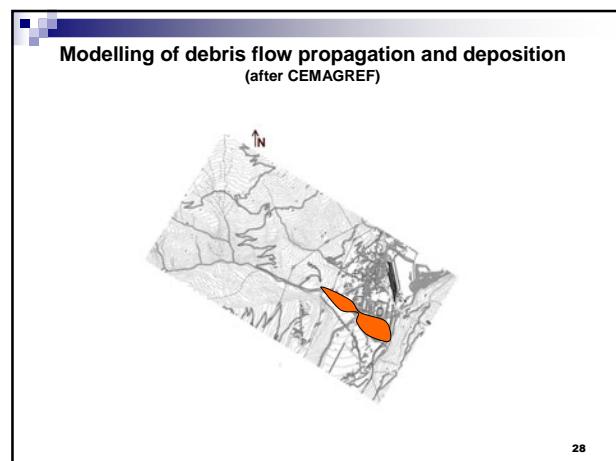
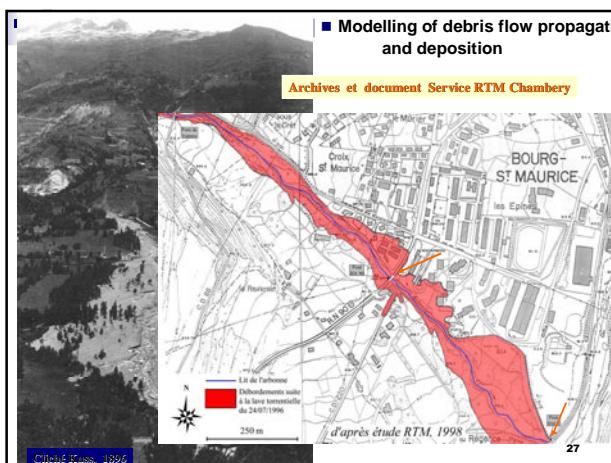
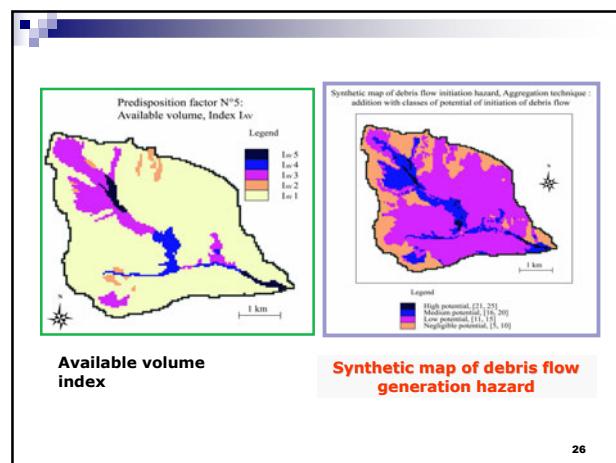
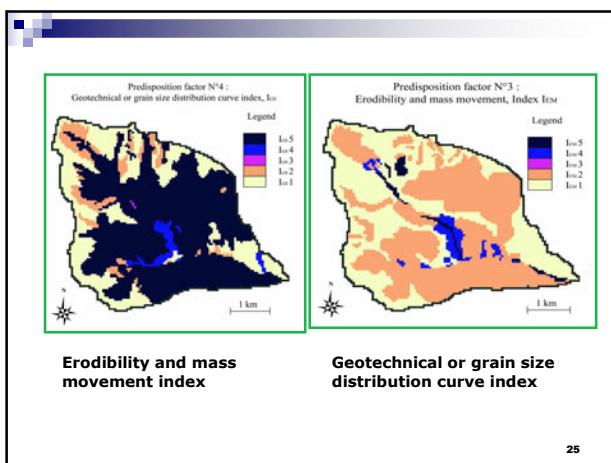
- ✓ Slope angle index ;
- ✓ Geological and hydrogeological conditions ;
- ✓ Erodibility and mass movement index ;
- ✓ Geotechnical or grain size distribution curve index ;
- ✓ Available volume index.

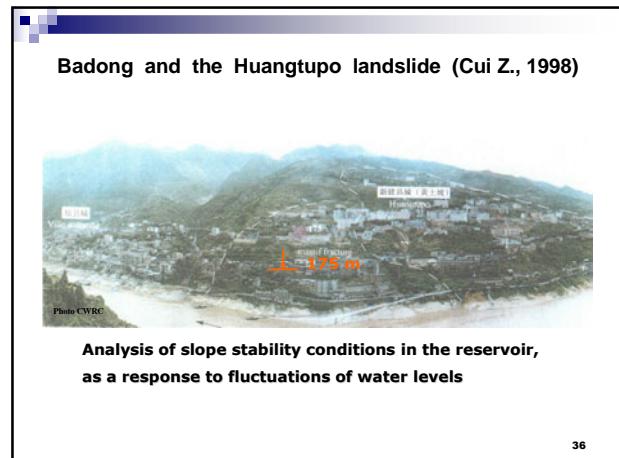
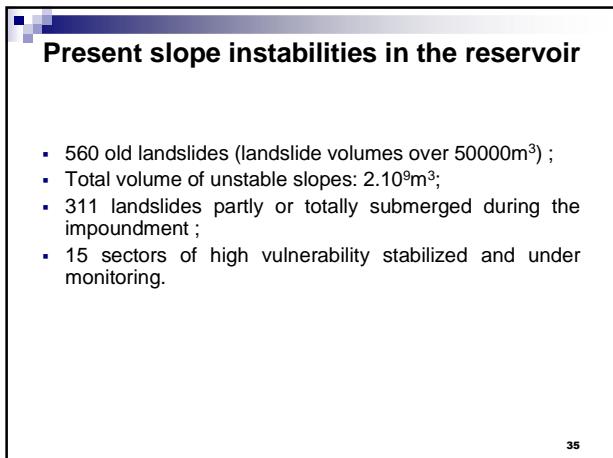
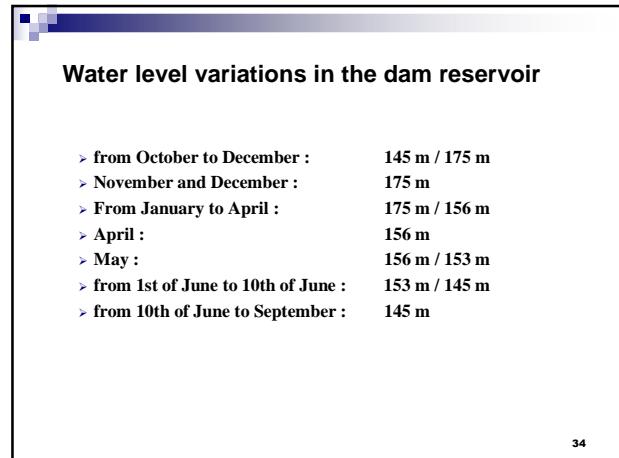
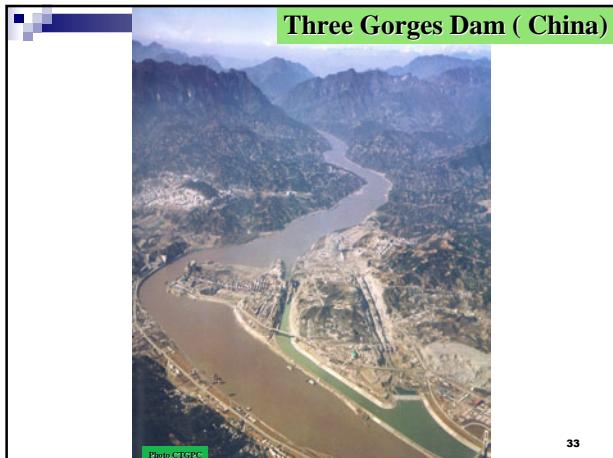
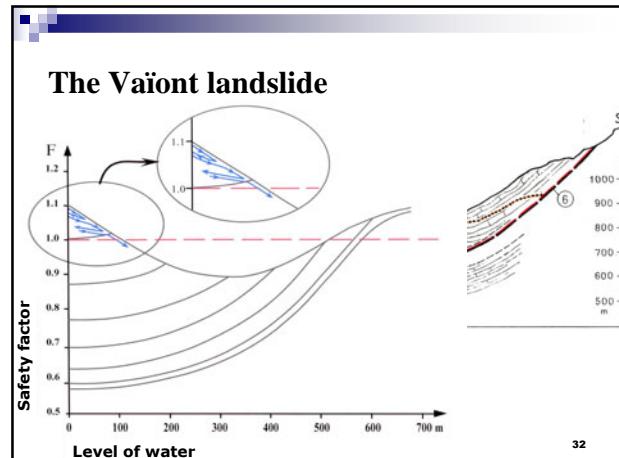
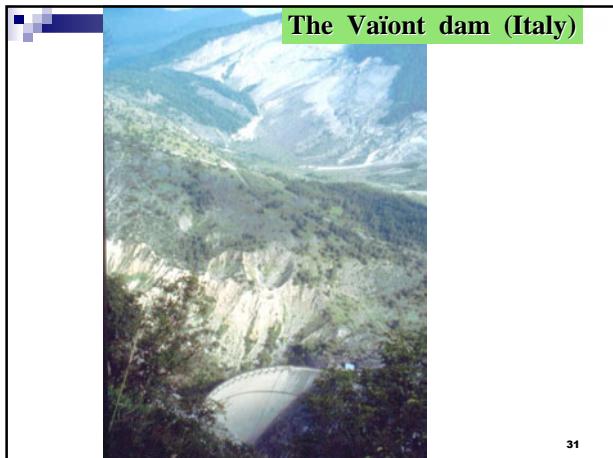
23

### Mapping of predisposition factors, with the help of PC Raster (GIS software from Utrecht University, The Netherland)

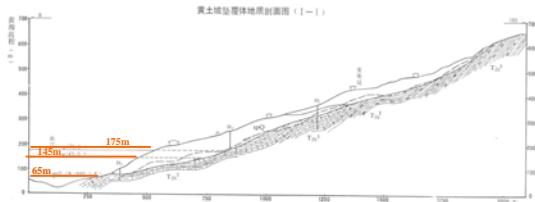


24



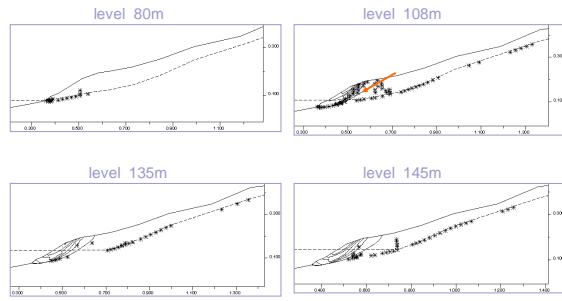


### Geological cross section of the landslide of Huangtupo



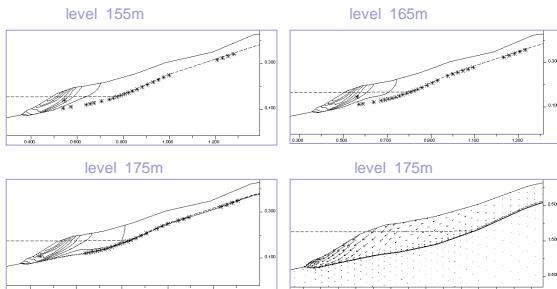
37

Impoundment of the reservoir from the level 80 m to the level 145 m :  
plasticity indicators (symbols \*) can be noted down,  
progressive deformation occurs (iso-value curves of displacement vector  
modules, in cm, are drawn, Y. Cai, 2000).



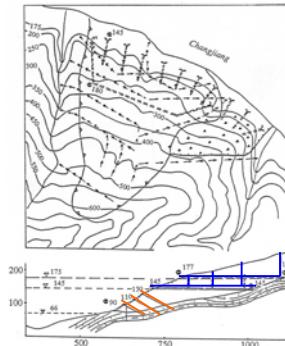
38

Impoundment of the reservoir from the level 80 m to the level 145 m :  
plasticity indicators (symbols \*) can be noted down,  
progressive deformation occurs (iso-value curves of displacement vector  
modules, in cm, are drawn, Y. Cai, 2000).



39

### Scheme of the drainage and reinforcement project for the landslide of Huangtupo



- drainage ditches network on the whole slope ;
- rainwater and waste water collected in sewers ;
- drainage galleries at the toe of the slope in order to prevent rapid drawdown conditions ;
- mechanical reinforcements with tensioned rock bolts at the toe of the slope ;
- surficial reinforcements (nailed soils, surface protections : small girders and geotextiles) at the toe of the slope ;
- Monitoring system.

40

### Scénarios d'événements de mouvements de versant

41

### ANALYSIS OF EVENT SCENARIOS

- ↳ How will we identify all the possible and realistic event scenarios?
- ↳ How will we characterize the intensity parameters of a given event scenario?
- ↳ How will we specify the time of occurrence of a given event scenario?

### OBSERVATIONS, ANALYSES, MODÉLISATIONS

42

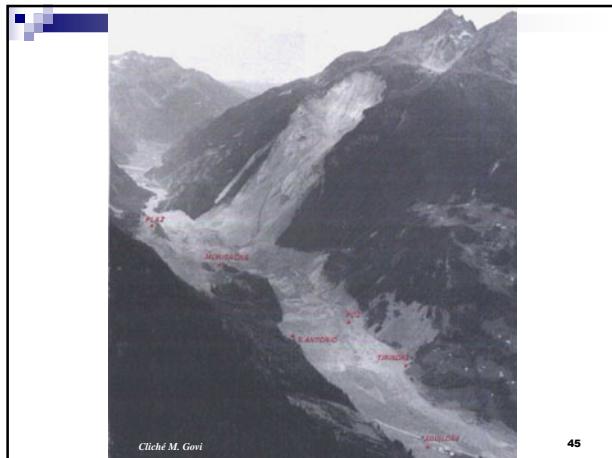


The Mount Zandila rockslide (28 juillet 1987)  
(ITALY, VALTELLINA)

43

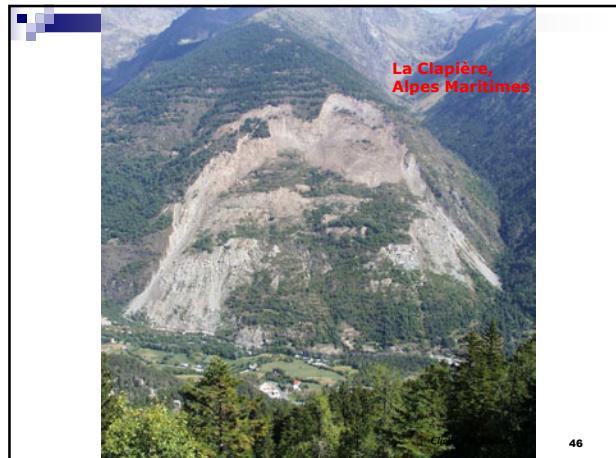


44



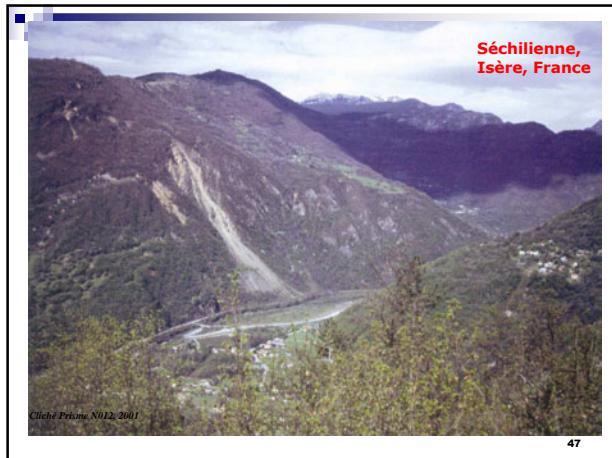
Cliché M. Govi

45



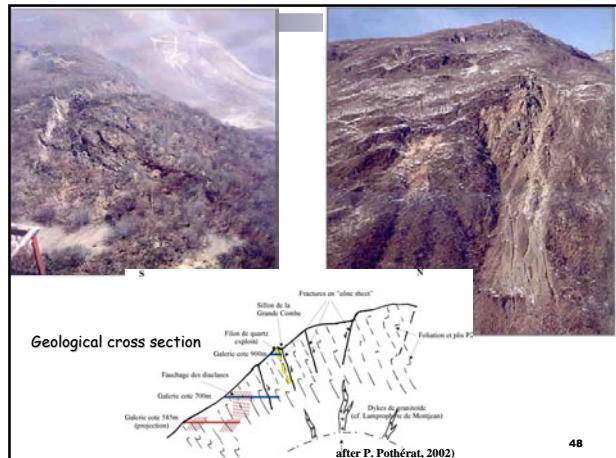
La Clapière,  
Alpes Maritimes

46

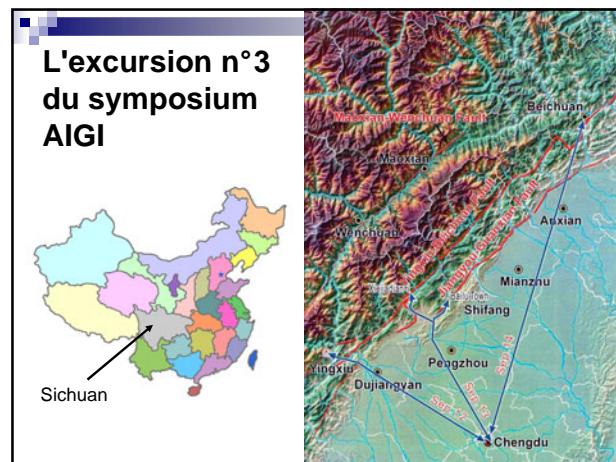
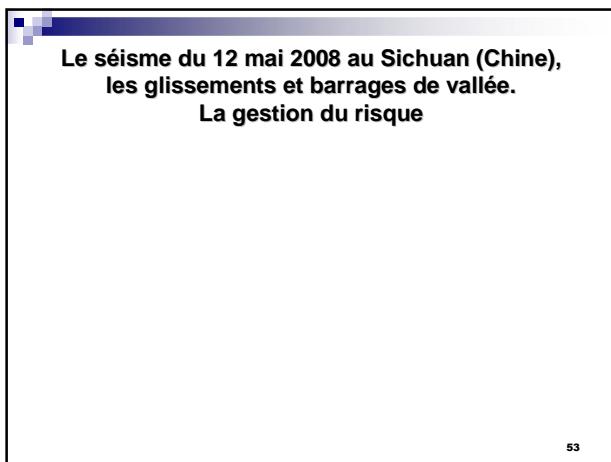
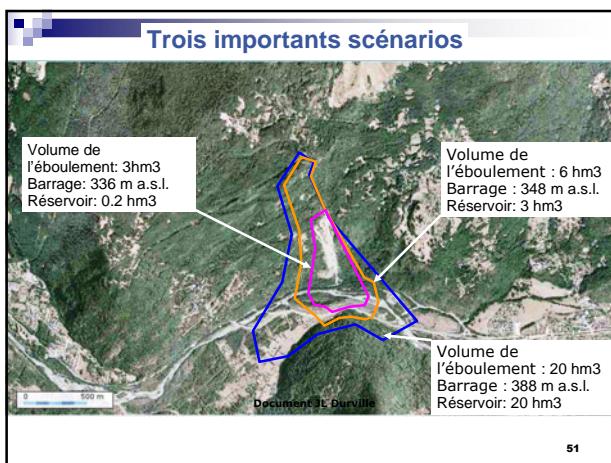
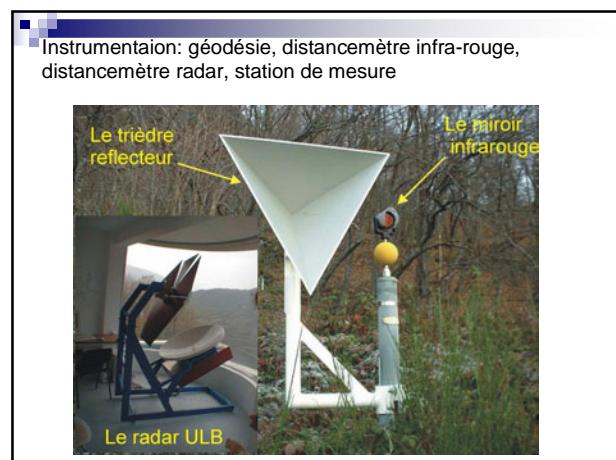
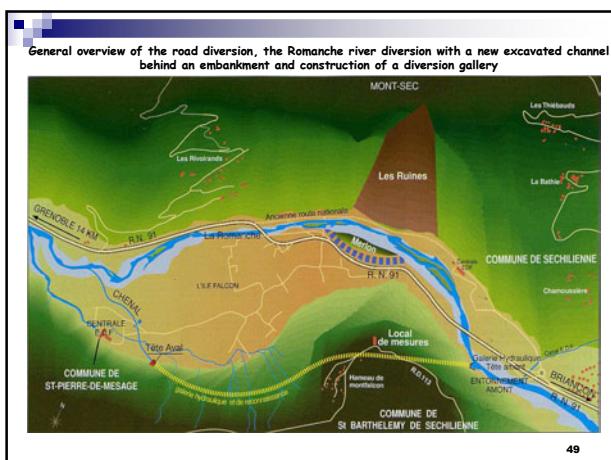


Cliché Prisme N012, 2001

47



48



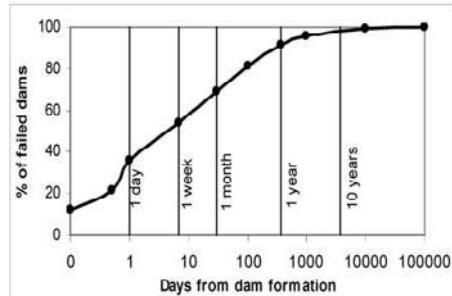
## Devenir d'un barrage naturel

- Stabilité du barrage qui résiste à la filtration des eaux et à la surverse ;
- Rupture par glissement du talus aval ;
- Rupture par érosion interne (phénomène de renard) entraînant la formation d'une brèche ;
- Rupture par surverse entraînant une érosion externe et la formation d'une brèche.

Paramètres : géométrie du barrage, nature des matériaux, débit amont, volume du réservoir

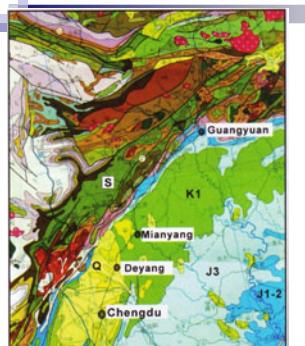
55

## Durée de vie des barrages naturels



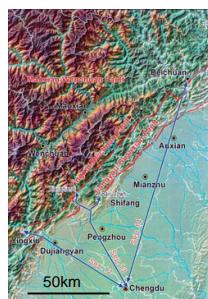
(population de 206 barrages ayant rompu)

56



Carte géologique de la zone de contact entre le système faille de Longmenshan et le bassin subsident du Sichuan.

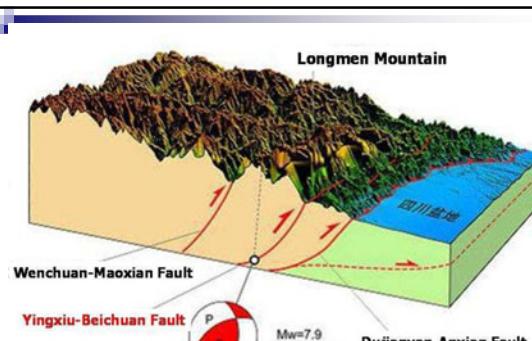
Q : Dépôts quaternaires ; J1-2 : Formations de Jurassique inférieur et moyen ;  
J3 : Formations de Jurassique supérieur ; K1 : Formations du Crétacé inférieur ;  
S : Formations du Silurien ; y: granites et granodiorites.  
Les structures complexes entre S et K1 sont rapportées du Cambrien au Tertiaire.



## Caractéristiques du séisme de Wenchuan

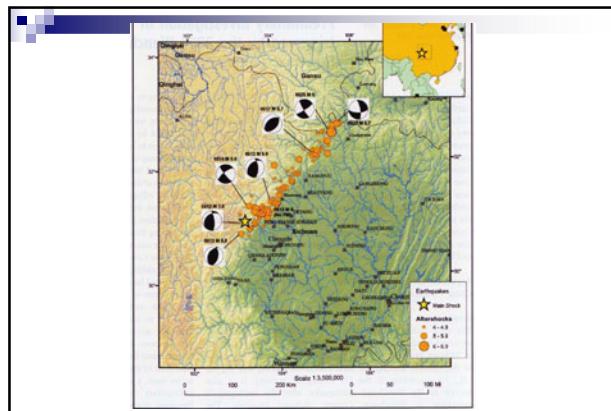
- Séisme de Wenchuan ou Great Sichuan Earthquake du 12 mai 2008 ou (5-12 Earthquake);
- Magnitude  $M_s = 8,0$  (USGS,  $M_s = 7,9$ ); Magnitude  $M_w = 8,3$  ;
- Epicentre: à 80km à l'WNW de Chengdu, capitale du Sichuan;
- Foyer: à 19km de profondeur;
- Répliques: le 25 mai,  $M_w = 6,0$ ; le 27 mai, 2 répliques,  $M_w = 5,2$  et  $M_w = 5,7$ ;
- Contexte sismotectonique: faille de Longmenshan, SW/NE, réactivée sur plus de 400km;
- Mécanisme au foyer de faille inverse avec une composante, variable, de décrochement dextre;
- Propagation de la rupture: vers le SW sur 180km en 60s, vers le NE sur 260km en 90s;
- Durée totale du choc principal: 120s.

58



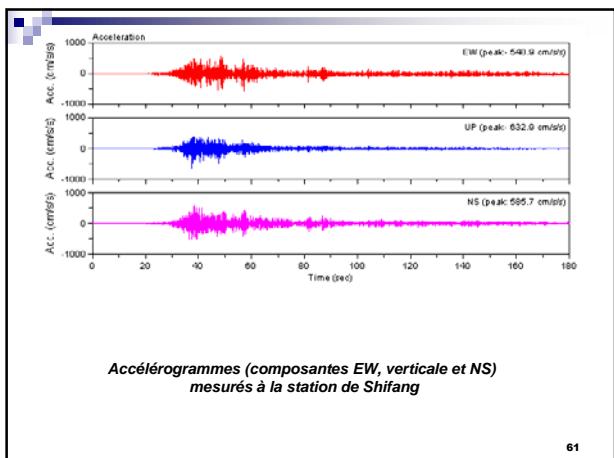
Représentation du système de failles actives de Longmenshan.  
Mécanisme au foyer, avec chevauchement de la plaque de Songpan-Ganzi  
sur les montagnes de Longmenshan, le long de la faille centrale de Yingxiu – Beichuan,  
suivant une direction N30E. (communiqué par Huang R. Q.).

59

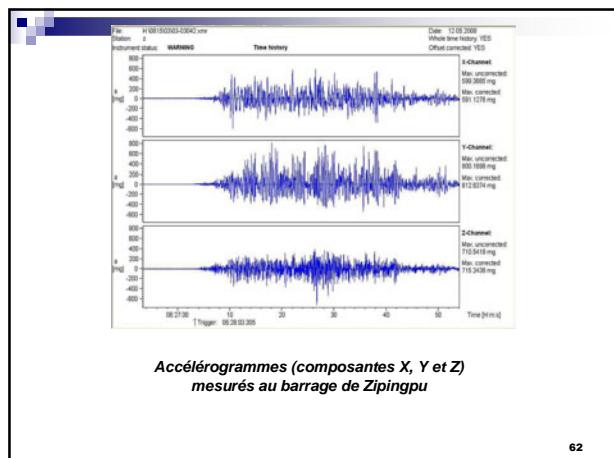


Choc principal et chocs secondaires, mécanismes aux foyers

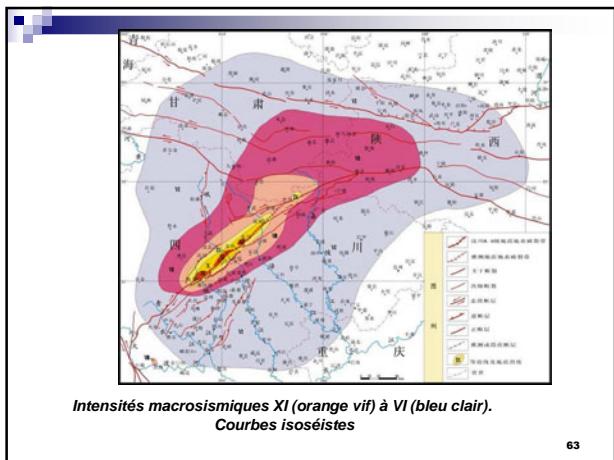
60



61



62



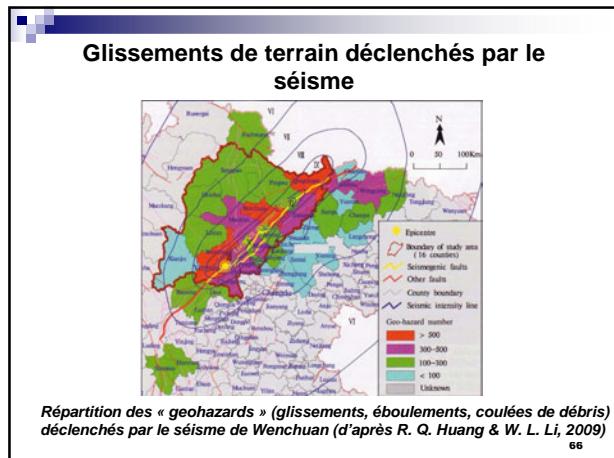
63



64



65



66

## Glissements de terrain déclenchés par des séismes

- Mouvements de versant co-sismiques dus à l'apparition de forces d'inertie supplémentaires d'origine sismique ;
- Amplifiées par des effets de site d'origine topographique (forme du versant) et géologique (structure et matériaux constitutifs du versant) ;
- Phénomènes induits accompagnant le séisme ou se déclenchant dans un délai plus ou moins important après le séisme (pressions interstitielles) ;
- Cas particuliers des glissements résultant de processus de liquéfaction affectant des sols fins saturés de faible compacité.

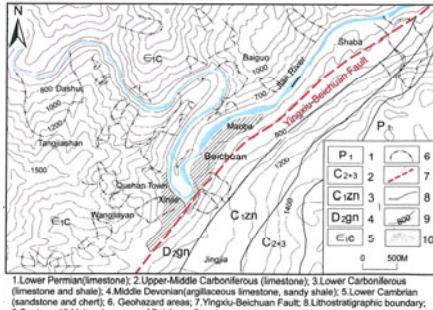
67

## Le cas des coulées de débris ou « debris flows »

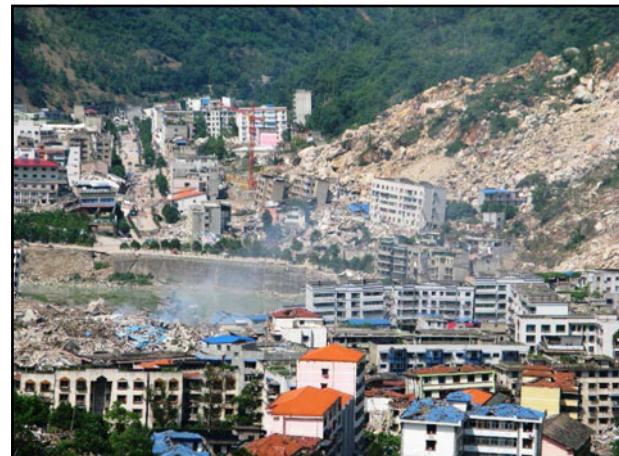
- Le séisme a provoqué instantanément de nombreux glissements et éboulements, de toutes dimensions, conduisant à l'accumulation de dépôts importants sur les pentes et dans les talwegs: versants « nettoyés »;
- Les pluies du 14 juin 2008 (1 mois après le séisme) et du 24 septembre 2008 (4 mois après le séisme) ont déclenché des debris flows très importants;
- Les seuils de déclenchement de debris flows (cumul de pluie sur 3 jours) se sont modifiés: 350-380mm avant le séisme, 270mm après le séisme.

68

## Glissements et éboulements dans la ville de Beichuan



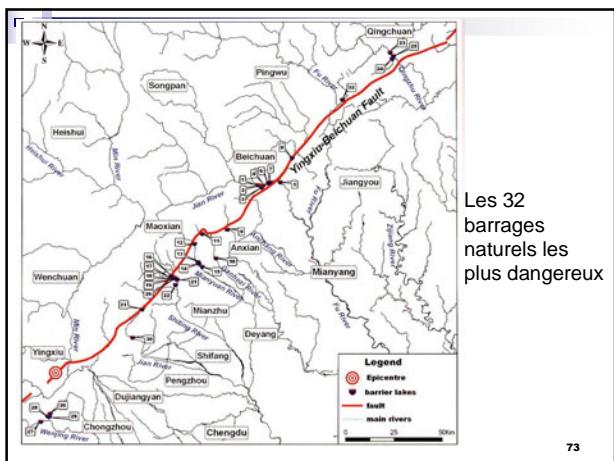
69



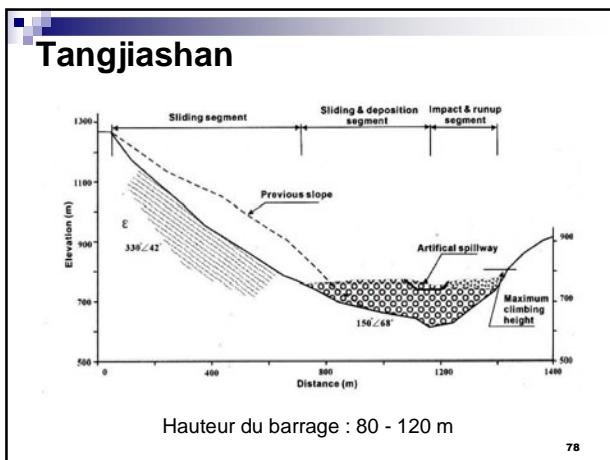
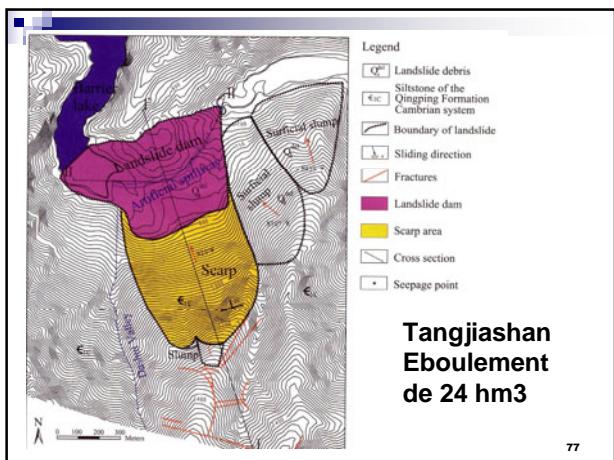
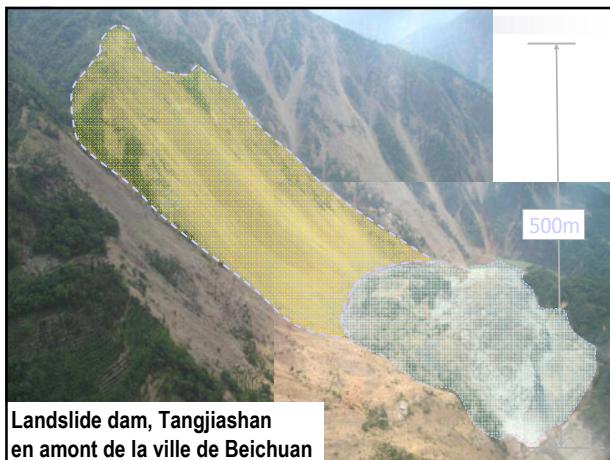
## Barrages engendrés par le séisme du Sichuan

- Plus de 250 barrages naturels, identifiés sur image satellitaire ;
- Volumes des retenues potentielles : de 30 000 m<sup>3</sup> à 300 millions de m<sup>3</sup> ;
- Hauteurs  $H$  des 32 barrages les plus dangereux :
  - < 10 m : 1 barrage
  - 10 - 30 m : 10 barrages
  - 30 - 50 m : 8 barrages
  - 50 - 100 m : 10 barrages
  - > 100 m : 3 barrages.
- Mode de rupture estimé : érosion par surverse pour 26 et érosion interne pour les 6 autres. Risques de ruptures en chaîne.

72



Classification préliminaire de danger			
Degré de danger	Critères		
	Hauteur du barrage (m)	Capacité maximale de la retenue ( $10^6 m^3$ )	Matériaux constitutifs du barrage
Très élevé	$H > 100$	$V > 100$	Groupe 1
Élevé	$50 < H < 100$	$10 < V < 100$	Groupe 2
Modéré	$25 < H < 50$	$1 < V < 10$	Groupe 3
Faible	$H < 25$	$V < 1$	Groupe 4



### Tangjiashan : la gestion du risque

- ❑ 84 victimes directes ;
- ❑ Danger très élevé (3 autres barrages ont été formés à l'aval : risque de rupture en chaîne) ;
- ❑ Plus d'un million de personnes menacées à l'aval ;
- ❑ Fin mai, le niveau montait de 1 à 1,5 m par jour.
  - Décision : creuser un chenal.
  - L'armée a oeuvré 7 jours et 6 nuits pour réaliser un chenal de 475 m de long et 12-13 m de profondeur.
  - 135 000 m<sup>3</sup> ont été terrassés, par 1100 travailleurs ; 26 bouteurs étaient sur le chantier.
  - Le 7 juin, l'eau a commencé à emprunter le chenal ; le volume de la retenue était à ce moment de 230 hm<sup>3</sup>.

79



Tangjiashan

80

### Beichuan : avant et pendant la surverse



81

### Tangjiashan : la gestion du risque à long terme

- ❑ Après la surverse : le chenal s'est approfondi (60 m) et élargi (100 m)
- ❑ En 2009, une lave torrentielle obstrue le chenal...
- ❑ Retenue résiduelle : risque jugé acceptable

82

### Xiaogangjian





### Enseignements pour Séchilienne



91

### Le risque hydraulique

- Volume de la retenue amont :  
200 000 m<sup>3</sup> pour une hauteur de barrage de 6 m  
1 100 000 m<sup>3</sup> pour une hauteur de 12 m.
- Le lac amont, l'inondation aval ;
- Etude sur modèle réduit (1/60) à la CNR-Lyon (commande Symbhi).  
24 essais ont été réalisés, avec deux types de matériau (en taille réelle : D<sub>50</sub> = 50 mm et 100 mm), deux hauteurs de barrage et différents débits de la Romanche.

92

### Les enseignements du séisme du Sichuan

- Les exemples chinois sont de dimensions bien plus grandes qu'à Séchilienne ;
- Séchilienne : classe de "danger faible", éventuellement "modéré" (risque à moyen ou long terme).
- Mais cette classification concerne uniquement l'aléa, et ne prend pas en compte l'importance des enjeux.

93

### Importance de la granularité du barrage

- La plupart des barrages naturels qui se sont formés après le séisme du 12 mai 2008 : matériaux rocheux, granularité assez grossière.
- La présence de gros blocs (plusieurs m<sup>3</sup>) limite l'érosion et un équilibre (provisoire ?) s'installe par suite du pavage du chenal, que celui-ci soit artificiel ou naturel.
- A Séchilienne, la proportion de fines devrait être non négligeable (pénétration de l'altération au sein des formations métamorphiques), mais on doit s'attendre à trouver aussi des gros blocs rocheux.

94

### Forme du barrage

- Au Sichuan : formes assez étalées dans le sens de la vallée (cf. la dynamique assez rapide des mouvements de terrain). Erosion progressive, même si des débits de surverse ont pu atteindre des valeurs élevées.
- A Séchilienne : les modélisations réalisées par L. Rochet concluent à un étalement assez prononcé du cône d'éboulis.

95

### Parades

- Trois types :
  - creusement d'un chenal d'évacuation,
  - pompage de l'eau de la retenue,
  - creusement d'une galerie de dérivation, en général dans un versant de la vallée.
- Sichuan : chenal pour réduire la hauteur du barrage et limiter l'importance du lac amont. Il faut avoir le temps (typiquement, une quinzaine de jours) : volume important du réservoir amont, précipitations faibles et donc débits incidents faibles à modérés en mai 2008, perméabilité moyenne à forte des matériaux éboulés.
- Séchilienne : remplissage en quelques heures ou quelques dizaines d'heures.

96

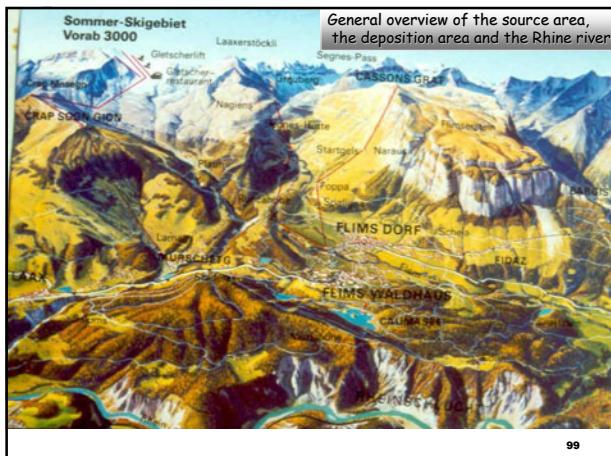
## Éboulements secondaires

- Autre enseignement du séisme chinois : fréquence des événements secondaires venant rehausser le barrage ou obstruer le chenal existant.
- A Séchilienne, des éboulements secondaires sont probables après un événement majeur, impliquant des risques résiduels au droit de l'éboulement principal.

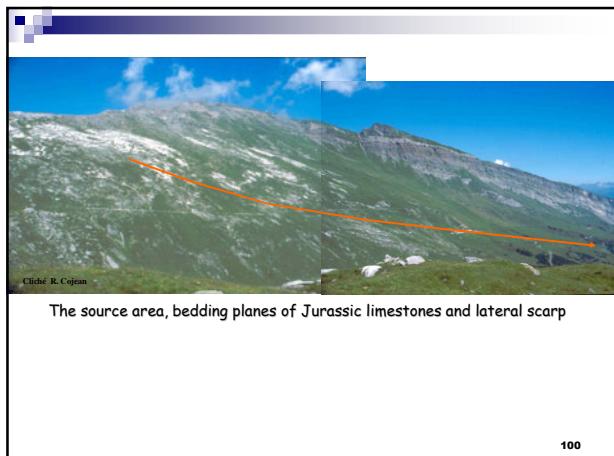
97

## Mouvements de versant de très grande ampleur – Modèles conceptuels

98

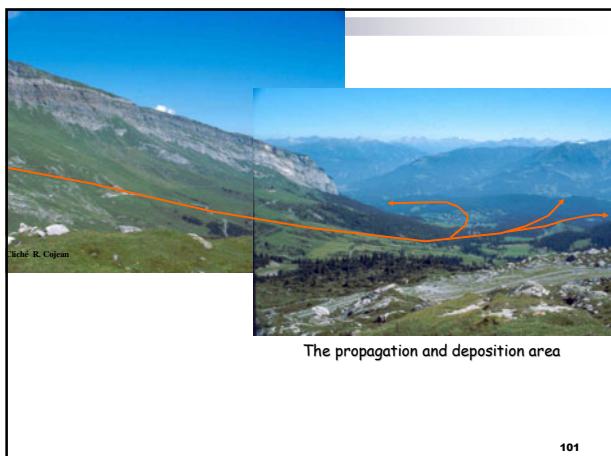


99

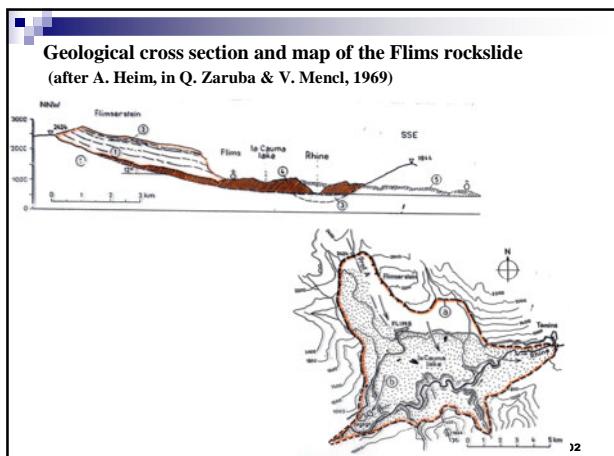


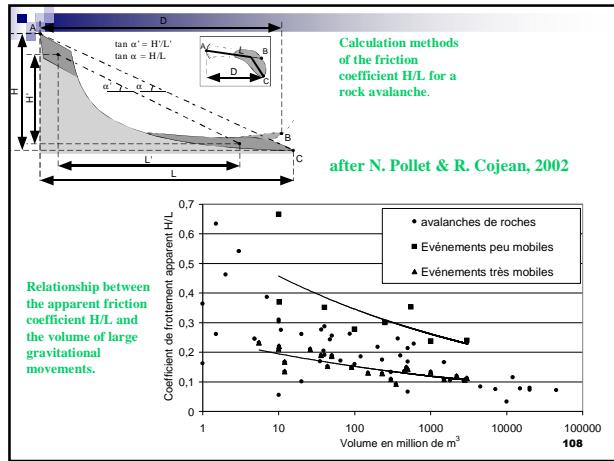
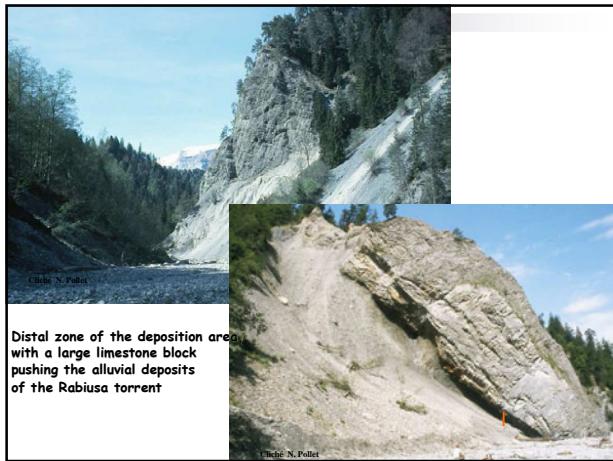
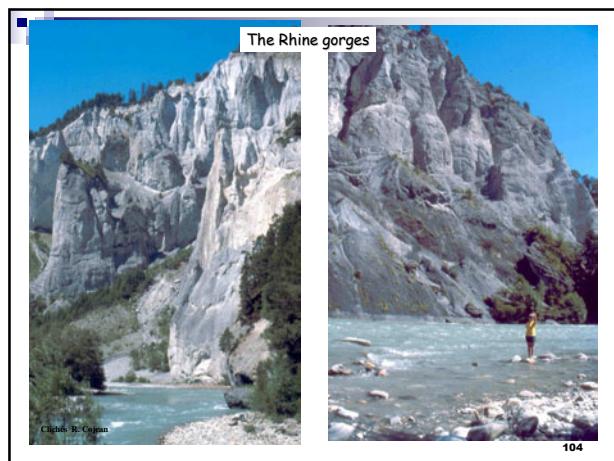
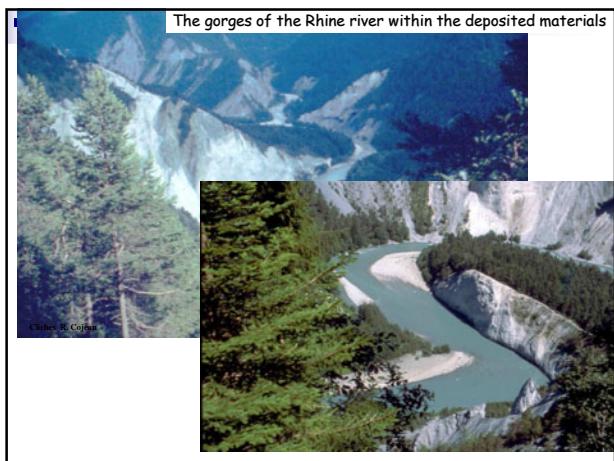
The source area, bedding planes of Jurassic limestones and lateral scarp

100



101





The slab-on-slab model as a key model to hazard assessment related to large slope instabilities

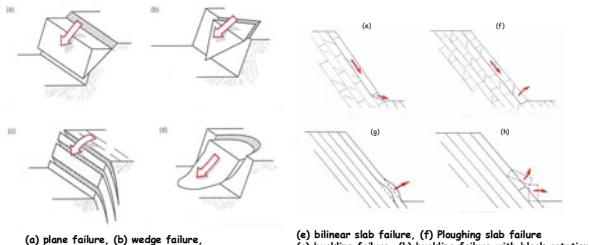
Synthetic diagram related to the slab-on-slab model

- |              |                            |  |                            |                   |
|--------------|----------------------------|--|----------------------------|-------------------|
| 1) Rockslide | 2) Multi-layered rockslide | 3) Intermediate rockslide / rock avalanche | 4) Immature rock avalanche | 5) Rock avalanche |
|--------------|----------------------------|--|----------------------------|-------------------|

## Géomécanique et simulations numériques

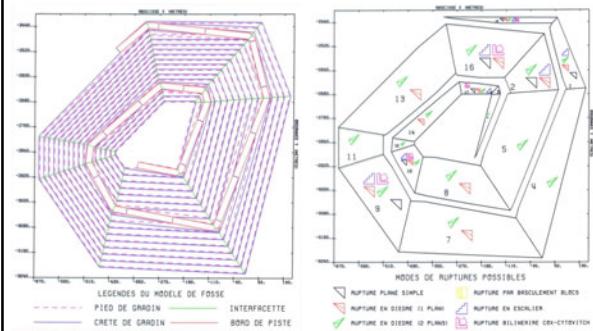
110

### Logiciel DEGRES Some examples of basic failure mechanisms



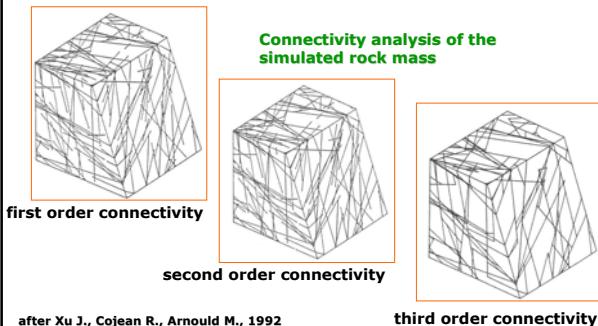
111

### Geometrical and geomechanical modelling of an open pit and identification of basic failure mechanisms



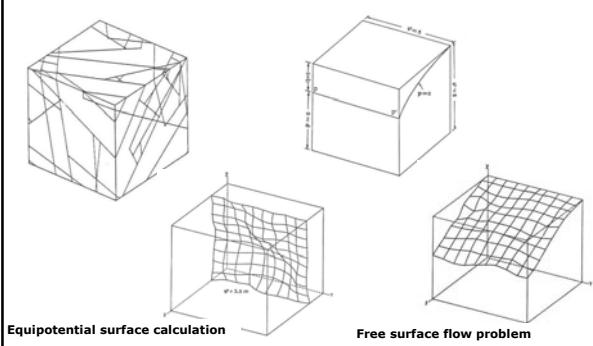
112

### Logiciel SIMBLOC



113

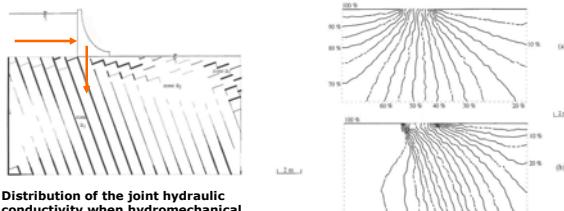
### Applications to fluid flows in discontinuous media



114

## Logiciel BRIG3D

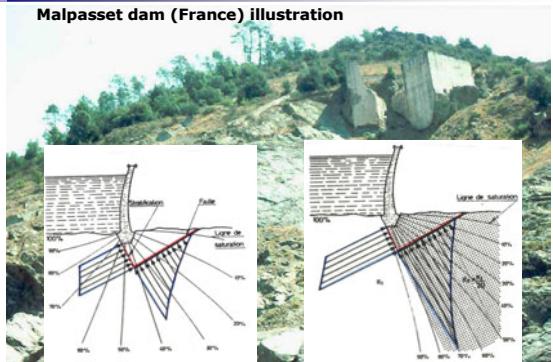
Applications to the analysis of the role of the anisotropy of a rock mass on the flow characteristics under a dam foundation



Distribution of the joint hydraulic conductivity when hydromechanical equilibrium is obtained.

Comparison of equipotential countours:  
a) hydraulic conductivity is the same for all the joints ;  
b) hydraulic conductivity is modified by the relative displacements of blocks

## Malpasset dam (France) illustration



Figures after Bernalx (1967)

Cliché R. Cojean

116

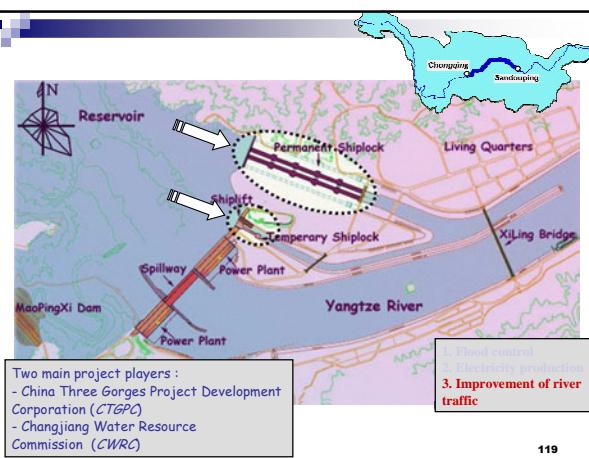
## Géologie de l'ingénieur et ouvrages du génie civil ou minier

117

Long term displacements of excavated rock slopes.

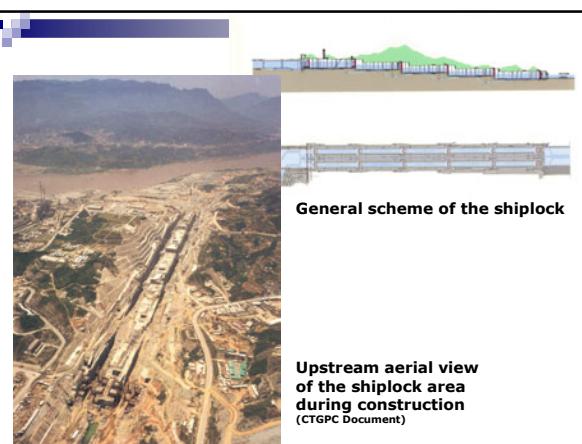
The permanent shiplock  
at the Three Gorges dam in China

118



Two main project players :  
- China Three Gorges Project Development Corporation (CTGPC)  
- Changjiang Water Resource Commission (CWRC)

119



Upstream aerial view  
of the shiplock area  
during construction  
(CTGPC Document)

120

