

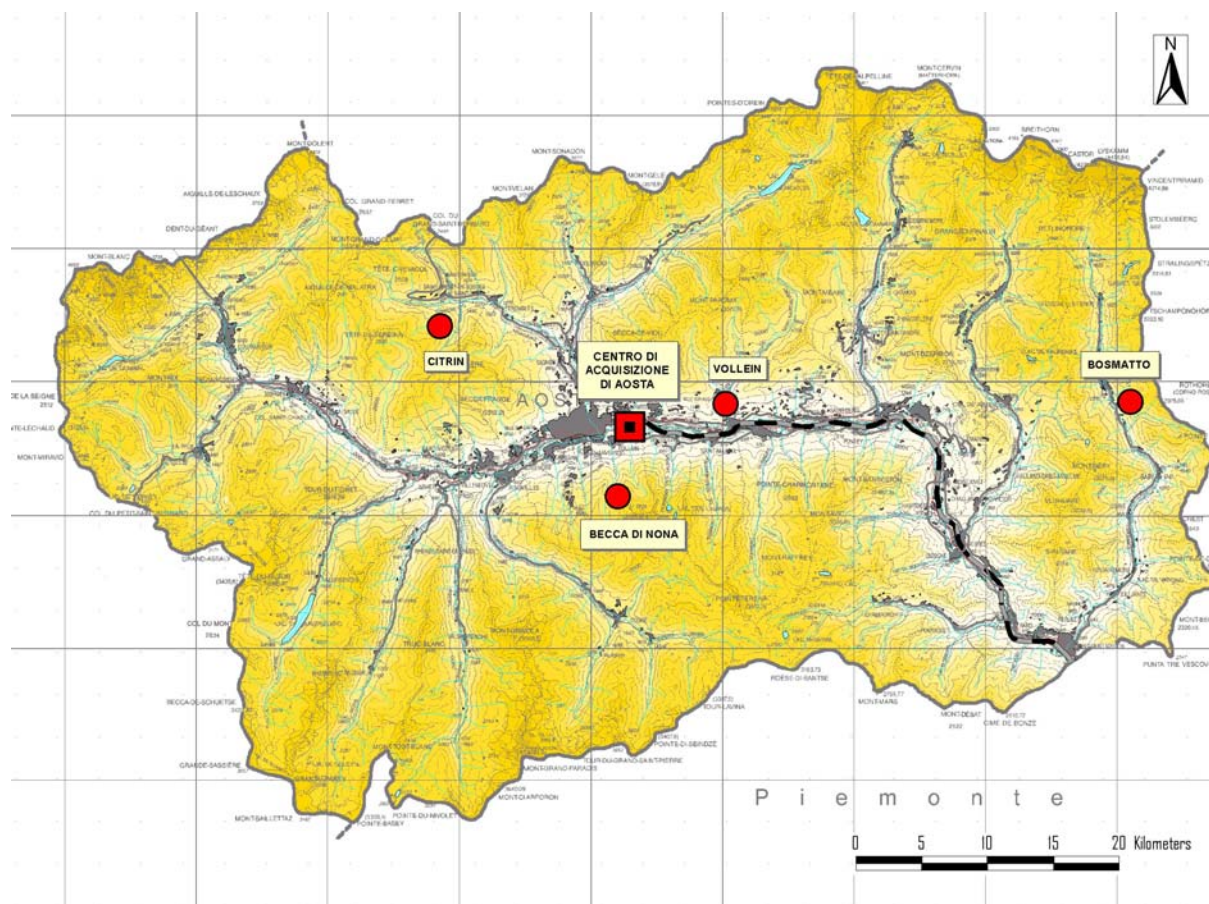
3.3.2. Displacement and rainfall threshold values for large landslide forecast in real time: the example of the “Becca di Nona” Landslide (Aosta)

Andrea TAMBURINI (CESI)

Andrea Tamburini, qui a participé au projet sur les parties « Base de donnée Capteurs » et Comparaison des systèmes de télésurveillance (système Eydenet) a présenté des éléments de réflexion sur « Les valeurs seuils de déplacement et de précipitations pour la prévision en temps réelle des grands mouvements de terrain : exemple de la Becca di Nona, Aoste ». Il précise en avant propos qu’il apporte davantage de questions que de réponses.

Localisation du réseau de télésurveillance :

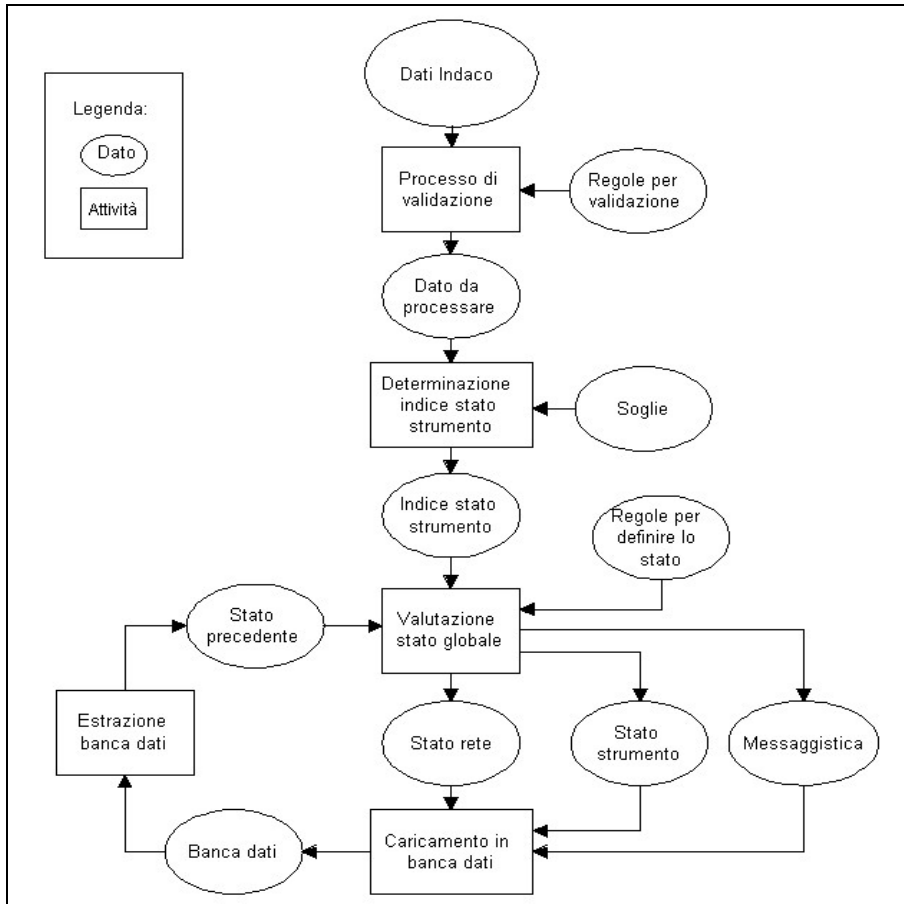
Le réseau, dont le centre d’acquisition de données est situé à Aoste, gère 4 sites de mouvements de terrain (cf. *sites pilotes*) : Becca di Nona, Citrin, Bosmatto et Vollein.



Territoire de la Vallée d’Aoste

Principales caractéristiques du Système d’Aide à la Décision (DSS) en Vallée d’Aoste (voir *Activité 3 Comparaison des systèmes de télésurveillance*) :

Eydenet est un DSS temps réel propriétaire, développé par le CESI pour l’évaluation en temps réel de données collectées automatiquement par des systèmes de monitoring installés sur les sites en mouvement. Ces particularités résident d’une part dans l’architecture du système (cf. *diapo 4*), d’autre part dans le « Workflow » automatique du traitement des données (ci-dessous).



Méthodologie du traitement automatisé des données de monitoring

Les données collectées, avant d’être stockées, sont d’abord validées (Processo di validazione); elles sont ensuite comparées avec les seuils (soglie). En fonction de la comparaison, 4 états sont possibles (stato strumento) :

- pas de données
- état normal
- pré-alerte
- alerte

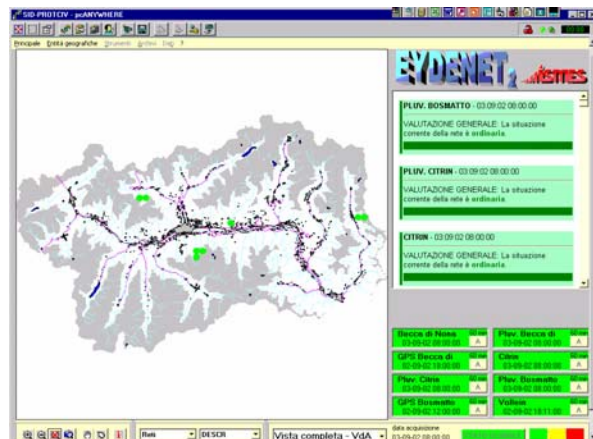
no data	
normal	
pre-alert	
alert	

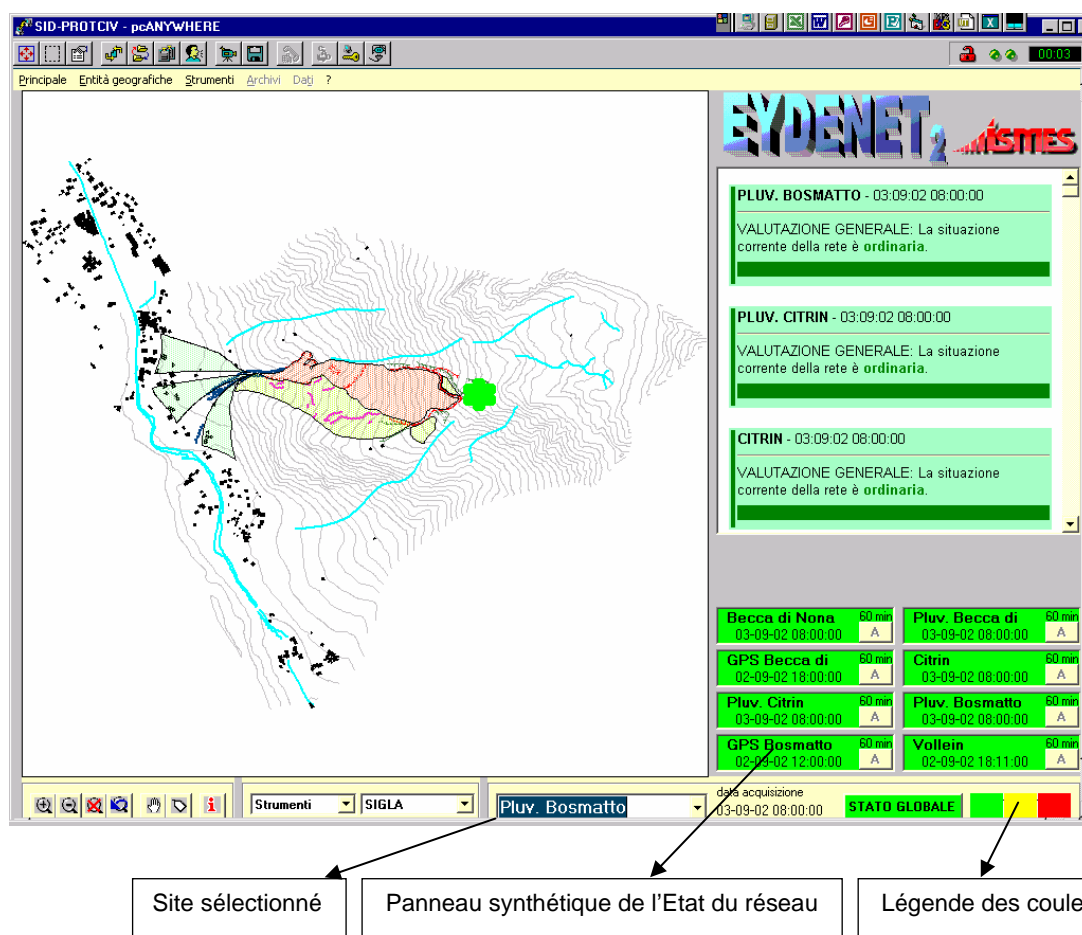
Des règles établies (Regole) permettent de définir 4 états du réseau global : sur l’écran d’affichage de la centrale d’acquisition, l’état du réseau et des instruments est visualisé selon le même code de couleur (copie d’écran ci-dessous).

L’événement est ensuite stocké dans la base de données (Caricamento in banca dati).

Sorties :

Les différentes sorties permettent d’avoir des vues d’ensemble du système (ci-contre), des vues de détail par site (ci-dessous).





Des requêtes sont possibles dans la base de données (cf. [diapos 9 à 11](#)) pour obtenir les états des instruments et du réseau à tout moment, des statistiques, des analogies historiques.

Prévision des mouvements de terrain :

La prévision des mouvements de terrain dépend de la possibilité d'identifier soit des indices d'activité (déplacements) soit des paramètres déclencheurs (précipitations). La surveillance (monitoring) représente l'outil principal pour conduire des procédures d'évaluation et définir des critères pour la prévision spatiale et temporelle des mouvements de terrain.

Les valeurs seuils d'alerte peuvent être établies sur :

- les pluies, en définissant des valeurs critiques de précipitation qui peuvent déclencher un mouvement ;
- les déplacements, en définissant des valeurs critiques de vitesse et/ou d'accélération du mouvement.

Les approches pour évaluer les valeurs seuils peuvent être soit empiriques, statistiques ou déterministe, soit une combinaison de différentes approches. Le choix de l'approche dépend du degré de connaissance du phénomène.

Approche empirique : il s'agit par exemple de modèles « boîte noire » basés sur l'extrapolation de données de déplacement disponibles sur le mouvement ; c'est l'approche la plus couramment utilisée ;

Approche statistique : elle est basée sur l'analogie entre des phénomènes comparables en termes de mécanisme, de conditions climatiques, etc. (paramètres déclencheurs) ; cette approche est peu applicable aux seuils de déplacements (peu transposables d'un site à l'autre), davantage aux seuils de pluies ;

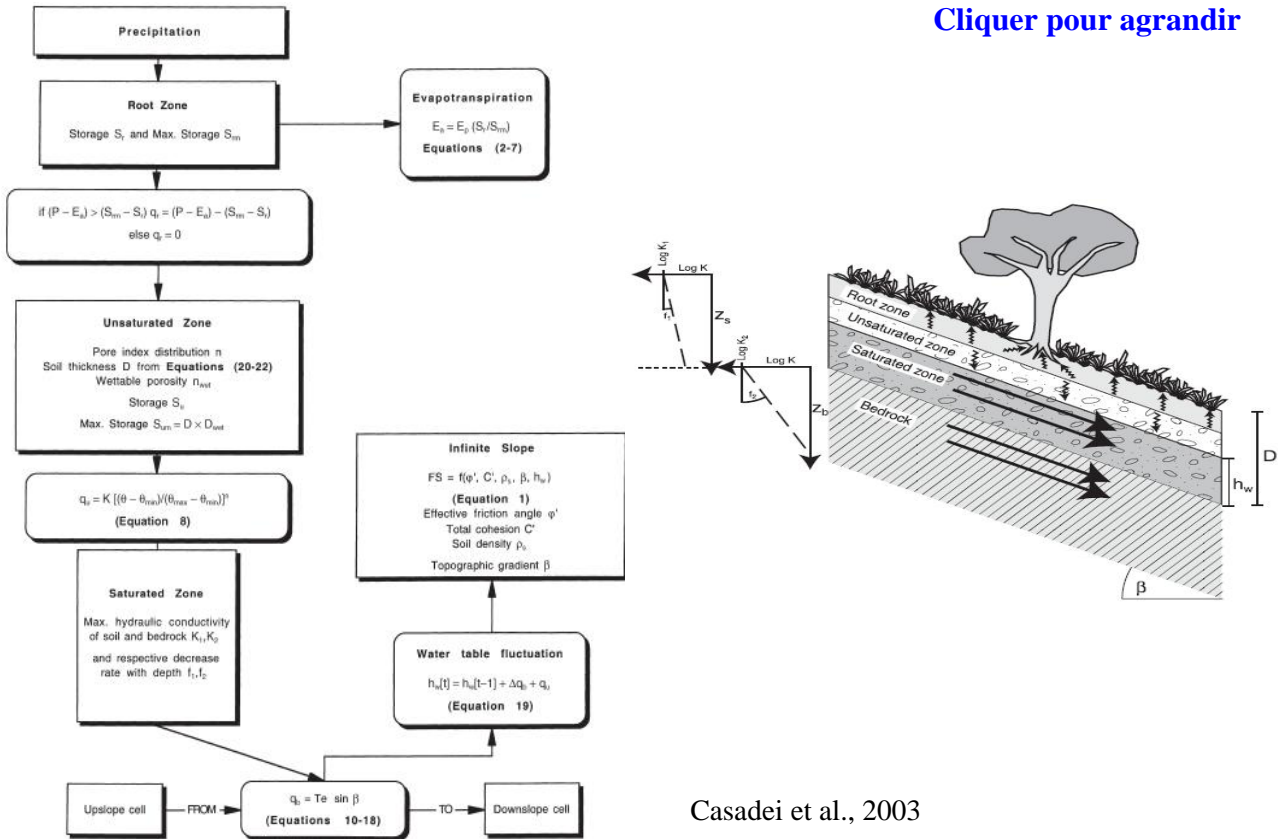
Approche déterministe : elle peut être appliquée seulement si un modèle évolutif du phénomène considéré existe (ce qui nécessite beaucoup de données !) ; elle est donc utilisée seulement dans quelques cas particuliers.

Valeurs seuils sur les précipitations

Les pluies sont l’un des principaux facteurs de déclenchement des mouvements de terrain (mais pas les seuls). Les prévisions basées sur des seuils de précipitations fonctionnent à l’échelle locale ou régionale.

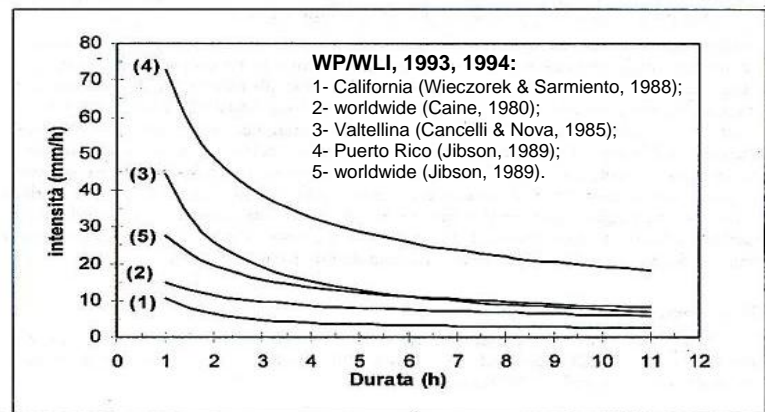
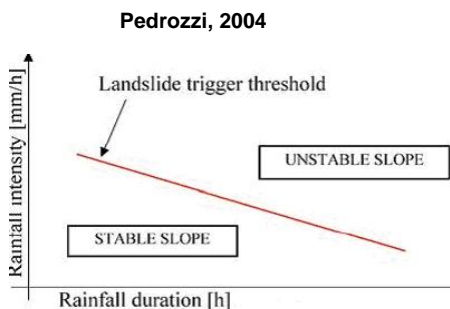
Les modèles déterministes et empiriques-déterministes combinent des données hydrologiques et hydrogéologiques complexes ; elles nécessitent de nombreux paramètres (exemple ci-dessous).

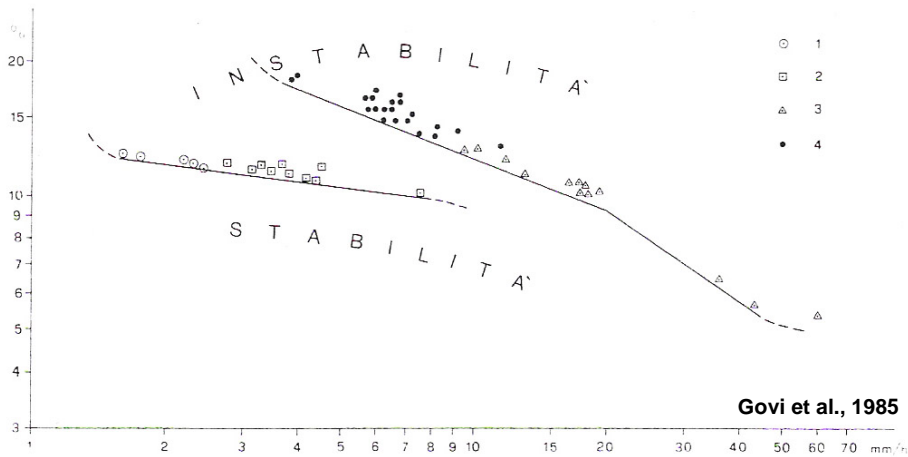
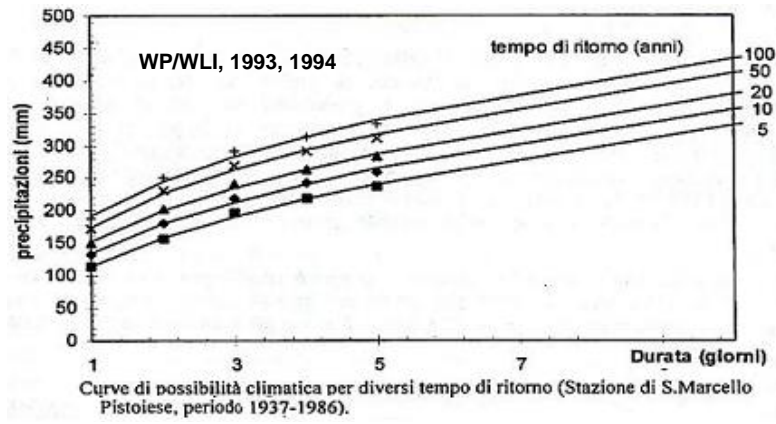
[Cliquer pour agrandir](#)



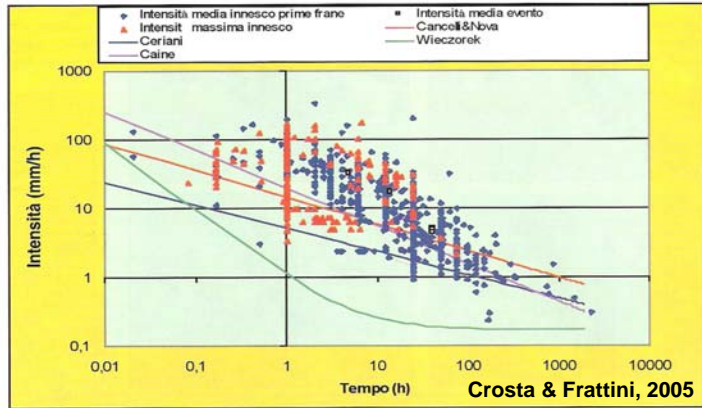
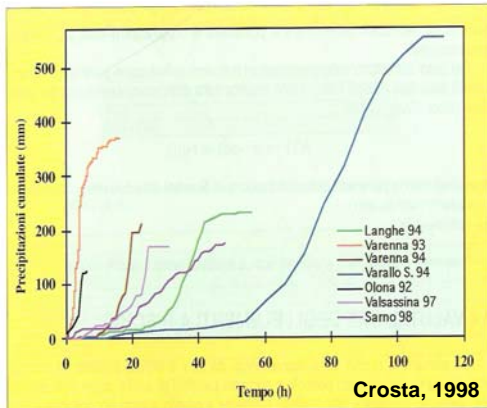
Casadei et al., 2003

L’approche empirique-statistique est la plus commune, basées soit sur des relations volume-intensité / durée de pluie, soit sur des analyses de cumuls de pluie (quelques exemples de la littérature ci-dessous).





Equazione	Autori	Tipo di dati Ambito territoriale
$I = 14.82 D^{-0.39}$	Caine (1980)	Dati mondiali, soglia per tutto il mondo
$\log I = 1.65 - 0.78 \log D$	Cancelli e Nova (1985)	Dati evento, Alpi Centrali (Valtellina)
$D = 46.1 - 3.6 \cdot 10^3 I + 7.4 \cdot 104 I^2$	Cannon e Ellen (1985)	Dati evento, California
$D = 0.90 / (I - 0.17)$	Wieczorek (1987)	Dati evento, California
$I = 20 D^{-0.55}$	Ceriani et al., (1994)	Dati eventi storici, Alpi Centrali (Valtellina)
$I = 19 D^{-0.50}$	Aleotti (2004)	Eventi storici, Piemonte
$I = 12.7 D^{-0.53}$	Bolley e Oliaro (1999)	Dati evento, Alpi piemontesi
Non specificata	Crosta e Frattini (2001)	Dati mondiali, tutto il mondo



L'approche déterministe quant à elle ne peut être appliquée que sur un phénomène unique, alors que l'approche empirique s'applique à une échelle régionale (bassin ou plus large).

Problèmes et points faibles :

- Il est difficile de comparer différentes méthodes ;
- Il existe toujours des incertitudes concernant les relations cause / effet ;
- Le temps de réponse n'est pas toujours forcément bien pris en compte. Par exemple, à Bosmatto (cf. visite de terrain § 8 p. 222), la lave torrentielle principale est arrivée 1 jour après les premières petites laves déclenchées par les précipitations d'octobre 2000, à cause de la configuration du site : il existe donc des cas qui sortent des lois générales ;
- De longues séries de données sont nécessaires, à la fois sur les causes et sur les effets ;
- Peu d'enregistrements d'événements sont disponibles à l'échelle d'un bassin versant ;
- Selon l'approche, l'échelle n'est pas toujours adaptée (régionale et non locale) ;
- Les paramètres géotechniques, l'utilisation du sol, la morphologie ne sont pas pris en compte dans les approches empiriques et statistiques ;
- Les formules disponibles ne s'appliquent pas à tous les types de mouvements de terrain.

Valeurs seuils sur les déplacements

Le problème est complexe car les phénomènes à long terme, comme les grands mouvements de versant (slope creep : Terzaghi 1950, Haefeli, 1953), sont généralement contrôlés par des lois de rupture qui dépendent du temps.

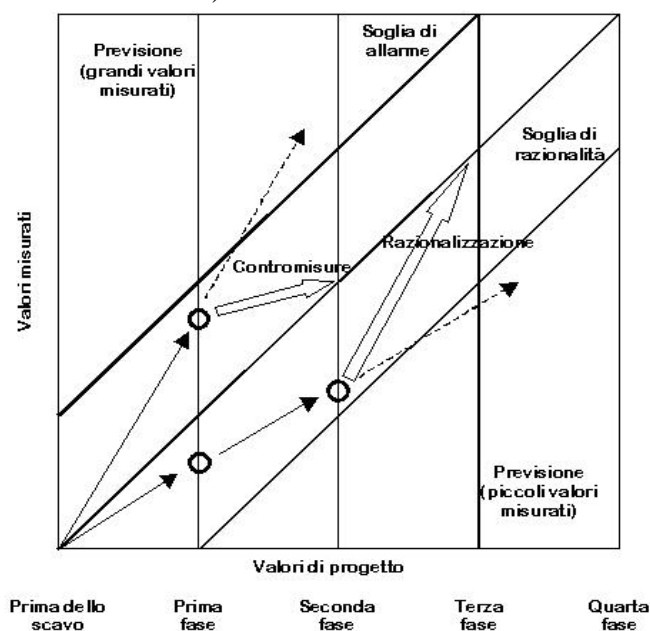
Une bonne approche est sans doute l'approche observationnelle (« learn-as-you-go, développée par Terzaghi en 1945): il s'agit de monitorer, comparer les résultats avec les prévisions, puis agir en fonction des résultats, par exemple en proposant une intégration de système de surveillance, des investigations et études plus approfondies, ou en ajustant des valeurs seuils (on apprend au fur et à mesure de l'évolution du phénomène).

Les méthodes déterministes sont finalement assez peu employées car elles nécessitent beaucoup de données, qui ne sont souvent pas disponibles lors de la conception d'un système d'alarme précoce.

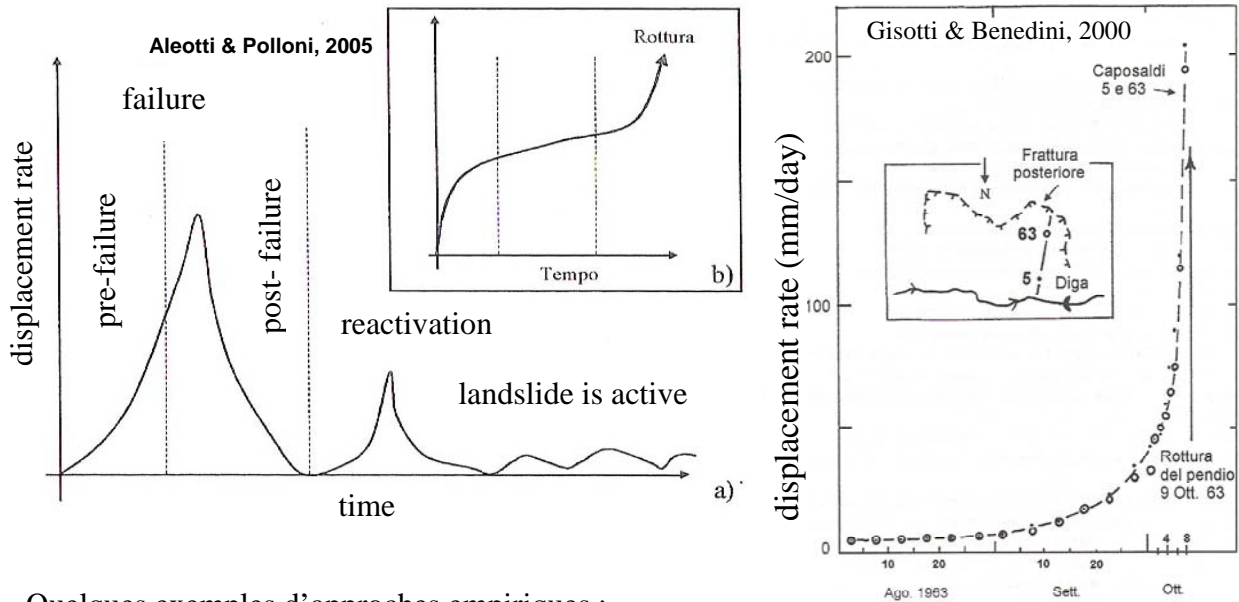
Les méthodes empiriques sont donc plus communément appliquées, sur la base de mesures relativement simples (fissuromètres, extensomètres...).

Même si les méthodes de surveillance récemment développées (Radar terrestre et satellite, laser scanner...) fournissent des cartes de déplacement très détaillées, on se rend compte qu'elles ne sont pas appropriées pour l'alerte en temps réelle, qui reste est basée sur des mesures locales, ponctuelles.

En ce qui concerne les méthodes empiriques, il y a beaucoup à apprendre des épisodes de réactivation (ci-dessous).



Ikuta et al., 1994



Quelques exemples d'approches empiriques :

Saito (1965, 1969) propose une relation entre taux de déplacement et temps, avec des coefficients empiriques qui doivent être adaptés en fonction de chaque site

$$\log(t_f) = c - m \log(\dot{\Omega}) \quad \text{Con: } \dot{\Omega} = \text{velocità di deformazione}$$

$t_f = \text{istante di rottura}$
 $c, m = \text{costanti empiriche}$

L'approche développée par Voight (1988, 1989) est également couramment employée : il s'agit d'une prévision du temps de rupture par extrapolation des valeurs de déplacement mesurées.

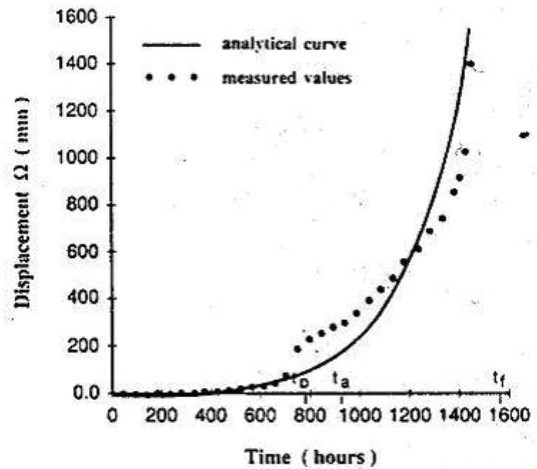
$$\ddot{\Omega}(t) = A \cdot [\dot{\Omega}(t)]^\alpha$$

con

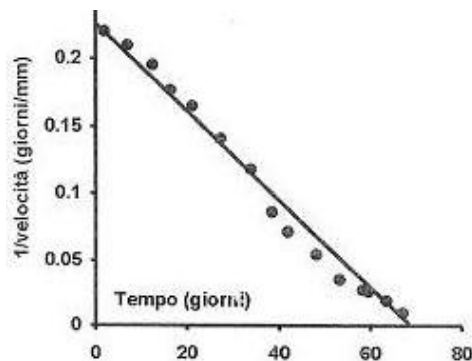
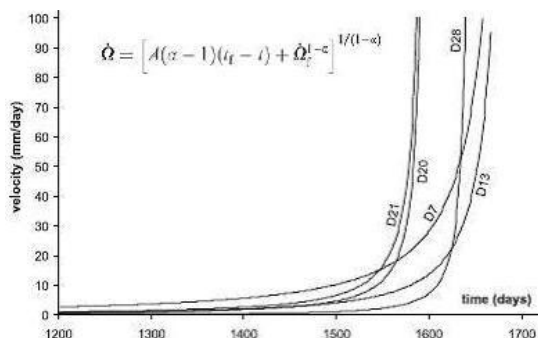
$\Omega(t)$: spostamento [L]
 $\dot{\Omega}(t)$: velocità [LT⁻¹]
 $\ddot{\Omega}(t)$: accelerazione [LT⁻²]

$\alpha \in [1.7 + 2.3]$
 $A \in [10^{-4} + 10^{-2}]$

Voight, adapté par Borsetto et al., 1991

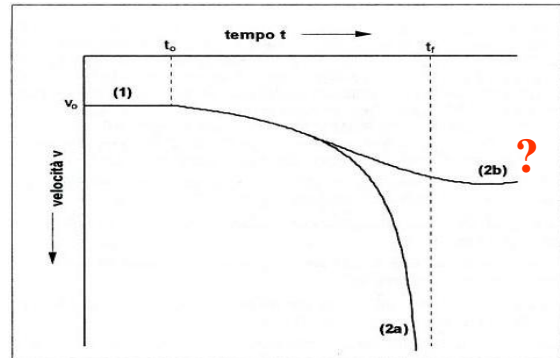


Crosta et Agliardi (2002, ci-dessous à gauche) ont fait évoluer cette méthode pour déterminer des valeurs seuil à partir des caractéristiques d'évolution, alors que Petley et Petley (2004) utilisent une relation entre l'inverse de la vitesse de déplacement et le temps (ci-dessous à droite).



Problèmes et points faibles :

On ne peut utiliser l’approche déterministe la plupart du temps qu’en rétro-analyse. En effet, les valeurs seuils sur les déplacements sont très difficiles à extrapoler, en particulier à cause de la dépendance non linéaire des déplacements dans le temps, due entre autre aux effets saisonniers. De plus, les modèles empiriques de type « boîte noire » ne fonctionnent que sur la phase d’augmentation du taux de déplacement. D’autre part, l’analyse des déplacements n’est pas nécessairement exhaustive.



Exemple de la Becca di Nona (voir aussi [Site pilote](#))

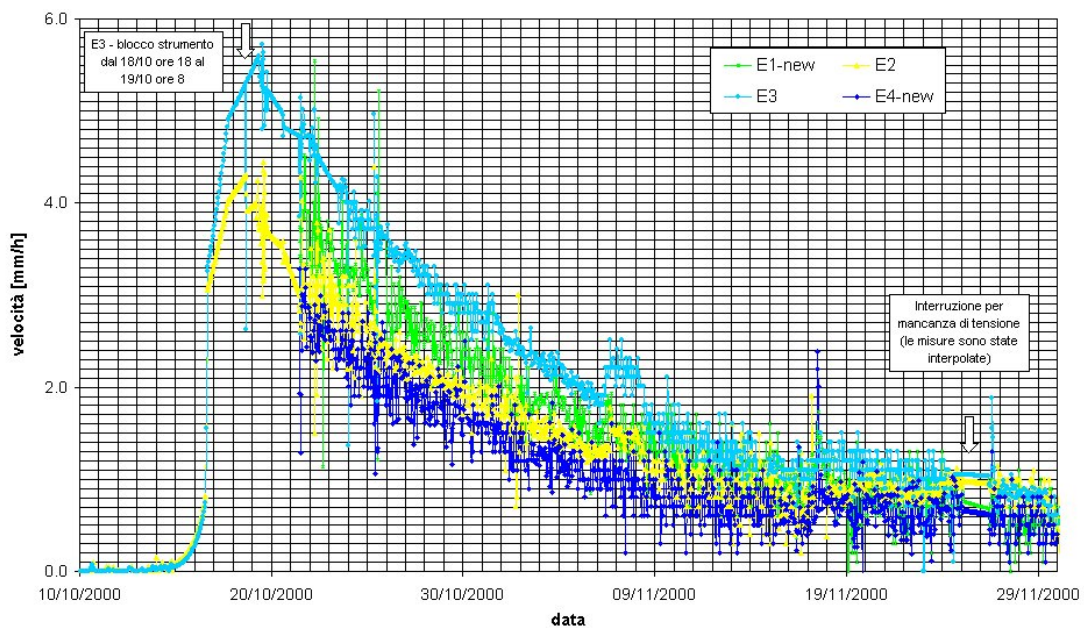
Il s’agit d’un site surveillé depuis 1998, qui s’est réactivé lors de l’épisode alluvial d’octobre 2000, avec des taux de déplacement atteignant 6mm/h. Le volume concerné est d’environ 2 millions de m³ et les déplacements annuels moyens d’environ 5-7cm / an en planimétrie et 5 cm/ an en vertical.

Le site est équipé de 4 extensomètres à câbles, 2 stations GPS automatiques, 1 station météo et 7 repères GPS à lecture manuelle. Les données sont transmises par radio à la centrale d’acquisition de la protection civile, avec des fréquences d’acquisition de 1h pour les extensomètres et la météo, 6-12h pour les GPS automatiques.

Seuils de déplacement :

On ne mesure que des déplacements de surface, qui proviennent des extensomètres à câble et des GPS « presque temps réel » ; les données disponibles ne sont pas adaptées pour définir des l’évolution du phénomène (selon l’approche Crosta).

Becca di Nona: velocità estensimetri dal 10/10 al 30/11/2000



Prévision du comportement des mouvements de terrain : conclusions et recommandations

Il est possible de prévoir le comportement des mouvements de terrain, mais on doit garder à l'esprit que chaque cas est différent : une méthode d'observation appropriée doit être adoptée.

Pour mettre en évidence l'activité d'un mouvement, il faut se baser d'une part sur les signes géomorphologiques, d'autre part sur les mesures instrumentales. La meilleure approche consiste à installer un système d'alerte précoce aussitôt que possible pour enregistrer des données dès que la rupture ou la réactivation se produit. Le but n'est pas seulement d'installer un système de surveillance, mais de suivre l'évolution du phénomène par l'analyse des données enregistrées, afin de les intégrer au système de surveillance et de le modifier en fonction des résultats. Le monitoring n'est qu'un point de départ de cette démarche.

Il est important de vérifier la fiabilité des données « ponctuelles » (locales) et de les valider grâce à des mesures manuelles périodiques (GPS ou mesures topographiques traditionnelles, Interférométrie radar, Laser scanner...).

Il est également important de mesurer des déplacements durant la fonte des neiges pour identifier des indices de réactivation sur des sites situés à haute altitude.

Enfin, le dépassement des valeurs seuils n'implique pas nécessairement le déclenchement du phénomène ; à ce propos, il ne faudrait jamais oublier le constat suivant d'Erisman et Abele (2000), à propos de l'évaluation de l'extension des grands glissements de terrain : « l'expert doit garder en tête qu'il ne risque rien si ce n'est sa réputation d'infailibilité s'il prédit une extension exagérée, mais qu'il y a des vies humaines en jeu dans le cas inverse ».

Bibliographie

- Aleotti P. & Polloni G., 2005 – “*Valutazione e mitigazione del rischio frane*”. Helvelius Edizioni.
- Borsetto, M., Frassoni, A., La Barbera, G., Fanelli, M., Giuseppetti, G. & Mazza, G., 1991 – “*An application of Voight empirical model for the prediction of soil and rock instabilities*”. In: Bell (Ed.), Proc. 5th Int. Symp. on Landslides, Christchurch. Balkema, Rotterdam, pp. 335–341.
- Casadei M., Dietrich W. E. & Miller N. L., 2003 - “*Testing a model for predicting the timing and location of shallow landslide initiation in soil-mantled landscapes*”. Earth Surface Processes and Landforms, 28, 923-950.
- Crosta G., 1998 – “*Regionalization of rainfall thresholds: an aid to landslide hazard evaluation*”. Environ. Geology, 8/98.
- Crosta, G. & Agliardi, F., 2002 – “*How to obtain alert velocity thresholds for large rockslides*”. Physics and Chemistry of the Earth 27 (2002), pp. 1557–1565.
- Crosta G. & Frattini P., 2000 – “*Rainfall thresholds for soil slips and debris flow triggering*”. Proc. of the 2nd Plinius Conference 2000.
- Erisman T.H. & Abele G., 2001. “*Dynamics of rockslides and rockfalls*”. Springer-Verlag. 2001.
- Gisotti G. & Benedini M., 2000 – “*Il dissesto idrogeologico. Previsione, prevenzione e mitigazione del rischio*”. Carocci Editore, Roma.
- Govi M., Mortara G. & Sorzana P. F., 1985 – “*Eventi idrologici e frane*”. Geologia Applicata e Idrogeologia, 20 (2), pp. 359-375.
- Haefeli, R., 1953 – “*Creep problems in soils, snow and ice*”. In: Proc. 3rd Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, vol. 3. pp. 238–251.

- Ikuta, Y., Maruoka, M., Aoki, M. & Sato, E., (1994). *Application of the observational method to a deep basement excavation using the top down method*. Geotechnique n.44, 4.
- Pedrozzi G., 2004 – “*Triggering of landslides in Canton Ticino (Switzerland) and prediction by the rainfall intensity and duration method*”. Bull. Eng. Geol. Environ (2004) 63, pp. 281-291.
- Petley D. N & Petley D. J., 2004 – “*On the initiation of large rockslides. Perspectives from new analysis of the Vajont movement record*”. In: “Large block slope failures” (Evans ed.), Balkema, Rotterdam.
- Saito M. (1965). *Forecasting the time of occurrence of a slope failure*, Proceedings of 6th ICSMFE, Montreal.
- Saito M. (1969). *Forecasting the time of failure by tertiary creep*, Proceedings of 7th ICSMFE, Mexico.
- Terzaghi K., 1950 – “*Mechanisms of landslides, in applications of geology to Engineering Practice*”. Geol. Soc. Amer. Spec. Pub., Berkeley Volume, 83-123.
- Voight B. (1988). *Material science law applies to time forecast of slope failure*, Landslides news, 3.
- Voight B. (1989). *A relation to describe rate-dependent material failure*, Science, vol.243.
- WP/WLI-International Geotechnical Societies’UNESCO Working Party on World Landslide Inventory, 1993 – “*A suggested method for describing the activity of a landslide*”. IAEG Bull.
- WP/WLI-International Geotechnical Societies’UNESCO Working Party on World Landslide Inventory, 1994 – “*Multilingual glossary for landslides*”. IAEG Bull.

Discussion (8) – Prédiction et modèles déterministes

J.-L. Durville : « La prédiction doit être effectuée en continu. Elle consiste à la réviser tous les jours en l’adaptant en fonction des paramètres observés, comme on le fait par exemple sur le mouvement de La Clapière. Cela fait partie des limites des modèles prédictifs ».

E. Leroi : « Il y a un paradoxe dans l’utilisation de modèles déterministes pour effectuer des analyses en retour et les utiliser pour la prédiction ».

A. Tamburini : « Oui mais ils peuvent être utiles pour déterminer les valeurs à utiliser dans le monitoring : on a besoin de ces valeurs pour caler les modèles utilisés. Par exemple pour le modèle de ‘runout’, la seule approche qui peut être utilisée est l’approche empirique ou peut-être l’approche statistique : malheureusement l’approche déterministe ne marche pas pour le moment, même si les modèles sont très sophistiqués, car on n’a pas les données nécessaires en entrée ».