



INTERREG III A *Projet n° 179 (ex n° 046)*

## RiskYdrogé

*“Risques hydrogéologiques en montagne : parades et surveillance”*

**ACTES DE LA CONFERENCE INTERNATIONALE**

### **RISKYDROGEO**

**24 – 25 – 26 Octobre 2006  
Saint-Vincent (Vallée d’Aoste)**

***Compte-rendu exhaustif des présentations et des débats***

**Partenaires et financeurs :**



Région autonome Vallée d’Aoste  
Assessorat du territoire,  
de l’environnement et des ouvrages publics  
Regione autonoma Valle d’Aosta  
Assessorato del territorio,  
ambiente e opere pubbliche



**CANTON DU VALAIS  
KANTON WALLIS**



Bundesamt für Wasser und Geologie **BWG**  
Office fédéral des eaux et de la géologie **OFEG**  
Ufficio federale delle acque e della geologia **UFAEG**  
Uffizi federal per aua e geologia **UFAEG**  
Federal Office for Water and Geology **FOWG**

**En collaboration avec :**



**Pôle Grenoblois Risques Naturels**

## Sommaire

<b>Introduction</b>	<b>4</b>
<b>1. PRESENTATION ET CADRAGE DE LA CONFERENCE</b>	<b>5</b>
1.1. <b>Programme, intervenants et participants</b>	<b>5</b>
1.1.1. Programme de la conférence	5
1.1.2. Liste des intervenants	7
1.1.3. Les participants	7
1.2. <b>Allocution de bienvenue</b>	<b>8</b>
1.3. <b>Présentation générale du projet, des objectifs et du déroulement de la conférence</b>	<b>9</b>
1.4. <b>Cadrage de la problématique de la surveillance et de la protection</b>	<b>10</b>
1.5. <b>Intervention d’Eric Leroi et présentation multimédia du projet</b>	<b>11</b>
<b>2. APPROFONDISSEMENT DES ATELIERS TRANSFRONTALIERS RISKYDROGEO</b>	<b>12</b>
2.1. <b>Présentation synthétique des 4 ateliers</b>	<b>12</b>
2.2. <b>Les différents modes de prise en compte des risques naturels dans l’aménagement du territoire d’une région à l’autre</b>	<b>16</b>
<i>Discussion (1) – Prise en compte des risques naturels dans l’aménagement</i>	<b>23</b>
2.3. <b>Echange d’expériences de gestion opérationnelle des risques hydrogéologiques par des responsables techniques internationaux et des élus locaux</b>	<b>27</b>
2.3.1. The warning and evacuation against sediment-related disasters - Realities and challenges in Japan	27
<i>Discussion (2) – Gestion des risques naturels : confrontation avec le cas du Japon</i>	<b>29</b>
2.3.2. Landslide monitoring and decision: Strategy and experiences of NGI	31
<i>Discussion (3) – L’expérience de la NGI</i>	<b>41</b>
2.3.3. Situation d’évacuation suite à la crue du torrent Durnand (juillet 2006)	42
<i>Discussion (4) – Gestion de la crise torrentielle du Durnand de juillet 2006</i>	<b>49</b>
2.3.4 Landslide monitoring in Piemonte	51



<b>3.</b>	<b>TELESURVEILLANCE DES SITES INSTABLES : STRUCTURE DES SYSTEMES DE TELESURVEILLANCE ET SEUILS D'ALARME</b>	<b>57</b>
3.1.	Présentation des résultats du projet et questions soulevées	57
	<i>Discussion (5) – Télésurveillance</i>	63
3.2.	Aide à la décision :	65
	3.2.1. Gestion de la Surveillance des sites Rocheux : logiciel Panorama. Application au site des Ruines de Séchilienne	65
	<i>Discussion (6) – Télésurveillance du site de Séchilienne</i>	71
	3.2.2. Prévion et gestion des crues en Valais : le projet MINERVE	72
	<i>Discussion (7) – Télésurveillance des bassins versants</i>	79
3.3.	Seuils d'alarme :	80
	3.3.1. Eboulement de Meidji (commune de Saint-Nicolas, Valais) : surveillance géodesique et détermination des seuils d'alerte	80
	3.3.2. Displacement and rainfall threshold values for large landslide forecast in real time: the example of the "Becca di Nona" Landslide (Aosta)	88
	<i>Discussion (8) – Prédiction et modèles déterministes</i>	98
3.4.	Le système de prévision du risque hydrogéologique-hydraulique à l'échelle régionale	99
	<i>Discussion (9) – Prévion à l'échelle régionale + surveillance du site de Meidji</i>	108
<b>4.</b>	<b>RISQUES HYDROGEOLOGIQUES ET CHANGEMENT CLIMATIQUE</b>	<b>109</b>
4.1.	Film : « Alerte au climat »	109
	<i>Discussion (10) – L'impact des changements climatiques sur les risques naturels en montagne</i>	113
<b>5.</b>	<b>OUVRAGES DE PROTECTION CONTRE LES RISQUES HYDROGEOLOGIQUES</b>	<b>118</b>
5.1.	Ouvrages de protection : perspectives d'innovation pour faire face à des contraintes d'emprise, de haute énergie et environnementales :	118
	5.1.1. Pratique habituelle en région de montagne	118
	5.1.2. Les filets à haute énergie	119
	<i>Discussion (11) – Filets pare-blocs CAN et Geobrug : perspectives</i>	127
5.2.	Ouvrages de protection contre les chutes de blocs, un concept nouveau : les Pare-blocs Structurellement Dissipants (PSD)	129
5.3.	Les ouvrages de protection en terre : innovations et re-ingenieries	141
5.4.	Débat sur les ouvrages de protection	155

<b>6.</b>	<b>UTILISATION DE TECHNOLOGIES INNOVANTES</b>	<b>161</b>
6.1.	Présentation des résultats du projet : the role of geomatics for territory monitoring	161
6.2.	Intervention d'experts extérieurs	174
6.2.1.	Caractérisation des déplacements de surface associés aux mouvements gravitaires par Télédétection - Bilan et Perspectives	174
6.2.2.	LIDAR DATAVAL: Application of advanced technology to assess glacial water resources and relative evolutionary dynamics	187
6.2.3.	3D modeling of geologic structures applied in rock fall hazard mitigation: the Trappistes case study, Valais, Switzerland	197
	<i>Discussion (12) – Technologies innovantes et surveillance des mouvements de terrain (1)</i>	<b>203</b>
6.3.	Présentation de l'utilisation de la couverture PS (Permanent Scatterers) pour la détection des glissements de terrain à l'échelle régionale	<b>207</b>
	<i>Discussion (13) – Technologies innovantes et surveillance des mouvements de terrain (2)</i>	<b>215</b>
<b>7.</b>	<b>DEBAT DE CONCLUSION : APPORT DU PROJET / OBJECTIFS INITIAUX</b>	<b>217</b>
<b>8.</b>	<b>VISITE AU SITE DE BOSMATTO (COMMUNE DE GRESSONEY-SAINT-JEAN)</b>	<b>222</b>
8.1.	Présentation du site de la visite de terrain du 26/10/06	222
8.2.	Visite des systèmes de surveillance du site de Bossmatto – Torrent du Letze	228
8.3.	Visite des ouvrages de protection	230
8.4.	Echanges en salle avec l'adjoint au Maire de Gressoney-St-Jean en présence de Monsieur Alberto CERISE	232
<b>9.</b>	<b>SYNTHESE ET CONCLUSION DE LA CONFERENCE FINALE</b>	<b>236</b>

## Introduction

La conférence internationale **RISKYDROGEO : « Risques hydrogéologiques en montagne – Parades et surveillance »** s'est tenue à Saint-Vincent (Vallée d'Aoste) les 24 et 25 octobre 2006. Elle a été suivie, le 26 octobre, par une visite sur le terrain des systèmes de surveillance et des ouvrages de protection du site de Bosmatto - torrent Letze (commune de Gressoney-Saint-Jean).

Cette conférence finale a marqué l'achèvement du **projet n° 179 INTERREG III A – ALCOTRA – RISKYDROGEO**, dont le rendu final est constitué par un DVD qui comporte les rapports de l'ensemble des travaux effectués, le rapport final du projet, ainsi que les présents actes de la conférence accompagnés de l'intégralité des présentations des intervenants (au format pdf).

---

# 1. Présentation et cadrage de la conférence

## 1.1. Programme, intervenants et participants

### 1.1.1. Programme de la conférence

Cette conférence était animée par Eric Leroi (URBATER).

#### Mardi 24 octobre :

##### 09h30 Accueil et enregistrement des participants

**10h00** **Bienvenue de Monsieur Alberto CERISE**, Assesseur au territoire, à l'environnement et ouvrages publics de la Région Autonome Vallée d'Aoste

**Présentation générale du projet**, des objectifs et du déroulement de la conférence  
**Monsieur Massimo PASQUALOTTO**, Directeur de la Protection du Territoire de la Région autonome Vallée d'Aoste

**Cadrage de la problématique de la surveillance et de la protection**  
**Monsieur Jean Marc VENGEON**, directeur du Pôle Grenoblois Risques Naturels (PGRN)

##### 10h30 Présentation multimédia du projet

##### 10h45 Approfondissement des ateliers transfrontaliers RiskYdrogéo :

- Présentation synthétique des 4 ateliers **Carine Peisser (PGRN)**
- Les différents modes de prise en compte des risques naturels dans l'aménagement du territoire d'une région à l'autre  
**Jean Daniel Rouiller (Géologue cantonal du Valais)**
- Echange d'expériences de gestion opérationnelle des risques hydrogéologiques par des responsables techniques internationaux et des élus locaux :
  - The warning and evacuation against sediment-related disasters - Realities and challenges in Japan  
**Takao Yamakoshi (PWRI Japon)**
  - Landslide monitoring and decision: Strategy and experiences of NGI **Farrokh Nadim (NGI, Norvège)**
  - Situation d'évacuation suite à la crue du torrent Durnand (juillet 2006)  
**Mr Dumas (maire de Martigny) & JD Rouiller (Canton du Valais)**
  - Landslide monitoring in Piemonte **Carlo Troisi (ARPA Piemonte)**

##### 13h00 Déjeuner

#### Mardi 24 octobre (suite) :

##### 14h30 Télésurveillance des sites instables : structure des systèmes de télésurveillance et seuils d'alarme

- Présentation des résultats du projet et questions soulevées **Pascal Ornstein (CREALP)**
- Aide à la décision :
  - Gestion de la Surveillance des sites Rocheux : logiciel Panorama. Application au site des Ruines de Séchilienne **Jean-Paul Duranthon (Cete Lyon)**
  - Valais : projet MINERVE prévision des crues exceptionnelles, régulation par barrages hydroélectriques  
**Dominique Bérod (Etat du Valais- service des routes et des cours d'eau)**

##### 16h00 Pause

- Seuils d'alarme :
  - Eboulement de Meidji (commune de Saint-Nicolas, Valais) : surveillance géodesique et détermination des seuils d'alerte **Eric Pointner (bureau Rovina)**

- Displacement and rainfall threshold values for large landslide forecast in real time: the example of the "Becca di Nona" Landslide (Aosta). **Andrea Tamburini (CESI)**
- Le système de prévision du risque hydrogéologique-hydraulique à l'échelle régionale **Sara Ratto (RAVA)**

18h00 FIN

**Mercredi 25 octobre :**

**09h00 Film : « Alerte au climat »**

09h30 Ouvrages de protection : perspectives d'innovation pour faire face à des contraintes d'emprise, de haute énergie et environnementales :

- Démarche de prise en compte validée par les projets Interreg II et III
  - Contraintes d'emprise dans la pente et d'énergie d'impact des blocs
  - Film Geobrug : filets haute énergie et perspectives d'innovation
- Jean Daniel Rouiller (Canton du Valais)**

10h30 Pause

- Les ouvrages de protection en terre : innovations et re-ingenieries **Philippe Gotteland (UJF - LIRIGM/3S)**
- Ouvrages de protection contre les chutes de blocs, un concept nouveau : les Pare-blocs Structurellement Dissipants (PSD) **Pascal Perrotin (Université de Savoie - ESIGEC)**

**Débat**

**Jean Daniel Rouiller & Eric Leroi**

12h30 Déjeuner

**14h00 Utilisation de technologies innovantes :**

- Présentation des résultats du projet : the role of geomatics for territory monitoring **Fulvio Rinaudo (Politecnico di Torino)**
- Intervention d'experts extérieurs :
  - Caractérisation des déplacements de surface associés aux mouvements gravitaires par Télédétection - Bilan et Perspectives **Christophe Delacourt (Université de Bretagne Occidentale)**
  - LIDARATAVAL: Application of advanced technology to assess glacial water resources and relative evolutionary dynamics **Fabrizio Diotri (Fondazione Montagna Sicura)**
  - 3D modeling of geologic structures applied in rock fall hazard mitigation: the Trappistes case study, Valais, Switzerland **Raphaël Mayoraz (Canton du Valais)**
  - Présentation de l'utilisation de la couverture PS (Permanent Scatterers) pour la détection des glissements de terrain à l'échelle régionale **Alessio Colombo (Arpa Piemonte)**

**15h30 Débat de conclusion : apport du projet / objectifs initiaux**

**Eric Leroi**

**17h00 Présentation du site de la visite de terrain du 26/10/06**

**Luca Pitet (RAVA)**

**Judi 26 octobre : Visite au site de Bosmatto (Gressoney-Saint-Jean)**

**8h30 Saint-Vincent - Gressoney St Jean : 1h de bus**

**9h30 Rdv à Gressoney St Jean**

- visite des systèmes de surveillance site Letze (1h de montée, 20' de descente)
- 11h30 visite des ouvrages de protection
- 13h lunch
- 14h -15 h Echanges en salle avec le Maire de Gressoney St Jean (1h)

**15 h retour Saint Vincent**

**16 h FIN**

### 1.1.2. Liste des intervenants

<b>Dominique BÉROD</b>	Canton du Valais- Service des routes et des cours d'eau
<b>Alberto CERISE</b>	Assesseur au territoire, à l'environnement et ouvrages publics de la Région Autonome Vallée d'Aoste
<b>Alessio COLOMBO</b>	ARPA Piemonte
<b>Christophe DELACOURT</b>	Université de Bretagne Occidentale
<b>Fabrizio DIOTRI</b>	Fondazione Montagna Sicura
<b>Mr Olivier DUMAS</b>	Maire de Martigny
<b>Jean-Paul DURANTHON</b>	CETE Lyon
<b>Philippe GOTTELAND</b>	Université J. Fourier (Grenoble) - LIRIGM/3S
<b>Eric LEROI</b>	Consultant risques naturels (URBATER)
<b>Raphaël MAYORAZ</b>	CREALP, Canton du Valais
<b>Farrokh NADIM</b>	NGI, Norvège
<b>Pascal ORNSTEIN</b>	CREALP, Canton du Valais
<b>Massimo PASQUALOTTO</b>	Directeur de la Protection du Territoire de la Région autonome Vallée d'Aoste
<b>Carine PEISSER</b>	Chargée de mission PGRN
<b>Pascal PERROTIN</b>	Université de Savoie – Polytech'Savoie
<b>Luca PITET</b>	RAVA
<b>Eric POINTER</b>	Bureau Rovina, Canton du Valais
<b>Sara RATTO</b>	RAVA
<b>Giacomo RE FIORENTIN</b>	ARPA Piemonte, Centre régional pour la recherche territoriale et géologique
<b>Fulvio RINAUDO</b>	Politecnico di Torino
<b>Jean-Daniel ROUILLER</b>	Géologue cantonal, Canton du Valais
<b>Andrea TAMBURINI</b>	CESI
<b>Jean Marc VENGEON</b>	Directeur du Pôle Grenoblois Risques Naturels (PGRN)
<b>Takao YAMAKOSHI</b>	PWRI Japon

### 1.1.3. Les participants

La conférence a rassemblé 86 participants, répartis comme suit :

	Rhône-Alpes PACA	Valais	Vallée d'Aoste Piémont	Experts invités	<b>Total</b>
Elus	0	1	2	0	<b>3</b>
Gestionnaires	4	2	16	0	<b>22</b>
Techniciens	11	2	16	2	<b>31</b>
Membres d'organismes de recherche	3	1	3	0	<b>7</b>
Membres bureaux d'étude privés	3	3	12	0	<b>18</b>
Autres (PGRN, Fondation MS)	3	0	2	0	<b>5</b>
<b>Total</b>	<b>24</b>	<b>9</b>	<b>51</b>	<b>2</b>	<b>86</b>

## 1.2. Allocution de bienvenue

*Alberto CERISE, Assesseur au territoire, à l'environnement et ouvrages publics de la Région Autonome Vallée d'Aoste*

La vie dans un territoire de montagne alpin et la gestion sociale, économique, urbanistique et touristique de ce territoire ne saurait faire abstraction des phénomènes naturels qui s'y développent et du contrôle des conditions de sécurité de la population. Atteindre ces objectifs se présente comme une mission particulièrement délicate sur un territoire de montagne tel que celui de la Vallée d'Aoste, qui est caractérisé par des dynamiques naturelles complexes, où se superposent les phénomènes géologiques et hydrogéologiques, mais aussi avalancheux et glaciaires. Les inévitables conséquences de ces phénomènes obligent la vallée à vivre avec les risques naturels inhérents à celle-ci.

C'est pourquoi les actions visant à développer la connaissance et le contrôle de ces phénomènes ont toujours revêtu une importance considérable et stratégique pour la vie sociale et économique des populations alpines. En dépit de la sensibilité de celles-ci pour ce type de problèmes, dans bien des cas l'évolution socio-culturelle de la population, comme celle des élus, a fait progressivement perdre la mémoire des risques susceptibles d'affecter le territoire. De temps à autres, ces souvenirs oubliés ou estompés se ravivent dramatiquement à l'occasion de grandes catastrophes. La dernière en date est celle du 15 octobre 2000, épisode pluvieux particulièrement intense qui a déclenché un grand nombre de glissements de terrains, coulées de boues et laves torrentielles dans toute la Vallée d'Aoste. Ce phénomène d'oubli démontre qu'une approche organique globale et permanente de la gestion des territoires alpins est absolument nécessaire.

Dans nos régions, les dynamiques naturelles dessinent des frontières différentes des limites politiques, en particulier les limites plaine – montagne. C'est ce qui a motivé depuis une vingtaine d'années la collaboration de régions partageant cette identité montagnarde, pour mettre en œuvre des actions visant au contrôle du territoire. Ces actions transfrontalières ont permis d'accumuler les expériences dans le cadre des programmes Interreg et de mettre en commun des connaissances et des savoir-faire. Dans ce contexte, les études menées au fil des ans par les techniciens des régions partenaires ont revêtu une importance particulière. Ces travaux se distinguent par leur haute valeur scientifique et ont abouti à la mise au point d'instruments de suivi basés sur les techniques de pointe de ce secteur. L'administration valdotaine a toujours considéré ces problèmes interrégionaux comme une occasion d'ouverture et de croissance dans l'optique de partager des expériences avec les régions limitrophes confrontées aux risques naturels.

C'est dans ce contexte que le projet Interreg IIIA RiskYdrogé : « *Risques hydrogéologiques en montagne : parades et surveillance* » (cf. § 1.3) a vu le jour fin 2003. Pour les années à venir, les partenaires du projet ont développé avec les autres partenaires des Alpes occidentales un projet stratégique nommé Risknat : « *Gestion sécurisée des territoires de montagne transfrontaliers* » abordant les différents aspects des risques naturels, qui a été présenté dans le cadre de la coopération européenne Objectif 3. Les régions impliquées sont : RAVA, Piémont, Valais, PACA et Rhône-Alpes. Les bases de cette nouvelle initiative seront bâties en partant notamment de l'expérience acquise dans le projet RiskYdrogeo au sujet de la collaboration pratique des différentes structures techniques qui gèrent les risques naturels dans nos régions.

Les résultats de ces études, comparaisons et expériences sont destinés à constituer un instrument utile en vue de la gestion opérationnelle du territoire, qui servira également de guide aux différents acteurs responsables de cette gestion, notamment au niveau politique. « *Les fruits de ces journées devront donc être saisis par les administrateurs* ».

### 1.3. Présentation générale du projet, des objectifs et du déroulement de la conférence

Massimo PASQUALOTTO, *Directeur de la Protection du Territoire de la Région autonome Vallée d'Aoste*

Les trois régions impliquées dans le projet Interreg IIIA RiskYdrogeo sont la région Rhône-Alpes, le canton du Valais et la Région Autonome de la Vallée d'Aoste. C'est la Direction de la Protection du territoire de RAVA, Assessorat du Territoire, de l'Environnement et des Ouvrages Publics qui assure le rôle de chef de file, avec comme partenaires le RTM (service de Restauration des Terrains de Montagne, délégation nationale – Grenoble) et le CETE de Lyon (Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement), et en collaboration avec le Pôle Grenoblois des Risques Naturels (PGRN), le Centre de Recherche pour l'Environnement Alpin de Sion (CREALP) et la Fondation Montagne Sûre (Courmayeur).

Le projet, commencé en octobre 2003, devait se terminer en juin 2006. Mais en août 2005, la Vallée d'Aoste a obtenu sa prolongation jusqu'en décembre 2006.

Le budget de projet prévoyait un total de 1 641 698 65 €, réparti comme suit :

- RTM :	195 800,00	€
- CETE :	283 100,00	€
- POLE GRENOBLOIS :	44 356,00	€
- VALLEE D'AOSTE :	883 181,65	€
- CREALP :	235 000,00	€

Le budget de l'extension s'élève à 563 330,00 € affecté à la Vallée d'Aoste. Il s'agit donc au total d'un budget véritablement important.

#### Rappel des objectifs du projet :

- Evaluer les méthodes d'analyse du sous-sol les plus répandues sur le marché ;
- Évaluer la possibilité de mettre en oeuvre des nouvelles instrumentations de sites instables, les tester et évaluer leur efficacité ;
- Tester et valider des systèmes de surveillance/gestion à distance des données avec déclenchement automatique d'alarme ;
- Confronter les procédures d'acquisition online des données hydrométéorologiques ainsi que les modalités de gestion technique des risques ;  
Sur la base d'un choix approprié des paramètres obtenus, déterminer au cas par cas les seuils d'alarme pour chaque phénomène ;
- Améliorer le rapport coûts - efficacité des ouvrages de protection ainsi que des systèmes de surveillance à distance.

#### Rappel des activités du projet :

- Groupe de pilotage mis en place selon les objectifs
- (1) Ateliers transfrontaliers
- (2) Instrumentation de sites pilotes
- (3) Evaluation des systèmes de télésurveillance
- (4) Méthodes et systèmes d'instrumentation
- (5) Catalogue des parades

Ces activités sont décrites plus précisément dans le *rapport final* (p. 2), distribué à tous les participants pendant la conférence.

À l'occasion de cette conférence de clôture du projet, la visite de terrain organisée le 26 septembre dans la vallée du Lys doit permettre aux participants d'appréhender le système de télésurveillance et d'instrumentation ainsi que les ouvrages de protection mis en place sur le



site du glissement de terrain de Bosmatto et du torrent du Letze, suite aux événements catastrophiques du 15 octobre 2000 (cf. § 8). Ce site a été choisi vu sa situation particulière et sa configuration complexe. Cette visite de terrain était également destinée aux participants d'un colloque tenu le 27 septembre à Saint-Vincent, sur le thème des ouvrages de protection hydraulique (« *Convegno sistemazioni idrauliche* ») et permettait ainsi de faire un trait d'union entre les deux manifestations.

M. Pasqualotto a remercié les experts et spécialistes étrangers, qui ont accepté de venir de loin pour proposer leur ouverture sur les problèmes abordés.

#### **1.4. Cadrage de la problématique de la surveillance et de la protection**

Jean-Marc VENGEON, *directeur du Pôle Grenoblois Risques Naturels (PGRN)*

Le directeur du Pôle Grenoblois d'études et de recherche pour la prévention des Risques Naturels (PGRN) remercie la Vallée d'Aoste de lui avoir confié l'organisation de cette conférence qu'elle accueille sur son territoire dont elle assure la logistique.

La collaboration entre les trois régions partenaires et les structures techniques (Fondation Montagne Sûre, PGRN, CREALP) s'est développée au fil de nombreux projets, et est amenée à se poursuivre dans le futur : elle se prépare à assurer ainsi la même fonction dans la programmation à venir. L'expérience déjà acquise en la matière est un gage de confiance et d'efficacité.

Le Pôle Grenoblois est intervenu dans la conception du contenu et le cadrage des présentations et des débats. Outre la présentation des résultats du projet RiskYdrogé (objet de la conférence de clôture de ce projet Interreg), cette conférence finale a également pour objectif de confronter ces résultats et ces pratiques à d'autres pratiques et d'autres expériences au niveau international.

Concernant le thème « surveillance et protection », même à travers des présentations techniques sur les matériels et les méthodes utilisés, ce sont les aspects pratiques et opérationnels qui sont mis en avant dans une optique de gestion des risques, et non pas les aspects scientifique ou technique forcément sous-jacents (qui ont par ailleurs été traités dans d'autres projets parallèles tels que Rockslidetec). Par exemple, les différents types de parades contre les risques naturels sont donc plutôt abordés sous l'angle du choix des méthodes de mise en œuvre et des coûts d'investissement et d'entretien, en appui aux gestionnaires et décideurs.

Pour préparer et animer ces 2 journées, le Pôle Grenoblois a décidé de faire appel à Eric Leroi (comme pour le projet Rockslidetec l'année précédente), consultant « risques naturels » doté d'une grande expérience des éléments innovateurs de la recherche et de leur mise en œuvre dans le domaine des risques naturels.

J.-M. Vengeon précise que les actes de la conférence rédigés avec l'aide des enregistrements audio des présentations, discussions et débats seraient incorporés au DVD final constituant le rendu final du projet, qui sera adressé à l'ensemble des intervenants invités à cette conférence. En outre, au-delà de ce programme Interreg, ces actes seront également disponibles sur les sites Internet des secrétariats techniques : PGRN (<http://www.risknat.org>), Fondation Montagne Sûre (<http://www.fondms.org>) et CREALP (<http://www.crealp.ch>). On assiste donc à la mise en place d'une plateforme de coopération pérenne entre ces régions des Alpes, dans le but de faire vivre et de valoriser les résultats de ces projets en commun dans la durée.

### **1.5. Intervention d'Eric Leroi et présentation multimédia du projet**

Parmi les personnes présentes à la conférence, Eric Leroi a distingué :

- les nombreux intervenants - techniciens - qui ont participé au projet et sont venus présenter leurs résultats,
- les intervenants venus faire partager leur expérience au niveau international : au Japon (cf. T. Yamakoshi, § 2.3.1) et en Norvège (cf. N. Nadim, § 2.3.2),
- les autres participants présents dans la salle, auxquels E. Leroi a demandé une participation active pour animer les débats.

Une *présentation multimédia* du projet RiskYdrogéó était ensuite destinée à en retracer le contexte, les objectifs et le travail réalisé.

## 2 Approfondissement des ateliers transfrontaliers RiskYdrogé

### 2.1 Présentation synthétique des 4 ateliers

Carine PEISSER (PGRN)

Une des cinq activités du projet RiskYdrogeo a été l'organisation de 4 ateliers transfrontaliers, présentés ici très brièvement. Les résultats complets de cette activité sont disponibles dans le Guide Pratique (*Activité 1*), qui regroupe une synthèse détaillée de chacun des ateliers ainsi que des conclusions mettant en avant les confrontations d'expérience.

L'objectif de cette initiative était de rassembler les acteurs concernés par les risques hydro-géologiques pour leur faire découvrir les problématiques et les pratiques de chacune des trois régions, à travers des **exemples locaux**.

L'intérêt de ce type de rencontre est double : d'une part découvrir une grande variété de cas d'instabilité de terrain dans les régions voisines, d'autre part et surtout pouvoir confronter des expériences avec des collègues transfrontaliers confrontés à des problèmes similaires.

Les différents thèmes abordés peuvent être regroupés en trois intitulés :

- La caractérisation du risque (faible part des interventions) ;
- Les problématiques de suivi / Surveillance / Télésurveillance des sites instables ;
- La question plus générale de la gestion du risque / gestion du territoire.

L'objectif affiché est de **répondre aux besoins des gestionnaires**, c'est-à-dire que le point de vue adopté n'est pas fondamentalement scientifique mais plutôt opérationnel.

Le calendrier a été le suivant :

- **Atelier 1 Sion** (Valais, CH). 5-7 mai 2004.
- **Atelier 2 La Mure** (Isère, F). 13-15 octobre 2004
- **Atelier 3 Albertville** (Savoie, F). 7-9 juin 2005
- **Atelier 4 Aoste** (Vallée d'Aoste, I). 13-15 septembre 2005



Localisation géographique des 4 ateliers, répartis dans les trois régions partenaires : Rhône-Alpes, Valais, Région Autonome Vallée d'Aoste

Le principe d'organisation de ces ateliers, validé au fur et à mesure du projet, a été d'inviter des participants représentant des organismes d'Etat, des universités / hautes écoles ainsi que des bureaux d'étude des trois régions, avec pour certains ateliers des interventions d'élus locaux. La durée a été fixée à 2 jours ½, au cours desquels se sont alternées des présentations en salle et des visites de terrain.

**Atelier 1 Sion (Valais, CH). 5-7 mai 2004.** *Exemples de dangers naturels en milieu alpin : problématiques, mesures d'investigation et de gestion.*

Ce premier atelier a regroupé 54 participants. Les présentations ont concerné 7 sites d'instabilités rocheuses, glissements de terrain et dangers hydrologiques, parmi lesquels 3 ont été visités. Ce sont essentiellement des analyses a posteriori qui ont été présentées, dans un objectif d'amélioration des études prospectives.

**Atelier 2 La Mure (Isère, F). 13-15 octobre 2004.** *Les risques liés aux glissements de terrain dans le secteur Trièves-Beaumont.* (47 participants)

Ce second atelier a été centré sur les glissements de terrain, le secteur (au sud de Grenoble) ayant une géologie particulièrement favorable à ce type de phénomène (argiles litées) : 6 sites ont été présentés et 3 visités (photos). Une des thématiques fortes a été celle de l'aménagement du territoire ; des discussions riches autour des notions de constructibilité et d'expropriation ont eu lieu, notamment avec des élus locaux en mairie.



**Atelier 3 Albertville (Savoie, F). 7-9 juin 2005.** *Exemples de risques hydro-géologiques affectant les infrastructures linéaires de la Savoie : problématique, surveillance, sécurité des usagers et protection.* (50 participants)

Les problèmes sur les 8 sites présentés (3 visités) sont surtout liés aux risques rocheux le long de réseaux routiers et ferrés à forts enjeux : deux des axes routiers de la Savoie sont des dessertes de grandes stations de ski, avec des pressions touristiques très fortes en hiver, et la vallée de la Maurienne donne accès à l'Italie par le tunnel du Fréjus, avec un intense trafic de fret.

Les grandes problématiques abordées ont concerné :



- Les parades / ouvrages de protection, avec notamment la visite de la galerie pare-bloc structurellement dissipante des Essariaux (Val d'Arly, voir § 5.2 p. 129, photo ci-dessous) ;



- La gestion de crise et la gestion plus quotidienne du trafic routier et ferré (notions de sécurité des usagers), avec en particulier la visite du centre opérationnel de gestion du trafic routier OSIRIS ;

**Atelier 4 Aoste (Vallée d'Aoste, I). 13-15 septembre 2005. Surveillance et gestion du territoire en Vallée d'Aoste.** (52 participants, 6 sites présentés,

Les 6 sites présentés (3 visités) sont tous en rapport avec l'épisode alluvial d'octobre 2000 : plusieurs jours de précipitations très intenses (jusqu'à 600mm / 4j) ont activé ou réactivé de nombreux phénomènes hydro-géologiques, ce qui a déclenché une réflexion générale sur la prise en compte des risques dans la Vallée d'Aoste.

Les thématiques ont été ciblées sur la télé-surveillance (visite du site de Becca di Nona, ci-contre), avec notamment la problématique de la gestion des alarmes (visite du centre opérationnel d'Eydenet) et en particulier de l'établissement des seuils d'alerte.



D'autres part certaines technologies innovantes ont été présentées, par exemple l'interférométrie radar terrestre sur le site de Citrin (voir aussi § 6.1 p. 161)

## Conclusions

Ces ateliers ont offert un panorama assez exhaustif des pratiques transfrontalières pour traiter les risques hydro-géologiques.

Une grande richesse d'échanges est apparue lors des discussions grâce aux origines géographiques et professionnelles variées des intervenants et des participants.

Ces échanges d'expériences ont mis en évidence certains points communs à toutes les pratiques locales :

- La (télé)surveillance : tous les partenaires ont développé des systèmes opérationnels qui, s'ils sont différents les uns des autres, remplissent les mêmes objectifs mais également rencontrent des difficultés identiques, par exemple sur l'établissement des seuils d'alerte (voir § 3 de ces actes p. 57) ;
- Les parades : il existe des méthodologies communes en matière de choix, d'implantation, de dimensionnement des ouvrages de protection ainsi que des questions émergentes récurrentes, liées par exemple aux capacités d'absorption d'énergie (ouvrages haute capacité, voir § 5 p. 109).

Par contre, d'autres points sont sensiblement plus divergents d'une région à l'autre :

- Gestion de crise : la façon de traiter le problème de la survenance d'un phénomène hydro-géologique diffère chez les partenaires ;
- Aménagement du territoire (règles d'urbanisme, expropriations...) : le contexte à la fois géographique, historique et culturel, en lien avec le cadre législatif de chaque région amène à des pratiques différentes (§ 2.2 p. 16).

Enfin, il paraît indéniable que ces ateliers ont constitué l'un des points forts du projet Riskydrogeo, qui sert d'articulation à tous les éléments développés par la suite. **Ce mode de collaboration est donc à privilégier absolument à l'avenir.**

## 2.2 Les modes de prise en compte des risques naturels dans l'aménagement du territoire selon les régions

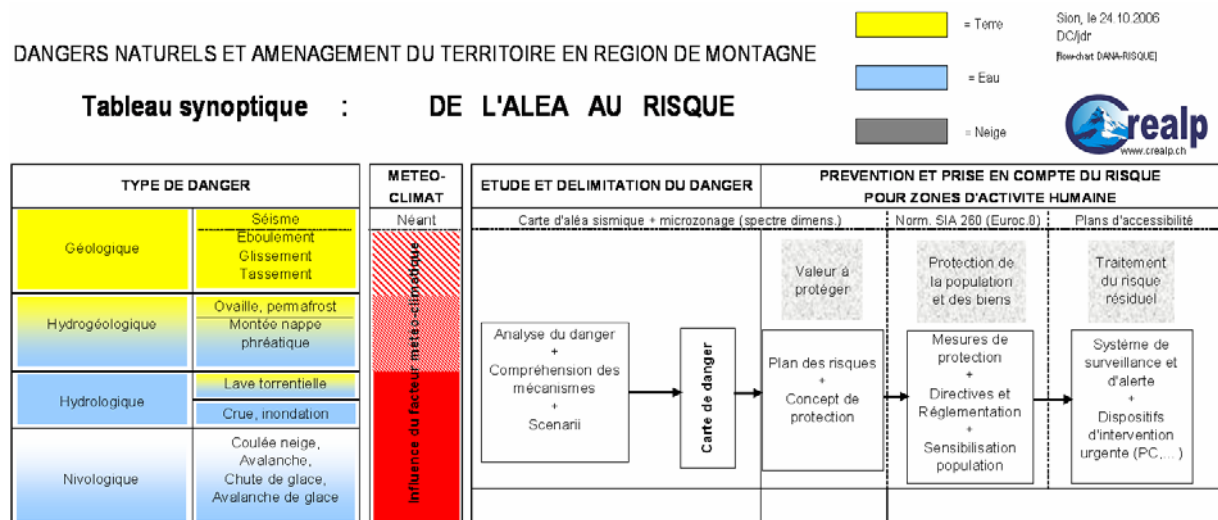
Jean Daniel ROUILLER (géologue cantonal, Valais)

J.-D. Rouiller abordait la problématique de la comparaison des procédures en matière de prise en compte des risques naturels, en commençant par évoquer l'exemple du canton du Valais avant de décrire la confrontation, réalisée dans le cadre du projet, des procédures en France, Italie et Suisse, pour en faire ressortir les spécificités.

### Notions de base

A partir du tableau ci-dessous on distingue notamment les dangers :

- géologiques à proprement parlé : éboulement, glissement de terrain, tassement, etc. ;
- hydrogéolo-logiques - selon la définition spécifique *idrogeologico* adoptée par le projet RiskYdrogé – qui sont en général engendrés par de fortes précipitations qui s'étalent sur plusieurs jours et saturent la partie superficielle du sol jusqu'à sa solifluxion : ovaïlle de Gondo (octobre 2000), glissements superficiels catastrophiques qui se sont produits au même moment dans la Vallée d'Aoste et phénomènes de mobilisation en été, toujours sous l'effet de fortes précipitations, de la partie superficielle des sols gelés d'altitude (permafrost) au moment où ils sont partiellement dégelés ;
- hydrologiques qui désignent les débordements à partir du réseau hydrographique (torrents et rivières en crue) : inondations et laves torrentielles.



Le tableau ci-dessus insiste notamment sur l'influence des conditions météo-climatiques sur le phénomène : réaction quasi immédiate (rouge) à la surface du sol (inondations, avalanches) et « effet retard » relatif en fonction de la rapidité de pénétration de l'eau dans le sous-sol, selon le principe que « *contrairement aux phénomènes de surface, il faut des siècles voire des milliers d'années d'activité souterraine de l'eau météorique pour activer des mouvements de masse tels les éboulements de Val Pola (1987) ou Randa (1991)...* ».

### Notions de danger et de risque

La compréhension des mécanismes d'activation et déclenchement ainsi que la modélisation des scénarii d'événement sont incontournables pour établir les cartes de danger et prendre correctement en compte le risque qui en découle. « *Tant que l'ensemble des cartes de danger ne sera pas homologué, il est préférable de parler de plan de risque plutôt que de carte de*

*risque. En effet, aussi longtemps que l'autorité continuera à gérer la constructibilité d'une zone à bâtir préexistante à la reconnaissance du danger, la notion de sa protection en fonction de sa valeur ne pourra pas être traitée spatialement mais seulement objet par objet. En matière d'aménagement du territoire, une carte de risque au sens strict du terme délimiterait par exemple une zone à bâtir exposée à un danger et pour la prise en compte duquel une mesure administrative de **réduction de l'indice de densité** (constructibilité) serait décidée pour contribuer à y diminuer le risque en complément ou non de mesures de protection constructives ou autres». D'ailleurs la législation suisse en vigueur ne parle pas de carte de risque mais prévoit que les périmètres de danger soient reportés à titre indicatif sur le plan de zones à homologuer par l'autorité cantonale. Lorsqu'il y a conflit entre la carte de danger et une zone d'activité humaine, les conditions de constructibilité sont déterminées au moyen d'un article spécifique du règlement communal.*

Relevons encore que le risque résiduel – se rapportant au scénario exceptionnel contre lequel on ne peut souvent pas se protéger pour des raisons économiques - est pris en compte par des systèmes de surveillance/alerte/alarme et des plans d'intervention pré-établis destinés à engager des moyens de protection complémentaires au moment de l'événement. Par exemple en cas de crue annoncée : mobilisation anticipée d'engins de déblaiement aux points névralgiques, pré-vidange partielle de barrages, etc. Le Valais a récemment mis au point un système expert de gestion des crues appelé MINERVE qui a l'originalité d'intégrer la contribution des aménagements hydroélectriques pour notamment écrêter la crue exceptionnelle.

## Les événements les plus fréquents

En Valais comme dans l'ensemble de l'arc alpin, en plus des pierres récoltées quotidiennement sur les 2500 km de réseau routier par les cantonniers, le géologue cantonal intervient une quinzaine de fois par an pour préavisier des situations de danger dues pour la plupart à des chutes de pierres et éboulements, plus rarement à des glissements de terrain. Les situations ci-après montrent un échantillon des cas types :

- la chute d'une pierre isolée (2002) qui a transpercé le toit d'une voiture tuant la passagère. Cette pierre discoïde (0,3 cm de diamètre), provenant d'un éboulis a été probablement mobilisée par le passage de gibier. Une telle trajectoire est due à un effet « tremplin » de la topographie qui génère une chute à la verticale.



- la chute d'un bloc sur un chalet (2004), heureusement sans victime. Le bloc, visible dans le pré, est rentré par le toit et est ressorti par l'avant du chalet.



- la chute d'un bloc de 100 m<sup>3</sup> (2006) avec arrêt à 2 m d'un chalet : grâce à l'état de fonte saisonnière la vitesse du bloc a été fortement ralentie.



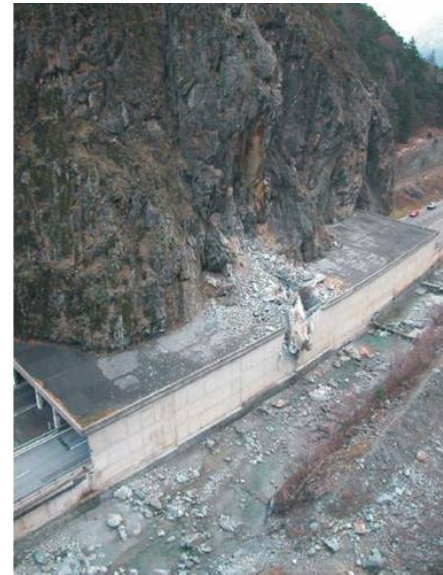




- Eboulement sur la route du Simplon (1999)

- détachement d'un compartiment rocheux de 600 m<sup>3</sup> (2003) et basculement sur une galerie de la route du Gd-St-Bernard, avec écrasement d'une voiture.

- Parmi les phénomènes plus rares citons celui d'un glissement superficiel (13 victimes) qui - lors des intempéries qui ont touché le sud des Alpes en automne 2000 - a coupé en deux le village frontière (I – CH) de Gondo que traverse l'axe routier du Simplon.

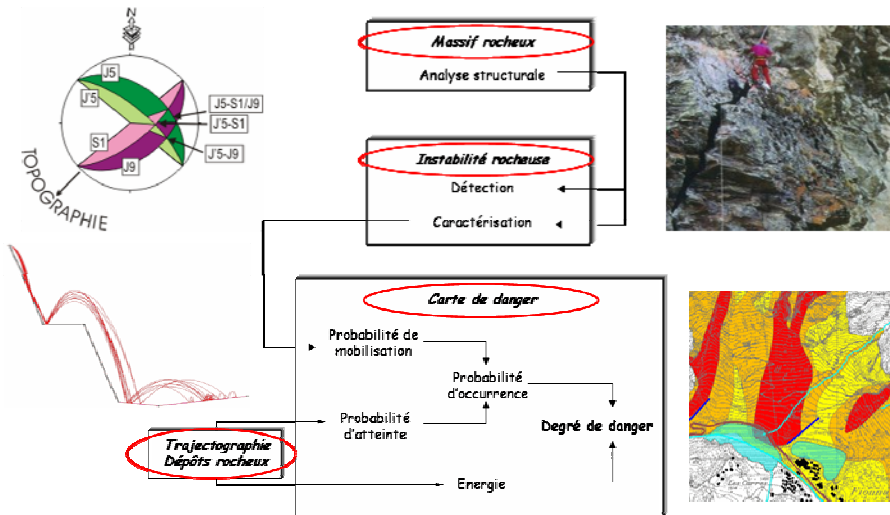


La falaise haute de 1000 m qui domine le village a été de tout temps une source de chutes de pierres. Ce dernier est d'ailleurs protégé depuis les années quatre-vingt-dix par un piège à blocs surmonté d'un mur en béton. Sous l'effet des précipitations l'éboulis de pied de la falaise sur lequel est bâti le village, a soliflué et 10'000 m<sup>3</sup> de matériau s'est accumulé dans ledit piège à bloc jusqu'à ce qu'une rupture explosive s'ensuive. Les maisons ont été rasées par deux des trois éléments de quelque 500 tonnes (flèches noires) arrachés au mur de béton qui ont carrément surfé la coulée à une vitesse de plus de 50 km/h. « On se trouve ici dans un cas de figure où la présence d'une mesure de protection contre un type de danger reconnu (chute de pierres) a, par effet barrage, transformé en catastrophe les conséquences d'un glissement superficiel dû à un événement météorologique d'une ampleur jamais rencontrée au Simplon (800mm/5j.). En effet, sans le piège à blocs, les bouffées de la coulée se seraient répandues successivement entre les maisons au pire en pénétrant dans certaines par les ouvertures amont, mais en tous cas sans victime ».

Du fait de sa haute fréquence d'occurrence le danger de chute de pierres est celui auquel sont le plus couramment exposées les vallées alpines. Il affecte l'ensemble des zones d'activité humaine, avec une prédilection particulière pour les voies de communication, en raison leur position linéaire dans un versant.

## Le danger généré par les instabilités rocheuses - établissement la carte de danger (F : d'aléas) et validité selon les régions

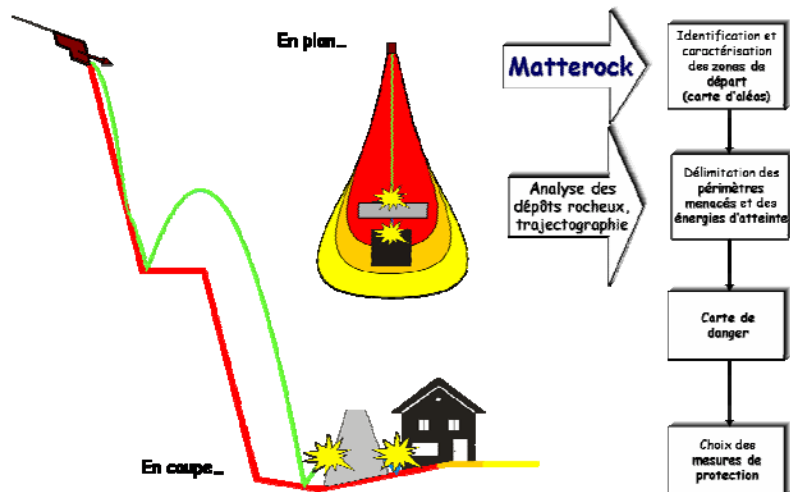
Pour mémoire, la démarche générale des praticiens - avec des méthodes quelque peu divergentes mais « au départ et à l'arrivée, c'est du même » - commence par une analyse structurale de la falaise rocheuse (tri des familles de discontinuités) afin d'établir son agencement structural. L'utilisation du stéréogramme Schmidt-Lambert (hémisphère sup.) et du flow chart ci-dessous permettent de détecter les instabilités (Vs: aléas), de qualifier leur probabilité de mobilisation (Vs: dangerosité) et d'établir la carte de danger au moyen de modèles monobloc de trajectographie.



Sans rentrer dans les détails rappelons que le croisement des probabilités de mobilisation et d'atteinte permet d'obtenir la **probabilité d'occurrence** et d'évaluer ainsi les **degrés de danger** (rouge, bleu, jaune). La couleur orange de la carte ci-contre est remplacée aujourd'hui le bleu. En France on n'utilise que le rouge et le bleu. La probabilité de mobilisation

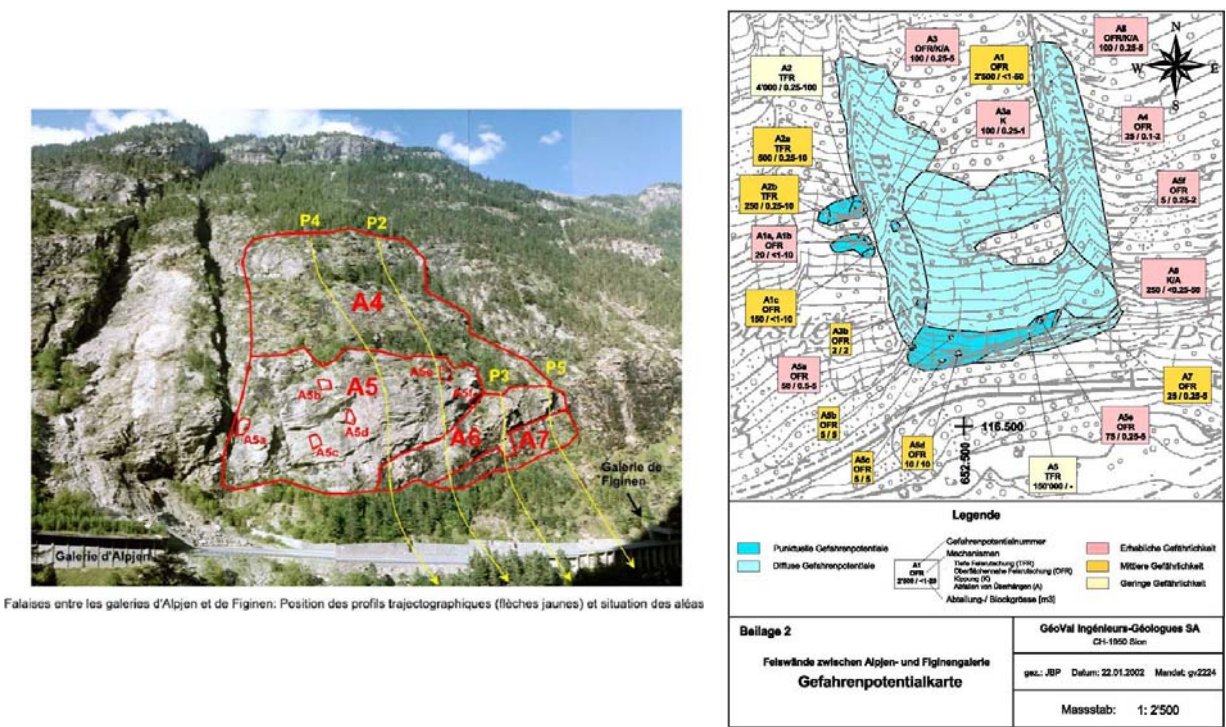
appelée aussi dangerosité de l'aléa (instabilité reconnue et délimitée) s'obtient par une pondération toute qualitative des propriétés structurales et géomécaniques de la roche, ces dernières étant très sensibles à l'état de dégradation de la roche.

En d'autres termes, en matière de chute de pierres, les étapes de prise en compte du danger se résument à (1) identifier et caractériser la zone de départ puis à (2) calculer la distance parcourue par le bloc de dimensionnement et son énergie d'impact sur l'objet menacé, comme le montrent le plan et la coupe de la figure ci-contre.



Ci-après est donné un exemple de report sur photo et sur carte des différents aléas (instabilités identifiées et caractérisées) dans une falaise et le positionnement des profils de trajectographie qui ont permis de dimensionner les ouvrages de protection, en l'occurrence des filets, disposés ensuite à l'amont de la route.





Exemple de carte d'aléas (au sens valaisan du terme)

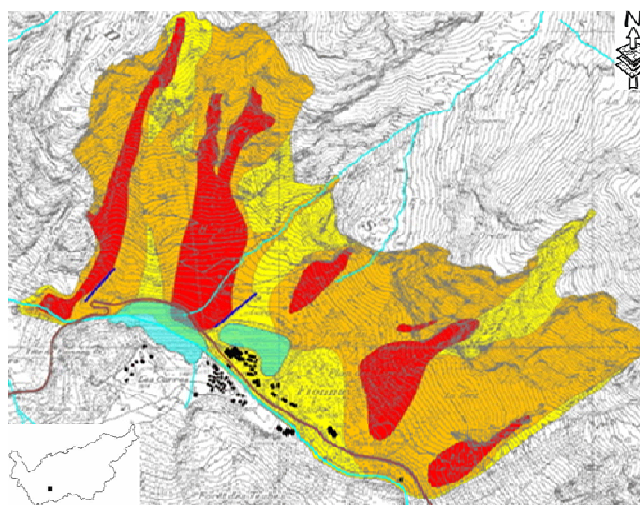
Pour établir la *carte de danger* (Vallée d’Aoste et Valais) ou *carte d’aléa* (France), des spécificités nationales voire régionales apparaissent également au niveau des procédures :

- **Vallée d’Aoste et Valais** : la carte est établie par un bureau privé sur mandat communal et validée par la Région ou le Canton. La responsabilité de la prise en compte et de la gestion des dangers naturels incombe à la Commune. Dès l’instant où une carte est validée par l’échelon supérieur, ce dernier prend de facto une part de responsabilité;
- **Rhône-Alpes** : idem mais validée par l’Etat s’il a prescrit un PPR.

La figure ci-après – dans laquelle la couleur orange est assimilée aujourd’hui au bleu – fait le lien entre la carte de danger et la réglementation qui s’y rapporte en Valais.

- Danger élevé**  
Zone non-constructible. Exceptionnellement, une expertise permettra de fixer les nouvelles conditions de constructibilité en cas d’amélioration naturelle ou artificielle de la situation de danger;
- Danger moyen**  
Zone constructible sur la base d’une expertise qui fixe le dimensionnement des mesures de protection;
- Danger faible**  
Zone constructible. Des mesures de protection individuelles doivent néanmoins être proposées;

**La carte de danger et le règlement de construction communal permettent un aménager du territoire sécurisé**



Définition des zones de dangers prise en compte

## (1) Le zonage

Concernant le **zonage**, « *il est plus ou moins admis* » que les zones de danger élevé (rouge) inconstructibles doivent être appréhendées avec une étude globale. Dans une zone où un glissement de terrain serait définitivement stabilisé, elle pourrait notamment permettre de rendre caduque l'interdiction de construire. Mais il faut reconnaître que cette possibilité reste relativement rare.

Par exemple, dans les secteurs exposés aux chutes de pierres, le zonage comportera en fonction des résultats des études de trajectographie :

- des **zones rouges** où l'énergie d'impact des blocs est trop élevée et qui sont par conséquent inconstructibles (sauf cas d'espèce) ;
- des **zones bleues**, soumises à moindre énergie, constructibles sous condition par exemple de mise en place d'écrans de protection collectifs doublés souvent avec des mesures individuelles sur les bâtiments eux-mêmes. Dans ce dernier cas, le dimensionnement de l'immeuble à construire ou rénover fait l'objet d'une expertise obligatoire. En effet, compte tenu des irrégularités du terrain, les trajectographies à la base du zonage déterminé par la carte de danger conserve une valeur toute relative qu'il y a lieu de préciser pour chaque objet soumis à autorisation de construire ;
- des **zones jaunes**, soumises à encore moindre énergie, constructibles sous condition par exemple de mise en place de mesures de protection individuelles et/ou d'aménagements à l'intérieur des immeubles (séjour et chambres côté vallée ; cuisine et salle d'eau côté montagne). « *Ce sont des mesures simples et peu coûteuses ; l'expérience a démontré leur efficacité* ».

En général les mesures de protection collectives sont subventionnées mais pas les individuelles.

La comparaison des terminologies et des procédures entre les trois régions partenaires (cf. p. 16-17 du **rapport final**) a mis en évidence des différences dans la définition des degrés de danger et de constructibilité. En région Rhône-Alpes, ces dispositions sont d'une manière générale admises sauf que la zone jaune en tant que telle n'existe pas. Il y a lieu aussi de relever qu'en Suisse pour traiter les zones inondables on utilise une 4<sup>ème</sup> couleur, le « pyjama jaune-blanc » pour prendre en compte le danger d'inondation exceptionnelle.

## (2) Prise en compte des mesures de protection

Alors qu'en Vallée d'Aoste et Valais on autorise la construction dans les secteurs protégés par des mesures collectives, ce n'est pas le cas en Rhône-Alpes. Les mesures de protection y sont peu prises en compte car jugées de caractère non définitif : on part du principe que l'entretien de ouvrages (filets détruits, merlons remplis, etc.) peut être lacunaire voire oublié. On aura donc tendance à ne pas laisser construire même si l'on érige des mesures de protection collectives. Il faut souligner qu'en Valais, la diminution du risque due à l'édification d'un écran de protection n'est pas traduite par un changement de couleur au niveau de la carte de danger. Par souci de mémoire, notamment pour que l'entretien des ouvrages de protection ne soit pas oublié, on conserve immuablement la couleur du danger originel.

## (3) Procédure de validation et d'homologation de la carte de danger

Cette procédure diverge quelque peu d'une région à l'autre :

- **Rhône-Alpes** : validation par concertation Etat-Commune; mise à l'enquête publique → la carte de danger devient servitude d'utilité publique (à moins que le danger ne disparaisse définitivement).
- **Vallée d'Aoste** : validation par la Région; homologation par concertation Région-Commune.
- **Valais** : validation par le Canton; mise à l'enquête publique (depuis 2006) et report à titre indicatif sur le Plan d'Aménagement des Zones (PAZ) communal lors de la procédure d'homologation cantonale.

#### Révision de la carte de danger

- **Tous** : possible sur la base d'une étude globale démontrant que le danger a diminué ou disparu, mais cela relance toute la procédure de *validation – mise à l'enquête – homologation* (durée : quelques années...).
- **Rhône-Alpes** : révision totale de tout le PPR.

#### Règlementation à l'intérieur des périmètres de danger

- **Rhône-Alpes** : PPR annexé au plan local d'urbanisme avec valeur de servitude publique (lorsque l'Etat estime que c'est nécessaire).
- **RAVA** : fait partie du plan d'urbanisme communal.
- **Valais** : carte de danger couplée à un article spécifique du Règlement Communal des Constructions et des Zones (RCCZ) qui précise les exigences de constructibilité selon les trois degrés de danger. Bien qu'à l'intérieur de la zone à bâtir l'autorisation de construire soit de compétence communale, le dossier de requête nécessite cependant l'approbation du canton pour tout ce qui touche aux dangers naturels, protection incendie, environnement, etc.

#### **(4) Responsabilité juridique en matière de danger naturel**

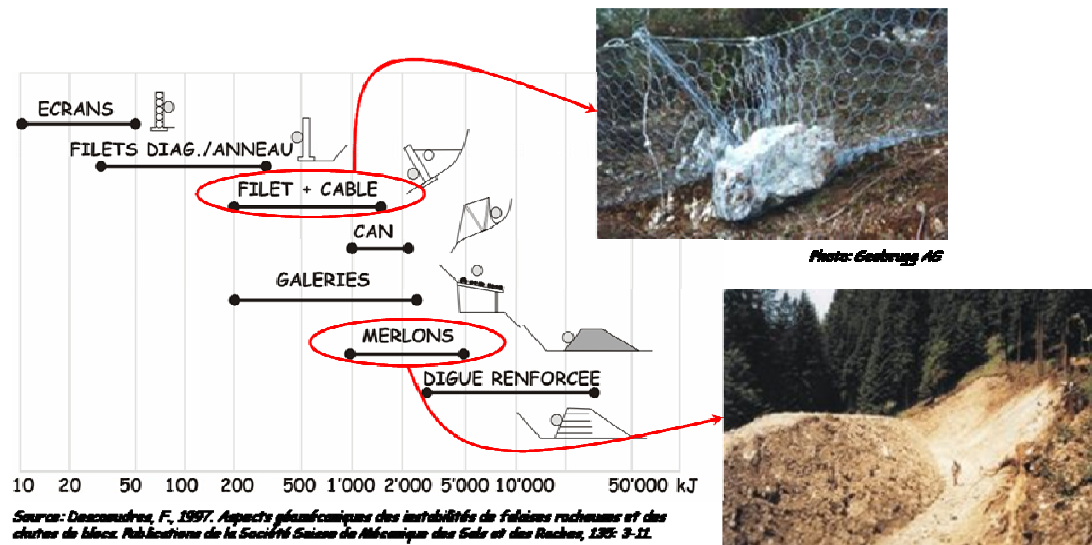
En Suisse cette responsabilité est répartie comme suit :

- La sécurité des biens et des personnes incombe à la **Commune**.
- Le **Canton** et la **Confédération** régissent les procédures de prise en compte du danger par le biais des recommandations, normes et subventions.
- Le **Canton** procède à l'établissement des études de base et des inventaires des sites à risque.
- La **Commune** établit les cartes de danger et prend les mesures de protection nécessaires avec l'appui des spécialistes cantonaux et les subventions cantonales et fédérales.
- Le **Propriétaire** peut apporter la preuve qu'il n'y a pas de danger (art. 31LcAT).

#### **Ouvrages de protection pare-pierres**

Pour mémoire, il est utile de rappeler ici les capacités d'absorption d'énergie des ouvrages construits dans l'arc alpin pour la protection contre les chutes de pierres et blocs. Bien que datant d'une dizaine d'années le tableau ci-après est toujours d'actualité, à l'exception des filets CAN pour lesquels une société suisse a récemment testé avec succès une capacité d'absorption de 5000 kJ.

**Les ouvrages de protection sont dimensionnés au moyen d'une étude trajectographique. La connaissance de l'énergie des blocs et de leur hauteur de vol à l'endroit de l'objet à protéger permet de déterminer le type d'ouvrage le mieux adapté:**



#### **Discussion (1) – Prise en compte des risques naturels dans l'aménagement**

**E. Leroi (URBATER) :** « Beaucoup de choses qui ont été dites posent des questions, ce qui permet d'engager le débat. Beaucoup de personnes présentes dans la salle font partie des services administratifs notamment, donc ils connaissent bien toutes ces procédures. Y a-t-il des questions ou des réactions ? »

**J.-M. Vengeon (PGRN) :** « Juste une précision côté français : ce qui a été présenté correspond juste au cas où le Plan de Prévention des Risques (PPR) est prescrit par l'Etat et donc, s'impose à la commune, qui est alors en charge de le réaliser. C'est donc un cadre à la fois complet et contraignant pour les communes.

Il existe aussi la possibilité pour les communes, lorsque l'Etat ne prescrit pas de PPR, de décider par elles-mêmes qu'elles ont besoin d'une carte de dangers, et de la faire de leur propre initiative. Cette carte est « contrôlée » ou validée par les services de l'Etat et les communes décident ensuite de l'utilisation qu'elles en font, si elles l'annexent ou pas au Plan Local d'Urbanisme (PLU). Le code de l'urbanisme permet à la commune d'appuyer des décisions avec cette carte de dangers, qui est une procédure un peu plus légère que le PPR ».

**J.-D. Rouiller :** « Ce qui ressort, notamment à travers le cas des expropriations, c'est qu'avec la loi Barnier (1995) en France, on va relativement vite vers l'expropriation par rapport au Val d'Aoste et au Valais, où c'est une démarche qui existe mais que l'on utilise pratiquement pas pour ce genre de cas : on essaie toujours de trouver une solution locale. Cela est certainement dû au fait que le pouvoir local y est assez important ; bien que l'accord de la Confédération soit nécessaire (subvention), celle-ci laisse la main au Canton pour ce genre de décision. L'exiguïté du territoire pousse à être moins tranchant que la France.

En cas de catastrophe naturelle avec victimes, si celles-ci sont indigènes les inculpations pour responsabilité de tiers sont rares. Le juge d'instruction évalue les responsabilités éventuellement engagées et inculpe ou non. « *La fatalité est encore admise comme cause d'accident de ce genre.* ». Mais de plus en plus de familles de victimes, surtout si elles ne sont pas montagnardes, se portent partie civile, ce qui peut obliger un juge à rouvrir un dossier dans lequel il n'y avait pas eu d'inculpation. Dans ce sens on a assisté récemment en Valais à la condamnation d'un maire et du spécialiste habilité à préavisier les décisions d'évacuation ou non. En matière d'avalanche, cette évolution a pour conséquence qu'on trouve moins facilement des observateurs de neige.



« *Quant au fameux principe de précaution, ce n'est pas au technicien de l'appliquer mais au politique (maire, préfet, etc.). L'observateur ou tout autre spécialiste en dangers naturels donne au politique un préavis sur la base de critères uniquement techniques. Libre au politique de suivre son préavis ou non et, s'il le juge utile de prendre une décision d'évacuation par mesure de précaution même si l'observateur lui donne un préavis optimiste. Actuellement, je constate que les techniciens invoquent de plus en plus ce principe de précaution. A mon avis, c'est une fausse route... » ».*

**E. Leroi :** « Dans les exemples de chute de pierres que tu a montrés tu as parlé d'une trajectoire mortelle « *aberrante* ». Je dirais que la nature n'a jamais de trajectoire aberrante, elle ne se trompe jamais. Ce qui est aberrant, c'est qu'on n'est peut-être pas en mesure de le comprendre, de le modéliser, de le prévoir. Mais la nature, elle, ne se trompe pas, donc il n'y a pas de trajectoire aberrante... La question qui va se poser est de savoir si l'on est en mesure de prévoir ce comportement à la fois sur le plan spatial et sur le plan temporel, puisque nous allons aborder le thème de la surveillance (cf. § 3, p. 57). Donc je crois qu'il ne faut pas se tromper, s'il y a une différence entre la nature et le modèle, c'est le modèle qui se trompe. Le problème, c'est bien d'être en mesure d'arriver à quelque chose qui puisse nous prémunir ».

**J.-D. Rouiller :** « Je l'ai appelée « *aberrante* », car elle est particulièrement exceptionnelle, dans le sens où dans la plupart des cas, une pierre ne tombe presque jamais seule et que l'on retrouve toujours son origine dans la pente. Dans ce cas je ne l'ai jamais trouvée... Il n'a pu arriver au centre du toit de la voiture que par une chute verticale. C'est un cas limite et c'est pourquoi j'ai appelé ça une « *trajectoire aberrante* » car dans ce cas, on ne peut rien faire (on ne peut qu'attendre la prochaine...). Par contre, dans 90% des cas, on trouve toujours la source et on peut la traiter ».

**E. Leroi :** « Mais tout le problème est de savoir si ce seuil de 90% est un risque acceptable, s'il faut aller jusqu'à 100% ou bien s'arrêter à 80%... La question n'est pas de savoir si c'est aberrant ou pas mais de savoir quel degré d'erreur on peut accepter dans la prévision par rapport à la réalité.

D'autre part, concernant les ouvrages de protection et du fait que l'on puisse construire derrière ces ouvrages, tu disais qu'en Suisse l'approche est plus « *pragmatique* » parce qu'on peut éventuellement modifier ou construire à l'abri des ouvrages de protection. Or l'exemple de Gondo montre qu'on n'est pas forcément à l'abri. Il ne s'agit pas forcément de la notion de pragmatisme mais plutôt d'une notion de responsabilité et aussi de différence de traitement qu'on peut avoir entre les approches Française et Suisse.

En France, on ne travaille pas avec les cartes d'aléas (ou carte de danger), mais réellement avec les cartes de risques, donc même si tu dis que « le risque n'existe pas », ces cartes existent et elles ont une traduction en terme de contraintes. Donc en Suisse, l'approche est différente, elle a sa logique, mais je ne pense pas que ce soit une question de « pragmatisme » mais plutôt une question de logique. Et tant que l'on reste sur des approches qualitatives, il est logique que l'on puisse avoir cette approche-là en France.

Pour pouvoir changer d'approche, il faudrait qu'on puisse avoir des approches quantitatives. Il y a des exemples récents, par exemple en Andorre où, dès lors qu'on adopte des approches quantitatives du risque, on est en mesure de modifier le zonage. Mais je crois qu'on n'en est pas encore là... ».

**Jean-Louis Durville (CETE Lyon) :** « Il est intéressant de voir qu'il y a des évolutions parallèles dans les 3 régions : la cartographie, la réglementation de la construction, avec le problème de la « *judiciarisation* » éventuelle, etc. Quand on parle de zone inconstructible, où est la limite de l'inconstructible ? On peut construire presque partout à condition d'y mettre les moyens techniques et financiers... Avez-vous pu comparer dans le projet ce qui se fait dans les 3 régions ? Sachant qu'en France ce n'est pas du tout comparable d'un endroit à l'autre, il serait intéressant de savoir si les seuils de constructibilité sont à peu près les mêmes ou sont sensiblement différents ».

**Jean-Pierre Requillart (RTM de l'Isère, Rhône-Alpes) :** « Je veux juste apporter un élément à partir d'une comparaison faite par le RTM sur des cas de glissements de terrain dans le Trièves (Isère), où en valeur de déplacement du glissement sur le long terme, il y a un rapport d'environ 1 à 10 entre la pratique qu'on a en Isère et celle du Valais : « *nous, on commence à s'affoler à partir de vitesses de déplacement de 1 mm/an, alors qu'eux, c'est à partir de plusieurs cm/an* ».

D'autre part, il y a une question que l'on se pose de plus en plus à propos des seuils de risque, notamment en matière de chutes de blocs : il y a plusieurs années, on raisonnait pour les seuils en considérant l'individu dans son habitation ; aujourd'hui on prend plus en compte les espaces de vie extérieurs. Donc ça change énormément la problématique du zonage ».

**E. Leroi :** « En ce qui concerne les zones jaunes, on voit apparaître de plus en plus en France des zones jaunes dans les PPR, de façon spécifique, y compris dans des zones d'aléa fort (rouge). Ce sont des zones dans lesquelles, notamment en milieu urbain, on a des enjeux très forts, et où l'Etat et la commune ne veulent pas bloquer complètement le développement. Par exemple, on voit apparaître des zones jaunes traitées notamment dans le cadre de Zones d'Aménagement Concerté (ZAC, qui offre la possibilité d'avoir un zonage particulier, par exemple à Montauban dans le cadre de réhabilitations par rapport à des problèmes d'inondations), parce qu'on est en mesure de mettre en place des réglementations spécifiques et de pouvoir les appliquer sur l'ensemble d'un territoire. On a donc une évolution de la réglementation pour essayer d'avoir quelque chose de pragmatique en terme de gestion des risques naturels ».

Question à J.-D. Rouiller : « *En regardant les différentes approches, il y a d'un côté une approche qui donne plus de responsabilité à l'Etat et de l'autre, plus de responsabilité au niveau communal. Est-ce que l'une de ces approches te paraît plus pragmatique, plus opérationnelle, te semble donner de meilleurs résultats, ou est-ce que ça se vaut ?* ».

**J.-D. Rouiller :** « N'étant pas natif de France mais d'un pays où le pouvoir est fortement décentralisé il va de soi que je suis pour un pouvoir de décision local. Le fait est le suivant : on s'aperçoit, dans les zones telles que le Valais, que la responsabilité locale oblige beaucoup plus la population à prendre ses responsabilités. Pourquoi c'est l'Etat central qui doit décider de faire un PPR ? Dès l'instant qu'on vous impose une décision de l'extérieur, ça déresponsabilise. En Suisse, la Commune fait une carte de danger, souvent de sa propre initiative, d'entente avec le Canton. « *Quoique la commune essaie parfois de se défilier quand on demande des inventaires des blocs qui sont tombés...* ». Le fait d'avoir des prises de position et des façons d'assumer localement les responsabilités, à mon avis c'est plus sain pour le développement. « *Si quelqu'un de sa famille est tué, c'est plus facile à admettre si c'est la collectivité locale qui a pris la décision que si c'est quelqu'un de l'extérieur...* ».

**E. Leroi :** « L'Etat ne se résume pas en France à l'Etat central. On a suffisamment de représentants des services déconcentrés présents en région pour le confirmer, tout n'est pas décidé à Paris... ».

**Philippe Raviol (DIREN Rhône-Alpes) :** « Sur ce sujet, en France, l'Etat a toujours été historiquement un Etat assez fort. Néanmoins, il subsiste un paradoxe dans la réglementation : nous avons un interlocuteur qui a une réelle responsabilité en matière de sécurité, c'est le maire de la commune. Effectivement, l'Etat donne la connaissance du risque et prend en charge un certain nombre d'outils mais ensuite, c'est au maire d'appliquer le PPR et que revient toute la responsabilité d'application de ces outils. C'est une responsabilité partagée. Les collectivités ne sont donc pas écartées des choix d'aménagement et de gestion de leur territoire, et parfois, les collectivités font aussi savoir que c'est une lourde charge pour elles ».

**Eric Leroi :** « Oui, en France, le maire est le premier représentant de l'Etat en matière de risques naturels au niveau local ».

**Franck Compagnon (RTM des Alpes maritimes, PACA) :** « Un point aurait pu être abordé dans cette synthèse : le système d'assurance dans les différents pays. Je ne sais pas comment ça fonctionne en Suisse, mais en France, on a un système de solidarité. C'est ce qui explique la prise en charge des PPR par l'Etat ».

**Eric Leroi :** « Nous aurons l'occasion de revenir sur ces points au cours de ces 2 jours... ».

**J.-M. Vengeon :** « Effectivement, l'aspect « assurance et indemnisation » n'a pas été étudié dans ce projet (qui portait plutôt sur les méthodes et les outils pour la surveillance et la parade). Dans le cadre



des ateliers (cf. § 2.1, p. 12), les échanges allaient plus loin sur l'aspect gestion du risque, mais cet aspect « influence des systèmes d'indemnisation » (à la fois sur la mise en œuvre des politiques générales comme les PPR ou des biais que ça peut avoir sur l'aspect plus ou moins responsabilisant d'une solidarité générale, ou encore sur la nécessité d'une assurance individuelle) n'a pas tellement abordé lors des débats pendant les ateliers. C'est un point important qu'on aimerait aborder et confronter dans les futurs projets, mais ce sont des projets qui s'intéressent spécifiquement aux politiques globales de gestion et de réduction des risques. ».

**E. Leroi :** « L'intérêt de cette première présentation est aussi de recadrer la finalité du travail mené dans le cadre du projet RiskYdrogé. Nous allons parler, de surveillance (cf. § 3, p. 57), d'ouvrages de protection (cf. § 5, p. 118) et voir comment ces moyens et ces techniques s'insèrent dans le schéma global de prévention, pour être en mesure de savoir si ces pratiques ont une influence sur les zones de construction, et est-ce qu'elles ont une influence sur notre façon de gérer le territoire.

Après les présentations techniques sur ce sujet, il sera intéressant de faire le lien entre d'une part la surveillance et les ouvrages de protection et, d'autre part, l'aménagement du territoire ».

### 2.3.1 The warning and evacuation against sediment-related disasters - Realities and challenges in Japan

Takao YAMAKOSHI (PWRI Japon)

Takao Yamakoshi est chercheur au Public Works Research Institute (PWRI, équivalent de l'Institut de Ponts et Chaussées au Japon) et présentait : « L'alerte et la mise en sécurité contre les risques naturels en montagne - La réalité et les challenges au Japon ».

#### Les dégâts causés par les risques naturels en montagne au Japon

Le Japon comporte environ 70% de son territoire en montagne. Les précipitations annuelles sont de 1500 mm à Tokyo et sont comprises entre 1000 et 3000 mm/an dans le sud du pays. Chaque année, les risques naturels en montagne font beaucoup de dégâts : en moyenne, il se produit environ 1000 sinistres faisant une cinquantaine de morts. La vulnérabilité des personnes est donc très importante au Japon.



Nombre de catastrophes naturelles hydro-géologiques au Japon de 1991 à 2000 (autres catastrophes : inondations, séismes)

Quelques exemples :

- 1600 glissements de terrain déclenchés par le séisme d'octobre 2004, de magnitude 6.8.
- Glissement de terrain à Village Daitô, le 10 août 2004 (ce glissement était prévu et a pu être filmé : voir [le film](#)).
- Lave torrentielle à Namekawa en 1999 (filmé par une caméra automatique).



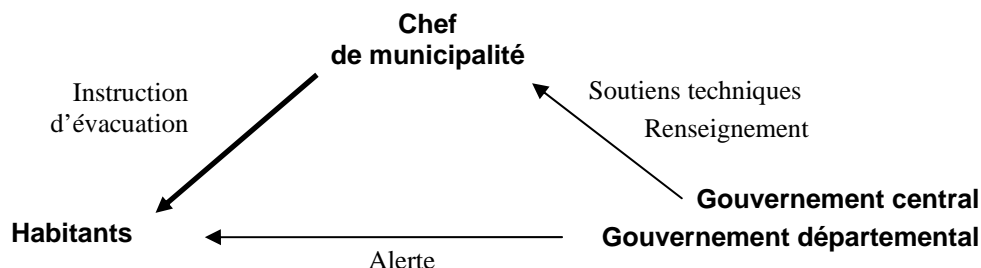
Glissements de terrain déclenchés par le séisme d'octobre 2004 (M6.8)



Glissement de terrain à Village Daitô (10/08/2004)

## Le cadre administratif de la réponse contre les risques naturels en montagne

Tout comme en France, en Italie et en Suisse, les chefs des municipalités sont responsables de l'ordre d'évacuation de leurs administrés :



## La réalité de l'ordre d'évacuation au Japon

Durant l'été 2006, parmi les 197 sites où des événements hydro-géologiques (dans le sens adopté par le projet) ont tué des personnes ou détruit des habitations entre le 22/6/2006 et le 25/8/2006 (d'après Département du Sabô, M.L.I.T), la situation était la suivante :

- ni ordre, ni évacuation : 43% des cas (86 sites),
- pas d'ordre mais évacuation autonome (individuelle) : 44% (87 sites),
- ordre d'évacuation après les dommages : 9% (17 sites),
- ordre d'évacuation avant les dommages : 4% (7 sites).

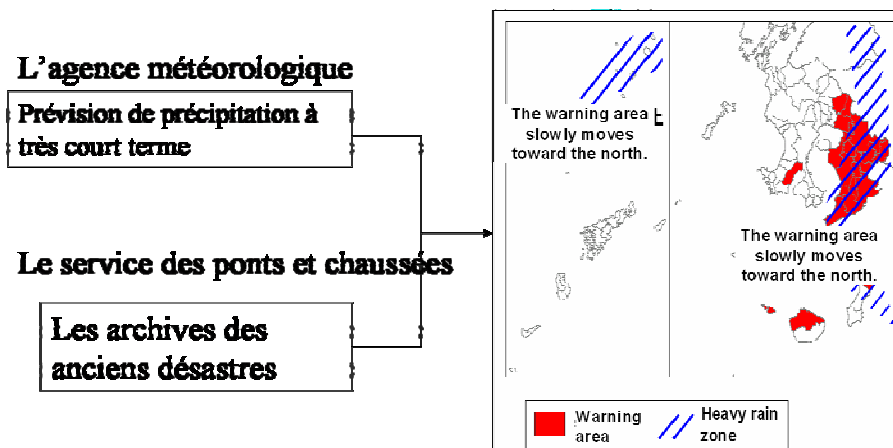
Pourquoi n'y a-t-il pas eu d'ordre d'évacuation dans 87 % des cas ?

- Lorsque la pluie est importante, des laves torrentielles et des glissements de terrain peuvent avoir lieu n'importe où dans une grande région, mais pas nécessairement en un lieu précis.
- Pour la plupart des habitants, l'évacuation est vécue comme « une perte du temps »
- Les responsables des municipalités hésitent à émettre des instructions d'évacuation...

Pour soutenir les communes, le gouvernement central leur fournit des informations précises. Les défis récents concernent les procédures d'alerte.

## L'alerte pour les risques naturels en montagne

La gestion des procédures d'alerte est assurée par une collaboration entre deux services :



Les alertes sont émises au niveau de l'unité communale (au Japon, les communes ont des territoires plus vastes qu'en France, Italie ou Suisse : il y a seulement 1600 municipalités pour un territoire de 380 000 km<sup>2</sup>).

Nouveaux développements pour améliorer les procédures d’alerte :

- Installation de détecteurs de lave torrentielle dans les torrents (détecteurs à câble dont la rupture déclenche l’alerte, ou détecteurs sismiques détectant le tremblement provoqué par les matériaux grossiers charriés par la lave).
- Porté à connaissance auprès de la population des phénomènes précurseurs des laves torrentielles (grondement de la terre, bruit des pierres roulant dans les torrents, bois flottants). Des brochures ont été distribuées pour faciliter leur identification.
- Prise de connaissance du premier phénomène le plus tôt possible : il n’est jamais trop tard pour évacuer, même si un premier phénomène a déjà eu lieu ; la plupart des chefs des municipalités ont décidé d’émettre des instructions d’évacuation après avoir pris connaissances du premier phénomène ; plus tôt on a connaissance du premier événement, plus on peut évacuer tôt.



La communication est cruciale dans la gestion de crise et doit pouvoir être assurée même en cas de coupure des liaisons téléphoniques. Le gouvernement central encourage donc les municipalités à préparer des cadres de communication mutuelle (par exemple radiophonie).

**L’association japonaise de Sabô**

Les membres de l’association Sabô (« lutte contre les risques naturels en montagne » en japonais) sont des municipalités qui sont menacées par de tels risques. L’association émet des propositions, des conseils, et des recommandations aux agences administratives concernant Sabô pour avancer les réalisations. Elle coordonne des échanges internationaux, avance des opinions et valorise des expériences. Les autres activités sont la publication, l’éducation, etc. Des documents d’information ont été distribués (et sont disponibles au Pôle Grenoblois Risques Naturels).

Comparant les activités de l’association Sabô à celles des organisations impliquées dans le Projet RiskYdrogé, T. Yamakoshi a conclu : « j’espère que vos activités transfrontalières vont évoluer en activités transcontinentales ».

**Discussion (2) – Gestion des risques naturels : confrontation avec le cas du Japon**

**Luca Pitet (RAVA) :** « Les mairies ont des problèmes d’évacuation. En particulier, on sait qu’au Japon, les évacuations sont très performantes en matière de risque sismique. Est-ce que vous utilisez ce savoir-faire pour les autres risques (mouvements de terrain et laves torrentielles) ? ».

**Takao Yamakoshi :** « Nos actions en cas de séisme sont effectivement très performantes. Mais ce, dans le cas d’une évacuation après événement, et non pas avant événement. Au Japon, les tremblements de terre sont très peu prévisibles, car les mécanismes sont très complexes (par opposition aux Etats-Unis, où l’occurrence des séismes est davantage prédictible. Donc, je crois que ce savoir-faire obtenu dans le cas des séismes ne pourra pas être utilisé pour l’évacuation en cas de survenue de phénomènes prévisibles comme les laves torrentielles ou les glissement terrain ».

**Jean-Paul Duranthon** (CETE Lyon/LRPC) : « Sur 197 cas recensés, il n'y pas d'instruction mais une évacuation autonome : est-ce que les gens décident par eux-mêmes de s'en aller ? ».

**T. Yamakoshi** : « Oui, il s'agit d'évacuations individuelles : les personnes prennent la décision d'évacuer avant l'ordre d'évacuation, parce qu'ils ont une longue expérience de ces phénomènes ».

**E. Leroi** : « C'est extraordinaire d'avoir 43% d'évacuations spontanées. La connaissance du risque est sans doute beaucoup plus développée au Japon que dans les territoires alpins. Par contre, il y a seulement 4% des cas où l'ordre d'évacuation a été émis avant dommages. Ça pose la question de l'efficacité des dispositifs de surveillance. Pourquoi y a-t-il si peu de décision d'évacuer en provenance des chefs des municipalités, alors qu'il y a 43% d'évacuations spontanées ? ».

**J.-M. Vengeon** : « Ces chiffres nous interpellent assez fortement : dans un pays très montagnard, cette expérience liée à la culture du risque ne marche qu'une fois sur deux parmi des populations locales (sans compter les touristes ?). D'un point de vue statistique ce résultat est relativement faible en terme de pronostic (contrairement à ce qu'a dit E. Leroi...). Leur culture et leur expérience ne les ont pas protégés de façon suffisante. Est-ce une limite des possibilités d'une culture locale face à des phénomènes brutaux et rapides ? ».

**T. Yamakoshi** : « Ce chiffre n'inclut pas les touristes et ne concerne effectivement que les populations locales. Ce taux d'évacuation locale est plus important que ce qui était attendu, mais c'est un résultat récent, nous ne pouvons pas juger de sa qualité... Je pense que ces instructions devraient être plus rapides parce que beaucoup de personnes dépendent des instructions des autorités municipales, départementales et centrales. On ne peut pas se contenter d'une évacuation individuelle ».

**J.-M. Vengeon** : « On a le même genre de statistiques dans le sud de la France en matière de crues rapides. Il a été observé un effort important au niveau local, avec des pratiques « non officielles » de mise en place de circuits courts d'alerte et d'instructions, parce que les alertes météorologiques provenant des structures existantes au niveau national et départemental sont trop lentes dans certains secteurs. Connaissez-vous des cas similaires ? ».

**T. Yamakoshi** : « Par exemple, une des activités de l'association Sabô est l'éducation. Elle fait des interventions auprès des chefs de municipalité et des habitants. Les universités interviennent aussi parfois dans ces actions de sensibilisation. Mais je ne sais pas si ces actions sont très efficaces ou non ».

**E. Leroi** : « Pour ma part, je trouve que cette proportion de presque 50% d'évacuations spontanées est très forte. Ce résultat me paraît remarquable. J'ai l'impression que dans les territoires alpins, notamment en France, l'ordre de grandeur n'est pas aussi élevé. ». À la salle : « Quelles réactions pouvez-vous avoir sur le terrain, au niveau des services de l'Etat ou des collectivités ? ».

**Paolo Turcotti** (Protection Civile de la Vallée d'Aoste) : « J'ai beaucoup apprécié le discours de T. Yamakoshi parce qu'il a aussi parlé des habitants. Finalement, entre techniciens, on oublie un peu la population. Il y a beaucoup à apprendre de cette présentation. Nous travaillons aussi en temps que techniciens à l'information des locaux, des élus, des municipalités, mais de temps en temps, on oublie un peu les habitants. Il faut les informer ».

**E. Leroi** : « Effectivement, l'information fait partie à part entière de la politique globale de prévention des risques. Elle est incluse de façon plus ou moins obligatoire dans la procédure et constitue une phase importante et intégrante de la prévention. Par contre, elle ne paraît pas aussi efficace ».

**Pierre Pothérat** (CETE Lyon/LRPC) : « Est-il possible de connaître le nombre de victimes pour chaque type de situation avec ou sans instruction d'évacuation ? ».

**T. Yamakoshi** : « C'est impossible à calculer pour l'instant (les données sont au Japon). Je crois qu'une vingtaine de personnes ont été tuées au total ».



### 2.3.2 Landslide monitoring and decision: Strategy and experiences of NGI

Farrokh NADIM (NGI, Norvège)

#### **Les systèmes d'alerte précoce comme mesure de gestion du risque**

Les systèmes d'alerte précoce permettent de réduire les conséquences des catastrophes naturelles, par exemple en donnant le temps suffisant pour mettre en œuvre des actions de protection des biens et / ou des personnes.

Ces systèmes sont davantage qu'une simple mise en œuvre de technologies :

- les facteurs humains, les éléments sociaux et les moyens de communication sont des aspects essentiels ;
- les autorités qui prennent les décisions (agences gouvernementales, police / pompiers) ;
- le développement de la forme et du fond des alertes émises ;
- les aspects sociaux : comment la population réagit ;
- la mise en œuvre des plans de secours et services d'urgence.

Il faut également rappeler que les décideurs ne sont en général pas des techniciens.

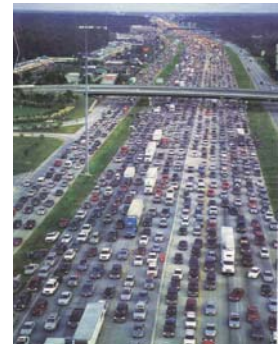
Ignorer les aspects humains et sociaux peut créer une nouvelle urgence : ex. évacuation de la Nouvelle Orléans lors du cyclone Katrina.

Plan de maintenance :

- instruments et technologie nécessitent de la maintenance, des réparations et des mises à jour,
- nécessité de tester les canaux de communication : ex. systèmes radio d'urgence,
- pratiquer les « réponses » aux alertes : ex. entraînement aux réponses d'urgence pour la police / les pompiers.

#### Une alerte réussie ?

Evacuation lors du cyclone Rita, 23 septembre 2005.



#### **Que peut-on surveiller ?**

N'importe quel système ou processus pour lequel :

- les processus définissant le système sont bien compris ;
- on peut définir des paramètres indicateurs ;
- des modèles de prédiction utilisant ces paramètres existent ;

La modélisation du système peut être :

- soit qualitative: le plus courant ; ex. « les pentes sont très instables quand il y a eu plus de deux jours de fortes pluies » ;
- soit quantitative : souvent difficile à établir; ex. « la pente arrivera à rupture lorsque les pressions interstitielles atteignent 45kPa »

Quelques exemples d'alertes potentielles :

- stabilité économique régionale ou nationale, sur la base d'indicateurs tels que chômage et inflation ;
- interactions humaines affectant l'environnement comme la déforestation ou les changements d'utilisation du sol ;
- problèmes de santé publique, comme les épidémies, surveillées via des rapports hospitaliers locaux.

Dans notre contexte, nous nous concentrons sur les géo-systèmes : éboulements rocheux, glissements de terrain, avalanches, volcans, tsunamis, laves torrentielles. Exemples :

- Aknes : mouvement de versant ;
- Lac Sarez : rupture d'un barrage naturel ;
- Amérique centrale : coulée de boue sur des pentes de volcan.

### **Temporaire contre permanent**

Les systèmes temporaires sont appropriés quand la menace est à court terme ou qu'elle va être réduite par d'autres moyens. Les installations permanentes sont quant à elles envisagées lorsque la surveillance a un meilleur rapport coût / bénéfice que les autres techniques de réduction du risque, ou lorsqu'il n'y a pas de possibilité de traitement du phénomène (ex. éruption volcanique).

### Technologies disponibles

Des technologies sont désormais disponibles clé en main : de plus en plus sophistiquées, mais aussi avec une meilleure standardisation dans les interfaces qui permet un assemblage plus simple du système.

Capteurs :

- Les capteurs individuels (ex. pression, température) fournissent des données détaillées en des points discrets ;
- Les systèmes intégrés de capteurs (ex. station météo, station géodésique automatique) fournissent des séries de données ou même des données directement traitées / interprétées.

Technologies de communication :

- câbles, radio, téléphone mobile, internet, satellite pour transférer les données et les messages ;
- services de messagerie pour diffuser les alertes (sirène, sms, téléphone, télévision, radio).

La quantité et la qualité des types de capteurs et des technologies de communication sont aujourd'hui impressionnantes. On peut trouver des solutions pour communiquer des données de n'importe quel endroit à un autre.

Dans le domaine des systèmes de traitement de données et des capacités de traitement (traitement de données satellites ex. interférométrie par réflecteurs permanents pour des affaissements / mouvements), il y a encore des améliorations à apporter, par exemple avec des systèmes intelligents pour un traitement en temps réel de grandes séries de données.

Utiliser la technologie n'est pas suffisant ; il faut savoir comment et pourquoi. Le défi est de concevoir un système pour :

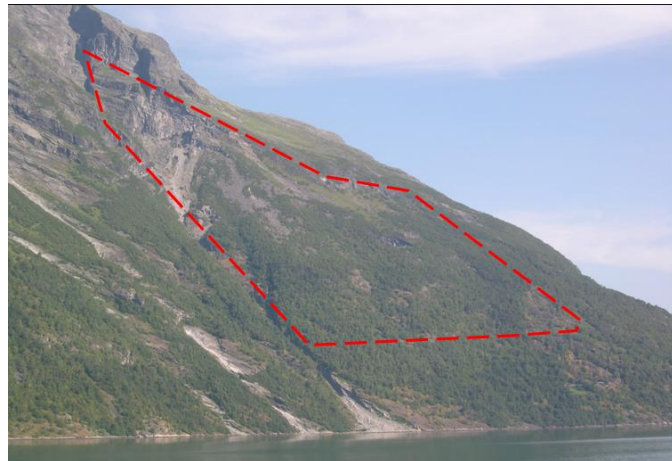
- mesurer de manière adéquate les paramètres nécessaires pour modéliser l'aléa ;
- intégrer des redondances pour assurer la fiabilité du système (être sûr de bien déclencher l'alerte) ;
- traiter efficacement les données pour assurer un accès opportun aux décideurs : prendre en compte les délais nécessaires à l'évacuation ;
- intégrer des modèles et des niveaux d'alerte ;
- Distribuer / communiquer les alertes aux populations concernées ;
- Eviter trop de fausses alertes.

Les difficultés viennent souvent des problèmes pratiques :

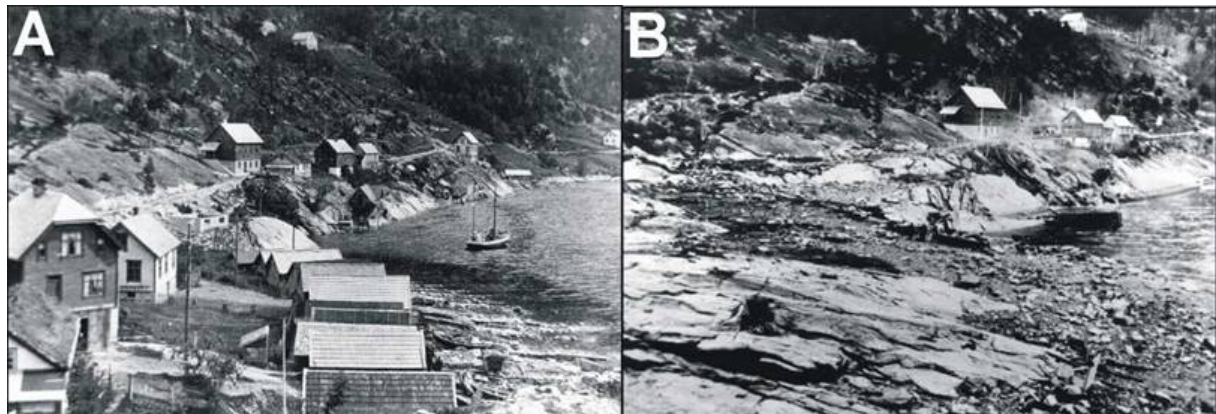
- accessibilité au site pour l'installation et la maintenance ;

- conditions environnementales locales : vents forts, températures basses, précipitations ;
- détériorations naturelles : petites fuites, corrosion, dommages aux câbles et aux composants ;
- interférences électriques magnétiques (EMI) et dommages associés aux tempêtes électriques ;
- vandalisme, vol, ou simplement manque de réserves d'exploitation et de pièces détachées.

### Åknes, Norvège



Il s'agit d'un versant en mouvement au dessus d'un lac. Actuellement le volume d'éboulement potentiel est estimé à 40 millions de m<sup>3</sup>. Trois événements principaux ayant entraîné plusieurs de morts se sont déjà produits, en particulier celui de Tafjord en 1934 (photos ci-dessus) : 3 million m<sup>3</sup> de roches glissent dans le fjord ; le tsunami atteint 62m au-dessus du niveau de la mer ; plus de 40 personnes sont tuées.



La partie supérieure du versant bouge de 3 à 4 cm par an : l'événement est certain, mais se réalisera-t-il ne façon progressive ou en un seul glissement catastrophique ?

### **Alerte précoce :**

#### Installation de capteurs :

- suivi de fractures, délimitation de la niche d'arrachement supérieure ;
- pressions interstitielles dans des sondages ;
- profils d'inclinaison / rotation dans des sondages ;
- détection de plans de glissement dans des sondages.



Techniques topographiques :

- Radar au sol (interférométrie, GinSAR)
- Réflecteurs pour radar satellite (PsinSAR)
- Station totale avec ses réflecteurs.

Collecte de données, transmission et interprétation :

- collecte locale sur site (réseau de capteurs et centrales d'acquisition) ;
- transmises via modem radio à la ville proche (Stranda) ;
- interprétées par les autorités locales et les experts géologues ;
- alarmes émises par les autorités locales ;
- finalement sirènes et alertes par téléphone mobile à tous les habitants.



Le système de déclenchement de l'alerte n'est pas complètement automatique ; il conserve une part d'intervention humaine. Le délai de déclenchement de l'alerte est de 5 à 10 min.

Comment communiquer avec la presse sans faire de catastrophisme ?

Vue d'artiste du tsunami à Geiranger

Le problème des médias est délicat : depuis la publication dans la presse d'une illustration du tsunami à Geiranger (ci-contre), certaines familles refusent d'envoyer leurs enfants se baigner dans le lac : l'article n'a pas précisé que la probabilité d'un tel événement est très faible. Ce type d'article effraie essentiellement les touristes.

**Etude géologique :**Cartographie laser (aérienne) :

- cartographie de la pente instable ;
- interprétation de la géologie structurale.

Etudes géophysiques :

- Résistivités ;
- Microsismique (monitorage passif)

Sondages forés à trois endroits :

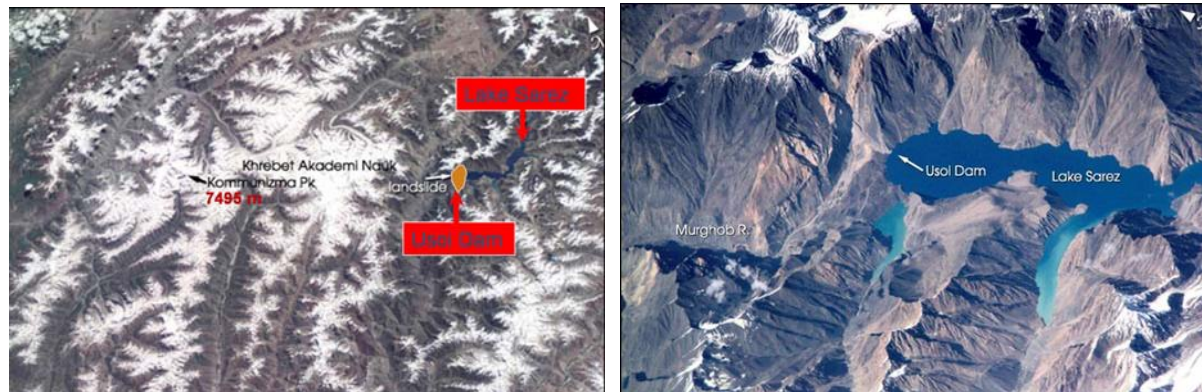
- Echantillonnage géologique / interprétation ;
- Installation d'instruments.

Analyses du tsunamiEtude géologique complète :

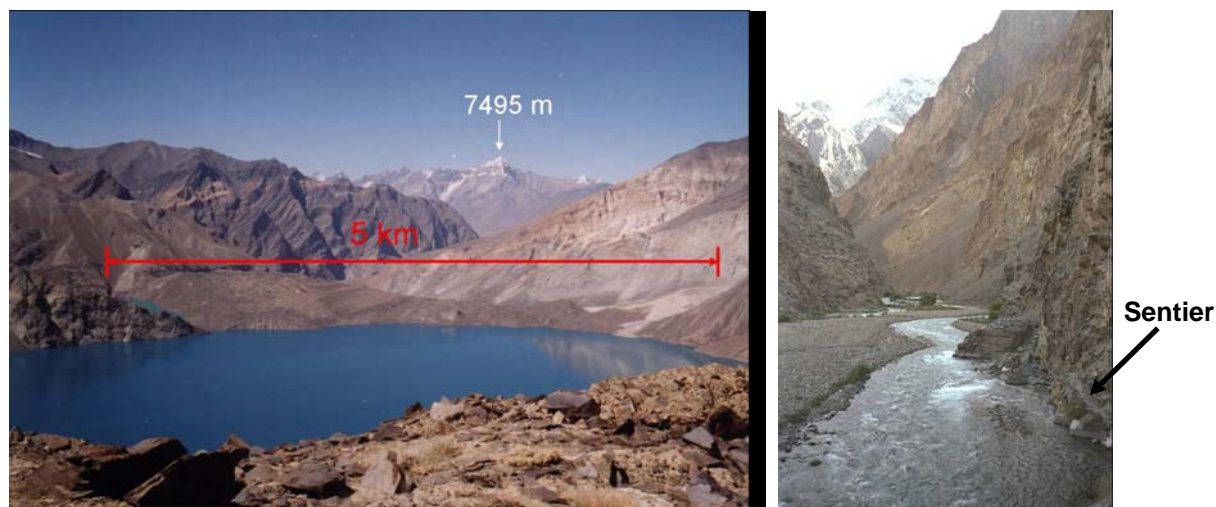
- Détermination des mécanismes
- Identification des processus
- Identification des paramètres indicateurs du mouvement

**Principaux défis / problèmes :** L'instabilité semble être générée par une orientation défavorable de la foliation dans les gneiss, mais la zone instable est localisée. Une meilleure compréhension de la géométrie de la zone instable et des mécanismes qui provoquent le mouvement est nécessaire pour établir des critères d'alarme précoce.

### Barrage d'Usoi et lac Sarez, Tadjikistan



La digue de barrage d'Usoi (600 m de haut) a été formée par un glissement de terrain. Il s'agit du plus gros barrage existant actuellement au monde, avec un volume d'eau retenu de  $17 \text{ km}^3$  ; il reste actuellement seulement 50m de marge sous la crête de la digue. De plus la région connaît une forte activité sismique, et de nombreux villages sont situés à l'aval du barrage.



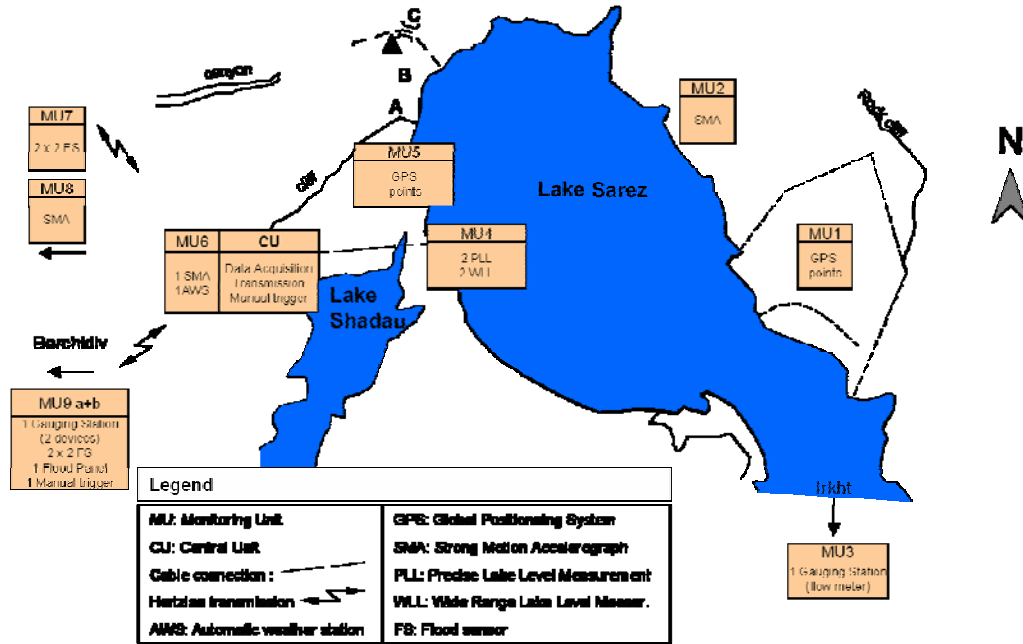
Les risques potentiels sont soit une rupture du barrage, par érosion interne brutale (phénomène de renard) ou sous l'action d'un séisme, soit un glissement de terrain ou éboulement dans le lac (pentes potentiellement instables de 50m de haut) susceptible d'engendrer une vague qui submergerait le barrage. Dans les deux cas, les conséquences seraient une inondation majeure des zones à l'aval du barrage.

Le NGI/ICG a pris part à l'équipe d'experts mandatée pour évaluer la conception du système de surveillance et son installation par un entrepreneur européen.

L'accessibilité au site est un problème majeur. Il existe seulement un sentier dans la vallée de Bartang (photo) praticable à pied ou à dos de mulet (deux jours de marche).



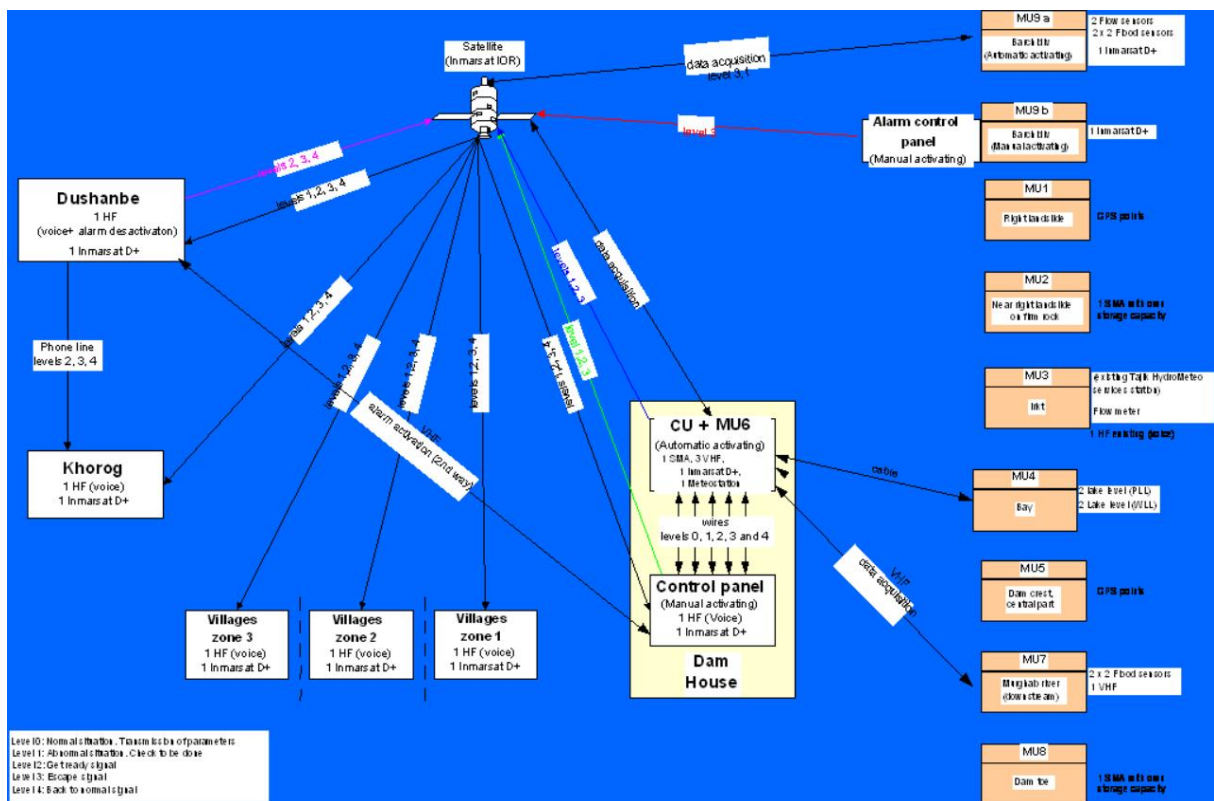
### Le système de surveillance



Le système de surveillance comprend :

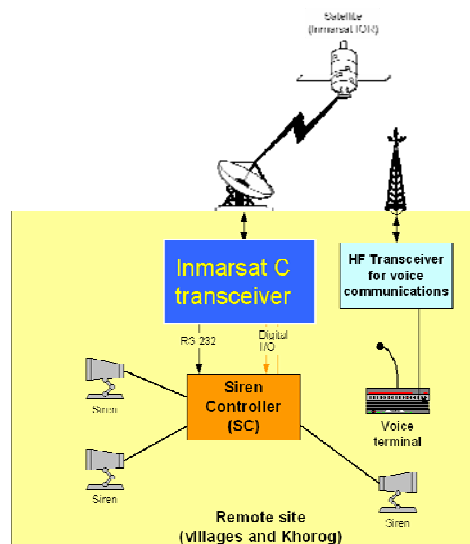
- déplacements de surface ;
- données sismiques ;
- niveau du lac ;
- détection de grande vague de surface sur le lac ;
- débit de la rivière Murgab ;
- turbidité ;
- données météorologiques.

Les données sont transmises de cette région reculée au centre opérationnel par satellite.



Les plus gros défis sur ce site sont les aspects pratiques:

- site reculé, accessible par hélicoptère ou à dos d'âne ;
- capacité technique locale minimum pour l'installation initiale et la maintenance des équipements : peu de transferts des techniciens au personnel local ;
- population locale très pauvre : les équipements et fournitures, l'essence sont utilisées à d'autres fins ;
- information et entraînement inadéquats : les buts, la nécessité et l'importance du système de surveillance ne sont pas bien compris par la population locale.



### Définition des états d'alerte

Niveau	Définition	Origine de l'alarme	Destination	Action
0	Etat normal : - tous les systèmes fonctionnent correctement - pas de condition anormale détectée	Unités de surveillance ou Système d'alerte précoce (EWS)	Message envoyé à la Maison du Barrage (DH) et à Dushanbe	Opérations quotidiennes et maintenance
1	Anormal mais non critique : situation anormale due à un phénomène naturel ou à une défaillance technique	idem	idem	Inspection, vérification, réparation et observation
2	Signal de pré-alerte (se tenir prêt) : non défini pour le moment, réservé à une utilisation future			
3	Signal d'évacuation : conditions anormales détectées sur la base de plusieurs paramètres	EWS, Dushambe ou Barchidiv	DH, Dushanbe, villages et Khorog	Evacuation des villageois
4	Retour à la normal : conditions normales confirmées après un niveau 2 ou 3	Dushambe	DH, villages et Khorog	Retour niveau 0

Stratégie d'alerte

Source d'information	MS	Niveau 2	Niveau 3
Mouvement du RLB (GPS)			
Accéléromètre (SMA)	X	X	
Station de jauges à Irkht (GS)	X		
Station de jauges à Barchidiv (GS)	X	X	X
Station de jauges à Vavzid (GS)	X		
Turbidité des eaux issues du lac	X	X	
Données météorologiques (AWS)	X	X	
Hauteur du lac (PLL)	X	X	
Hauteur du lac par une vague (WLL)	X	X	X
Capteurs d'inondation (FS)	X	X	X
Déclenchement manuel basé sur des observations visuelles anormales		X	X

Valeurs seuil

Niveau	Source	Valeur seuil
1	Accélération Niveau du lac (PLL) Niveau du lac (PLL) Station de jauges, Barchidiv Alarme manuelle	a > 0.05 g H > 3270 m/ niveau de la mer dH/dt > 25 cm/jour Q > 300 or Q < 10 m <sup>3</sup> /sec (un débit trop faible est aussi un signe anormal) Observation visuelle inhabituelle

3	Niveau du lac (WLL) Capteurs d'inondation station, Barchidiv station, Barchidiv Alarme manuelle	H vague >50m Q > 400 m <sup>3</sup> /sec Q > 400 or Q < 5 m <sup>3</sup> /sec (idem) dQ/dt > 15 m <sup>3</sup> /sec/hour Observation d'événement majeur
---	---	---

Fréquence de transmission de données en situation normale

Mesure	A la Maison du Barrage	A Dushambe
GPS (manuel)	-	-
Données sismiques	-	-
Station Barchidiv	Chaque seconde	4/jour
Données météo	Chaque heure	4/jour
Niveau du lac (PLL)	Chaque heure	1/jour
Niveau du lac (WLL)	Chaque heure	-
Capteurs d'inondation	-	-

Fréquence de transmission de données en situation d'urgence

Mesure	A la Maison du Barrage	A Dushambe
GPS (manuel)	-	-
Données sismiques	1/100 sec	En début et fin de séisme
Station Barchidiv	1/sec	1/10 min
Données météo	-	-
Niveau du lac (PLL)	-	-
Niveau du lac (WLL)	1/sec	1/min pendant 10 min, (valeur max)
Capteurs d'inondation	-	immédiat

### Comment va fonctionner l'équipement dans le futur ?

Un des gros problèmes est la fourniture d'électricité : il y a trois centrales électriques (photos), dont la maintenance incombe au personnel local, qui n'a que très peu de moyens.



Etat du système : les composants techniques fonctionnent bien, tous les problèmes initiaux ont été résolus. Ce système d'alerte « précoce » est une solution temporaire, jusqu'à environ 2015. Toutefois, une simple erreur lors des tests du système a probablement rendu l'ensemble de la procédure inefficace pour les prochaines années : les sirènes n'ont pas été coupées durant les tests initiaux, ce qui a déclenché plusieurs fausses alertes avec évacuation : la population n'a plus suivi l'ordre d'évacuation après quelques fois, et cela reste en mémoire. Il sera probablement difficile d'avoir une évacuation efficace lors d'une alerte réelle.

**Système d’alerte pour les lahars (coulée de boue issue d’un volcan) en Amérique centrale : un projet pilote**

Glissement de terrain de Casita causé par le cyclone Mitch au Nicaragua, 30 octobre 1998 : un éboulement sur le volcan a déclenché une gigantesque coulée de boue.

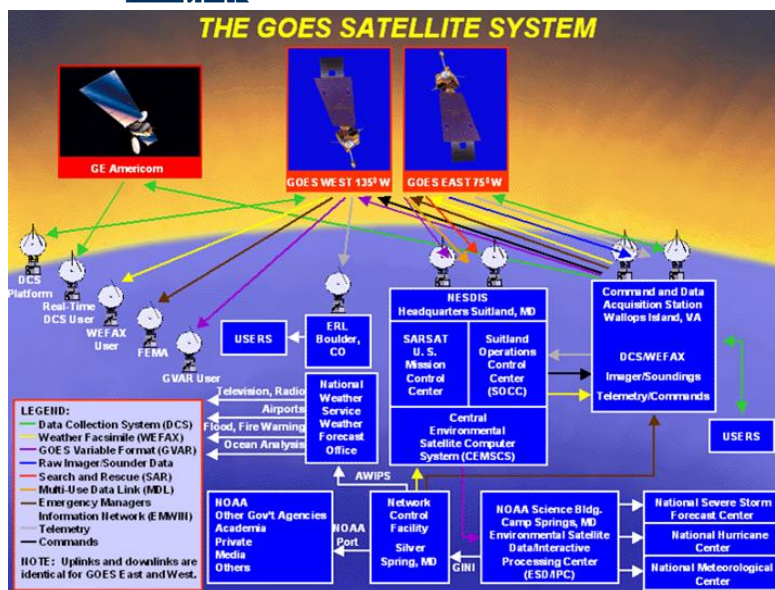
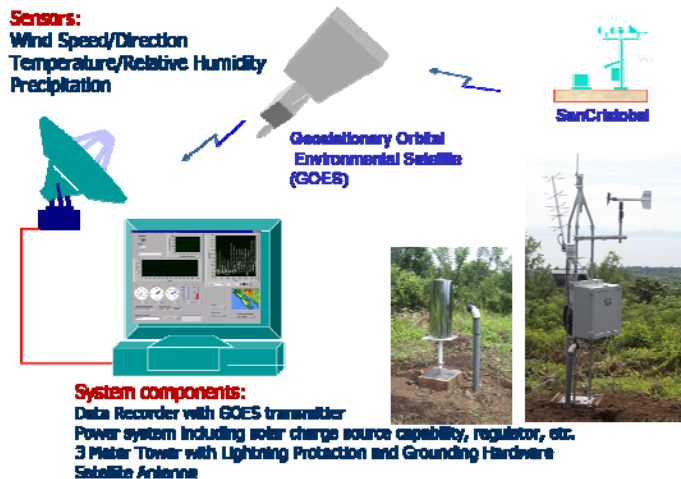
Surveillance mise en place :

Capteurs : vitesse du vent et direction, température / humidité relative, précipitations.

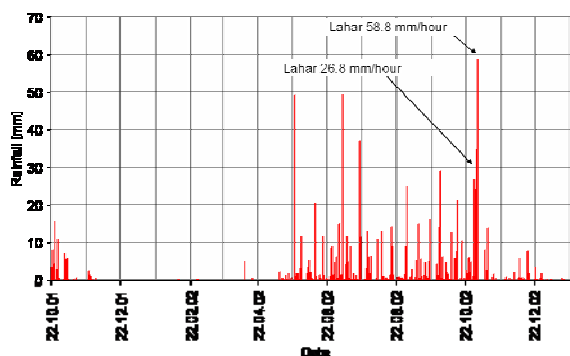
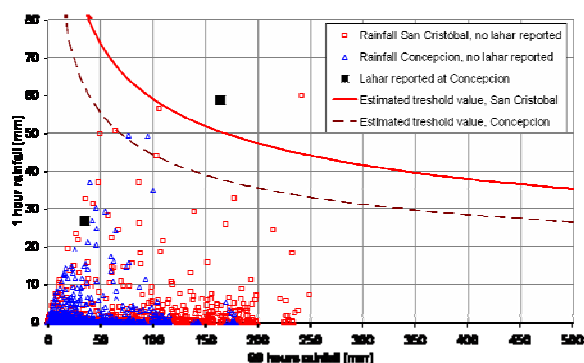
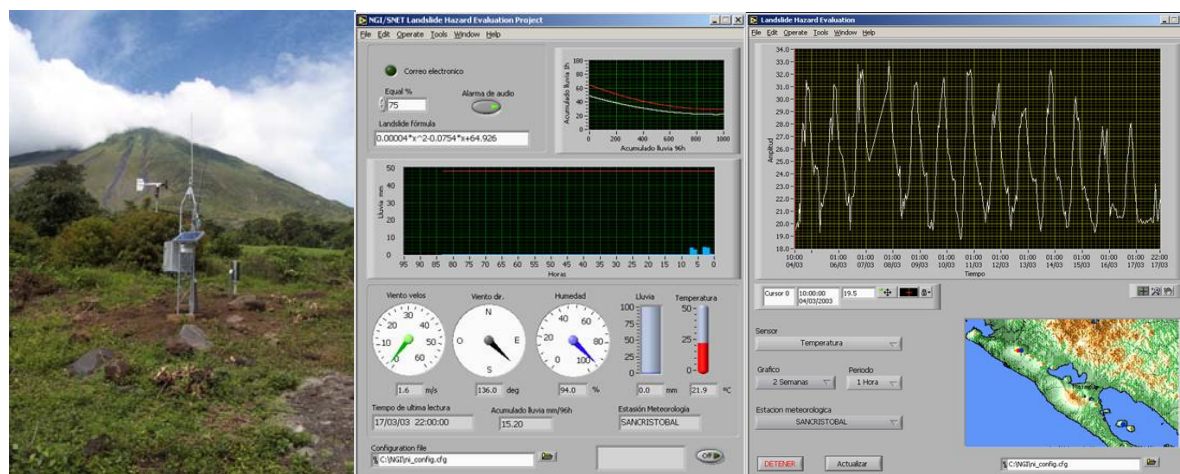
Satellite environnemental à orbite géostationnaire (GOES)



Composants du système : enregistrement des données et transmission par GOES ; source d’énergie incluant des capteurs solaires ; tour de 3m avec protection parafoudre et antenne satellite au sol Le problème est qu’il n’y a pas sur place de logiciel adapté pour traiter les données, qui doivent donc être envoyées aux Etats-Unis.







Valeurs seuil simplifiées : précipitations au Nicaragua mesurées d’octobre 2001 à janvier 2003 (à gauche) et événements de lahars observés sur le volcan Concepcion les 28 et 31 octobre 2002 (il manque la fin des données pour pouvoir établir les seuils).

Maximum journalier de précipitations horaires au volcan Concepcion, oct.2001 – janv.2003 (à droite): il est très délicat d’établir des seuils précis.

**Leçons à retenir :**

- Les équipements et systèmes de communication fonctionnent toujours, mais leur maintenance est un défi ;
- La corrosion est un problème majeur dans un environnement volcanique (gaz corrosifs);
- Au Salvador, les deux pluviomètres installés par le NGI sont intégrés avec d’autres pluviomètres (Suttron) utilisés pour les alertes aux inondations ;
- Au Nicaragua, les pluviomètres pourraient bien être remplacés par des équipements plus simples et les communications se feraient par transmission radio digitale (relié au réseau sismique) ;
- Les deux pays poursuivent le concept qui vise à donner une alerte régionale face aux glissements de terrain en cas de conditions pluviométriques extrêmes ;
- En ce qui concerne l’équipement, il aurait a posteriori fallu mettre en place un équipement plus simple et moins cher.

**Discussion (3) – L'expérience de la NGI**

**T. Yamakoshi :** « Il s'agit de systèmes de très haut niveau, mais je crains qu'au lac Sarez, le personnel local ne soit pas en mesure d'assurer la maintenance sur un système aussi complexe. La population locale est-elle cependant consciente du risque ? »

**F. Nadim :** « Oui, la population est consciente du danger : un réseau de sentiers a été prévu pour lui permettre de s'enfuir au-dessus du barrage. Les gens peuvent s'y réfugier, mais pas y vivre ».

**P. Raviol :** « Il est difficile de communiquer aux médias sur un événement à très faible probabilité d'occurrence : comment éviter le catastrophisme ? »

**F. Nadim :** « Le NGI a des lignes directrices pour sa communication : dans la mesure du possible, le journal doit envoyer l'article pour validation avant sa parution. Certains journaux ont tendance à vouloir faire des articles à sensation : les communiqués de presse ne leur sont pas envoyés, seuls les journaux identifiés comme sérieux en sont destinataires ».

**L. Effandiantz (CETE Lyon) :** « Y a-t-il un ou plusieurs experts sur le site d'Aknes ? ».

**F. Nadim :** « Un expert affecté au site 24h/24 pendant 2 ans, après quoi la responsabilité sera transférée aux experts locaux, toujours associés aux experts partenaires internationaux ».

### 2.3.3 Situation d'évacuation suite à la crue du torrent Durnand (juillet 2006)

J.-D. ROUILLER (*géologue cantonal du Valais*) & Olivier DUMAS (*maire de Martigny*)

Ces deux personnes ont présenté le cas de la lave torrentielle du torrent Durnand et de la mesure d'évacuation momentanée d'une partie de la population de Martigny qui en est découlée.

#### **La lave torrentielle du Durnand (25 juillet 2006) : une conséquence directe de la fonte du Permafrost** (J.-D. Rouiller)

L'événement s'est produit à 2 km environ à l'amont de Martigny, à l'endroit où le Durnand, affluent de la Dranse, se jette dans celle-ci. Cette dernière, l'un des principaux cours d'eau latéraux de la vallée du Rhône draine le bassin versant des vallées de l'Entremont dont l'une donne accès au col du Gd-St-Bernard.

Comme cela est souvent le cas dans la géomorphologie alpine, le rétrécissement aval des vallées latérales laisse peu de place aux voies de communication. Au Borgeaud, nom local de la confluence des deux cours d'eau (photos ci-dessous), la ligne de la société de chemin de fer locale (TMR) « slalome » dans le lit majeur de la Dranse alors que la route internationale du Gd-St-Bernard la surplombe à flan de coteau par une succession de viaducs et galeries.



Situation à l'embouchure du Durnand dans la Dranse au lendemain de la crue du Durnand (noter la taille des blocs transportés)

Le 25 juillet 2006 à 19h30, les matériaux transportés par le Durnand produit une embâcle (35 000 m<sup>3</sup> de matériau) sur la Dranse à l'endroit où une passerelle la franchit. La lave a arraché le pont et les rails du train sur environ 400 m. L'une des « bouffées » a même fait dérailler le train alors qu'il s'apprêtait à franchir le pont, manquant de l'emporter. Faisant preuve d'un sang froid exceptionnel le conducteur a évacué dans le plus grand calme la trentaine de voyageurs qui s'y trouvait. L'embâcle a entraîné la formation d'un lac. La nuit tombante et une forte végétation empêchaient d'évaluer correctement son extension, raison pour laquelle un ordre d'évacuation à l'aval a été donné dans un premier temps (vers 21h).

En remontant le torrent (photos ci-après), on observe successivement des secteurs de dépôt et d'érosion du lit. L'érosion (d'aspect terreux) met en évidence le dépôt historique de blocs anguleux en provenance du glacier rocheux.





Secteurs successifs de dépôt et d'érosion du lit du torrent

Plus haut on observe les embranchements supérieurs du torrent. On y trouve un dépôt intermédiaire de matériau qui semble avoir été peu remobilisé par l'événement.



Confluence des Jures (embranchements supérieurs du torrent) avec à droite le dépôt intermédiaire

Entre 2400 et 2500 m, directement au pied des crêtes de gneiss, on observe les « langues » de glacier rocheux qui ont produit la lave torrentielle du 25 juillet



Langues de glacier rocheux à l'origine de la lave torrentielle du torrent Durnand

On relève sur la droite la structure en forme de cuvette qui a concentré la plus grande quantité de débris du glacier rocheux et notamment la partie fine du matériau, indispensable pour assurer le transport des gros blocs et abraser le lit du torrent.



Glaciers rocheux et cuvette d'accumulation (à droite : cassure de pente, rigoles d'érosion)

On retrouve ici deux facteurs clés pour la constitution d'un glacier rocheux lors d'une phase de refroidissement climatique: des falaises très fracturées en cours de dégradation et une morphologie permettant l'accumulation in situ des débris issus de leur dégradation et favorisant leur sédimentation avec la glace issue des les dépôts de neige.

Quant au processus de mobilisation de lave torrentielle du 25 juillet il s'explique comme suit :

- un zéro degré diurne au-dessus de 4200 m pendant pratiquement tout le mois de juillet qui a activé la fonte de la tranche supérieure (3-4 m) du glacier rocheux,
- l'apport d'eau météorique des névés sommitaux (voir photo) qui a aidé à la solifluer en vue de leur mobilisation par un événement pluvio-orageux.

Il est intéressant de relever qu'alors que les précipitations n'ont débuté qu'en fin de journée, à midi déjà un touriste a été gêné par des coulées de matériau à l'endroit où le sentier pédestre franchit les Jures. Cela tend à démontrer que sous l'effet de la chaleur cumulée, la tranche supérieure du glacier rocheux se trouvait fin juillet dans une phase d'équilibre instable par le seul fait de sa fonte et de celle des névés.



Cuvette d'accumulation des débris de roche (à arrière-plan : la vallée du Rhône)

Quant aux précipitations qui ont déclenché la lave torrentielle, elles ont été estimées à quelque 80 mm.





Détail de la tranche superficielle du glacier rocheux avec rigole d'érosion creusée par l'événement

Dans l'une des rigoles creusées par l'événement du 25 juillet, « deux jours plus tard on entendait très bien l'eau de fonte couler en profondeur ».



Echelle de la taille des blocs du glacier rocheux (photo de droite : à l'arrière-plan la ville de Martigny)

A relever la forme anguleuse typique des blocs qui démontre leur origine autochtone, à savoir qu'ils proviennent directement des falaises sus-jacentes.

En conclusion, il ressort que sans la fonte de ce pergélisol la lave torrentielle n'aurait pas été aussi chargée. En effet, le glacier rocheux a fourni une part non négligeable des blocs transportés ; de plus, tout laisse à penser que la fraction fine du matériau - protégée par la cuvette du délavage de pente dû à l'écoulement saisonnier de l'eau météorique - a grandement contribué au « portage » de ceux-ci mais a aussi participé très activement à l'érosion du lit du torrent.

Si le réchauffement climatique annoncé devait se confirmer au cours de ce siècle, il devrait y avoir une recrudescence de ce type d'événement dans l'arc alpin. Cette problématique est abordée au § 4 (p. 109).

### Résumé

La lave torrentielle du Durnand s'est déclenchée à partir du petit cirque de glacier rocheux sis entre 2400 et 2500 m d'altitude au pied de crêtes de gneiss. Elle a provoqué deux mille mètres plus bas une embâcle de 35 000 m<sup>3</sup> dans le lit de la Dranse. En raison de la poche d'eau créée à l'arrière de ce barrage, l'incertitude qui pesait sur la suite des événements a conduit les autorités locales à procéder à l'évacuation d'une partie des habitants de la ville de Martigny qui se trouvaient à proximité immédiate de ce cours d'eau.

## **L'évacuation de Martigny suite à cette crue torrentielle** (Mr Olivier Dumas)

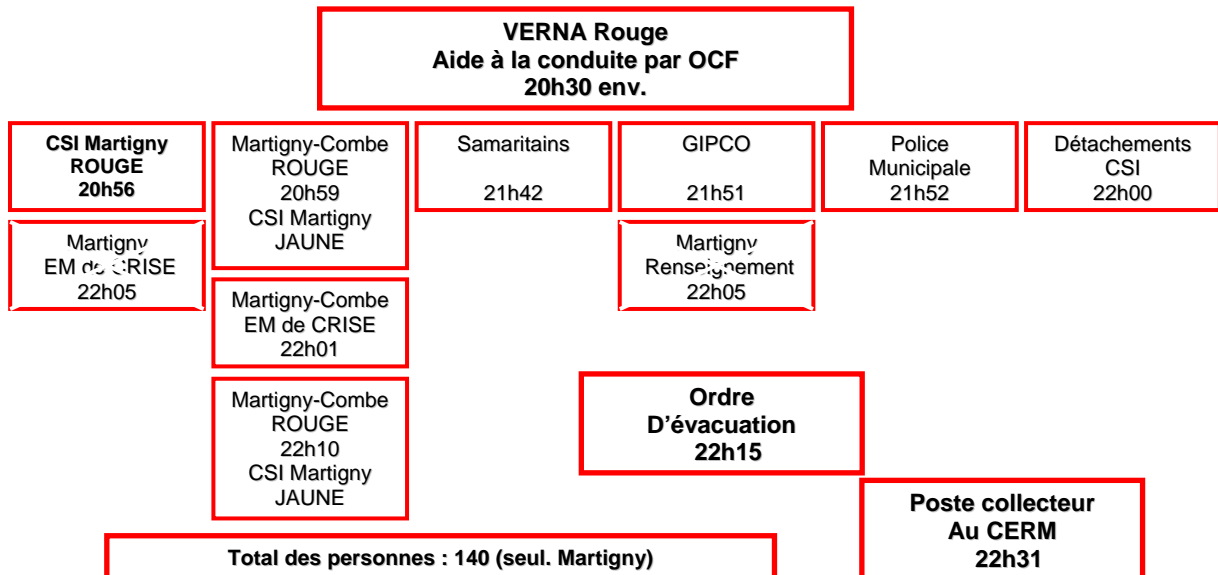
À la salle : « Lorsque Mr Rouiller m'a demandé de participer à votre rencontre, c'était d'abord pour apporter le témoignage d'un homme qui était devenu un homme de terrain ce soir là, puisqu'il est vrai qu'un maire n'a pas trop l'habitude d'aller crapahuter sur des éboulis. Enfin il importait de le faire, puisque nous étions dans une situation un peu particulière. Je voudrais surtout dire le besoin que nous avons dans ces situations d'avoir des spécialistes comme vous. Nous sommes très démunis ; il y avait un certain nombre de décisions à prendre ce soir là et c'est ce témoignage que je veux apporter ».



Voies de chemin de fer déplacées sur plusieurs dizaines de mètres et passerelle engravée au lendemain de la crue

### **Déroulement de l'alarme**

Le système d'alerte communale en Valais repose sur une procédure d'alarme dite « Verna rouge » :



Organisation de la gestion de crise à Martigny dans la soirée du 25 juillet 2006 (explications dans le texte)

« Vers 20h30, nous avons appris qu'un accident s'était produit avec ce train, qu'il y avait eu des débordements sur la route du Grand-Saint-Bernard et que cette route devait être mise hors circulation. A partir de là, tout s'est déclenché assez vite : l'alarme rouge a été déclenchée à 20h56 au centre de secours et d'intervention des pompiers de Martigny, ainsi que dans une commune voisine (Martigny-Combe, qui a travaillé main dans la main avec nous tout au long de cette soirée). A 20h59, tous les habitants étaient avisés.



*Vers 21h10, les pompiers sont arrivés sur le site pour examiner la Dranse : tout était tranquille, l'eau était certes boueuse mais le débit était tout à fait normal, conforme à ce que nous connaissions dans les heures précédentes (durant lesquelles quelques pluies s'étaient abattues en montagne alors que la plaine était totalement sèche). Sur place, à proximité de la route et du pont, se trouvait déjà le bus de la police cantonale, qui a servi de centre d'intervention et de poste avancé pour le commandement.*

*Vers 21h20, les premiers constats sont dressés dans la gorge en forte pente. Il était difficile de se rendre sur le site et nous étions suspendus aux commentaires du chauffeur du train, qui a pu nous fournir quelques explications. Il a fallu éclairer la pente pour que certaines personnes puissent descendre, non sans danger.*

*Nous avons décidé d'informer l'hôpital, ne sachant pas encore s'il y avait des blessés, afin que le personnel en congé ce jour là puisse être contactés pour intervenir rapidement au cas où il y ait besoin de secours sur place ».*

*Sur la poche d'eau formée aux Valettes suite au débordement du Durnand : « Suite à quelques informations sur la hauteur possible du barrage, estimée à 8m, on pouvait imaginer que la poche d'eau qui était à l'arrière était importante, à 21h45 nous avons pris la décision d'aviser la population d'une évacuation possible et que tout devait être mis en oeuvre en ville pour faciliter l'évacuation et l'accueil de la population. En même temps, nous avons donné l'ordre aux différentes installations hydroélectriques situées à l'amont de ne plus faire de lâcher d'eau (purge, chasse des différentes prises d'eau) de sorte qu'on n'ait pas encore une arrivée massive d'eau dans ce lac qui était encore en formation ».*

## Organisation

*« À 22h, nous avons avisé tous les pompiers et toute la protection civile de la région de se mobiliser et de se tenir à disposition du commandement et à 22h15, nous avons pris la décision d'évacuer la ville, parce que nous n'avions pas de renseignements précis et qu'il valait mieux mettre la sécurité au premier plan, avant de penser au confort des habitants, qui devaient être probablement sortis du lit...*



*Un certain nombre de renseignements arrivaient au poste de commandement et, en fonction de la configuration de la ville (photo aérienne ci-dessus), nous avons pris la décision d'évacuer certains quartiers. Depuis l'amont vers l'aval la Dranse s'écoule au sud ouest de la ville. Tous les quartiers relativement peuplés en bordure de cette rivière étaient susceptibles d'être inondés ».*

La Dranse à Martigny

*« L'ordre d'évacuation était assez facile à donner, nous avons fait retentir les sirènes et puis nous avons envoyé la protection civile et les membres du corps de police avec des installations de sonorisation. A ce propos, il y a **certain points faibles** : nous avons constaté par exemple que nos policiers ne savaient pas du tout utiliser ce type d'équipement, ils le faisaient en roulant et les gens sortant des maisons n'entendaient que des bribes de ce qui se*

*disait, puisque la phrase dite se terminait peut-être à 100 m de son point de commencement ; les gens n'entendaient que des bribes. Il n'y a donc pas eu d'information précise pour que les gens sachent exactement que faire. Il y avait donc des amas de population qu'il fallait renseigner.*

*D'autre part, il y a eu quelques difficultés avec les chaînes de radios. La chaîne officielle de service public, n'ayant pas reçu de renseignements corrects de la police cantonale, n'a pas diffusé tout de suite les informations. D'autre part il n'y avait plus de journaliste présent après 21h au studio de la chaîne régionale, qui est beaucoup écoutée. Il a fallu retrouver un journaliste pour donner des informations liées à l'évacuation*

*Pendant ce temps, nous avons commandé certaines machines de chantier. Avec l'expérience de l'événement pluvieux d'octobre 2000, nous savions que la Dranse pouvait charrier énormément de troncs d'arbre. Or sur ce cours d'eau, le tablier d'un certain nombre de ponts est relativement bas. Nous avons déjà pris la décision 6 ans auparavant d'amener des machines de chantier, de façon à pousser les troncs vers le bas à leur arrivée pour qu'ils puissent passer sous le tablier.*



La cellule de crise



Personnes évacuées - Centre d'exposition, Martigny

*Nous avons également reçu de l'aide de la part des corps de pompier et de protection civile des communes voisines ».*

*« Une fois l'évacuation faite, nous avons dû enregistrer les personnes. Nous avons par chance le centre d'exposition de Martigny qui était vide à cette période (il accueille un certain nombre de manifestations, dont la foire du Valais qui se tenait quelques temps après), ce qui nous a facilité la tâche. Nous avons pu concentrer toutes les personnes évacuées. Environ 3000 personnes ont reçu l'ordre initial d'évacuation, mais toutes ne sont pas arrivées au centre car un ordre a été donné par la suite de ne pas évacuer les étages supérieurs. Le plan d'évacuation concerne normalement tous les bâtiments, car il est surtout considéré pour des eaux se trouvant au niveau maximum durant une période relativement importante. Or dans ce cas, il s'agissait de craindre une vague, qui d'après les premiers calculs aurait pu atteindre 6 ou 7 m de haut (par la suite cela s'est avéré un peu exagéré), mais cette vague ne faisant que passer, il était totalement inutile d'évacuer les étages 3 à 6 (ou 8). Donc nous avons même évacué un peu plus de monde que nécessaire.*

*Les gens se sont déplacés dans la bonne humeur, mais cela représentait beaucoup de monde : nous avons inscrit environ 1200 personnes. Ceci s'est fait dans le calme. La grande difficulté a été d'avoir les informations techniques, qui n'étaient pas disponibles parce que les gens présents sur le terrain n'avaient pas la possibilité de les fournir de façon précise et le renseignement à la population était naturellement un peu lacunaire.*

*A 1h35 dans la nuit, suite au retour des spécialistes (notamment de Mr Rouiller et de son équipe du service des cours d'eau), les renseignements qui nous ont été donnés étaient suffisamment précis pour que l'on puisse juger qu'il ne pouvait plus rien se passer de grave. J'ai donc pris la décision, en tant que maire de la commune, d'autoriser la population à réintégrer ses foyers ».*

## Constats

« Lors de cette évacuation, par chance il ne s'est agit que d'un 'exercice grandeur nature'; il n'y a pas eu de dommages matériels ni humains. On se rend compte en de telles occasions combien il importe de faire des exercices, parce les rouages ne sont pas naturellement huilés. Beaucoup d'intervenants sont présents et la coordination de nombreuses activités pose des problèmes. Certains se sentent obligés de prendre des initiatives qui ne leur appartiennent pas et peuvent désorganiser les services voisins. Je crois qu'il est indispensable que la police, les spécialistes et les personnes chargées de l'approvisionnement dans une situation d'évacuation se consacrent chacun à leur tâche et qu'une seule petite unité s'occupe de la coordination. ».

## Les dégâts



Engravement...



...et érosion

## Conclusion

« Encore une fois, nous avons besoin de renseignements des spécialistes qui soient les plus fiables possibles. Par rapport à la vie humaine, c'est peu de chose lorsque l'on dit qu'on va passer 3 ou 4 heures loin de son foyer, mais la question que se posaient beaucoup d'habitants était de savoir dans quel état ils allaient retrouver leurs habitations, si l'inondation se produisait effectivement. C'était donc une question basique qui était posée ».

### Discussion (4) – Gestion de la crise torrentielle du Durnand de juillet 2006

**E. Leroi** : « Qu'est-ce qui a été fait depuis ? On a vu que la zone de dépôt à l'amont était instable, donc vous êtes susceptibles d'avoir d'autres phénomènes du même type. Est-ce que vous avez mis cette zone sous surveillance ? »

**J.-D. Rouiller** : « Les analyses sont en cours avec mon collègue D. Béro. Les diverses visites du site ont démontré que dès l'instant où l'on était entré dans une période plus froide les conditions n'étaient plus réunies pour qu'un tel phénomène se renouvelle encore cette année. En l'occurrence, il n'y avait pas de mesures particulières à prendre si ce n'est la mise en place d'une surveillance en cas de nouvelles précipitations exceptionnelles. Pour l'instant, un groupe de bureaux est en train de réaliser la carte de danger EAU du torrent et d'analyser les causes exactes de l'événement pour savoir dans quelle mesure et comment on devra prendre en compte ce type de risque vis-à-vis des zones d'activité humaine menacées. Actuellement, 5 ou 6 glaciers rocheux à risque ont été recensés. Au total ce nombre ne devrait pas dépasser dix pour l'ensemble du Canton.

**Dominique Béro** (Etat du Valais, service des routes et des cours d'eau, Sion) : « Les deux enjeux liés au Durnand sont premièrement les risques d'embâcle et de rupture pour la ville de Martigny et,

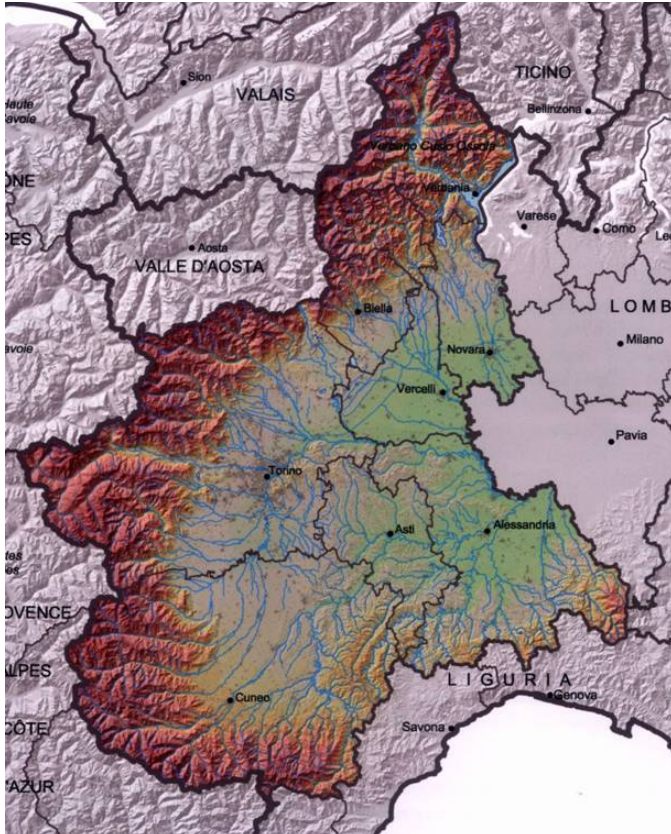


deuxièmement, la ligne de chemin de fer. On a évalué que le risque d'embâcle était important mais que le risque de rupture était moindre, puisque ce type de matériaux a tendance à former un barrage relativement large, avec peu de chances de se rompre tout de suite. Il a donc été décidé de prendre le temps de bien analyser la situation. Concernant l'autre risque, pour le train, un système de détection et d'alarme va très rapidement être mis en place ; à moyen terme des mesures structurales durables et intégrées pour la protection de la ligne de chemin de fer et les autres infrastructures seront mises en place ».

### 2.3.4 Landslide monitoring in Piemonte

Giacomo RE FIORENTIN (*ARPA Piemonte, Centre régional pour la recherche territoriale et géologique*)

Le règlement d'organisation de l'ARPA Piémont, régi par la loi régionale n°60 de 1995, prévoit, entre autre, la mise en place du Centre Régional pour la Recherche Territoriale et Géologique. Cette structure s'occupe de la connaissance du territoire au sens large, avec pour objectif principal de développer les méthodologies et les instruments pour l'évaluation, la gestion et la réduction des risques géologiques et environnementaux.

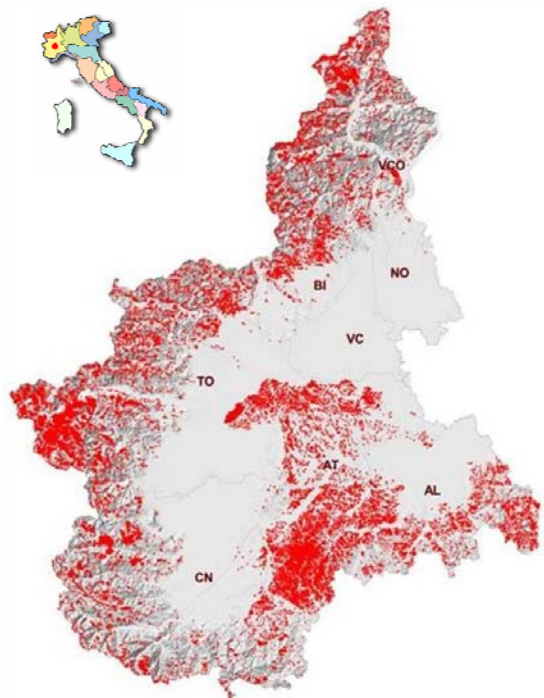


Pour le contrôle des processus d'instabilité liés à l'activité des versants, le centre gère le Réseau Régional de Contrôle des mouvements de Versant (RERCOMF), qui intervient de façon ponctuelle sur un mouvement identifié, à travers l'installation d'instruments de mesures.

Le territoire piémontais couvre une surface d'environ 25000 km<sup>2</sup>, dont 75% de zones de montagnes et de collines (200 sommets de plus de 3000m, quelques uns de plus de 4000m) ; 77% des communes sont dans ces zones de montagnes (29%) et collines (48%), pour une population de 4,5 millions d'habitants.

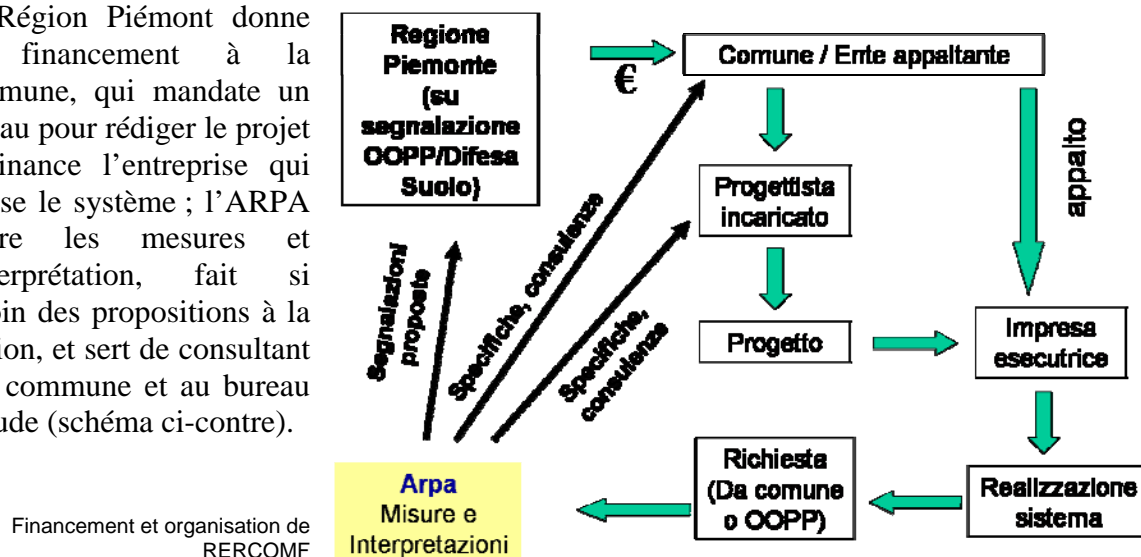
Dans le projet IFFI, près de 34 000 mouvements de terrain ont été reconnus et analysés (figure ci-contre). Ces phénomènes couvrent 14% du territoire de montagnes/collines et environ 9,36% du territoire régional entier. Parmi eux, 300 glissements sont instrumentés et suivis par l'ARPA Piémont.

Dans la majorité des cas, les systèmes de contrôle sont installés par la commune seule grâce à un financement régional. Tous les systèmes de contrôle, pour être efficaces, nécessitent de l'attention, de la maintenance et du contrôle sur une période de temps de plusieurs années. La gestion des systèmes de contrôle des mouvements de versant et leur interprétation nécessitent un personnel spécifique, avec des connaissances technico-scientifiques.



Les communes disposent rarement du personnel technique pour directement effectuer et interpréter les mesures nécessaires et ont difficilement les ressources économiques pour faire appel dans la durée à des experts extérieurs. Pour cela, la Région Piémont a institué après 1994 la structure adaptée, appelée RERCOMF ; son activité se présente comme un service de la structure technique régionale (« Ente »), fourni aux collectivités locales dans le domaine du contrôle des mouvements de versant.

La Région Piémont donne un financement à la commune, qui mandate un bureau pour rédiger le projet et finance l'entreprise qui réalise le système ; l'ARPA assure les mesures et l'interprétation, fait si besoin des propositions à la Région, et sert de consultant à la commune et au bureau d'étude (schéma ci-contre).



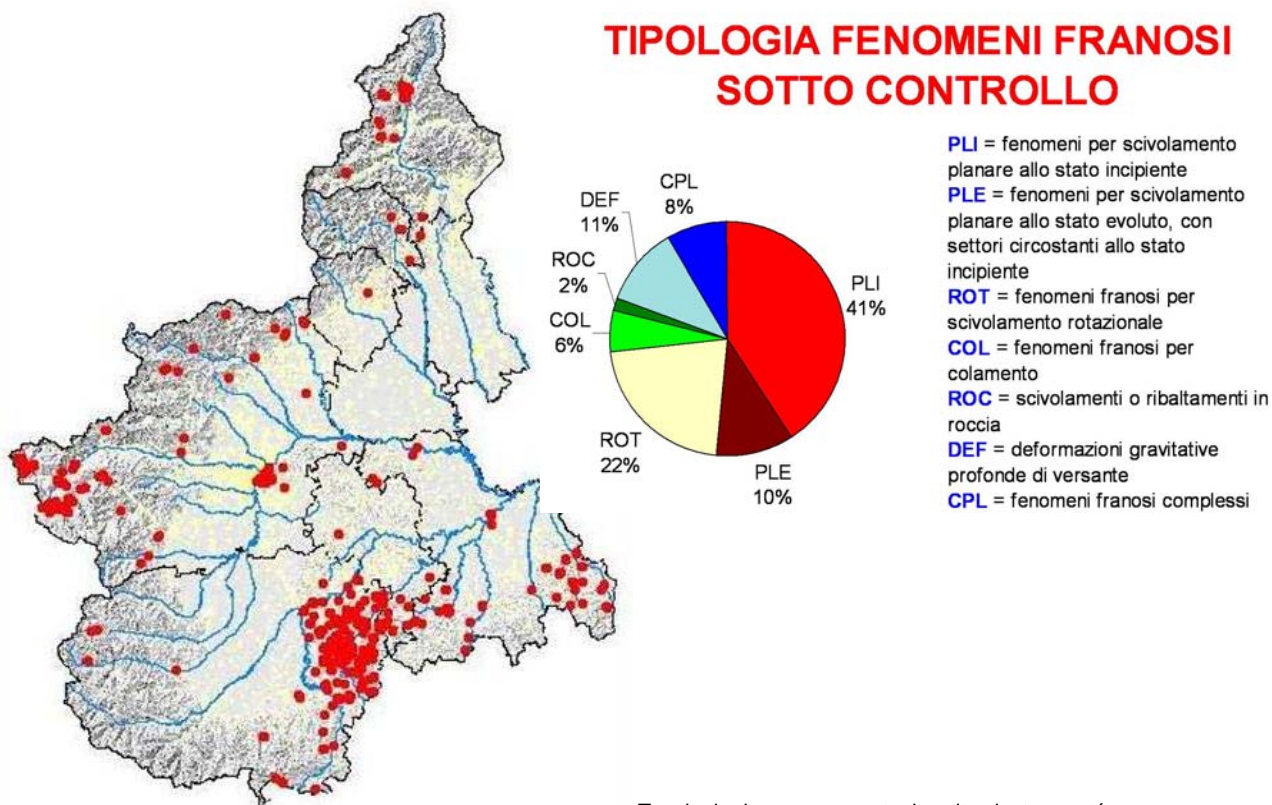
Les objectifs de RERCOMF sont les suivants :

- garantir que l'instrumentation, installée sur financements publics, soit utilisée au mieux et entretenue de façon adéquate ;
- évaluer l'évolution dans le temps des phénomènes de glissement/éboulement ;
- informer, à intervalles de temps réguliers, l'autorité compétente sur l'évolution du phénomène (commune, direction régionale, office provinciale, protection civile...)
- promouvoir le développement des ressources destinées au contrôle instrumental des mouvements ;
- proposer, sur la base des connaissances du Centre (projet IFFI, etc.), l'installation de nouveaux systèmes de contrôle ;
- fournir un support de décision aux autorités locales dans le cas d'une évolution du phénomène.

Ses activités sont multiples :

- prendre en charge l'instrumentation mise en place par des organismes variés ;
- rassembler toute la documentation disponible sur les sites instrumentés ;
- effectuer, ou faire effectuer par une entreprise extérieure, les mesures instrumentales ;
- faire l'interprétation des résultats et évaluer le danger (aléa) et le risque sur le site ;
- transmettre les résultats et les observations à la structure concernée ;
- fournir une consultation technique aux communes ou autre entité concernée en phase de projet et / ou d'installation de nouveaux systèmes de contrôle ;
- promouvoir la recherche et l'expérimentation de nouveaux systèmes de contrôle, par convention ou accord avec les autres entités qui s'occupent de la surveillance des mouvements de terrain ;
- proposer l'installation de systèmes de surveillance sur des phénomènes de mouvements dont l'évolution peut générer des risques pour les personnes ou les infrastructures.

RERCOMF suit 300 sites instrumentés de manière active, plus d'autres en phase de projet ou de réalisation ; sur 125 sites au moins un instrument a relevé un mouvement du terrain :



L'instrumentation en place comprend :

- 680 tubes inclinométriques (22 000 M environ ;
- 400 tubes piézométriques (dont 126 automatiques, 20 en télé-transmission) ;
- 120 centrales d'acquisition de données ;
- mesures de « giunti » (joints, fractures), clinomètres, extensomètres ;
- 10 réseaux topographiques optiques (dont 3 automatisés) ;
- 20 réseaux GPS.

Le réseau est de type « extensif ». La majorité des sites ne font intervenir que peu d'instruments, à quelques exceptions près, comme les mouvements de versant de Rozzone et Ceppo Morelli, qui ont une instrumentation complexe reliée à système central qui gère des fonctions d'alerte.

#### Fonctionnement :

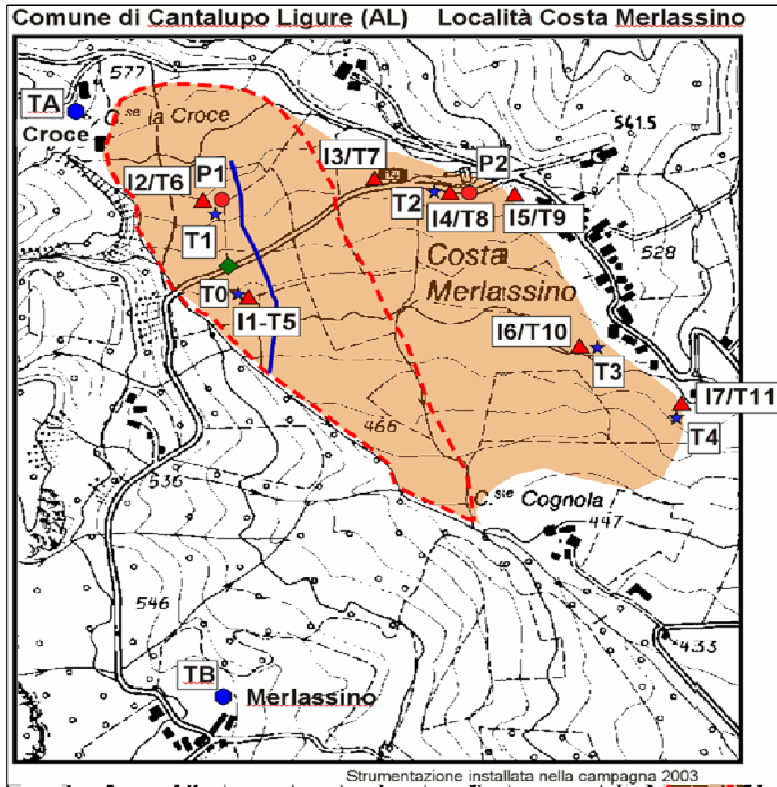
L'Arpa assure les mesures topographiques, GPS, distomètres ; il y a des contrats de sous-traitance avec des entreprises privées pour les centrales d'acquisition automatiques et des mesures GPS (Hydrodata, Risorse Idriche), pour les mesures inclinométriques (O.T.R) ; il existe également des accords et conventions avec CESI/AEM pour le système de surveillance de Rosone, ou avec d'autres gestionnaires comme l'A32 tunnel du Fréjus pour Ceppo Morelli. RERCOMF valide l'ensemble des résultats, puis les communique aux différentes autorités : administrations communales et provinciales, Communauté montagne, Protection Civile, OO PP Région, ... Le budget de l'année 2006 s'élève à environ 350 000 Euros.

Pour la collecte et l'archivage des données, un logiciel spécifique a été réalisé en collaboration avec le CSI Piémont. Adapté aux exigences spécifiques de cette activité, il permet la collecte des données, leur présentation, leur analyse préliminaire, et la production de tableaux, diagrammes et rapports (voir *infra*).








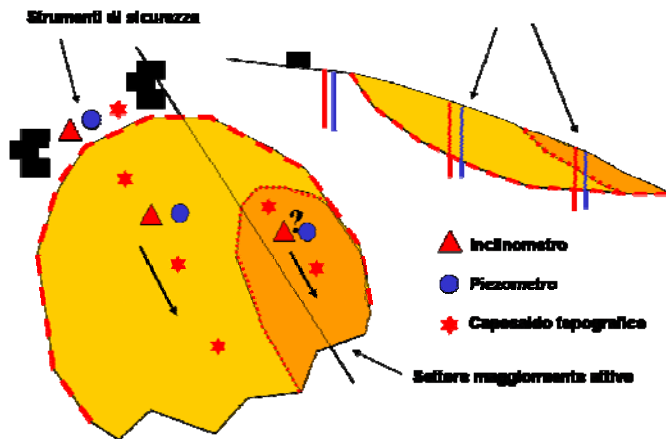






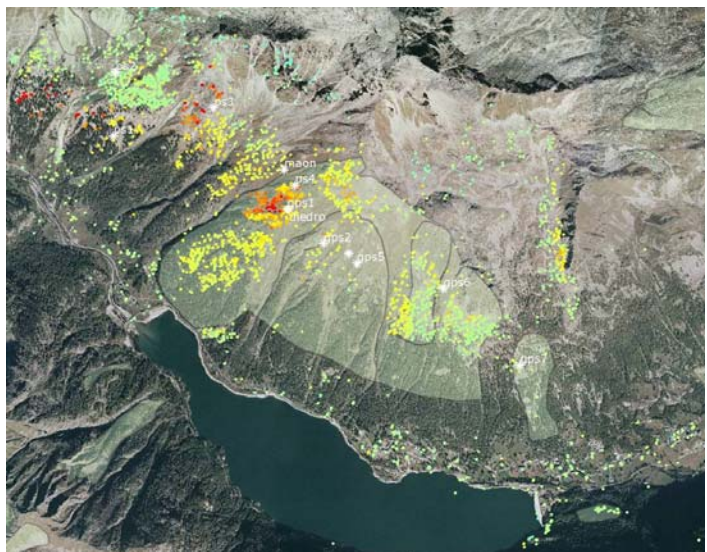
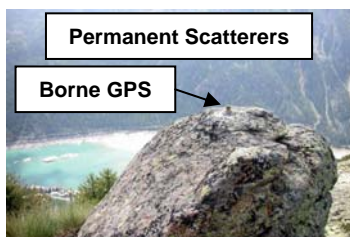
Normalement, plusieurs systèmes de surveillance sont associés afin d’avoir une compréhension de l’évolution du phénomène (ex. ci-contre).

-  Caposaldo topografico fisso
-  Caposaldo topografico
-  Inclinometro
-  Piezometro
-  Sondaggio non attrezzato (denominato extra o lx)



Instrumentation

RERCOMF travaille sur des tests sur les nouvelles technologies : interférométrie satellitaire, GPS, Réflecteurs Permanents (*Permanent Scatterers* : cf. présentation d’A. Colombo § 6.3). Le Centre assure la validation de ces systèmes.



Malgré tout, une des activités principale de RERCOMF est d'installer l'instrumentation et surtout de faire en sorte que la maintenance soit correctement assurée. Exemples : un rapport indique qu'un tube inclinométrique présente une interruption ; s'agit-il de vandalisme ? RERCOMF intervient par une inspection dans le forage avec télécaméra, qui met en évidence un endommagement du tube par un éboulement à la profondeur 13,5m (photo ci-dessous à gauche). Un autre rapport indique qu'un piézomètre n'a pas pu être trouvé par le technicien : il a été oublié et est recouvert de matériaux abandonnés (photo de droite).



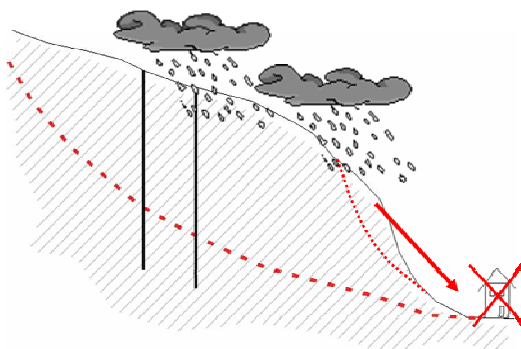
#### Limites de la méthode :

La surveillance des mouvements de terrain présente des limitations de caractère général, liées aux caractéristiques intrinsèques (« génétiques ») des mouvements et à leur évolution. On observe en général des périodes de repos ou de mouvements lents, et des accélérations ou activations paroxystiques, liées à des facteurs extérieurs de déclenchement.

Au Piémont, le principal facteur déclenchant est représenté par les pluies intenses ou prolongées. La surveillance ne permet pas de prévoir quel phénomène d'instabilité, ou quelle portion d'un phénomène, peut s'activer avec l'arrivée de telles précipitations, même si on peut prévoir leur intensité et leur durée.

Les nombreux phénomènes d'instabilité à déclenchement rapide qui concernent une portion limitée de la couverture superficielle, bien qu'ils soient fréquents et dangereux, ne peuvent pas être instrumentés à cause de « il largo margine di alea nell'ubicazione » et de leur déclenchement trop rapide.

De nombreux grands mouvements de versant alpins présentent un schéma d'évolution avec des mouvements complexes de certaines parties plus ou moins limités et une évolution rapide de la partie frontale lors de pluies intenses ou prolongées. Les systèmes de surveillance, s'ils permettent de comprendre l'évolution complexe du mouvement, ne sont pas en mesure de prévoir, ni dans le temps ni dans l'espace, le déclenchement du phénomène rapide au front (schéma ci-contre).



#### **Question**

**E. Leroi :** RERCOMF s'occupe-t-il des gestions d'alerte ?

Réponse : Non

### 3 Télésurveillance des sites instables : structure des systèmes de télésurveillance et seuils d'alarme

#### 3.1 Présentation des résultats du projet et questions soulevées

Pascal ORNSTEIN (CREALP)

Pascal Ornstein présente les résultats du projet en matière de télésurveillance des sites instables, à savoir « Evaluation des 3 systèmes de télésurveillance en usage sur le territoire des partenaires : EYDENET, GESSRI, GUARDAVAL ». Ces résultats sont présentés dans leur intégralité dans l'**Activité 3 du Guide Pratique**, et sont également résumés dans le chapitre 3 du **Rapport Final**. Nous ne retranscrivons donc ici que les grandes lignes (avec renvois sur les pages correspondantes du Guide Pratique, abrégé **GPA3**) ainsi que les conclusions et réflexions les plus marquantes.

L'auteur remercie pour leur étroite et fructueuse participation à ce travail M. Broccolato (région VdA), J.-P. Duranthon (CETE Lyon), A. Tamburini (CESI-STA).

#### Définitions générales

De façon très schématique, on peut considérer que tout ce qui est surveillé de loin fait l'objet d'une télésurveillance. La télésurveillance vise à récupérer à distance (souvent à grande distance) une information, qui fera l'objet d'un traitement et sera sanctionnée par une prise de décision (faut-il intervenir ou non ?).

Historiquement, ce sont les secteurs d'activité à risque (banques, administrations civiles et militaires, entreprises à haut risque) qui ont utilisé les premiers la télésurveillance ; aujourd'hui, la plupart des secteurs d'activités sont concernés (télésurveillance industrielle, médicale, agricole, commerciale, domestique, etc.).

Schématiquement, l'architecture générale d'un système de télésurveillance intègre trois composantes :

- une couche 'acquisition des données' : prise de mesure ;
- une couche 'agrégation des données' : stockage et diffusion des informations via des serveurs informatiques ;
- une couche 'exploitation des données' : analyses, génération d'alarmes, rapports...

Classiquement, un projet de surveillance consiste, une fois le risque identifié et évalué et les objectifs de sécurité fixés compte tenu du niveau de risque acceptable, à mettre en œuvre un système de surveillance et les consignes de gestion associés pour atteindre ces objectifs. Tout projet de surveillance est, à la fois, soumis et génère des contraintes de moyens.

En région alpine, la télésurveillance est souvent le seul moyen de diminuer objectivement la vulnérabilité des personnes et des biens au droit des sites jugés à risque jusqu'à ce que des mesures de protection durables soient mises en œuvre. Dans ces régions, les contraintes environnementales (topographie, ressources limitées, conditions ambiantes) ont progressivement conduit à la nécessité de se doter d'outils permettant d'assurer le contrôle à distance des sites jugés à risque. L'interruption, ne serait-ce que durant quelques semaines des liaisons routières et/ou ferroviaires, qui constituent l'épine dorsale des vallées alpines, peut avoir d'importantes répercussions sur l'économie des régions frontalières et transfrontalières.

Exemple : Le 31 mai 2006, un éboulement à la hauteur de Gurtellen (canton d'Uri) a bloqué l'autoroute A2 dans les deux directions. L'axe du Gothard, principal axe de transit nord-sud de Suisse (6 mio. de véhicules en 2005), restera finalement fermé durant 1 mois.





« [...] Outre les conséquences tragiques de cet événement, il faut aussi prendre en considération ses effets économiques. Grâce à une étude détaillée, nous sommes en mesure d'estimer les coûts résultant de la déviation du trafic. Ces derniers sont de l'ordre de 10 à 12 millions de francs pour toute la durée de la fermeture [...] »

(Extrait conférence de presse du Touring Club Suisse, juin 2006)

Aujourd'hui, la télésurveillance s'avère un moyen fiable et économiquement intéressant pour limiter les pertes d'exploitation, à travers une gestion plus efficace du risque.

L'objectif principal de la télésurveillance des versants instables est donc de fournir, à distance, des informations sur l'évolution d'un phénomène de façon à pouvoir :

- Détecter l'accélération plus ou moins brutale du phénomène (« voir venir l'évènement suffisamment à l'avance ») ;
- Prendre, si possible, les mesures de prévention efficaces avant la rupture (estimer le temps de préavis avant la rupture).

D'un point de vue fonctionnel, il s'agit de systèmes automatiques permettant d'effectuer le monitoring à distance d'un ou plusieurs sites jugés à risque (potentiel ou avéré) équipés de stations de mesures automatisées avec télétransmission et pouvant combiner différents types de capteurs physiques (météorologiques, hydrométriques, extensométriques, géodésiques, etc.).

### Evaluation des 3 systèmes EYDENET, GESSRI, GUARDAVAL

A travers la confrontation des solutions implémentées et la mise en commun des expériences acquises par les 3 partenaires via la conception et l'exploitation de leur système de télésurveillance, les initiateurs du projet (Cete de Lyon pour Rhône-Alpes, Direction de la protection du territoire pour RAVA, CREALP pour le Valais) souhaitaient pouvoir fournir aux maîtres d'œuvre en charge de la mise en place d'un système de télésurveillance d'une part des éléments de réflexion pour l'analyse et l'expression précise de leurs besoins (cahier des charges), d'autre part des critères de dimensionnement, techniques mais aussi économiques, enfin des orientations pour les choix de conception et le choix des technologies disponibles. Cette évaluation doit permettre de dégager les composantes communes d'un système de télésurveillance dédié aux risques hydro-géologiques en région alpine.

La démarche mise en oeuvre repose sur une analyse détaillée et une comparaison multicritères des 3 systèmes, indépendamment de tout jugement de valeur: une quarantaine de critères ont été examinés, regroupés en 6 grands thèmes de réflexion :



(Voir figure 3.1 du [GPA3](#), p.1, pour le détail exhaustif des critères).

### Les sites surveillés (Rapport Final p.2-3)

Le type de site surveillé est révélateur des capacités du système de télésurveillance, en terme d'intégration de dispositifs de mesures, d'adaptabilité vis-à-vis des contraintes de site (topographie, taille du site, fréquence de mesures), de sûreté de fonctionnement (enjeux), de la longévité du système... Chaque site est décrit selon le type de phénomène, son volume, les enjeux, la durée du monitoring, l'instrumentation en place... Les volumes potentiellement mobilisables vont par exemple de quelques centaines (sites Suisses surveillés par GUARDAVAL) à quelques millions de m<sup>3</sup> (Séchilienne, surveillé par GESSRI, voir § 3.2.1 p. 65).



### L'architecture des systèmes

Elle dépend à la fois des choix de conception et des contraintes fixées. La comparaison sur ce point à nécessité la définition d'un mode de représentation symbolique exprimant de manière schématique mais suffisamment fidèle l'architecture des trois systèmes. Pour ce faire, chaque système a été décomposé en briques fonctionnelles élémentaires dont l'ensemble constitue une collection de composants standardisés communs aux trois dispositifs (*GPA3* p.5). L'architecture de chaque système a ensuite été reconstituée à partir de ces composants offrant une représentation schématique unifiée (Synoptiques, *GPA3* p.6-7) autorisant la comparaison entre systèmes et permettant de mettre en évidence les spécificités de chacun. C'est ainsi que le système GESSRI se caractérise par une architecture très distribuée avec des contraintes fonctionnelles très élevées en terme de fiabilité et de vulnérabilité se traduisant par une très forte redondance des systèmes en termes d'acquisition, de stockage et d'exploitation des données. EYDENET se caractérise par des modes de transmission multiples et correspond à un système couplé intégrant un module d'exploitation des données : INDACO et un module d'aide à la décision : EYDENET. GUARDAVAL quant à lui est un système très compact, centralisé, qui privilégie la transmission des données par liaison GSM et l'accessibilité des données via l'Internet.

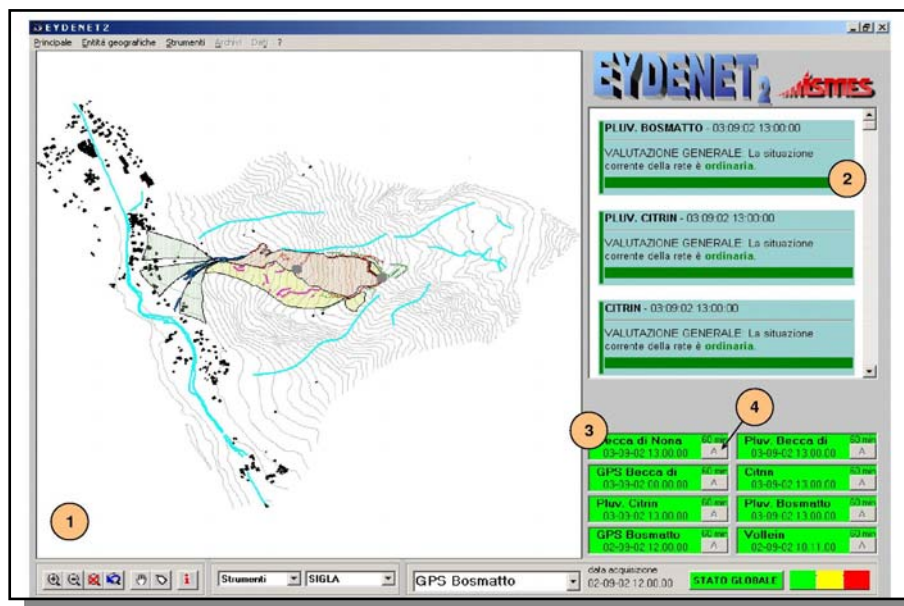
### Acquisition des mesures (*GPA3* p. 8-9)

Les dispositifs d'acquisition de mesures conditionnent dans une large mesure le développement matériel et logiciel du système de télésurveillance, son architecture, son exploitation (sécurité de fonctionnement), sa polyvalence vis à vis des instruments disponibles sur le marché, son évolutivité (capacité à intégrer de nouveaux dispositifs de mesures, gérer de nouveaux types ou formats de données). Ils déterminent aussi pour une bonne part le coût du système, que ce soit au niveau de l'achat du matériel de mesure, de l'installation, de l'exploitation ou de la maintenance.

Dans ce domaine, la comparaison a fait ressortir la grande polyvalence d'EYDENET.

### Aide à la décision (*GPA3* p.10-12)

L'objectif est d'assister le responsable de la télésurveillance dans le processus qui va de la mesure à la prise de décision. Les systèmes d'aide à la décision offrent un environnement conçu pour optimiser cette prise de décision, grâce à des outils conçus pour la gestion, l'analyse, la représentation, la modélisation et la diffusion des données. Ce sont des systèmes d'information informatisés, interactifs, flexibles associant divers outils et technologies.



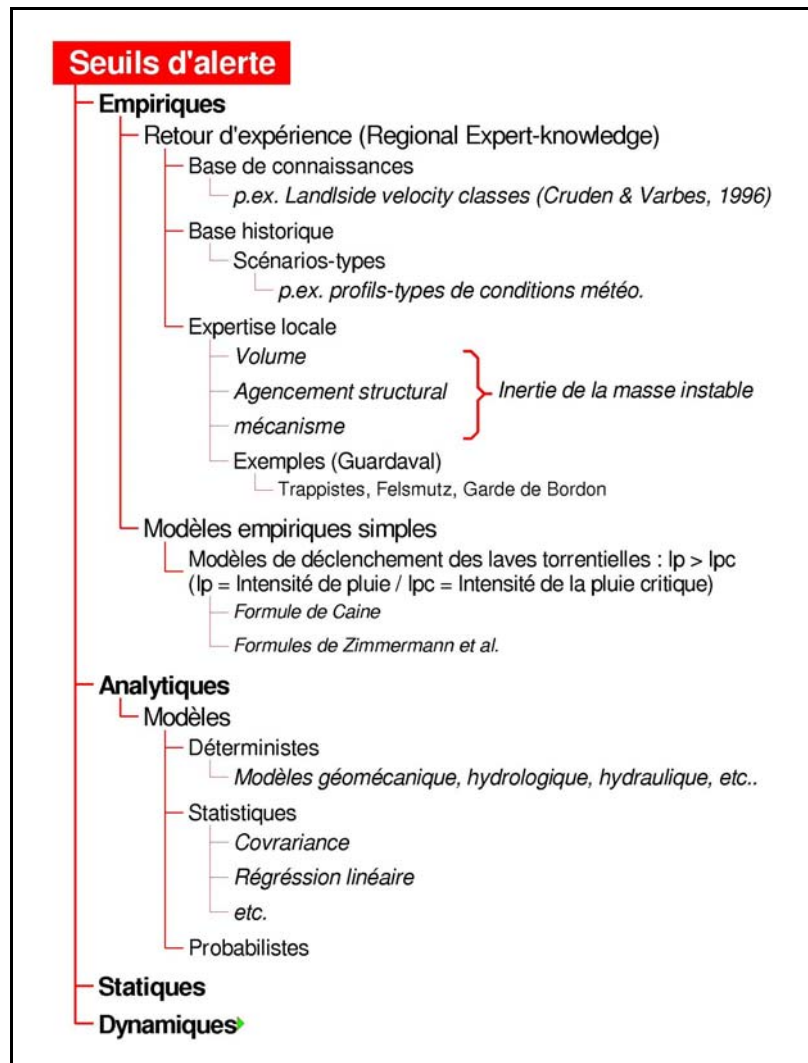
Exemple : Tableau de bord associé au module d'aide à la décision EYDENET intégrant un SIG (1), des messages d'information contextuels en langage naturel (2), un synoptique résumant pour chaque site l'état de fonctionnement du réseau et / ou des différents dispositifs de mesure (3), la possibilité d'accéder aux événements stockés dans la base de donnée historique (4) (A. Tamburini, ISMES 2004)

Cette partie constitue un élément central du travail (voir complexité des éléments pris en compte GPA3 p.19).

Le processus de gestion des alarmes a des implications multiples et doit s'intégrer de manière cohérente dans le dispositif de télésurveillance. Il est entre autre important de bien réfléchir aux ressources impliquées dans cette gestion : ressources matérielles, logicielles et humaines.

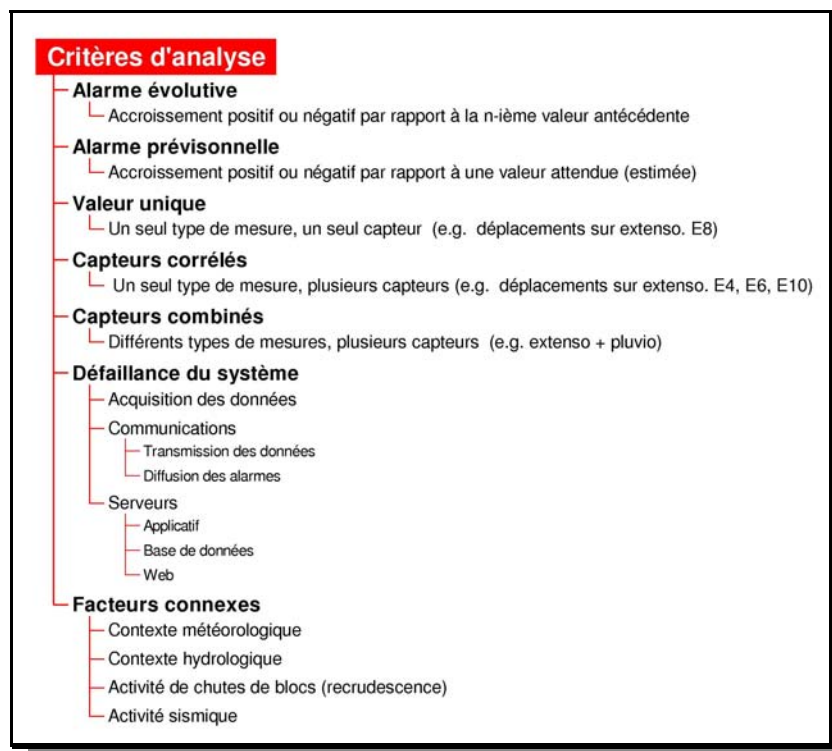
Pour ce qui concerne les **seuils d'alerte**, il existe des domaines où ces seuils sont bien définis (par exemple qualité de l'air). Dans le domaine des mouvements de terrain (phénomènes complexes influencés par de nombreux facteurs), les seuils sont bien souvent fixés au cas par cas, sur la base le plus souvent du retour d'expérience. Cette connaissance empirique peut être implémentée sous différentes formes :

- Base de connaissance : connaissance très aboutie d'un phénomène, formalisée dans une base de données ;
- Base historique : raisonnement par analogie effectué à partir de scénarios passés implémentés dans une base de données (exemple à Séchilienne) ;
- Expertise locale : les seuils sont fixés par des experts (approche la plus développée, mise en œuvre par ex. dans GUARDAVAL).



Extrait de la figure 3.9 (GPA3 p.19) « Cadre de la problématique générale de la gestion des alarmes » :  
Question des seuils d'alerte

**Critères d'analyse** : l'activation d'une alarme est basée sur une analyse des données acquises par le système de surveillance. En fonction du type de mesures effectuées, du degré d'expertise du site, du modèle d'évolution, du nombre de variables associées au comportement du phénomène, les règles d'analyses mises en œuvre peuvent être plus ou moins complexes :



Exemple de critère simple (implémenté dans GUARDAVAL) :

Surveillance de Felsmutz : Seuil d'alerte = 1 mm/h pour tous les capteurs.

Exemple de critère plus complexe (implémenté dans EYDENET)

Capteurs corrélés : « ... *Si la vitesse moyenne des dernières 24 heures est supérieure à  $V1$  mm/h (pour extensomètres E4, E6, E10) et à  $V2$  mm/h (pour extensomètre E8) pour deux mesures consécutives on passe en état de pré-alerte ...* »

### Champ d'utilisation du système (GPA3 p.27-29)

Le choix d'une solution existante ou l'implémentation d'un nouveau système de télésurveillance implique, outre les choix conceptuels, de définir suffisamment tôt les différents objectifs du système : objectifs actuels et futurs, objectifs généraux et particuliers. Ces choix de dimensionnement vont déterminer le champ d'utilisation du système, qui est défini en fonction de :

- La taille des projets : elle est estimée à partir de la surface des sites, des volumes mobilisables, des enjeux économiques, des installations techniques (nombre de stations, capteurs, dispositifs de communication), des infrastructures particulières ;
- La durée des projets : durée effective, durée prévisionnelle.

### Adaptabilité / Réactivité du système

En terme de performances et conjointement au champ d'utilisation, il convient également de prendre en compte dans la réflexion les critères d'adaptabilité et de « réactivité » du système.

L’adaptabilité peut être définie comme la capacité du système à s’adapter à l’évolution des besoins et/ou à un contexte d’exécution changeant (p.ex. nouveau site de surveillance, nouvel environnement de mesure, nouvelles exigences de mesure, etc.)

La réactivité est une mesure de l’effort nécessaire pour répondre à ces besoins. Elle correspondra au délai de réaction entre l’apparition d’un nouveau besoin (p.ex. raccordement d’une nouvelle station de mesure) et la mise en œuvre opérationnelle de la réponse adaptée (activation de la nouvelle station de mesure au sein du dispositif de télésurveillance).

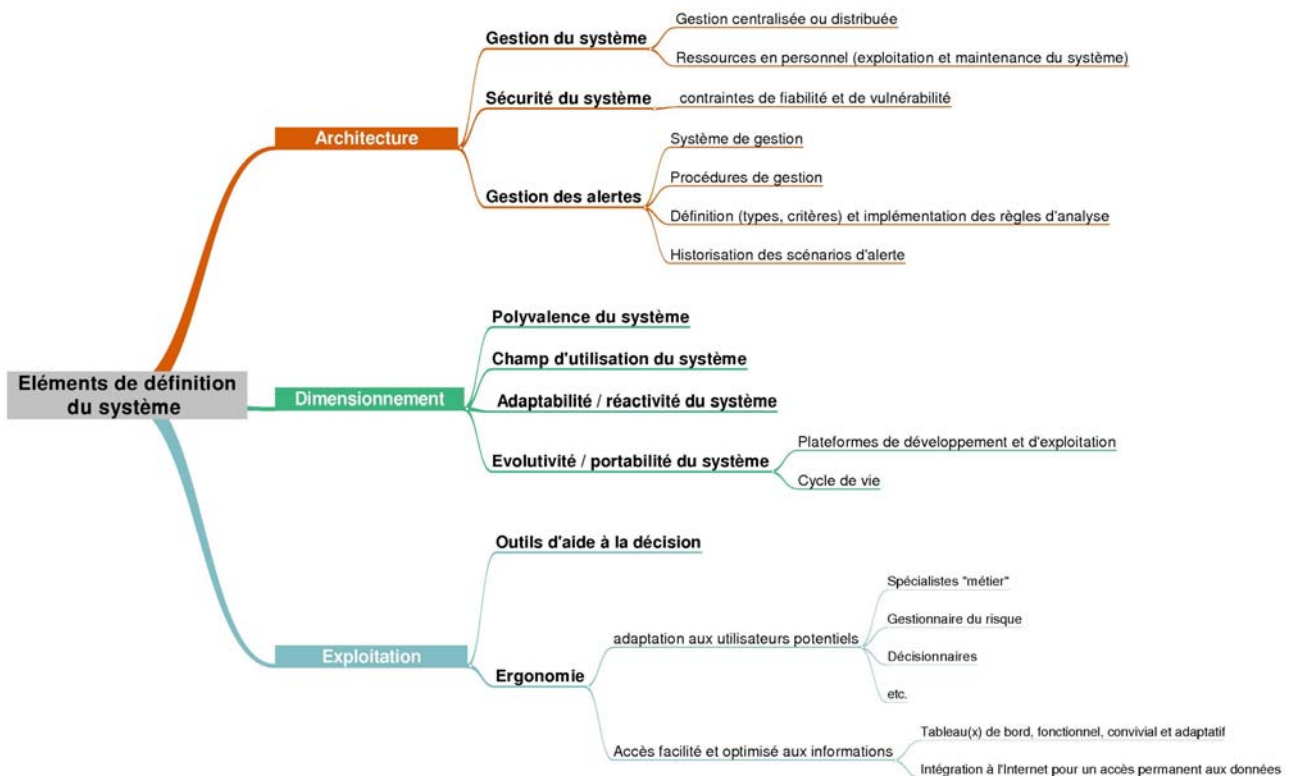
### Conclusions

Le comparatif des 3 systèmes de télésurveillance mis en œuvre par les partenaires du projet RiskYdrogeo a permis d’identifier les caractéristiques et spécificités de chacun. Ces éléments doivent permettre à un maître d’œuvre de profiler le système offrant le meilleur compromis entre les avantages et inconvénients des solutions mises en œuvre (cf. tab. 2) ceci compte tenu des objectifs recherchés et des moyens à disposition (voir **GPA3** p. 30 pour le détail). Les principaux « plus » identifiés pour chacun des trois systèmes sont les suivants :

- L’aide à la décision, la gestion évoluée des alertes pour EYDENET ;
- La sûreté de fonctionnement, la gestion évoluée des alertes pour GESSRI ;
- L’intégration à Internet, la réactivité et l’adaptabilité pour GUARDAVAL.

Les « inconvénients » s’entendent surtout en terme de coût et de contraintes générées, non en terme de performance technique.

Une des vocations de cette évaluation était aussi d’identifier les éléments de définition d’un système de télésurveillance adapté à la gestion des risques hydro-géologiques. Les éléments ci-dessous sont apparus comme les plus importants à prendre en compte dans ce cadre spécifique :





En conclusion, le développement et/ou la mise en exploitation d'un système de télésurveillance est une démarche exigeante et complexe impliquant des :

- Compétences multiples : 'métier', informatique, télécommunications, métrologie, etc. ;
- Choix multiples : technologiques, conceptuels, économiques (solution existante ou développement spécifique), politiques ;
- Contraintes multiples : fiabilité, vulnérabilité, évolutivité (cycle de vie).

D'où l'importance d'effectuer une véritable **analyse préalable des besoins** pour aboutir à l'élaboration d'un véritable **cahier des charges** : dimensionnement du système, identification des contraintes liées à son implémentation, son déploiement et son exploitation. Une première version de ce cahier des charges a été réalisée dans l'*Activité 4* de ce projet (Inventaire des méthodes et instrumentations).

#### **Discussion (5) - Télésurveillance**

**E. Leroi** : « Le travail présenté ne fait pas apparaître la notion de temps, le temps nécessaire à l'installation. Or c'est un problème récurrent pour les décideurs : comment réagir face à une menace nouvelle, que recommander dans l'immédiat, à court terme (quitte à évoluer ensuite vers quelque chose de plus complexe) ? ».

**P. Ornstein** : « Un des points importants est de réaliser une analyse compétente des besoins, non seulement immédiats mais aussi futurs, afin de dimensionner très tôt le système pour le bon champ d'utilisation. Il faut en particulier considérer avec une attention particulière l'adaptabilité et la réactivité du système ».

**J.M. Vengeon** : « Il me semble qu'il faut distinguer 2 cas de figure : soit on est dans une région déjà couverte par un système de télésurveillance (RAVA, Valais), et il ne s'agit que de rajouter une terminaison au système existant, soit non et tout est à développer. »

**P.Ornstein** : « La force d'un système est justement de pouvoir aborder ces 2 problématiques. Cela doit être intégré très tôt dans la conception, pour pouvoir accepter un nouveau site ou déplacer le système tel quel sur un autre site (portabilité). Un système 'rustique', doté d'une architecture minimale, pourra répondre à des besoins « nerveux » ; un système plus élaboré pourra évoluer dans l'espace et dans le temps ».

**J.M. Vengeon** : « La Valais a-t-il été sollicité pour exporter son savoir-faire ? ».

**P. Ornstein** : « Non, par contre nous avons déjà été sollicités à différentes reprises pour présenter l'architecture du système et toute la réflexion qui le sous-tend ».

**J.P. Duranthon** : « Parmi tout ce qui a été présenté, il faut quand même toujours prendre en compte l'ampleur du site surveillé par rapport au coût de la surveillance. Même si un système est portable, il doit rester adapté aux enjeux ».

**P. Raviol** : « L'aboutissement de ce travail est-il de fournir, et serait-il souhaitable de la faire, un guide des solutions de (télé)-surveillance envisageables en fonction du type de sites à surveiller : aura-t-on des éléments de décision « théoriques », au-delà de la connaissance des avantages et inconvénients des trois systèmes ? ».

**P.Ornstein** : « L'objet du travail était de fournir aux personnes susceptibles de concevoir un système de télésurveillance des points de départ pour leur réflexion : que faut-il prendre en compte très tôt dans la conception du système, sans parler des questions qui restent encore très ouvertes comme les seuils d'alerte (quelles valeurs limite définir, quelles règles d'analyse implémenter) ? Il n'est pas question de

fournir de réponses clé en main, car il y a autant d'avis que de systèmes, ni d'établir un catalogue des solutions les plus adaptées, ce serait l'objet d'un autre projet. Par contre, l'Inventaire des méthodes et Instrumentation (*Guide Pratique, Activité 4*) fournit un bon complément à ce travail sur la partie acquisition de mesures ».

**L. Effandiantz** (Cete Lyon) : « Remarque : certaines fonctionnalités présentées dépendent étroitement de l'environnement technique du système. Par exemple, pour transmettre les données en ligne sur Internet, il faut disposer de l'ADSL sur le site, ce qui n'est pas toujours le cas ».

**P.Ornstein** : « Effectivement, c'est une des questions qu'il faut se poser : les ressources sur le site sont-elles adaptées aux moyens de transmission choisis ? ».

**J.M. Vengeon** : « En Valais, y a-t-il des sites surveillés qui ne sont pas reliés à GUARDAVAL ? En France, de nombreux sites télésurveillés ne sont pas suivis par GESSRI. Cela biaise peut-être la comparaison : il y aurait plusieurs systèmes individuels à mettre en parallèle dans cette étude ».

**P. Ornstein** : « Dorénavant, tout nouveau site sur lequel les enjeux l'impose est systématiquement raccordé à GUARDAVAL. Il existe bien sûr des sites surveillés par des mesures manuelles, mais de moindre ampleur en terme d'enjeux. Il faut garder à l'esprit que le développement des systèmes s'étale sur plus de 15 ans (1988 pour les débuts de GESSRI, 2003 pour GUARDAVAL) : cela rentre en compte dans l'évaluation, sur l'expérience des intervenants, les technologies utilisées (qui n'étaient pas les mêmes il y a 15 ans), la maturité du système (GESSRI est beaucoup plus mature, abouti, que GUARDAVAL) ».

**E. Leroi** : « La question de Philippe Raviol me semble centrale : vous avez tous les éléments de structuration de la démarche pour aller plus loin, jusqu'à formuler des conseils, des recommandations, en passant probablement par une typologie des sites surveillés. Cela donnerait une valorisation forte au travail effectué ».

**J.L. Durville** (LCPC, Paris) : « Parmi les contraintes qui président au choix d'un système, le paramètre temps/délai me paraît fondamental : d'une part le temps propre du phénomène (sa vitesse, son temps de préparation) et d'autre part le temps de réponse des autorités pour prendre les mesures adéquates (fermer une route...) et le temps propre du système (qui aujourd'hui est très rapide, avec des systèmes extrêmement performants). Cette notion de délai disponible conditionne le choix du système ».

**E. Leroi** : « Le BRGM (Bureau de Recherche Géologique et Minière, France) a développé un kit de surveillance d'urgence, dont tout le matériel tient dans quelques caisses : installé en une journée sur site, ce système sommaire permet de « combler le hiatus » entre l'apparition du phénomène dangereux et l'installation d'un système pérenne ; il peut calmer l'angoisse des décideurs et donner aux techniciens le temps de concevoir autre chose ».

**P. Ornstein** : « Dans GUARDAVAL, cette contrainte a été intégrée très tôt dans la réflexion ; la réactivité du système est importante : en Valais, un site peut être équipé en une journée ».

### 3.2 Aide à la décision :

#### 3.2.1 Gestion de la Surveillance des sites Rocheux : logiciel Panorama. Application au site des Ruines de Séchilienne

Jean-Paul DURANTHON (CETE Lyon)

##### Avant-propos

Cette présentation ne concerne absolument pas les alarmes et alertes telles qu'elles sont définies sur le site de Séchilienne.

Le système de surveillance GeSSRI date en fait de 2000 (développé à partir de 1999). Avant, le CETE utilisait le logiciel TELE, basé sur un concept de logiciel propriétaire, qui a évolué de 1988 à 2000.

##### Présentation du site de Séchilienne

Le site des Ruines de Séchilienne est situé dans la basse vallée de la Romanche, en rive droite de la rivière, 2,5 km en aval du village de Séchilienne, et 15 km au sud-est de Grenoble. Il borde la Route Nationale 91, accès aux stations de ski des Deux Alpes, Alpes d'Huez, et au col du Lauraret (trafic routier 30 à 40 000 véhicules / jour).

Le mouvement de versant, l'un des plus grands phénomènes instables actuellement recensés dans les Alpes françaises (1500 m de large sur près de 750 m de dénivelée), vraisemblablement initialisé par les phénomènes de décompression inter et postglaciaires, concerne une surface de 70 hectares.

Le mouvement intéresse le versant entre les cotes 600 et 1130 m environ (fond de vallée à 330 m). Le phénomène a été mis en évidence en 1985 (chutes de blocs sur la RN 91). Depuis, on observe (voir *présentation powerpoint* pour les photos, *diapos 8 à 11*) :

- une zone à vitesse élevée (zone frontale) : plusieurs décimètres/an, jusqu'à 11 m d'ouverture de fractures depuis 1986,
- des secteurs à vitesses plus faibles mais significatives, de l'ordre de quelques centimètres par an.

L'aléa de rupture à court terme représente un volume de l'ordre de 3 millions de mètres cubes bordé sur ses marges par un volume sensiblement équivalent pouvant générer des chutes régressives. L'importance des volumes en jeu interdit toute solution confortative.



Vue du versant des Ruines de Séchilienne depuis la station de surveillance de Montfalcon



Vue depuis l'amont

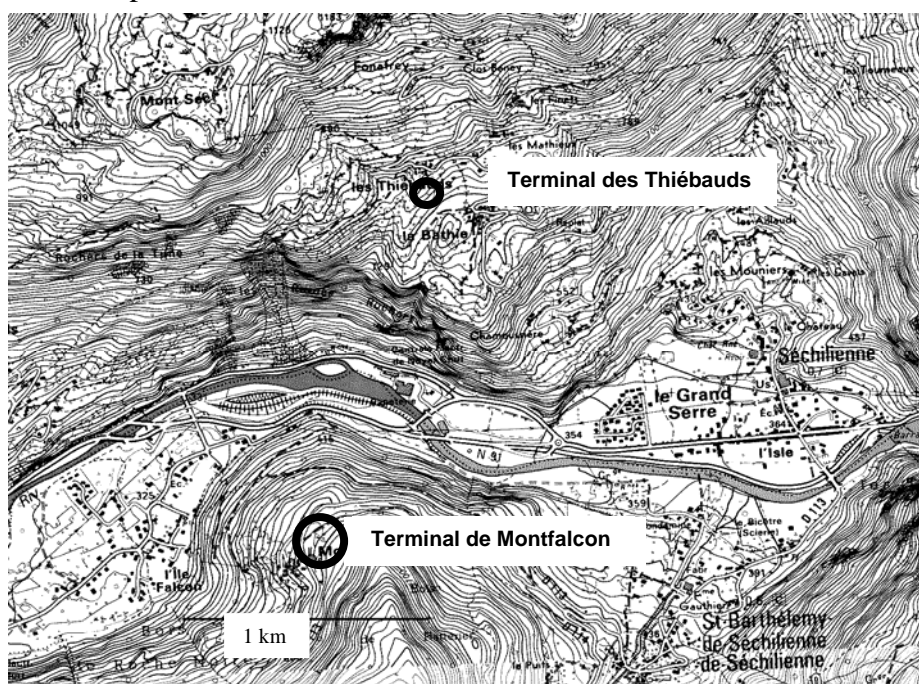


Selon son volume, l'éboulement peut dévier la Romanche, couper la Route Nationale 91, puis lorsque le volume augmente barrer totalement la vallée. Selon la hauteur du barrage, il existe un risque d'inondation de l'amont (inondation relativement lente), puis de l'aval (potentiellement brutale) en cas de rupture rapide du barrage par débordement.

Les parades existantes comportent une déviation de la route nationale, un merlon et une galerie de déviation de la Romanche : elles doivent pouvoir faire face à un éboulement de 3 millions de m<sup>3</sup>.

#### Instrumentation du site :

Dès 1986, un dispositif de surveillance est installé puis régulièrement renforcé. Les premiers dispositifs sont manuels, puis progressivement automatisés et télétransmis : extensomètres, mesures géodésiques par laser, radar Ultra Large Bande (le seul de ce type peut-être dans le monde), station météorologique (photos [diapos 15 à 17](#)). Environ 100 repères de mesures sont répartis sur les 70 hectares du site.



La surveillance automatisée du site se répartit en 2 terminaux de site:

- Le terminal des Thiébauds, qui gère tout le réseau extensométrique ;
- Le terminal de Montfalcon, qui gère toutes les visées géodésiques et radar.

Architecture du système de surveillance (voir [diapos 19](#) et surtout [Activité 3 Systèmes de télésurveillance](#)) : les notions de gestion de proximité avec deux Terminaux de Site déportés implantés à proximité immédiate du versant instrumenté (Les Thiébauds et Montfalcon) et de gestion à distance avec le Centre d'Exploitation du CETE de Lyon, ont été reprises dans l'architecture de l'outil **GeSSRI** (Gestion de la Surveillance des Sites Rocheux Instables, voir ci-dessous).

#### **Le dispositif de gestion de la télésurveillance**

Les exigences spécifiques du site ont justifié le recours à des développements logiciels importants. La quantité et la variété des dispositifs d'acquisition mis en œuvre sur le terrain ont progressivement fait émerger le besoin d'un outil capable d'assurer une gestion fiable de l'ensemble des fonctions de la télésurveillance.



Un nouveau concept a donc été développé à partir de 1999, suite à des audits internes et des consultations extérieures : cela a mené à redévelopper complètement l'application à partir de langages et logiciels standard, ce qui n'était pas le cas jusqu'alors puisque l'outil intégré utilisé (SMART) était spécifique au Ministère de l'Équipement. Le système Gestion de la surveillance des sites rocheux instables (GeSSRI) a ainsi été créé à partir de Panorama, un progiciel de supervision et système d'information industriel.

L'intérêt est multiple :

- Avoir recours à des éditeurs importants permet d'assurer une meilleure pérennité et une plus grande facilité de maintenance ;
- L'utilisation de techniques de programmation et d'architectures de systèmes d'information plus modernes donne une plus grande souplesse d'utilisation et une plus grande fiabilité au niveau des transmissions d'information qu'avec l'ancien système TELE ;
- L'utilisation d'un système d'exploitation sécurisé permet d'augmenter la traçabilité et de préserver les données confidentielles.

Le nouveau système de surveillance à mettre en place a été défini avec deux types de traitement :

- Les commandes et traitements automatiques, qui ne nécessitent pas d'intervention humaine : acquisition des données, détection des alertes, traitement des alertes, mise à jour des données entre les PC, mise en forme des états et tableaux utilisés quotidiennement ou en contexte de crise ;
- Les traitements non automatiques qui reposent sur l'intervention d'un géologue, géotechnicien, expert en charge du site : analyses et études ponctuelles faites sur les données, demandes particulières...

Les techniques de transmission sont un point qui a été particulièrement étudié, afin d'assurer la meilleure sécurité possible dans l'acheminement des données entre les terminaux de site et le centre d'exploitation (Liaison RTC ou RNIS, Liaison RTC ou RNIS doublée, Liaison RNIS avec routeurs, Liaison spécialisée...).

### **Le développement de GeSSRI**

A partir de l'expérience acquise, deux grandes familles de produits ont été envisagées pour développer GeSSRI :

- les options de programmation « totale » à partir de langages de programmation (cas de TELE jusqu'alors) ;
- les options consistant à utiliser et adapter un produit intégré disponible dans le commerce. Les produits suivants ont été examinés : OpenView (HP), LabView (National Instruments), Soldata (Soldata Eicosol), Panorama (Codra – Europ Supervision).

Du fait que les 3 techniques de surveillance du site (extensométrie – radar – géodésie) soient réparties sur 2 sites distants ne permettant pas l'installation d'une structure réseau conventionnelle, il était évident qu'il fallait :

- un noyau commun à ces 3 applications ;
- une gestion réseau permettant la mise en commun des données ;
- une forte garantie de pérennité des outils logiciels utilisés.

PANORAMA, qui répondait tout à fait à ces critères, a été retenue pour la création de l'outil GeSSRI (Gestion de la Surveillance des Sites Rocheux Instables), appelé à devenir un outil informatique unique.

En effet, Panorama (qui est un produit assez proche de LabView) est composé :

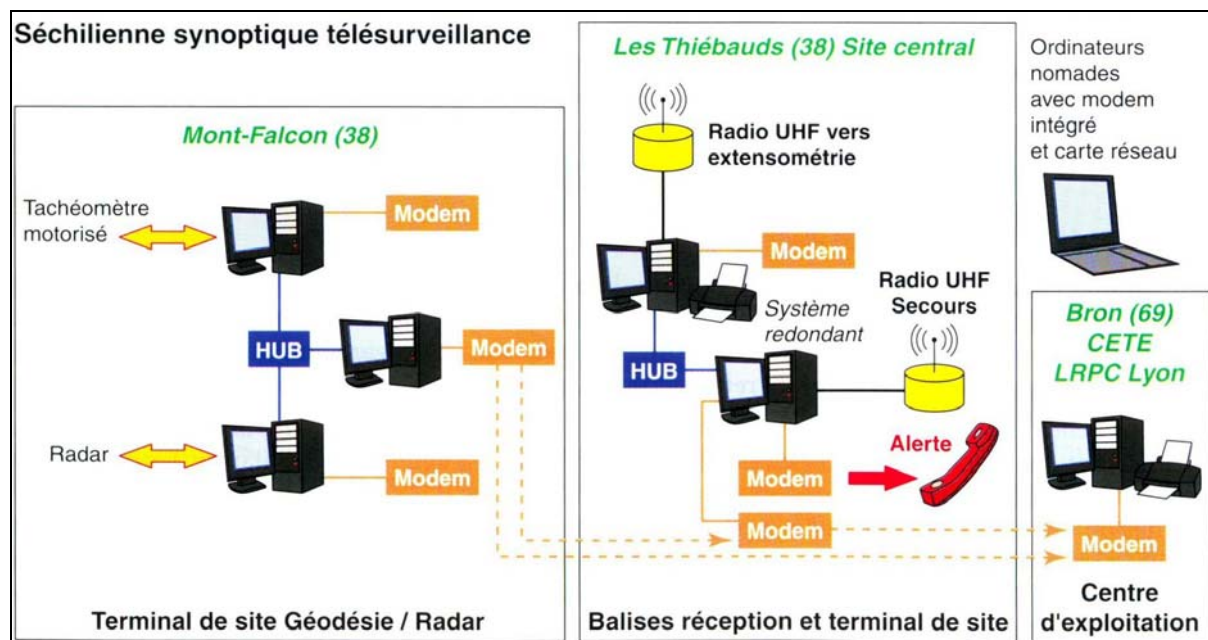
- d'une interface de programmation visuelle ;
- de pilotes pour de nombreux bus industriels (adaptables pour la connexion des capteurs extensométriques et autres);
- d'ouvertures vers d'autres programmes grâce aux méthodes de communication couramment utilisées et d'autres spécifiques à la gestion de process industriels.

Il dispose de tous les modules nécessaires à la supervision d'un site, y compris la gestion des astreintes, des alertes ; de plus les modules sont riches en fonctionnalités.

La pérennité de ce superviseur est assurée à travers le partenariat développé entre le Centre d'Etudes Atomiques (CEA, qui développe PANORAMA depuis 1988), et Microsoft pour sa diffusion. Les nombreuses installations de supervision (12 000 licences) dans les domaines stratégiques tels que les dispositifs de surveillance et de conduite de sites militaires ou nucléaires sont la meilleure garantie de fiabilité (notion de volume, produit largement dimensionné par rapport à nos besoins, mises à jour régulières).

Remarque : La gestion des alertes dans GeSSRI n'est pas assurée par Panorama. Le Module Interactif de Surveillance et de Traitement des Alarmes de Panorama, ne sachant gérer, à l'époque du développement, que des alarmes vers un télécopieur, pager, mini messages... mais pas de message vocal, le logiciel ALERT, distribué par Micromédia, pour la transmission des alarmes par le réseau téléphonique (RTC ou GSM) a été retenu (pour les mêmes critères de diffusion et de fiabilité que Panorama).

### Principe et architecture de GeSSRI



Architecture simplifiée du système de télésurveillance  
(voir aussi le synoptique GeSSRI, plus complet, dans [Activité 3 Systèmes de télésurveillance](#))

Une gestion en réseau du noyau commun aux dispositifs de mesure permet la centralisation des données de l'ensemble des dispositifs avec **un seul outil**.

Malgré tout, alors que cela n'était pas initialement prévu, des développements spécifiques ont été réalisés pour uniformiser les données, sous Delphi et VB pour chacune des sources de surveillance, mise en forme sous BD MS Access.

Ce nouveau système implique quelques contraintes :

- la mise en œuvre est confidentielle, ce qui nécessite l'acquisition de connaissances spécifiques pour l'exploitant ;
- Il faut acquérir une licence d'exploitation pour chaque application installée, ce qui a un coût : c'est la contrepartie de l'abandon d'un concept de logiciel propriétaire.

Le système, tout d'abord implémenté sur le site des Thiébauds (serveur), équipé de deux PC redondants, interroge les autres applications pour centraliser les données et les transmettre via un modem RTC vers le centre d'exploitation des massifs rocheux instables du CETE de Lyon et à la demande vers les ordinateurs « nomades » (permanence de suivi). En cas de crise, le serveur du Terminal de Site des Thiébauds permet d'effectuer toutes les manipulations nécessaires permettant de suivre les évolutions des données et des prévisions en temps réel sur toute l'installation (Thiébauds et Mont Falcon) ; il s'agit alors d'un véritable basculement du Centre d'Exploitation du CETE de Lyon sur le site des Thiébauds.

Le but final est d'archiver les données réelles et calculées ainsi que de créer des courbes de prévision et d'évolution permettant de prévenir avec quelques heures ou quelques jours d'avance une accélération des mouvements laissant supposer l'imminence d'un écroulement en masse et d'en prévenir les effets.

Le Terminal de site de Montfalcon piloté par GeSSRI est prévu pour passer automatiquement en mode autonome sur défaut du serveur des Thiébauds et envoie dans ce cas les données issues de la géodésie automatique et du radar, via un modem RTC, au Centre d'Exploitation des massifs rocheux instables du CETE de Lyon. Les modules déportés de la géodésie automatique et du radar peuvent également travailler en mode autonome en cas de défaillance du Terminal de site de Montfalcon. Le même schéma vaut pour ce qui concerne le paramétrage à distance (seuil de prévision, graphes...) et la télémaintenance.

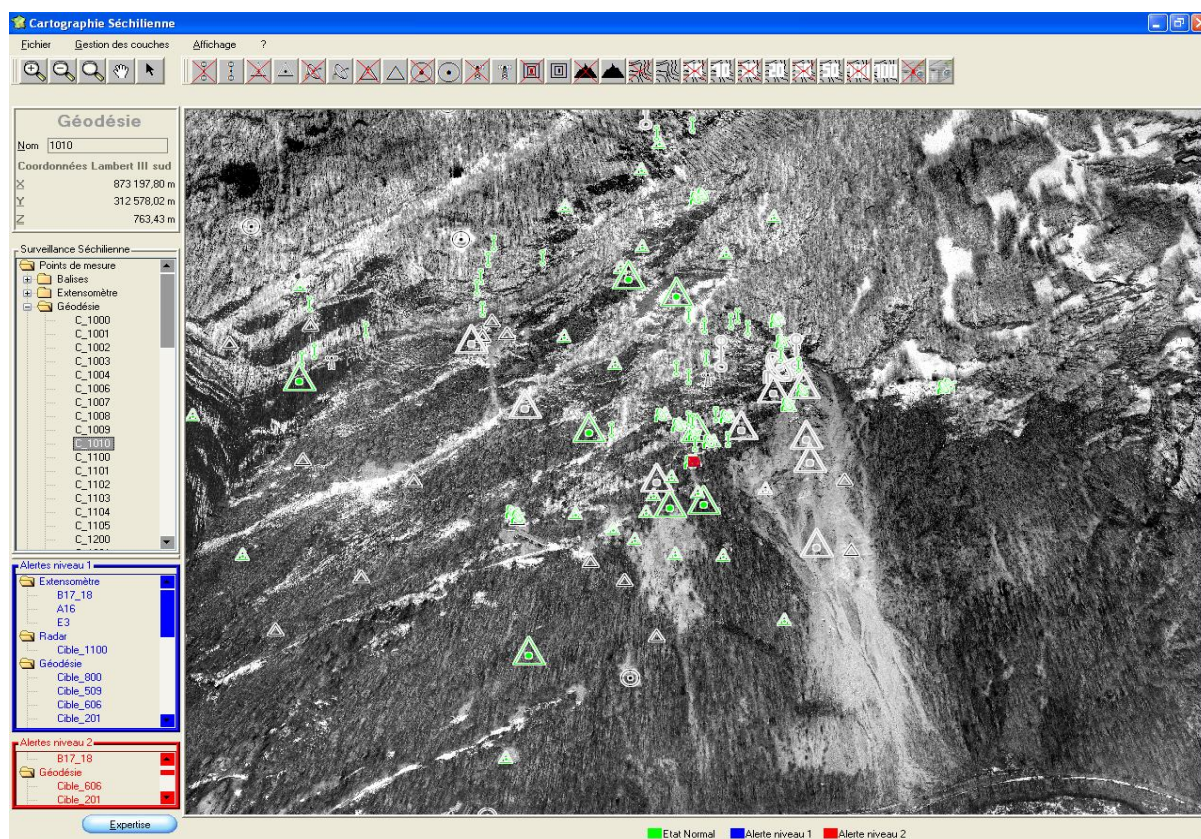
#### GeSSRI est-il adaptable sur d'autres sites ?

L'avantage de Panorama est d'assurer une grande fiabilité dans la transmission de l'information. Par contre la souplesse d'utilisation est limitée, et le coût est très important. Le système pourrait éventuellement être transposé sur des sites aux volumes et enjeux équivalents à Séchilienne, mais est mal adapté pour des volumes et enjeux plus faibles (voir pour cela Guardaval dans [Activité 3](#)). Par contre le CETE dispose d'un kit avec deux centrales d'acquisition, équipées de logiciels du commerce, quelques capteurs et autre petit matériel, instable très rapidement et pour un coût modeste sur de petits sites.

#### **Utilisation et valorisation des données**

Afin de mieux valoriser les données, notamment en contexte de crise, nous avons créé Expertise. Cet outil intègre les données de GeSSRI, sous une forme adaptée à l'analyse des experts en charge du suivi du site. Expertise possède également un modèle de pronostic de la date d'un éventuel éboulement.

Enfin, à ce système de surveillance a été rajouté en 2005 le volet cartographique (SIG), qui n'a du fait de sa date de mise en service pas été pris en compte dans la comparaison des systèmes de télésurveillance ([Activité 3](#)). Carto Séchilienne est un plan informatisé qui permet de visualiser la position géographique de chaque capteur et de son évolution : en cliquant sur un capteur (ci-dessous), on a directement accès à toute la chaîne de mesures.



Interface du SIG Carto Séchilienne

Ce SIG est actuellement l'entrée principale de GeSSRI utilisée par les experts.

## Conclusions

A mesure de la progression dans la connaissance du phénomène et de la crédibilité d'une hypothèse de crise, le dispositif de télésurveillance a fait régulièrement l'objet d'adaptations pour assurer la continuité et la qualité de l'information sur l'évolution des mouvements. Ces adaptations passent par la redondance et la diversification des techniques mises en œuvre sur le site. La gestion de l'ensemble de ces techniques est supervisée par un outil informatique unique (GeSSRI) spécialement adapté aux particularités du site et intégré à la stratégie opérationnelle du suivi.

Mais il ne faut pas oublier que la (télé)surveillance ne se limite pas à consulter des écrans d'ordinateurs. La fiabilité d'un système d'alerte repose sur :

- des hypothèses de scénarios, leurs actualisations (fréquentes dans le cas de Séchilienne), le travail de terrain des géologues et experts, qui est le fondement sans lequel la surveillance n'existe pas ;
- des mesures : implantation, fréquence, précision ;
- la résistance du matériel (pluie, foudre, gel, brouillard, etc.) : capteurs et transmission ;
- le temps de réaction de l'ensemble de la chaîne d'alerte (personnel chargé de l'instrumentation, géologues et experts, décideurs...).



**Discussion (6) – Télésurveillance du site de Séchilienne**

**Eric Leroi** : « Le point important de la réactualisation a été abordé à la fin à propos des scénarios, mais il paraît aussi important de réactualiser le système lui-même : on peut être amené à rajouter ou changer de place des capteurs sur le site, ou à recommander des investigations complémentaires pour mieux comprendre les mécanismes en jeu. Comment peut-on faire le lien entre la surveillance et ces éléments ? GeSSRI peut-il les intégrer ? »

**J.-P. Duranton** : « Il est tout à fait possible de rajouter des capteurs à la demande des géologues de terrain, même si la marche à suivre dans Panorama n'est pas très simple, avec des procédures très précises et un peu fastidieuses. »

**L. Effandiantz** (Cete Lyon) : « Sur un site de cette ampleur, l'objectif n'est pas de faire de la détection mais de caractériser le mouvement et son évolution, pour guider au fur et à mesure les investigations sur le terrain. »

**J.-P. Duranton** : « Toujours à destination des experts, il faut insister sur l'importance des outils informatiques d'aide à la décision tels qu'Expertise, dont la nécessité apparaît rapidement en cas de crise. »

**Dario Tosoni** (géologue Arpa Piemont) : « GeSSRI a-t-il été utilisé seulement sur Séchilienne ? Envisagez vous de l'utiliser sur d'autres sites en France pour vérifier la fiabilité du système ? »

**J.-P. Duranton** : « Le système tourne maintenant depuis 6 ans sur Séchilienne, sa fiabilité est acquise pour nous. Les redondances ont été poussées très loin, on utilise actuellement deux disques durs par PC, avec basculement des informations pour ne jamais rien perdre. Quant à l'aspect « portable » de GeSSRI, je répète que le système ne peut pas être transposé à moindre coût sur un site où les enjeux sont moindres. GeSSRI a été dimensionné plutôt « vers le haut » pour qu'on n'ait pas à redévelopper entièrement un système si les besoins évoluent. »

**D. Tosoni** : « Pour des sites plus petits, un système moins lourd n'a pas été envisagé ? »

**J.-P. Duranton** : « Je renvoie sur le travail de P.Ornstein, le système Guardaval s'adapte bien à de petits sites ; aujourd'hui il existe aussi dans le commerce (spécialisé) des outils clé en main, avec des rattachement sur le web. Il me semble qu'il n'y a plus besoin de créer de tels outils, sauf si on veut en être gestionnaire, propriétaire, ce qui n'est pas dans la volonté ni dans les attributions du CETE de Lyon. »

### 3.2.2. Prévision et gestion des crues en Valais : le projet MINERVE

Dominique BÉROD (*Etat du Valais- service des routes et des cours d'eau*)

Dominique Bérod présente MINERVE, un programme récent en Valais mis en place pour la surveillance du haut bassin versant du Rhône, la prévision des crues et leur régulation par les barrages hydroélectriques.

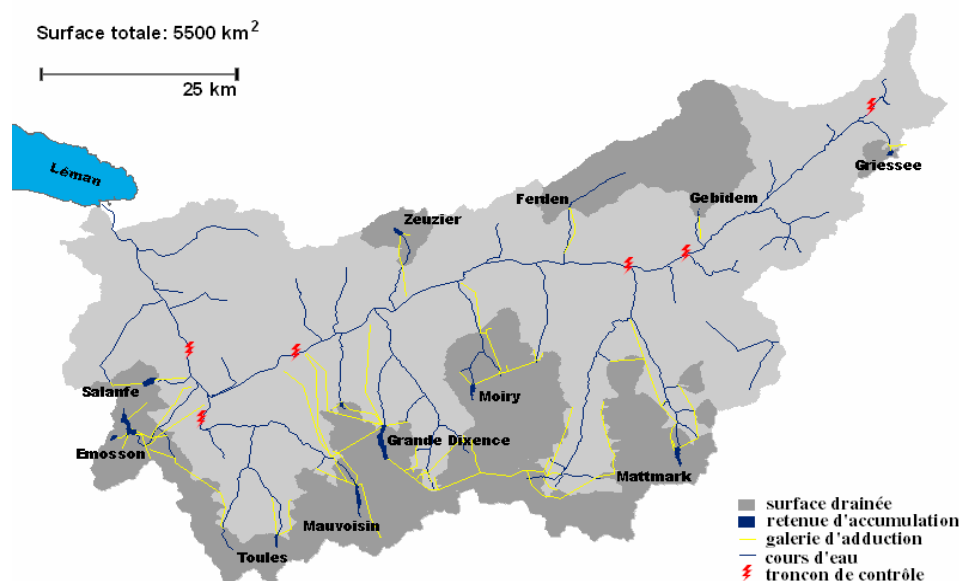
#### Stratégie de protection contre les crues en Valais

Dans la stratégie générale de protection contre les crues, l'accent est mis sur l'identification des processus et des zones de danger (cartographie), mais surtout sur la gestion des crues, y compris les risques résiduels lorsque des travaux sont effectués :

1. Organisation en cas de crise dans les communes : appui à l'aide d'outils d'aide à la décision ;
2. Prévision de crues à 2-3 jours (là où cela est possible) et gestion des retenues hydroélectriques : c'est l'objet du projet MINERVE, né à partir de l'observation, sur les crues de 1993 et 2000, que les barrages ont eu un effet positif sur les crues, celles du Rhône en particulier ; cet effet n'était pas escompté lors de la conception des grandes retenues hydroélectriques en Valais ;
3. Réseau d'observateurs pour les petits bassins versants qui sortent du cadre de MINERVE : projet IFKIS HYDRO.

Les projets d'aménagement viennent en queue de liste des priorités stratégiques, même si 10-15 millions d'euros sont investis chaque année dans ce domaine.

#### Bassin versant du Rhône amont



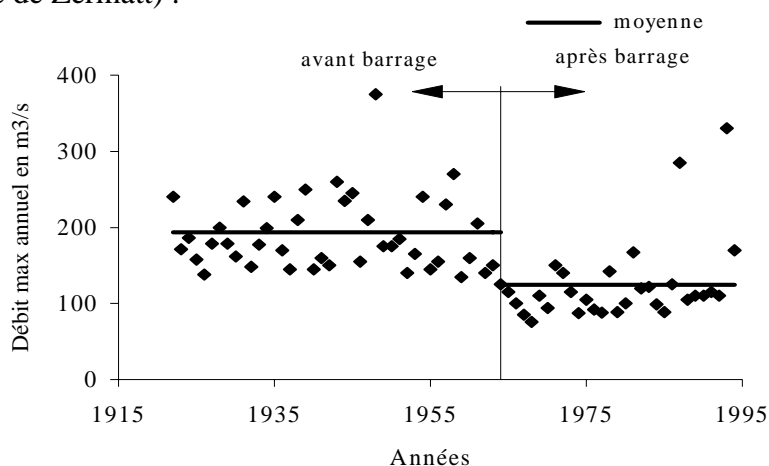
Le Valais a une surface totale de 5 500 km<sup>2</sup>, qui correspond à peu près au bassin versant du Rhône à l'amont du Léman.

Le volume de stockage total des grands barrages est de 1 200 millions de m<sup>3</sup>. Ces barrages sont habituellement pleins en septembre-octobre, période des grandes crues possibles du Rhône et de ses principaux affluents. Il reste malgré tout dans ces moments environ 5%-10% du volume des barrages disponibles, ce qui correspond à 150 millions de m<sup>3</sup>, qu'on peut comparer au volume typique d'une crue du Rhône, environ 200 millions de m<sup>3</sup> : il paraît donc très intéressant de profiter des barrages pour mieux gérer les crues.

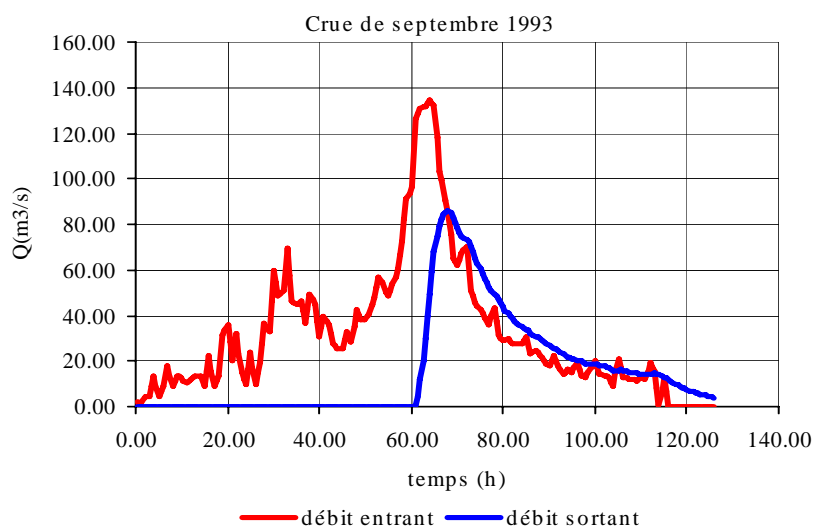
### Quelques chiffres complémentaires

Surface drainée dans les retenues : 1430 km<sup>2</sup>  
 Potentiel de dérivation : 346 m<sup>3</sup>/s  
 Débit de pointe crue 2000 (Léman) : 1360 m<sup>3</sup>/s  
 Effets observés 1987, 1993, 2000 : 100 - 300 m<sup>3</sup>/s

Effet des retenues hydroélectriques sur les crues (exemple de Mattmark, situé dans la vallée voisine de celle de Zermatt) :



On observe que le débit annuel moyen (courbe noire) diminue fortement après la construction du barrage ; par contre les débits de crue maximaux (carrés noirs) restent à des niveaux pratiquement équivalents.



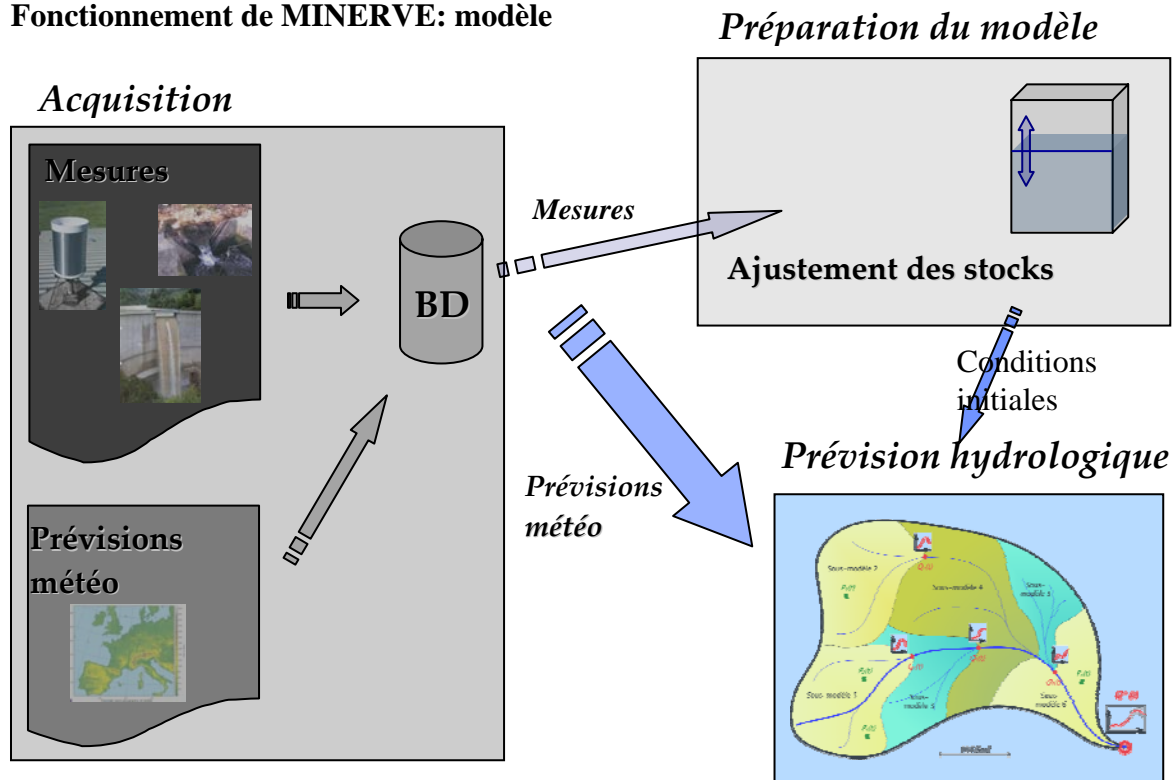
La courbe ci-dessus présente, en bleu, les débits réels observés à l'aval du barrage lors de la crue de 1993, et en rouge une crue simulée qui montre les débits entrants : la différence significative prouve tout l'intérêt qu'il y aurait à utiliser les barrages pour la protection contre les crues et non seulement pour la production d'électricité.

### Le projet MINERVE

Le projet a démarré en 2002, avec comme initiateur le Canton du Valais, comme co-financier important la Confédération Suisse (Office fédérale de l'environnement, OFEV). Le mandat est essentiellement réalisé par l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (Laboratoire des constructions hydrauliques et Laboratoire d'hydrologie et d'aménagement), avec un appui très fort de Météosuisse pour les données et les prévisions.

L'objectif in fine de MINERVE est de pouvoir développer un système d'aide à la décision pour la protection contre les crues. A plus court terme, il s'agit de développer un outil de prévision et de gestion des crues en temps réel, du moins de suivre en temps réel les précipitations et les écoulements sur l'ensemble du réseau (centralisation au SRCE) ; dans un tout premier temps, il permet déjà de disposer d'un modèle de calcul hydrologique et hydraulique convivial pour les moyens et grands bassins valaisans.

### Fonctionnement de MINERVE: modèle



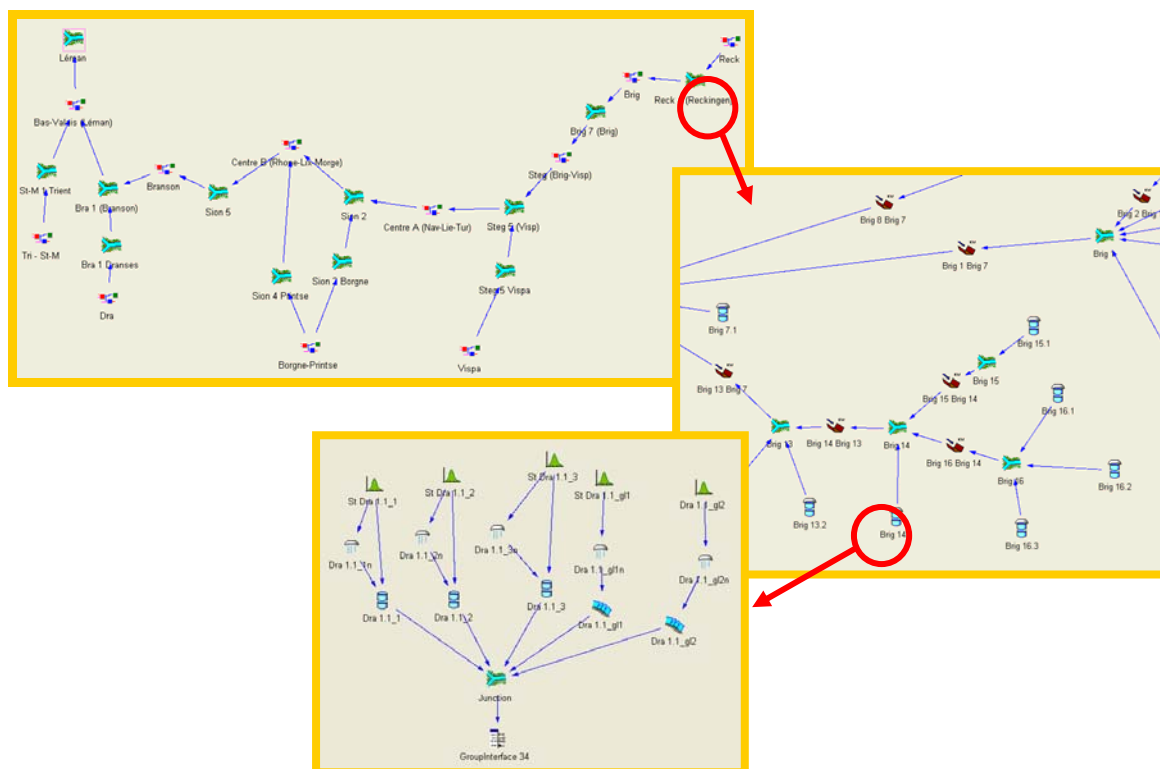
Source : F. Jordan, LCH-EPFL

Les données sont à la fois des données météorologiques (précipitations, températures, pressions) et des données de débits qui viennent d'une part des stations de mesures fédérales et d'autres part de structures privés comme sociétés hydroélectriques (débits turbinés, débits pompés...) ; les prévisions météo sont réalisées à partir du modèle ALMO. L'ensemble est stocké dans une Base de Données MINERVE, ce qui permet d'avoir quotidiennement une bonne connaissance des stocks des différents bassins. Un modèle en continu réalise ensuite des simulations hydrologiques à trois jours, sur la base de prévisions météorologiques à trois jours et des conditions initiales des stocks.

### Modèle hydrologique

Il s'agit d'un modèle conceptuel semi-distribué à réservoirs. La principale difficulté n'a pas été le développement du modèle hydrologique en soit mais la description du bassin versant dans sa complexité, avec les bassins versants naturels mais aussi toutes les interactions liées aux ouvrages hydro-électriques. Le modèle intègre au total 240 points de calcul, qui correspondent à tous les ouvrages hydro-électriques du canton (schéma ci-dessous en zooms successifs).





Source : F. Jordan, LCH-EPFL

### Fonctionnement opérationnel de MINERVE:

Partant de la base de données, un premier calcul est réalisé sans tenir compte des barrages : on obtient des débits naturels aux points stratégiques que l'on souhaite surveiller. Un second calcul avec les barrages permet de voir le gain possible, selon l'état actuel de remplissage des barrages.

Le gros avantage de MINERVE est de mettre en réseau l'ensemble des ouvrages pour lancer un calcul d'optimisation, permettant d'évaluer si un turbinage préventif sur un ou plusieurs barrages pour minimiser une crue sur un ou dix points du territoire du Valais était requis, et de quel ordre. Un nouveau calcul est alors réalisé avec les barrages optimisés ; la boucle calcul-optimisation-calcul peut être réitérée jusqu'à obtenir un résultat jugé satisfaisant.

Un ordre de police peut alors être donné aux barragistes, si possibles avec 36-48h d'avance, pour turbiner de manière à vider préventivement une partie des barrages.

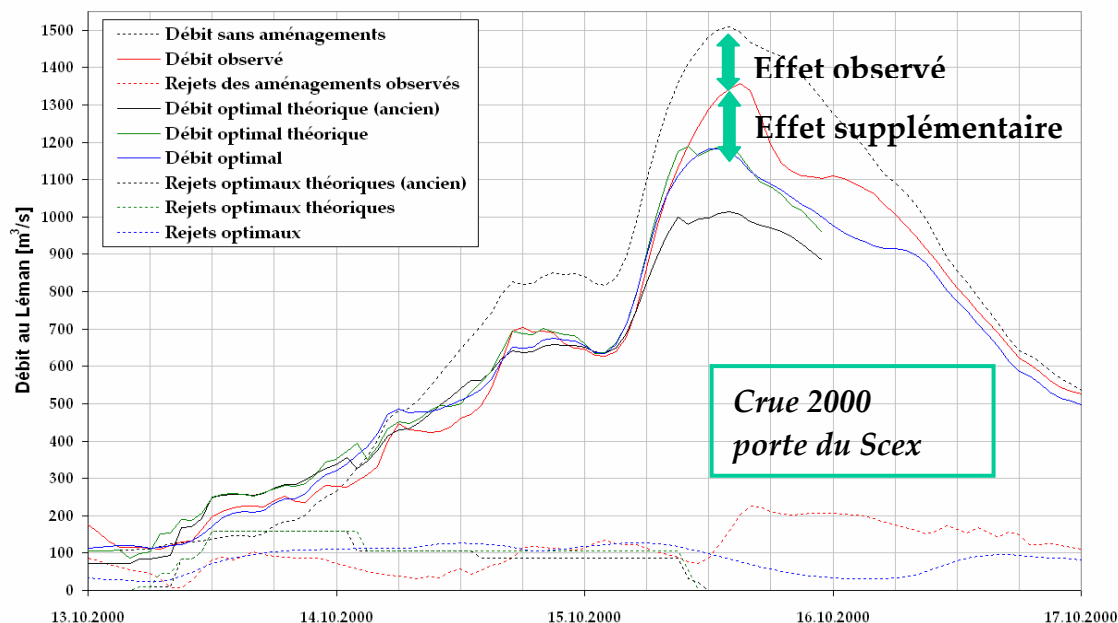
Les prévisions météorologiques arrivant toutes les 12h, le calcul peut être revu 12 ou 24h plus tard pour minimiser les erreurs.

### **Relations avec les sociétés hydroélectriques**

Les sociétés hydro-électriques fournissent les données de précipitations et de débits qu'elles enregistrent de manière privée, en contrepartie des résultats fournis par le modèle (qui peuvent leur permettre d'optimiser leur gestion, mais qui sont sans garantie). Cet échange de données est réglé par une convention signée entre l'Etat et chacune des sociétés.

Les demandes de turbinage préventif (3 jours d'avance) doivent émaner d'ordre de police. Une seconde convention règle par ailleurs le coût de la mesure demandée (perte d'énergie, de qualité, de souplesse) : le Canton doit pouvoir dédommager le barragiste si le turbinage préventif entraîne une perte d'exploitation, par exemple si les précipitations annoncées ne viennent pas remplir à nouveau le barrage.

## Comparaison calcul – simulation



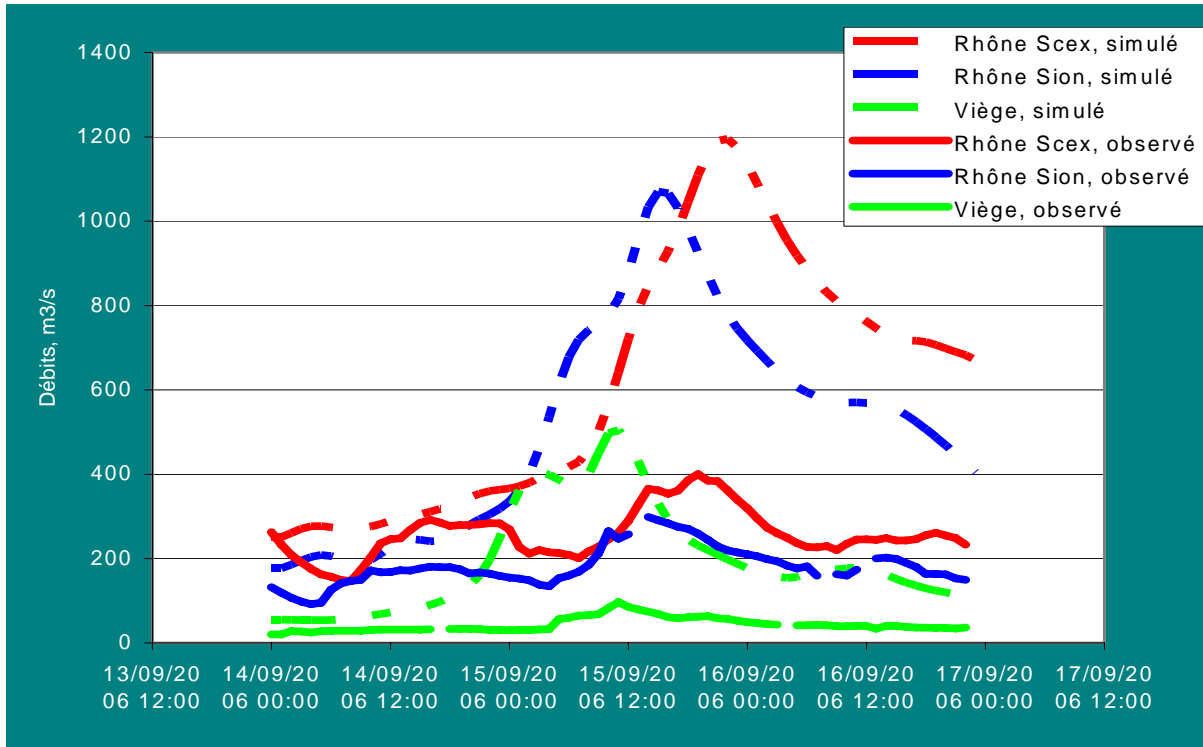
Source : F. Jordan, LCH-EPFL

La comparaison entre les courbes « débit observé » et « débit sans aménagement » (simulation de la crue sans les barrages), donne une idée du gain apporté par les barrages lors de la crue d'octobre 2000 : c'est l'« effet observé » de 200-300 m<sup>3</sup>/s, soit 50 cm de hauteur d'eau sur certains points du Rhône. L'« effet supplémentaire » correspond au gain que l'on aurait pu avoir en donnant des ordres de vidange préventifs aux barrages (à nouveau environ 200 m<sup>3</sup>/s). Avec une crue telle que celle de la courbe pointillée bleu, il y aurait eu des débordements majeurs sur tout le canton ; la crue observée a provoqué certains débordements, qui n'auraient pas eu lieu avec des débits optimisés (courbe bleue, débit optimal). Cette simulation a posteriori montre tout l'intérêt d'utiliser le programme MINERVE, qui n'était pas encore opérationnel lors de la grande crue d'octobre 2000.

### Prévision du 13-15 septembre 2006

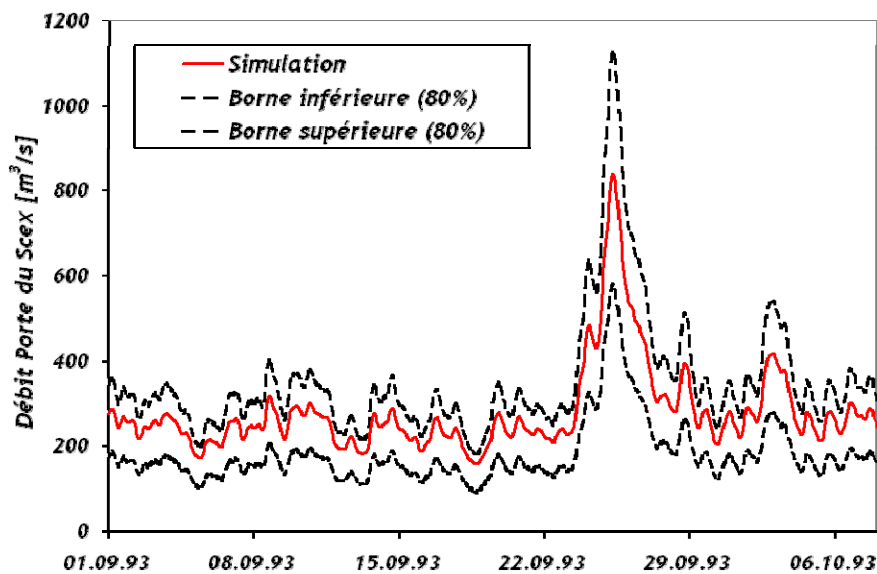
L'alerte météo reçue le 13 septembre 2006 a déclenché pour la première fois le programme MINERVE. Le graphique ci-dessous montre les exemples de trois points parmi tous les autres calculés : les 3 courbes les plus hautes correspondent aux débits simulés et les plus basses aux débits effectivement observés. Dans la ville de Viège par exemple, les simulations prévoyaient des débits d'environ 450 m<sup>3</sup>/s, alors que la Viège (affluent du Rhône) a à cet endroit une capacité maximale d'environ 400 m<sup>3</sup>/s, ce qui laissait attendre des débordements.

En fait, le modèle ALMO de prévision météo a largement surestimé toutes les précipitations sur la partie haute du canton, d'où une surestimation également des débits de crue. Les simulations réalisées ensuite avec les précipitations observées ont montré des débits de crue très proches de ceux observés (80 m<sup>3</sup>/s) pour la Viège : le modèle hydrologique n'est donc pas remis en cause, à l'inverse des prévisions météorologiques.



Source : F. Jordan, LCH-EPFL

Pour améliorer la prise de décision, le souhait des spécialistes est de ne pas se baser sur une seule valeur, mais sur une fourchette qui tienne compte de toutes les incertitudes sur les paramètres hydrologiques (sans parler pour l’instant des incertitudes météo) : une fourchette à 80% donne une appréciation moins précise mais plus fiable pour prendre des décisions.



Exemples d'incertitudes (sans la météo) : modèles hydrologique du Rhône (Source : F. Jordan, LCH-EPFL)

## Intégration dans la stratégie générale

Le programme MINERVE est avant tout **un outil d'aide à la décision**, un appui à la gestion des risques résiduels des projets importants, uniquement sur de grands bassins versants : le Rhône et ses principaux affluents, la Viège (Vispa), la Dranse...

L'objectif final est d'intégrer ce programme dans le système beaucoup plus général des plans d'alarme (cantonal pour le Rhône, communal pour les affluents).

En collaboration avec le géologue cantonal (J.D.Rouiller), le Service des Routes et Cours d'Eau met en place une **cellule scientifique de crise**, qui doit appuyer au mieux les autorités qui prennent des décisions, avec des arguments aussi clairs que possibles : les données de MINERVE, centralisées et ordonnées, font partie de ces arguments.

## Des problèmes déjà identifiés...et des recommandations

L'expérience de septembre 2006 a montré la dépendance du programme à la qualité des prévisions météo ; il peut être intéressant de tenir compte de l'avis des prévisionnistes, qui diffère parfois des résultats des calculs de prévisions mais ne peut pas être intégré dans un modèle. MINERVE devrait donc pouvoir gérer des aspects qualitatifs également (en septembre, les prévisionnistes avaient « senti » que les précipitations resteraient sur le Sud, mais ne pouvaient pas le garantir).

Les données disponibles sont encore lacunaires : certains bassins versants disposent de très peu d'information.

Le programme calcule des chiffres et des courbes qu'il faut absolument pouvoir interpréter, ce qui nécessite de l'expérience ; il n'est pour l'instant pas envisageable d'intégrer directement les résultats bruts dans des systèmes experts. Il faudrait ainsi entre 5 et 7 spécialistes capables de faire tourner le modèle et d'interpréter ses résultats, ce qui n'est pas encore le cas aujourd'hui.

Pour améliorer le système, il est clair qu'il faut continuer d'améliorer la qualité des prévisions météorologiques: Almo2 (doit densifier le réseau en portant la maille de 5 km actuellement à 2km), COSMO LEPS (prévisions probabilisées), Méthode des analogues (basée sur un historique fiable, fait des prévisions par similarité avec des cas du passé – développée à Grenoble).

Pour densifier le réseau de mesures, le canton instrumente actuellement les bassins versants où il y a les plus grandes lacunes (débitmètres, pluviomètres, radar météo sur le Petit Cervin).

Il est également important d'assurer des formations (ateliers, exercices), non seulement pour les spécialistes de MINERVE, mais aussi pour tous les intervenants de la chaîne de décision : élus, pompiers, police...

En tout état de causes, même avec les lacunes actuelles, « *Il est interdit de ne pas essayer* ».

## Conclusions

Les principales forces du modèle MINERVE reposent sur :

- La centralisation des données existantes : elle permet d'avoir une vision d'ensemble sur le canton le jour où un phénomène se passe (ce qui n'était pas le cas le jour des crues de 2000);
- La simulation de différents scénarios pour apprécier une situation ;
- L'aide à la décision, support important en cas de crise.

Ses principales faiblesses tiennent aux incertitudes dans les modèles et prévisions météorologique, au manque de personnel (budget pour mettre à disposition du personnel supplémentaire) et au manque d'expérience actuel sur un modèle encore récent.



Le modèle doit être en évolution continue : il a connu un premier essai en 2006, va fonctionner de manière pilote dès 2007, pour tourner en routine dès 2008.

Enfin, ce type de modèle repose sur des coopérations multiples: travail d'équipe entre les prévisionnistes météo, les hydrologues, les responsables de barrages, les forces d'interventions.

MINERVE n'est en fin de compte qu'un **outil d'aide à la décision**, ce n'est en aucun cas le modèle qui prend la décision.

*Minerve est à l'origine la déesse de la guerre et de la sagesse : guerre contre les crues, sagesse dans notre position envers les phénomènes naturels, face auxquels il faut savoir rester très modeste.*

#### **Discussion (7) – Télésurveillance des bassins versants**

**Philippe Raviol** (DIREN Rhône-Alpes) : « Ce projet semble très ambitieux, entre autre parce qu'il concerne un bassin versant complexe, avec de nombreux ouvrages qui ne sont a priori pas prévus pour être des écrêteurs de crue, ce qui doit poser des problèmes en terme de gestion des ouvrages :

- (1) Comment ont été appréhendées les capacités de stockage de ces ouvrages en cas d'événements exceptionnels successifs ?
- (2) Le système a un objectif de prévision et d'alerte. En France il y a des exemples de « problèmes » liés à des utilisations en tant qu'écrêteurs de crues d'ouvrages non prévus pour, et même pour des ouvrages spécifiques des questions se posent en terme de capacité.
- (3) Y a-t-il eu des vellétés d'utiliser ce dispositif dans un objectif d'aménagement du territoire, comme ce qui s'est fait en France sur la Loire : il a été question d'utiliser un dispositif de gestion des crues pour aménager des zones potentiellement moins soumises à ces crues 'optimisées' ».

**D.Bérod** : « Les grandes crues de 1987, 1993 et 2000 étaient des crues à plusieurs pointes. Les développements hydrologiques du modèle permettent sans aucun problème de prendre en compte ces événements successifs. Il est possible d'agir sur le barrage pour autant que la sécurité de l'ouvrage lui-même n'est pas mise en cause : la limite imposée aux moyens d'action est la cote maximale d'alerte, à laquelle le gestionnaire du barrage reprend en main la sécurité.

MINERVE est un outil de gestion du risque qui n'appelle aucune modification de la situation de danger en aval. Il n'y a aucune possibilité de modification du zonage, donc de l'aménagement du territoire ».

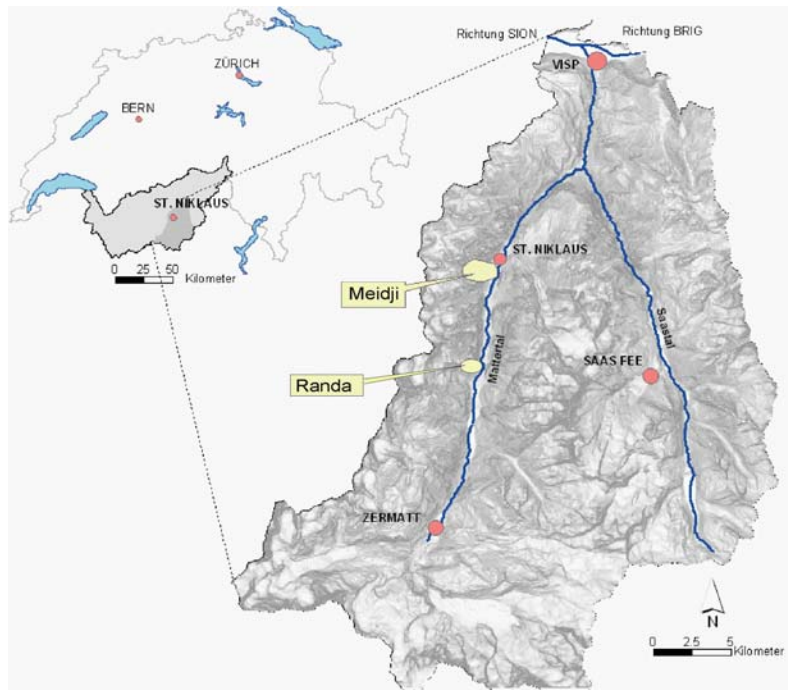
**E.Leroi** : « Ce problème d'aménagement est plus général et peut s'élargir par exemple aux mouvements de terrain, pour lesquels il y a aussi des vellétés de construire à l'aval d'ouvrages de protection ou de systèmes de surveillance. C'est une tendance dangereuse. Sur ce point la position de l'état français est très clair (pas de modification du zonage), mais c'est un aspect difficile à faire comprendre à la population ».

### 3.3. Seuils d'alarme :

#### 3.3.1 Eboulement de Meidji (commune de Saint-Nicolas, Valais) : surveillance géodesique et détermination des seuils d'alerte

Eric POINTER (*bureau géologique Rovina*)

La commune de St Nicolas (St. Niklaus) est située dans le haut Valais, dans la vallée de Zermatt (rive gauche du Mattertal, entre Viège et Zermatt).



Localisation du site de Meidji

#### **Eboulement du 21/11/2002, 15h20**

De la falaise de Meidji, qui surplombe le village, 120 000 m<sup>3</sup> de roche se mettent en mouvement, dont 70 000 m<sup>3</sup> s'écroulent dans la vallée. Plusieurs gros blocs, dont un de 1500 m<sup>3</sup>, ont été retenus par la nouvelle digue, qui venait d'être construite (photo ci-dessous, les machines de chantier sont encore derrière la digue).

Le moment de l'éboulement a pu être prévu précisément grâce au réseau d'observation installé quelques mois avant. Ainsi, l'évacuation de la population a eu lieu environ 20 h avant l'événement, qui n'a par ailleurs pas fait de dégâts aux bâtiments ni aux infrastructures.



Voir le [film de l'éboulement](#)

**Situation actuelle**

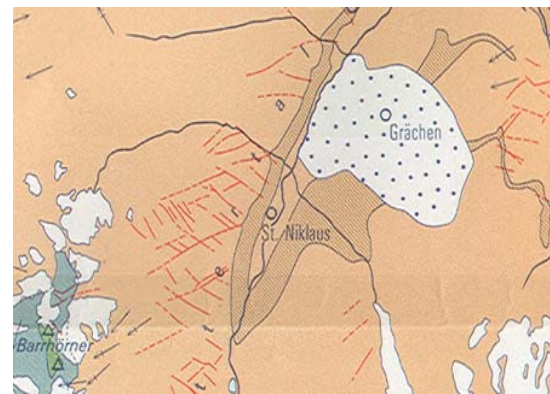
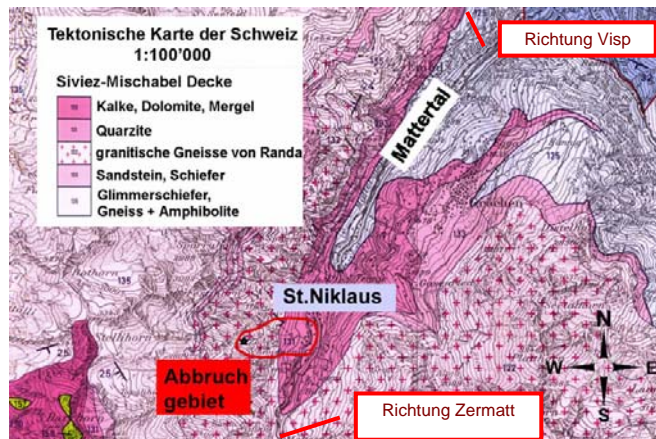
La construction de la digue (une partie sur les 3 prévues) était complètement terminée en décembre 2002.

Après l'écroulement, un autre gros bloc (1200 m<sup>3</sup>) qui risquait de se remobiliser avec de fortes précipitations a été miné dans un ravin.

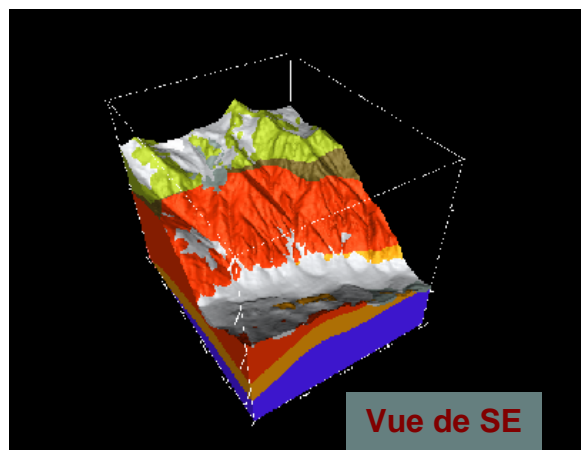
Les mouvements de glissement se poursuivent toujours, (vitesse moyenne env. 1 à 2 mm/jour), accompagnés de chutes de pierres et de blocs isolés. Il y a encore une relation entre les vitesses de glissement et les précipitations.

**Contexte géologique (diapo 5) et système de fractures**

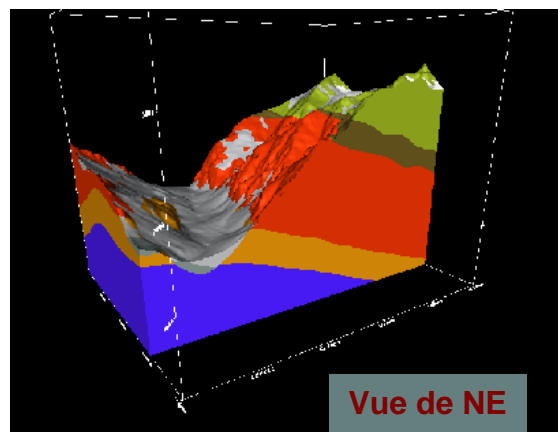
Le secteur est composé de « Gneiss oeilé de Randa » (appartenant à la nappe du Gd. St. Bernard, aujourd'hui appelée nappe de Siviez-Mischabel). Il s'agit de gneiss monotone, avec présence parfois de niveaux plus fins riches en micas. La zone de l'éboulement se situe directement au-dessus de la courbure du synclinal permo-carbonifère de St. Nicolas (figure ci-dessous). De grandes structures régionales créent des vires et des couloirs raides.



Contexte géologique



Vue de SE



Vue de NE

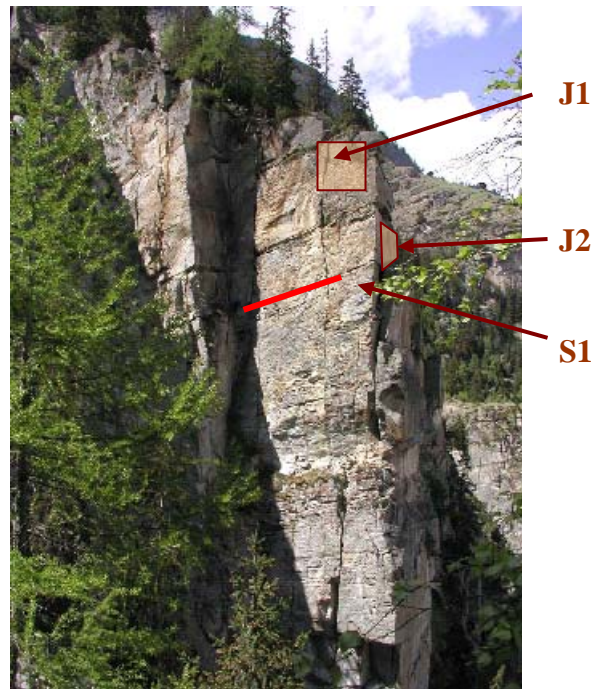
**Légende :**

- Bleu: Nappe de Pontis
- Orange: couverture carbonifère à triasique
- Rouge: Augengneiss de Randa (gneiss oeilé)
- Brun: couverture permo-carbonifère
- Vert: socle de la nappe de Siviez-Mischabel
- Gris: Quaternaire

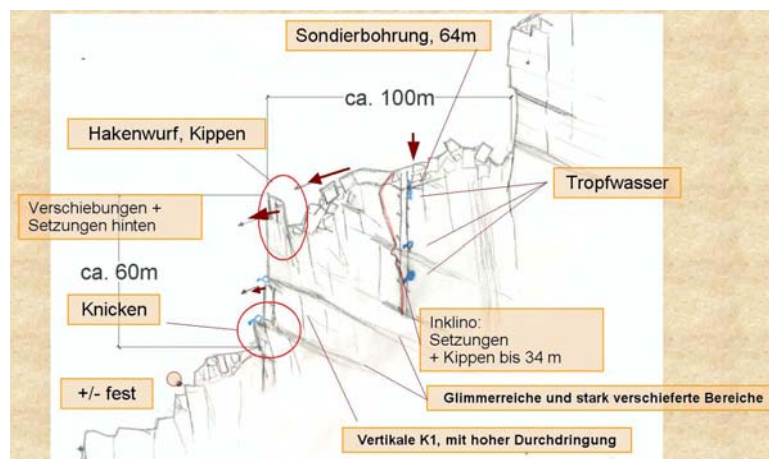


En plus des grandes failles régionales, l'agencement structural est dirigé par deux systèmes de fractures :

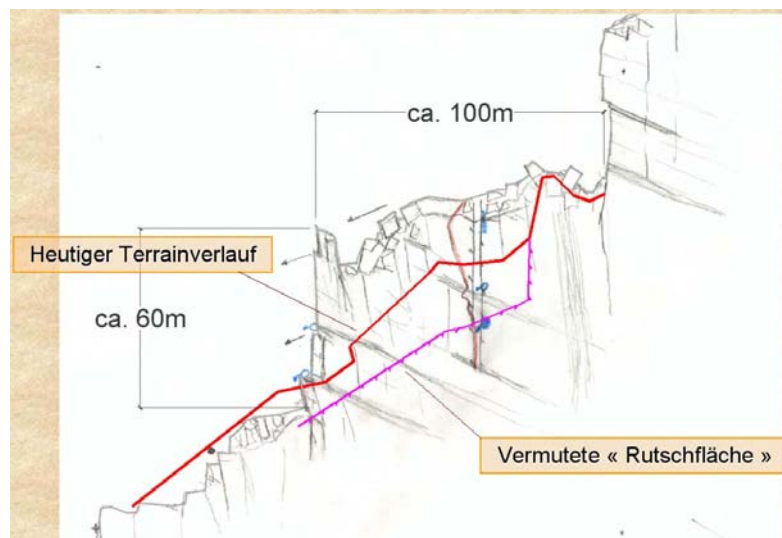
- J1: (025/75): plonge fortement, orienté perpendiculairement à l'axe de la vallée ;
- J2: (110/80): plonge fortement, orienté parallèlement à l'axe de la vallée
- S1: (240/18): faiblement incliné, opposé à la pente topographique



Les deux discontinuités J1 et J2 sont à l'origine de nombreuses falaises en rive gauche du Mättertal : elles provoquent la formation de piliers (prismes rectangulaires, photo ci-contre).



Profil schématique du compartiment rocheux instable **avant** l'éboulement



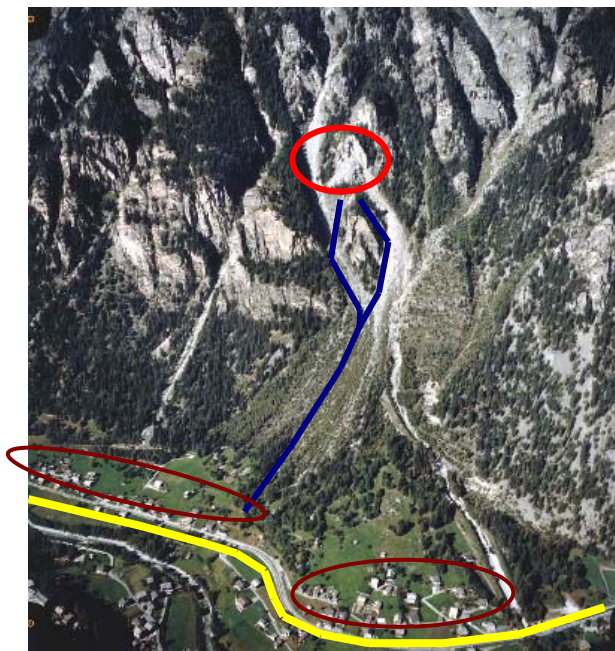
Profil schématique du compartiment rocheux instable **après** l'éboulement



## Aléa et danger

L'aléa (rouge sur la photo ci-dessous) se situe directement au-dessus des hameaux de « Schwidernu » et « ze Stalu » (commune de St. Nicolas, 1 km au sud de la gare, cercles marrons), qui comptent environ 120 habitants et 3 petites entreprises ; il menace également 800 m de ligne du chemin de fer Matterhorn-Gotthard-Bahn et la route secondaire Stalden-Zermatt (jaune).

La trajectoire de l'éboulement (bleu) se fait sur 600m de hauteur, avec une pente moyenne 32° ; la durée de l'écroulement, calculée d'après les études trajectographiques, est de 60 sec.



## Historique

Les premières chutes de blocs importantes ont lieu dans les années 1930, reportées par des habitants du village ; toutefois des photos d'époque (voir le *powerpoint diapos 11 et 12*) montrent encore une zone de forêt qui avait disparu en 2000.

Plusieurs appréciations géologiques de la zone ont été réalisées entre 1990 et 2001, entre autre pour le PNR31 « Changements climatiques et dangers naturels ».

Pendant les intempéries d'octobre 2000, plusieurs milliers de mètres cubes s'éboulent ; un bloc de 10 m<sup>3</sup> s'est arrêté à quelques mètres d'une maison habitée.

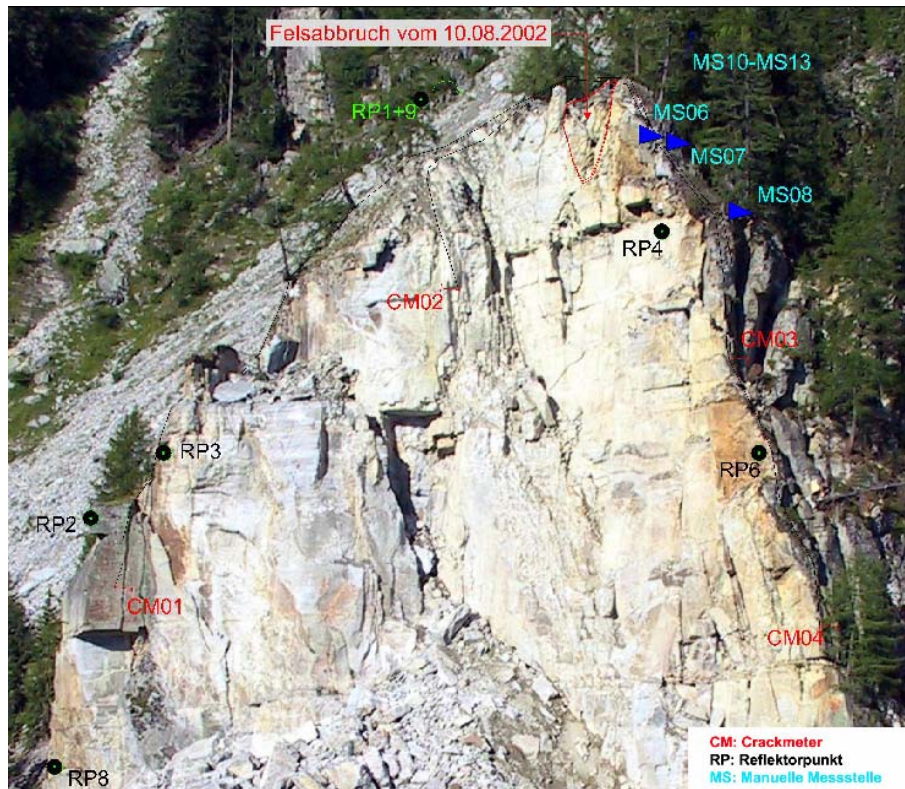
A partir de cet événement, des cartes de danger ont été établies et un projet de digue est planifié.

### Succession des événements de juillet à novembre 2002 :

18.07.2002 Deux chutes de blocs d'environ 120 – 250 m<sup>3</sup> : le président de la commune (maire) demande immédiatement des explications ;

19.07.2002 Evaluation de la situation par le bureau Rovina : sur le terrain, les géologues observent des fissures ouvertes, des racines étirées et des arbres déracinés et tordus, avec notamment une forte activité en bordure de la tête instable ; d'autres indices tels que des blocs retournés, des phénomènes de pression dans la roche (fissures de tension, éclatement), du flambage et même des décolorations de la roche (témoins de déformations actives) font suspecter un mouvement important de la falaise (voir le *powerpoint diapos 25 à 32 TMOINS MUETS*) ;

08.08.2002 Début des mesures de déformation : extensomètres, fissuromètres, réflecteurs pour visée au théodolite, tiltmètre pour mesurer le pendage de la falaise, centrale d'acquisition avec transmission Natel (téléphone mobile) vers le bureau Rovina (voir PRECISIONS, *diapos 33-34*) : les vitesses de glissement sont très importantes (près de 5 – 10 mm / jour) ;



Instrumentation de l'ensemble de la tête instable

- 10.08.2002 Chute de rocher 300 – 400 m<sup>3</sup> après de fortes précipitations ;
- 05.09.2002 Doublement des vitesses de déplacement => établissement d'un plan d'évacuation, décision de lancer un projet de digue comme mesure urgente, formation d'une cellule de crise ;
- 16.09.2002 Premières informations à la population ; intégration d'un expert pour disposer d'un deuxième avis ;
- 28/30.09.2002 Visite sur le terrain du Prof. Parriaux, expert désigné : son avis qui confirme les premières hypothèses ;
- 30.09.2002 Chute de 800 m<sup>3</sup> de la paroi (photo *diapo 36*), précédée d'une très faible accélération du mouvement (*diapo 37*) ; la veille s'est produit un séisme (épicentre à Zermatt, ML = 2.3), qui pourrait être l'élément déclenchant ;
- 30.09.2002 Juste après la chute, une forte accélération de la masse totale (graphique *diapo 37*) conduit à l'évacuation de la population de la zone dangereuse ;
- 07.10.2002 Minage de sécurité de deux gros blocs (environ 3 000 et 4 000 m<sup>3</sup>) dont les vitesses de déplacement sont particulièrement rapides ;
- 21.10.2002 Début de la construction de la « digue du milieu » et mise en place d'une digue d'urgence dans la zone de la « digue nord » ;



01.11.2002 **Après construction de la digue d'urgence l'évacuation a été levée sauf pour deux maisons très exposées ;**

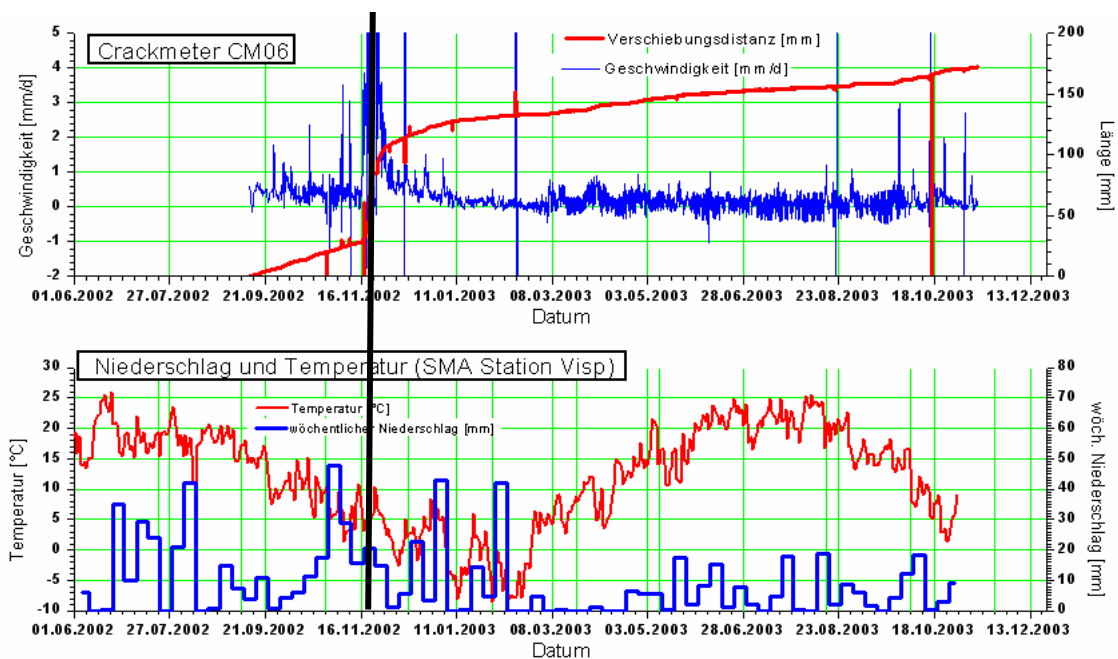
31.10 – 15.11 Forage de 60 m de profondeur à l'arrière de la zone en glissement (photo [diapo 45](#)) : aide à la mise en place d'un modèle géomécanique ([diapos 42-44](#)) ;

16.11.2002 Fortes précipitations, accélération du glissement (**graphique et tableau ci-dessous**), **évacuation de la zone Nord** ;

20.11.2002 Nouvelle augmentation de la vitesse de glissement, indiquée par tous les instruments de surveillance ([diapo 39](#)) : à 18h **évacuation de toute la zone** ;

21.11.02, 15h20 Eboulement d'environ 120 000 m<sup>3</sup> ;

23.11.02, 2h00 **Levée de l'évacuation sauf pour deux maisons.**



**Evolution des déplacements de l'extensomètre CM6 (en haut, courbe rouge) et courbe des températures et précipitations (en bas, respectivement rouge et bleu)**



**Tête instable avant et après l'écoulement du 21/11/2002, vue de face****Tête instable avant et après l'écoulement du 21/11/2002, vue de profil**

Datum / Zeit	Zeit vor Abbruch	Verschiebung [mm]	Momentane Rutschgeschwindigkeit		Niederschlagsmengen Medji [mm] vor dem Ereignis			Bemerkung
			[mm/Tag]	[mm/Std]	Summe 24 Std	Summe 48 Std	Summe 7 Tage	
08.08.2002 08:00	105.3 Tage	0	-					
10.11.2002 08:20	11.3 Tage	751	8.9	0.4	3.3	3.6	18.5	
15.11.2002 08:00	6.3 Tage	814	13.0	0.5	12.6	12.6	29.6	
17.11.2002 08:15	4.3 Tage	899	75.2	3.1	26.3	46.1	72.1	Evacuation partielle
19.11.2002 08:00	2.3 Tage	1081	96.0	4.0	0.0	14.6	73.3	
20.11.2002 07:50	1.3 Tage	1227	147.0	6.1	6.3	6.3	79.6	
20.11.2002 16:45	22.6 Std	1296	211.2	8.8	0.9	7.2	80.5	Evacuation totale
21.11.2002 07:30	7.8 Std	1690	641.1	26.7	0.9	7.2	80.5	
21.11.2002 09:45	5.6 Std	1777	928.0	38.7	0.9	7.2	80.5	
21.11.2002 13:15	2.1 Std	2025	1700.6	70.9	0.0	0.9	76.1	
21.11.2002 15:20								Eboulement

Evolution des vitesses (mm/jour et mm/h) ayant conduit aux évacuations

**Cellule de crise et gestion du risque**

La cellule de crise, formée de la « Zivilschutzanlage » (Protection civile), des pompiers et du géologue en chef du bureau Rovina, a assuré :

- Le traitement de toutes les décisions ;
- La fermeture et le contrôle des zones d'évacuation ;
- La prise en charge de la population évacuée (toutes les personnes ont pu être logées chez des particuliers) ;
- La coordination avec la ligne de chemin de fer Matterhorn Gotthard, l'armée, les différents services, etc. ;
- L'information régulière à la population (env. 2 à 4 fois par semaine), via un bulletin de presse ou des réunions publiques ;
- La publication d'un bulletin de presse.



### *Conclusions*

D'après cet exemple, il est possible de prévoir un éboulement avec un bon système de surveillance.

#### D'un point de vue technique :

- Il est important d'avoir une écoute de la population locale, qui observe quotidiennement les changements de la falaise, y compris les « petits » événements (à noter dans le cadastre des événements).
- Application immédiate de deux systèmes de mesures redondants, si nécessaire
- Le modèle géomécanique, s'il est réévalué et amélioré après sa mise en place initiale, est un outil précieux pour la prévision.
- L'intervention d'un expert pour un deuxième avis peut s'avérer nécessaire.
- Des travaux de protection d'urgence peuvent être entrepris dans l'attente d'ouvrages définitifs (digue d'urgence dans la zone Nord, la digue finale prévue n'a pour l'instant pas pu être réalisée pour des questions financières)

#### D'un point de vue organisationnel :

- Il est indispensable que la cellule de crise coordonne l'ensemble des activités, et que les autorités soient disposées à prendre des décisions « non bureaucratiques » et surtout rapides.
- Aucune décision ne doit être prise « à la légère », sans discussion objective sur toutes les variantes possibles. Un changement de situation (par ex. levée de l'évacuation) ne peut se décider que sur la base de raisons fondées.
- Dès qu'une évacuation est envisagée, il faut également penser à la levée de l'évacuation (sur quels critères).
- **Fixer des valeurs seuil à l'avance est difficile** ; dans le cas de Meidji, c'est la comparaison des vitesses de déplacement (tableau ci-dessus), couplée à l'analyse du comportement géomécanique (modèle) qui a servi de base de décision.
- Une information franche et détaillée de la population, en abordant les incertitudes comme les certitudes, est un gage de réactivité en situation d'urgence. Cela passe par l'établissement avec soin d'un bulletin de presse « honnête » (toutes les informations fournies à la presse passaient au préalable par la cellule de crise).
- Enfin, on peut recommander de réaliser les travaux avec des entreprises et des ouvriers de la région, qui connaissent bien les problèmes locaux.

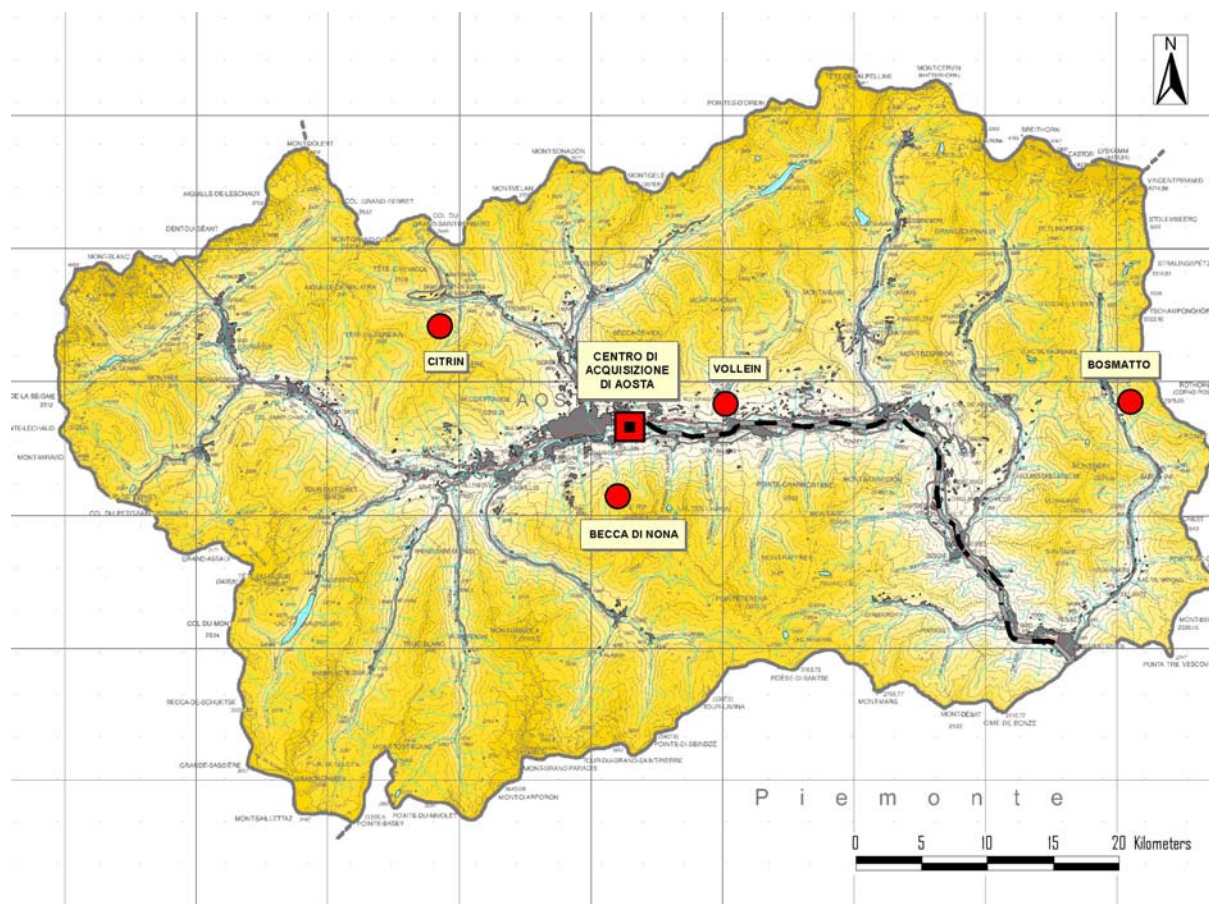
### 3.3.2. Displacement and rainfall threshold values for large landslide forecast in real time: the example of the “Becca di Nona” Landslide (Aosta)

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 :

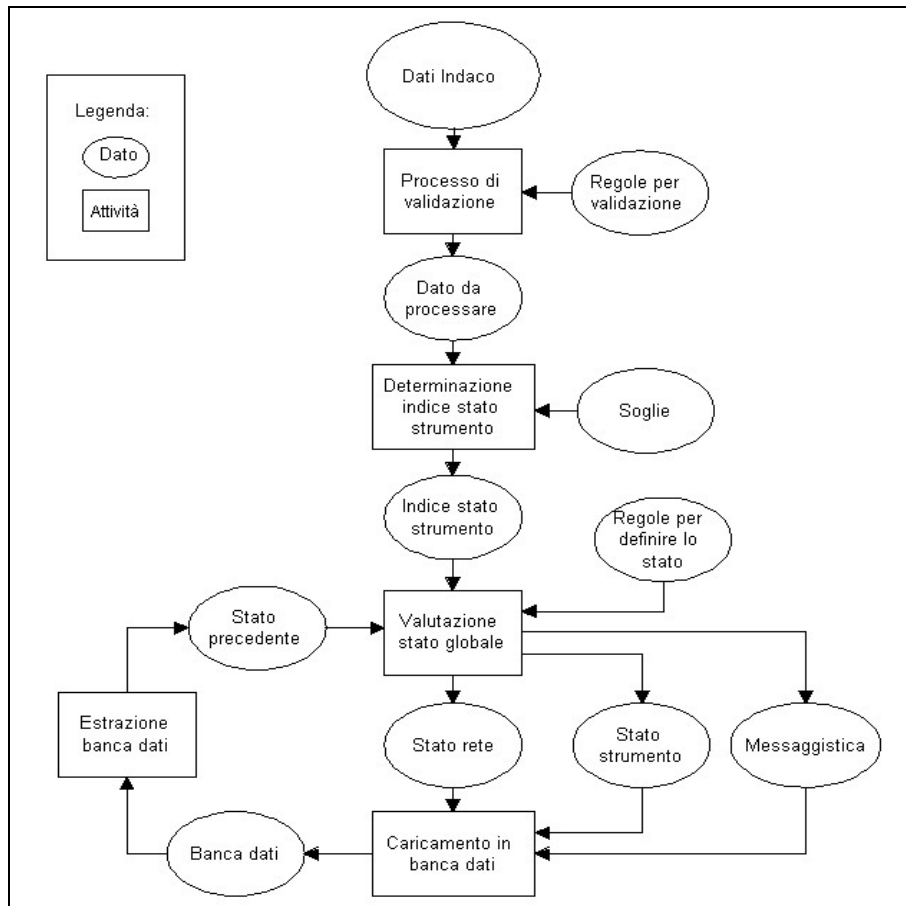
Le réseau, dont le centre d’acquisition de données est situé à Aoste, gère 4 sites de mouvements de terrain (cf. *sites pilotes*) : Becca di Nona, Citrin, Bosmatto et Vollein.



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

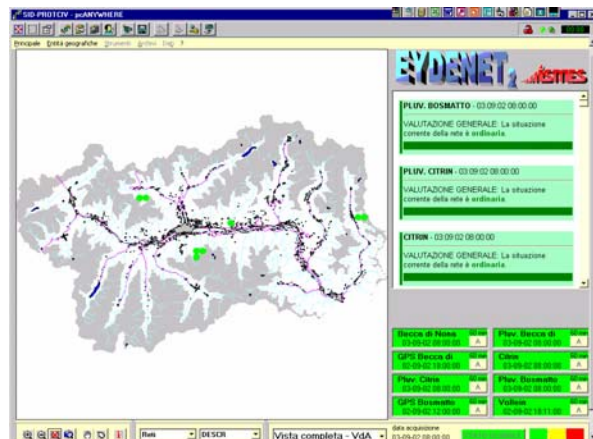
no data	
normal	
pre-alert	
alert	

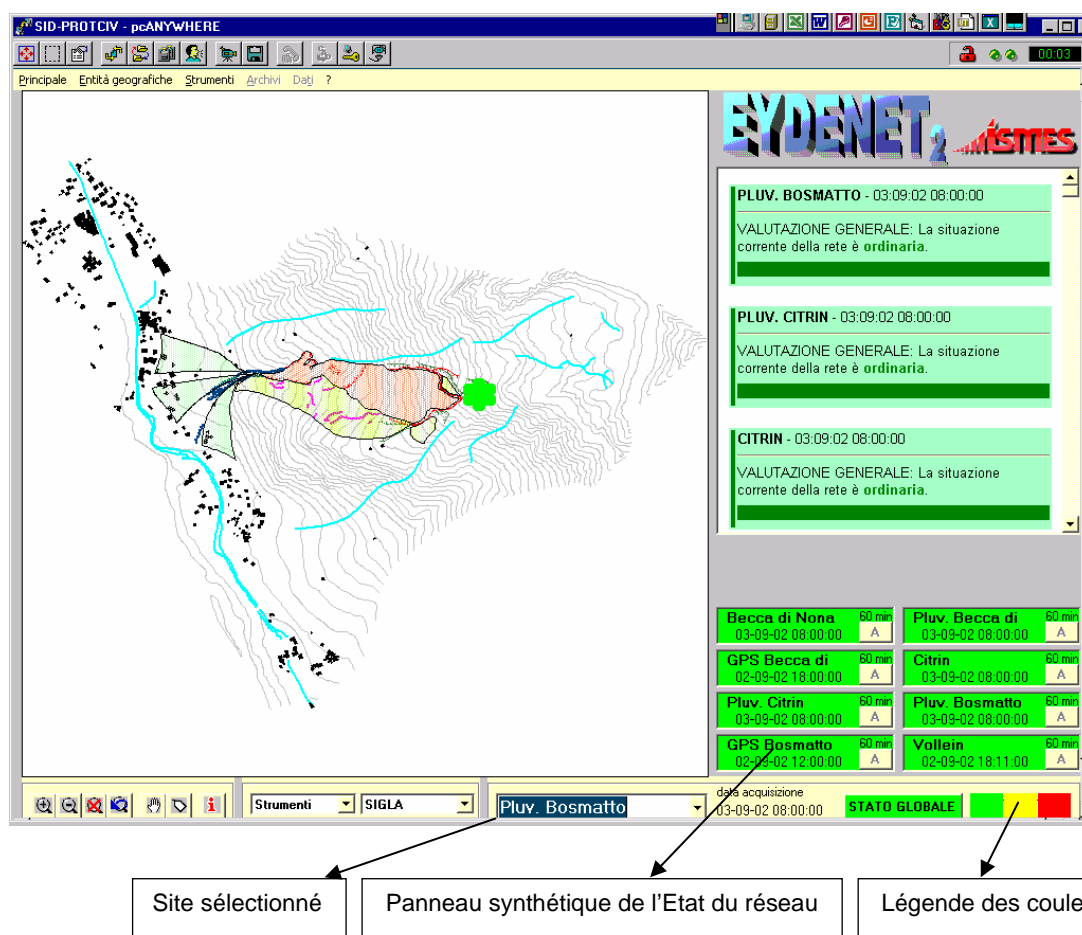
Des règles établies (Regole) permettent de définir 4 états du réseau global : sur l’écran d’affichage de la centrale d’acquisition, l’état du réseau et des instruments est visualisé selon le même code de couleur (copie d’écran ci-dessous).

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 ;



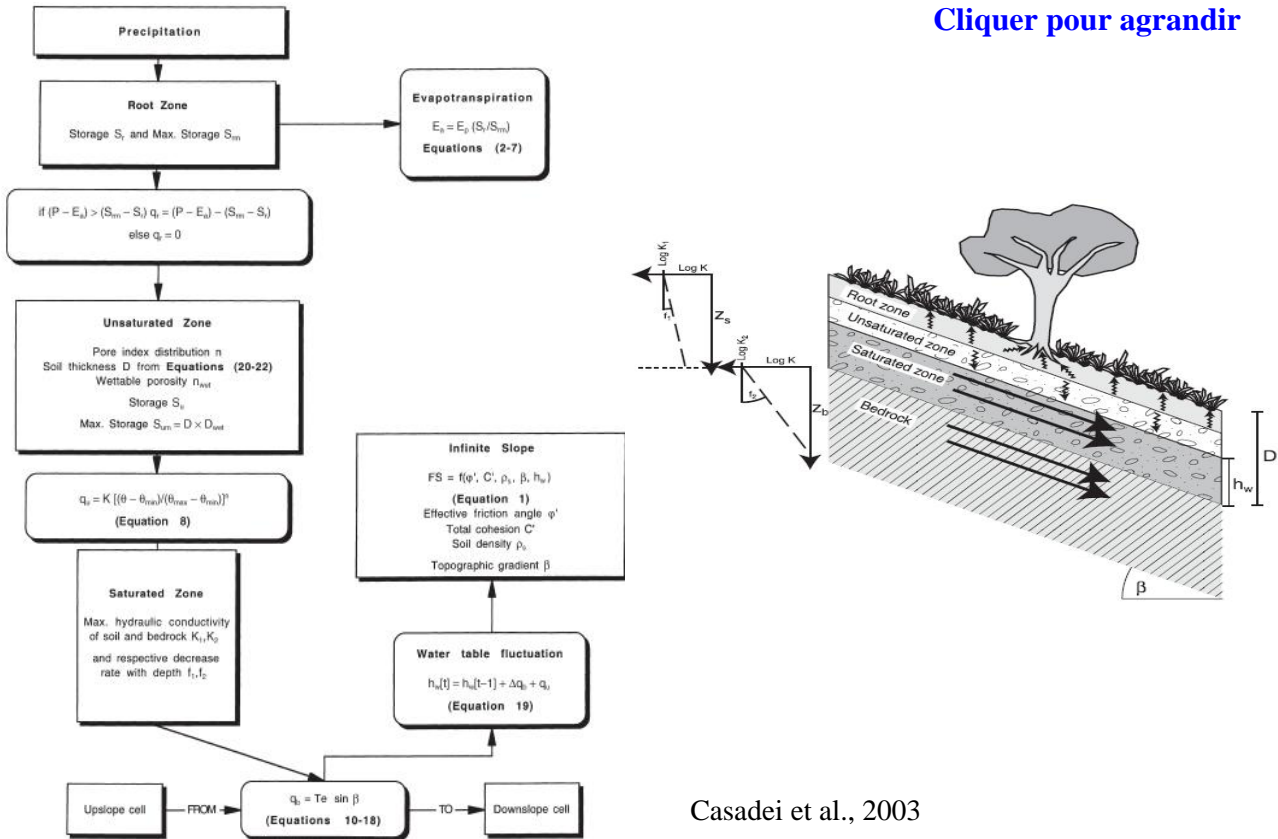
**Approche déterministe :** elle peut être appliquée seulement si un modèle évolutif du phénomène considéré existe (ce qui nécessite beaucoup de données !) ; elle est donc utilisée seulement dans quelques cas particuliers.

**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.

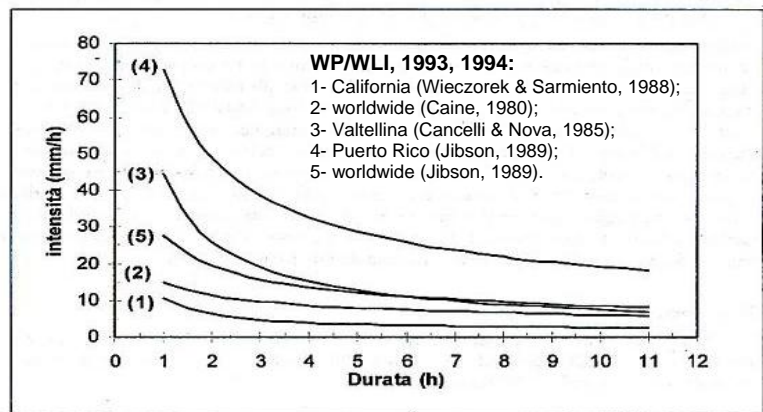
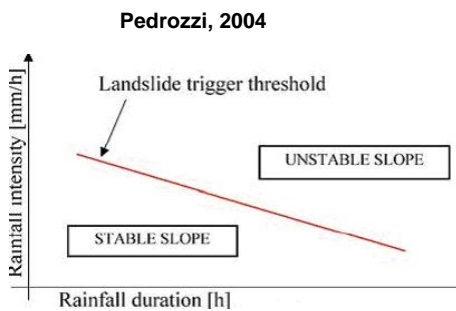
Les modèles déterministes et empiriques-déterministes combinent des données hydrologiques et hydrogéologiques complexes ; elles nécessitent de nombreux paramètres (exemple ci-dessous).

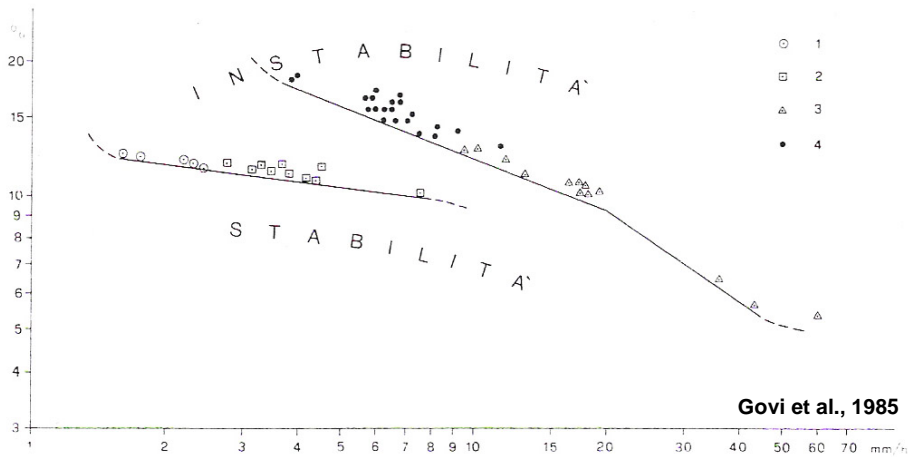
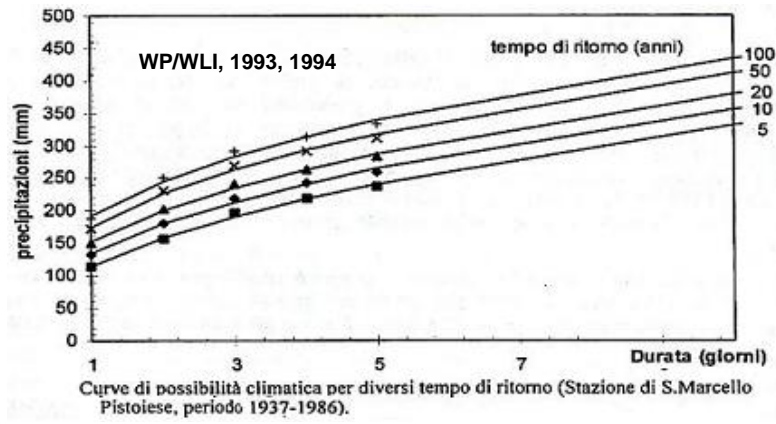
[Cliquer pour agrandir](#)



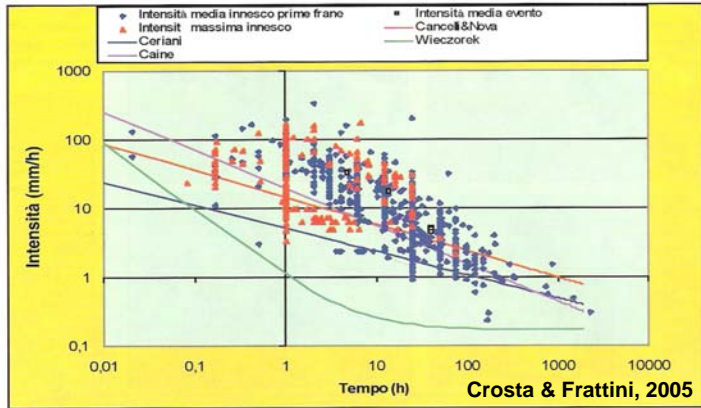
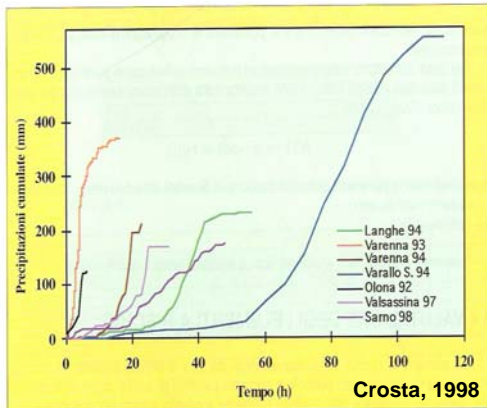
Casadei et al., 2003

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.

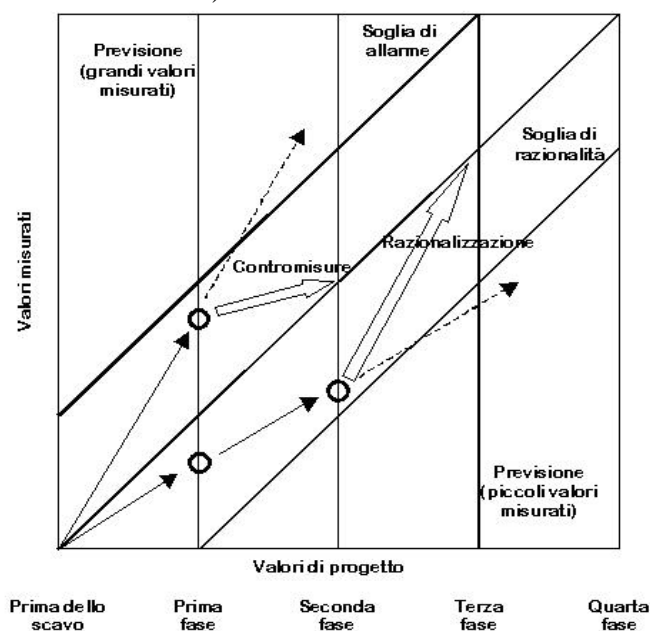
Une bonne approche est sans doute l'approche observationnelle (« learn-as-you-go, développée par Terzaghi en 1945): il s'agit de monitorer, comparer les résultats avec les prévisions, puis agir en fonction des résultats, par exemple en proposant une intégration de système de surveillance, des investigations 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.

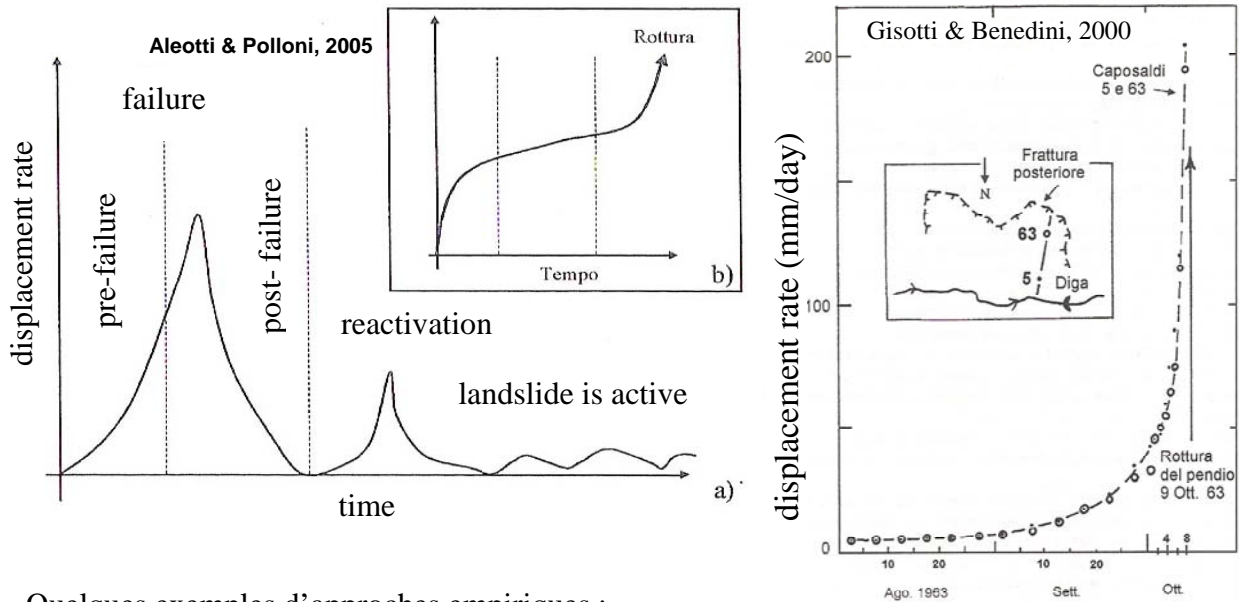
Les méthodes empiriques sont donc plus communément appliquées, sur la base de mesures relativement simples (fissuromètres, extensomètres...).

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.

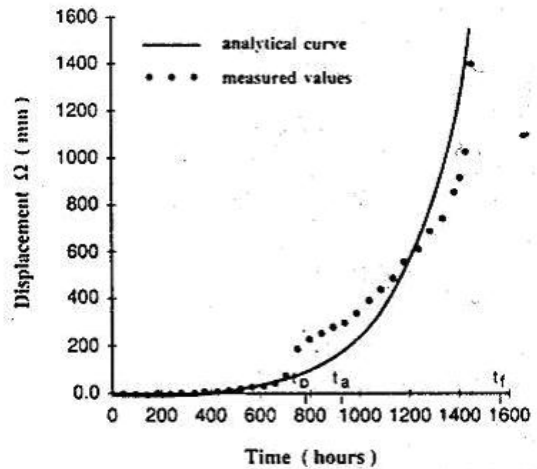
$$\ddot{\Omega}(t) = A \cdot [\dot{\Omega}(t)]^\alpha$$

con

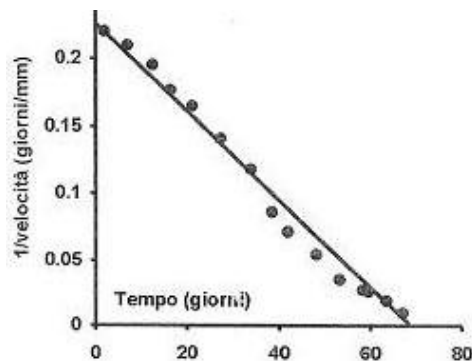
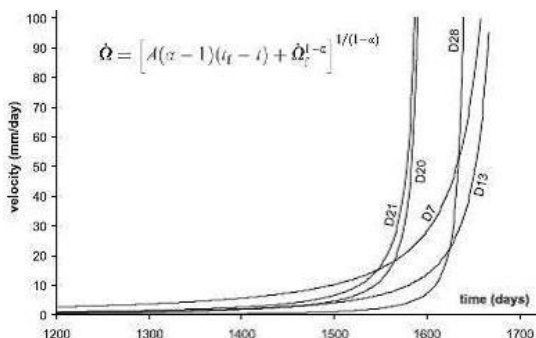
$\Omega(t) : \text{spostamento [L]}$   
 $\dot{\Omega}(t) : \text{velocità [LT}^{-1}\text{]}$   
 $\ddot{\Omega}(t) : \text{accelerazione [LT}^{-2}\text{]}$

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

Voight, adapté par Borsetto et al., 1991



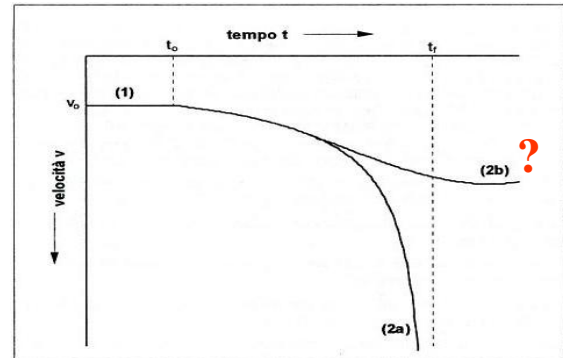
Crosta et Agliardi (2002, ci-dessous à gauche) ont fait évoluer cette méthode pour déterminer des valeurs seuil à partir des caractéristiques d'évolution, alors que Petley et Petley (2004) utilisent une relation entre l'inverse de la vitesse de déplacement et le temps (ci-dessous à droite).





### 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](#))

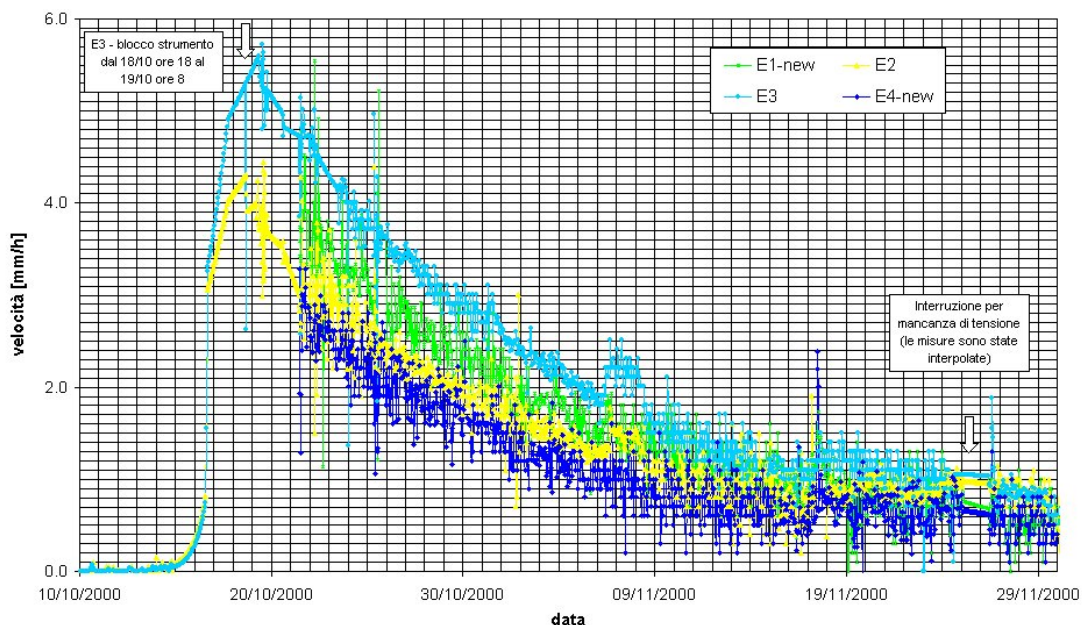
Il s'agit d'un site surveillé depuis 1998, qui s'est réactivé lors de l'épisode alluvial d'octobre 2000, avec des taux de déplacement atteignant 6mm/h. Le volume concerné est d'environ 2 millions de m<sup>3</sup> et les déplacements annuels moyens d'environ 5-7cm / an en planimétrie et 5 cm/ an en vertical.

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



Les valeurs seuil initiales (tableau ci-dessous) ont été proposées sur la base des déplacements maximaux observés durant la réactivation d'octobre 2000, soit 4,5 à 6 mm/h (graphe ci-dessous).

	<i>threshold value</i>	<i>pre-alert</i>	<i>alert</i>
<b>Extensomètres E1, E2, E4</b>	avg 24 h displacement rate	1.2 mm/h	2.4 mm/h (2 subs. obs.)
	avg 4 h displacement rate		2.4 mm/h
<b>Extensometer E3 and Automatic GPS stations</b>	avg 24 h displacement rate	1.5 mm/h	3.0 mm/h (2 subs. obs.)
	avg 4 h displacement rate		3.0 mm/h

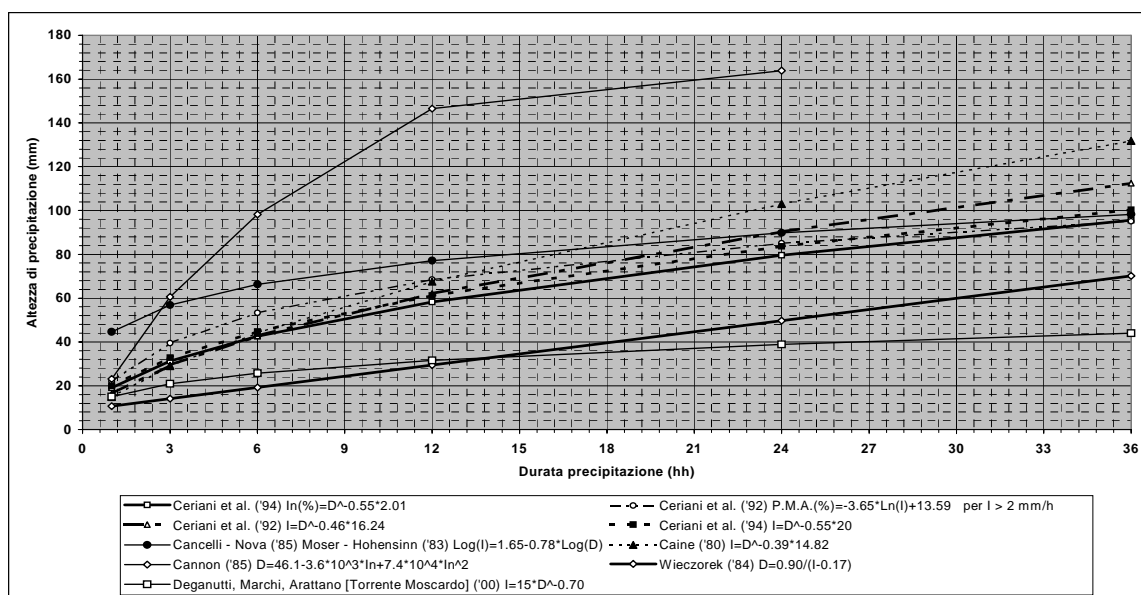
Indépendamment, des mesures GPS manuelles sont réalisées périodiquement.

Seuils de précipitation

Les valeurs seuils sont seulement représentatives de l'occurrence d'une lave torrentielle dans le bassin versant du torrent Comboé, et pas de l'activation du glissement.

De plus, un seul événement a été enregistré jusqu'à aujourd'hui, celui d'octobre 2000. En conséquence, les valeurs seuil initiales proposées ont été tirées de la littérature (tableau ci-dessous): c'est une approche conservatrice qui a été adoptée, considérant la plus basse des courbes « quantité de précipitation / durée » publiée.

Becca di Nona pluviometer	
<i>threshold value</i>	<i>alert</i>
Rainfall intensity 1h	14.8 mm/h
Rainfall intensity 3h	29 mm/h
Rainfall intensity 6h	42.6 mm/h
Rainfall intensity 12h	58.3 mm/h
Rainfall intensity 24h	79.6 mm/h
Rainfall intensity 36h	95.1 mm/h



[Cliquer pour agrandir](#)

## 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. 5<sup>th</sup> 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 2<sup>nd</sup> 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. 3<sup>rd</sup> 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. Prospectives 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 6<sup>th</sup> ICSMFE, Montreal.
- Saito M. (1969). *Forecasting the time of failure by tertiary creep*, Proceedings of 7<sup>th</sup> 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 ».



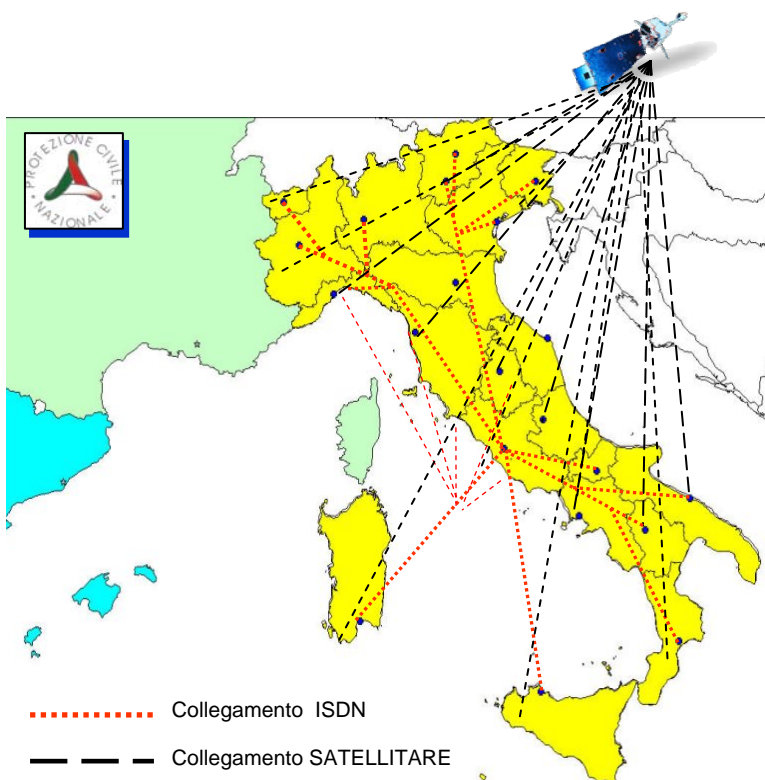
### 3.4.4. Le système de prévision des risques hydro-géologiques et hydrauliques à l'échelle régionale : activité du centre fonctionnel.

Sara RATTO, RAVA

#### Le Centre Fonctionnel (CF) :

Il s'agit d'une salle opérationnelle où sont effectuées les prévisions à courts et moyens termes des effets hydro-géologiques possibles induits sur le territoire par les conditions météorologiques prévues par les bureaux compétents ; une surveillance de la situation météo-hydrologique réelle s'effectue alors en conséquence.

L'objectif est d'alerter la Protection Civile sur des situations de risques hydro-géologiques potentiels liés à des précipitations intenses et prolongées.



La loi 267 de 1998 institue le réseau CF ; la directive PCM du 27/02/2004 règle les missions, fonctionnements et modalités de gestion du CF et du système de Protection Civile.

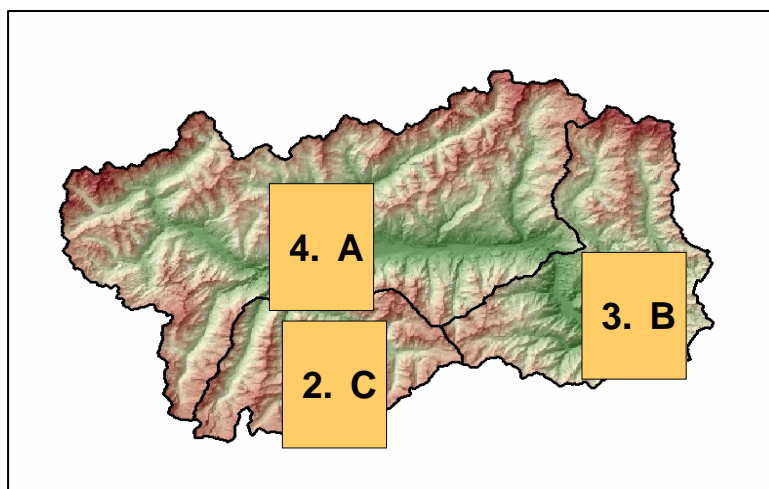
Les informations du bureau hydrographique concernant l'événement alluvial d'octobre 2000 et l'acquisition des compétences du Service Hydrographique du bassin du Fleuve Po (DL 112/98) ont permis d'élaborer un premier embryon d'un système de prévision du risque hydro-géologique et hydraulique régional et de surveillance des phénomènes pluviométriques et d'inondations, comme support de l'activité de la Protection Civile. Ce travail a été réalisé par le Centre Fonctionnel, avec la collaboration de l'Office météorologique régional et du Centre Fonctionnel de l'ARPA Piémont, ainsi que d'autres structures telles que l'Office des avalanches, l'Office de surveillance des mouvements de terrains, l'Office des barrages, l'ARPA Vallée d'Aoste...

Au sens de la directive PCM du 27/02/2004, l'activité du CF se divise en 3 phases :

- (1) une phase de connaissance, destinée à définir et mettre à jour les éléments tecnico-scientifiques de base qui contribuent au fonctionnement du Système d'Alerte régional ;
- (2) une phase de prévision : la prévision des effets au sol induits par les situations météo prévues (=issues des prévisions) aboutit avec l'émission d'un avis / bulletin de criticité hydro-géologique et hydraulique régional ;
- (3) une phase de monitoring / surveillance : lorsqu'on prévoit une criticité au moins modérée, pendant cette phase il s'agit de vérifier le niveau de criticité actuel et prévu, par confrontation des mesures relevées avec les seuils adoptés et éventuellement les informations fournies par les observateurs locaux ; on parvient finalement à l'émission d'un bulletin de mise à jour de la situation météo-hydrométrique régionale.

## (1) Phase de connaissance

- Le territoire est subdivisé en trois zones d'alerte :
  - homogènes en terme de comportement météo ;
  - homogènes en terme de réponse hydraulique.



- L'approche se fait en deux temps :
  - a) Définition des types de risque et des scénarios de risque en terme de :
    - effets territoriaux (processus naturels selon lesquels le risque se manifeste :
      - ponctuel : éboulements, phénomènes torrentiels dans des bassins secondaires ;
      - surfacique : inondations (crues) qui intéressent des surfaces majeures de 100 km<sup>2</sup> ;
    - dommages attendus : légers ou graves.
  - b) Définition du niveau de criticité = intensité avec laquelle se manifeste le risque : modéré, élevé.

Les niveaux de criticité sont étroitement corrélés aux dommages : ils expriment donc les niveaux de danger / risque.

- Détermination et mise à jour du système de seuils :

- a) *Seuils pluviométriques* : l'approche pour l'étude des seuils de déclenchement peut être :
  - de type physique, basé sur des modèles numériques qui tiennent en compte du rapport entre les précipitations, l'infiltration efficace, les pressions neutre et la stabilité des versants ;
  - de type empirique, basé sur l'analyse historique du rapport entre les précipitations et le déclenchement des mouvements de terrain.

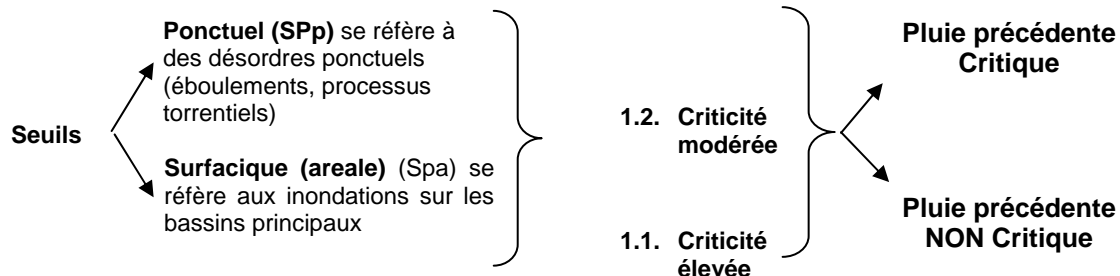
Dans le cas d'un système d'alerte géré par les CF, il faut travailler sur de larges portions de territoire (échelle régionale) et des relations entre les précipitations et le déclenchement de phénomènes de typologie très diverses (gravitaires mais aussi liés aux processus hydrauliques). Cela conduit à adopter une approche statistico-probabiliste, très différente de celle qu'on peut adopter dans le cas d'un système d'alerte lié au monitoring de phénomènes ponctuels.

Le modèle adopté (mis au point dans le cadre de la convention entre le Département de protection Civile et le centre de compétences de l'ARPA Piémont) prévoit que le seuil pluviométrique soit défini par le **temps de retour** (Tr) pour lequel est minimale la fonction de corrélation du nombre d'alarmes manquées et de fausses alarmes.

$$\Phi = p_1 * MA_{(TR)} + p_2 * FA_{(TR)}$$

Dans le premier cas on a enregistré des dommages sans le dépassement de seuil et donc sans la possibilité d’alerter ; dans le deuxième cas on a dépassé le seuil, mais aucun dommage n’a été enregistré ; donc l’alerte éventuelle donnée aurait été fausse.

Avant tout on calcule le temps de retour des précipitations qui ont déclenché le phénomène, en considérant différentes durées (1, 3 , 6, 12 heures). On suppose alors que l’intensité associée au temps de retour plus élevé soit responsable du dommage. Si le dégât est de type hydrogéologique (ponctuel) la hauteur de pluie est calculée sur la base des données de la station la plus proche, tandis que si le dégât est de type hydrologique (aréal) la hauteur de pluie est calculée à l’échelle du bassin versant. La méthode utilisée décerne aussi les dommages graves des dommages légers et tient en compte l’effet de saturation, à travers le calcul de la pluie antécédente. L’analyse des résultats a permis d’adopter des seuils différents pour chacune des zones d’alerte. De suite on schématise le noyau du processus.



✓ Analyse historique des événements :

Les données ont été organisées en tableau selon les informations nécessaires.

Date	Ora	Comune	Località	Gravità del danno	Danno diffusional	Stagione	Periodo climatico	Zona di allertamento	Tipo di fenomeno	Tipo di danno	Descriz. Danni	Effetti geomorfologici	Causa	Stazione pluviometrica di riferimento
15/02/1990	-	Charvensod	Piscine	lieve	Localizzato	I	dal 1990-2000	A	Frana di colamento	d36		-		
15/02/1990	12.30	Etroubles	Chez Les Biérics	grave	Localizzato	I	dal 1990-2000	A	Neve torrenzialia	d36,35,05		-		
15/02/1990	-	Pré-St-Didier	Km 18,200 della S.S. 26 per La Thuile	lieve	Localizzato	I	dal 1990-2000	A	Lava torrenzialia	d36		-		
15/02/1990	-	Courmayeur	La Palud	lieve	Localizzato	I	dal 1990-2000	A				-		
15/02/1990	-	Courmayeur	La Saxe	lieve	Localizzato	I	dal 1990-2000	A				-		
15/02/1990	18.00	Pré-St-Didier	Pont de La Large	lieve	localizzato	I	1990-2000	A	Colata di terra e di detrito	d21	danni non precisati	-	Acque ruscellamento	Courmayeur-La Thuile
27/06/1990	-			lieve	localizzato				Frana di crollo	d36	danni ad alcuni laterici			Station pluvi. de référence
11/12/1990	-			lieve	localizzato	I	1990-2000	A	crollo di detrito	d14,44	Danni a coltivi e a pista di servizio	-	ruscellamento, d'infiltrazione e piogge intense	Aosta, Valgrisenne
08/03/1991	-	Fontainemore	Ronc	lieve	Localizzato	I	dal 1990-2000	B	Colata di terra e fango	d05,37		-		
08/03/1991	-	Gignod	Roula	lieve	Localizzato	I	dal 1990-2000	A	Colata di terra e fango	d25,14		-		
08/03/1991	-	Villeneuve	Ru Champlong	lieve	localizzato	I	1990-2000	C+A	frana di terra	d44,36	Danni alla pista del Ru de Champlong e al bosco	-	ultime abbondanti precipitazioni	Aymavilles, Avise
08/03/1991	-	Avier	Chez Les Moget	grave	localizzato	I	1990-2000	A	Frana di crollo	d02,36,42	alle abitazioni, al bosco, al muretto di sostegno	-	Fratturazione della roccia, acque di infiltrazione	Avise
08/03/1991	-	Avier	Leverogne	lieve	localizzato	I	1990-2000	A	Scivolamento rotazionale in terra	D14	Danni a coltivi	-	Acque d'infiltrazione e di ruscellamento	Avise
08/03/1991	-	Avier	Plan Raffort	lieve	localizzato	I	1990-2000	A	Colata di terra	d05,d45	danni alla strada interpodereale per Plan Raffort	-	Acque d'infiltrazione e di ruscellamento	Avise
08/03/1991	-	Champorcher	Echely	lieve	localizzato	I	1990-2000	B	Scivolamento di detrito	d21		-	Acque d'infiltrazione	Champorcher
08/03/1991	-	Hone	Plan Fiau-Valley Rovines	lieve	localizzato	I	1990-2000	B	Crollo di detrito	d26,08	Alla strada regionale e all'acquedotto	-	Acque d'infiltrazione e di ruscellamento	Hone Bard

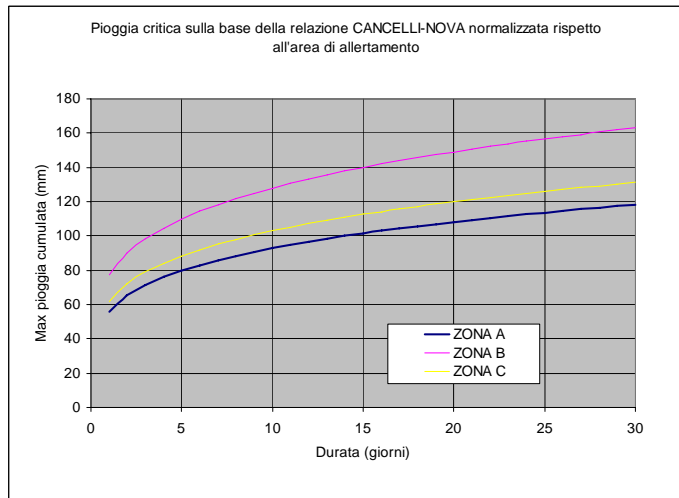
A l’issue de l’analyse de centaines d’événements, 404 ont été retenus, 227 pour la définition des seuils ponctuels et 167 pour les seuils surfaciques.

✓ Analyse de l'état de saturation des sols :

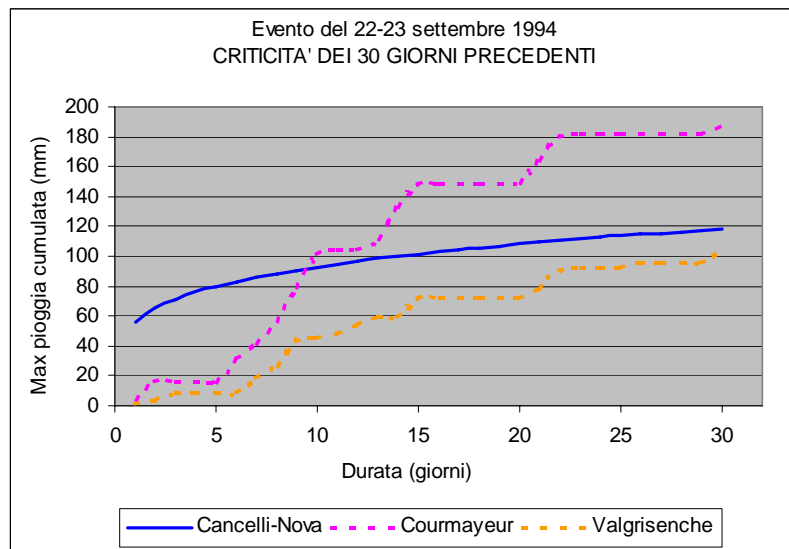
- Pour le seuil ponctuel (SPp) on utilise la relation Cancelli et Nova (1985) recalée sur la zone étudiée grâce à un facteur de normalisation N :

$$I = (44.66 * D^{(-0.78)}) * N$$

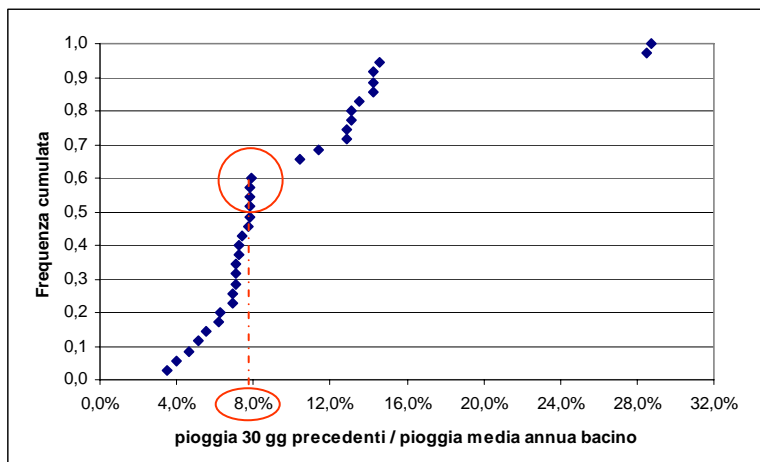
I : intensité de pluie en mm/h  
 D : durée en heure  
 N: facteur de normalisation = rapport entre la pluie annuelle de la zone testée et celle de la zone sur laquelle est obtenue la relation



Dans le cas de dommages ponctuels, il faut confronter pour chaque station la courbe des précipitations cumulées sur les 30 jours précédents et la courbe de Cancelli-Nova : en cas de dépassement, on considère critique la pluie antécédente.



- Pour le seuil surfacique (SPa), il faut déterminer la courbe de stabilité / instabilité => graphique des fréquences cumulées :



Graphique des fréquences cumulées

On identifie la valeur seuil où la courbe s'infléchit (8% Pluie moyenne annuelle – PMA), recalculée pour chaque bassin. Dans le cas d'un phénomène de dégâts surfaciques, si la pluie recalée à l'échelle du bassin versant sur les 30 jours précédents est supérieure ou égale à la valeur des 8% PMA, alors la pluie précédente est dite critique.



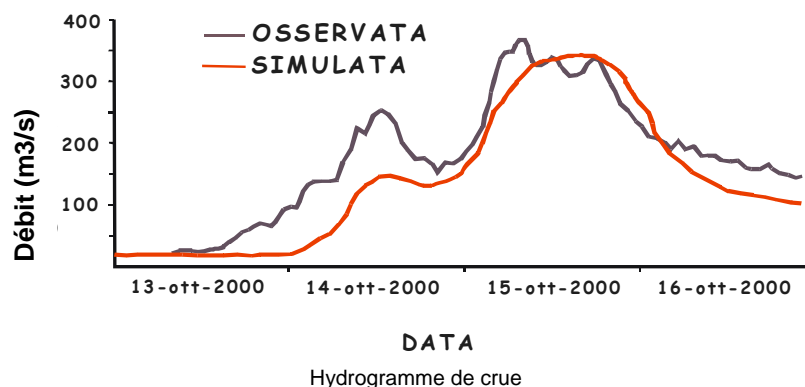
### ***b) Seuils hydrauliques :***

Ils sont déterminés par l'intermédiaire des modèles numériques Hec-RAS et Mike11.

Sur la base de ces seuils, on déclenche :

- une pré-alerte quand le niveau atteint 1 mètre sous le niveau d'inondation à la section critique ;
- une alerte pour le niveau d'inondation à la section critique.

Calage – Validation d'un modèle de prévision des crues : on utilise un modèle pluie-débit nommé DRIFT, basé sur la théorie de l'hydrogramme unitaire. En fonction de la pluie prévue le modèle génère le débit à une section donnée : à l'aide du modèle hydraulique on transforme le débit en hauteur d'eau et, sur la base des seuils, on évalue la possibilité d'alerte.



## **(2) Phase de prévision**

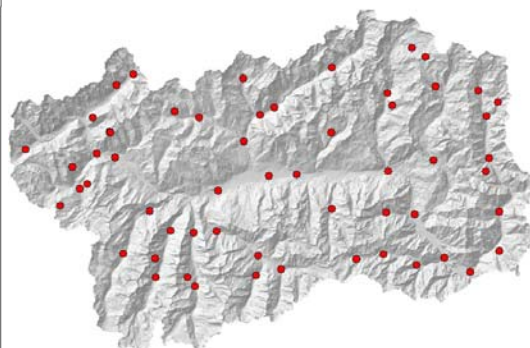
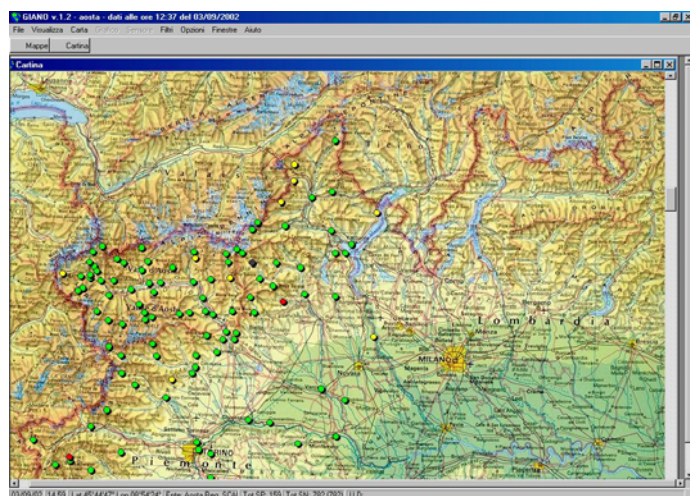
### 1- Acquisition journalière des données

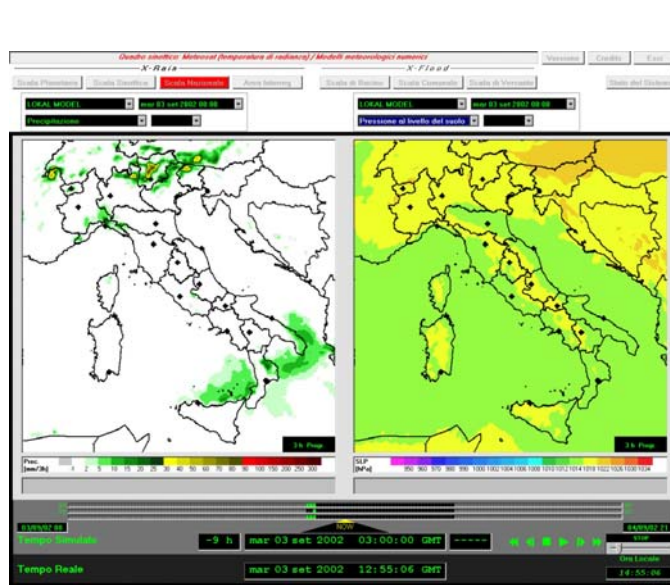
Il s'agit d'acquérir les données du réseau pour ce qui concerne le temps actuel, tandis que les prévisions météorologiques sont effectuées par l'Office météo régional et Arpa Piémont.

### 2- Analyses et confrontation des données récoltées de sources variées

Vérification de la coïncidence des diverses prévisions pour avoir un indice de fiabilité.

A l'aide des produits fournis, on effectue la vérification de la co-présence de situations qui peuvent augmenter la gravité de l'événement météorologique (altitude élevée de l'isotherme zéro degré, présence de vent siroco, position et « profondeur » des dépressions atmosphériques, situations de blocage...).





REGIONE AUTONOMA VALLE D'AOSTA PRESIDENZA DELLA REGIONE DIREZIONE PROTEZIONE CIVILE SERVIZIO INTERVENTI OPERATIVI		PROCEDURA ALLERTAMENTO
TITOLO: INFORMAZIONI METEO PER ZONE DI ALLERTAMENTO		Page: 10 / 1
DATA	NUMERO REGIONE	REGIONE ECONOMICO
2002	02	PIEMONTE



Spillette  
 - C.V.A.: fax 0165 823225, cell.marcamanda@cva-ao.it, ballatore.sergio@cva-ao.it, stefano.juglar@cva-ao.it, scialoi.mario@cva-ao.it  
 - Dipartimento Territorio Ambiente Risorse Idriche - Direzione tutela del territorio: fax 0165 776804, m.pasquolomonte@regione.vai.it - d.lavoro@regione.vai.it  
 - Dipartimento Territorio Ambiente Risorse Idriche - Servizio sistemazioni idrauliche e dissesti di versante: fax 0165 776827, m.frenco@regione.vai.it, v.vogor@regione.vai.it  
 - Dipartimento Territorio Ambiente Risorse Idriche - Ufficio Centro Funzionale: fax 0165 772291, u.drografico@regione.vai.it, centrofunzionale@regione.vai.it

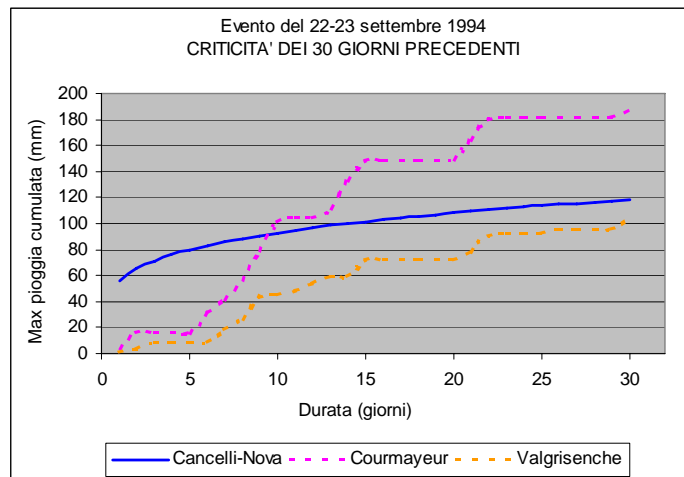
ZONA A (1) dorsale alpina, 42 valle centrale	ZONA B (1) vallée de Gressoney, Ayas, Champagnole	ZONA C (1) vallée de Rhêmes, Fagnanaz, Courmayeur
Periodo dalle ore 12:00 UTC del 24/09/2006 alle ore 00 UTC del 25/09/2006:		
Precipitazione media A1: 8 mm Precipitazione media A2: 5 mm Precipitazione max: 20 mm	Precipitazione media: 15 mm Precipitazione max: 30 mm	Precipitazione media: 8 mm Precipitazione max: 20 mm
Periodo dalle ore 00 UTC del 25/09/2006 alle ore 12 UTC del 25/09/2006:		
Precipitazione media A1: 20 mm Precipitazione media A2: 25 mm Precipitazione max: 40 mm	Precipitazione media: 50 mm Precipitazione max: 80 mm	Precipitazione media: 40 mm Precipitazione max: 60 mm
Periodo dalle ore 12 UTC del 25/09/2006 alle ore 00 UTC del 26/09/2006:		
Precipitazione media A1: 4 mm Precipitazione media A2: 2 mm Precipitazione max: 10 mm	Precipitazione media: 10 mm Precipitazione max: 15 mm	Precipitazione media: 5 mm Precipitazione max: 10 mm
Zona termica: 3700 - 3400 m Limite neve: 3250 m Segnalazioni: nulla da segnalare.		
Zona termica: 3200 - 3000 m Limite neve: 3000 - 2600 m Segnalazioni: durante la notte precipitazioni anche forti, specie sul settore orientale.		

Tendenza per le successive 36 ore: miglioramento, salvo residui e deboli rovesci ed unicamente sulla dorsale.  
 Osservazioni:  
 Il presente documento viene emesso tutti i giorni entro le ore 13:00  
 Saint Christophe, 24/09/2006  
 Il Previsore  
 Robert-Luciani Thierry

### 3- Analyses de la situation hydrologique des 15-30 jours précédents

A défaut d'un modèle continu de type « Pluie-Débit » avec un module de fusion de la neige, qui permet de simuler, au delà des écoulements hydrauliques superficiels, aussi les conditions de saturation des sols, on se contente d'estimer qualitativement l'état de saturation des sols par :

- Evaluation qualitative de la fonte de neige (observation du réseau thermo-nivométrique) ;
- Evaluation de l'état de saturation dans les 30 jours par le biais de la vérification du dépassement d'une courbe de stabilité : si une seule station pluviométrique de la zone d'alerte dépasse la courbe, la condition de saturation est appliquée à toute la zone.



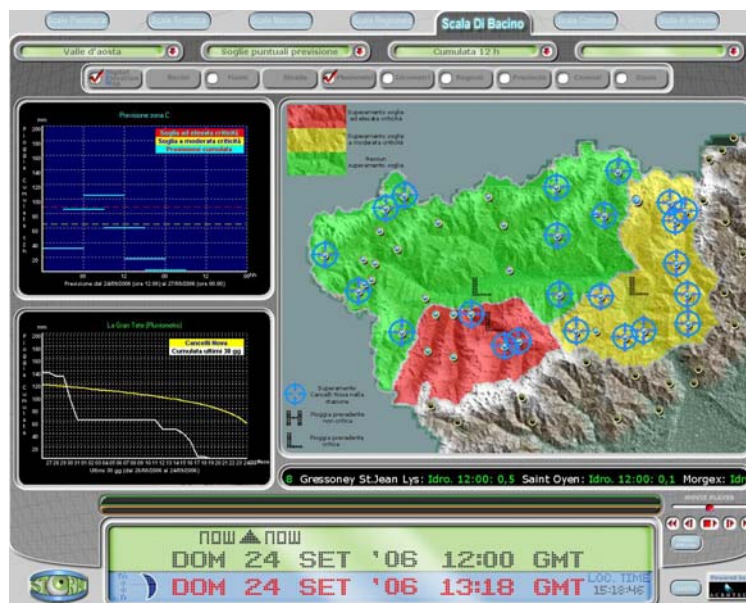
### 4- Confrontation des valeurs issues des prévisions avec les seuils disponibles

Les prévisions émises par l'Office météorologique régional et le Centre de Compétence de l'ARPA Piémont fournissent une valeur de précipitation moyenne et maximale pour chaque zone d'alerte, respectivement toutes les 12h et toutes les 6, 12 et 24 h.

La confrontation se fait d'après trois aspects :

- Le type de risque :
  - le dépassement des SPp, par la valeur de précipitation maximale prévue, prélude à un risque de type hydro-géologique localisé ;
  - le dépassement du SPa, par la valeur de précipitation moyenne prévue, présuppose un risque de type alluvial à l'échelle d'un bassin ou d'un ensemble de bassins.
- Le niveau de criticité attendu :
  - Dépassement des seuils de criticité modérée ;
  - Dépassement des seuils de criticité élevée.
- L'état de saturation des sols :

- Pluie précédente non critique ;
- Pluie précédente critique.



### 5- Evaluation / validation des différentes prévisions

De nombreux facteurs influencent la prévision des effets :

- Facteurs géologiques : la variabilité considérée intrinsèque à la zone d’alerte et au choix des scénarios ;
- Facteurs climatiques : la prévisibilité (= *qualité de prévision*) des effets au sol est liée à la prévisibilité météo (une situation météo instable entraîne une incertitude dans la prévision des effets au sol) ;
- Facteurs méthodologiques : des approximations sont à la base des approches méthodologiques du système ;
- Facteurs instrumentaux : efficacité de l’ensemble de l’équipement hardware et software de la salle opérationnelle ;
- Indisponibilité momentanée de toutes les informations nécessaires ;
- Expérience de l’opérateur.

Chaque facteur, et pour chacun des paramètres, est plus ou moins facilement quantifiable et peut avoir un poids différent dans le processus d’évaluation.

Afin de faciliter le processus décisionnel et de diminuer la subjectivité, 3 actions sont menées :

- Définition des procédures ;
- Etablissement (en cours) d’une check-list qui guide l’opérateur dans les différentes phases du processus décisionnel ;
- Développement (en cours) d’un modèle de prévision des crues.

### 6- Production et transmission d’un bulletin / avis de criticité hydro-géologique et hydraulique aux structures concernées.



Regione Autonoma Della Valle d'Aosta  
Assessorato Territorio Ambiente e Opere Pubbliche  
Dipartimento Territorio, Ambiente e Risorse Idriche  
Ufficio Centro Funzionale

**AVVISO DI CRITICITÀ IDROGEOLOGICA E IDRAULICA REGIONALE**

Situazione meteo: Il minimo depressionario associato alla vasta saccatura che ha interessato l'arco alpino nord occidentale determina ancora per la giornata di oggi e domani condizioni di tempo perturbato. Nella seconda parte della giornata di oggi sono previste precipitazioni da moderate a forti sulla zona B, moderate sulla zona C e deboli sulla zona A. Per la giornata di domani sono previste precipitazioni deboli sulla zona A, da deboli al più moderate sulla zona B e da moderate a localmente forti sulla zona C. Zero termico in rialzo dai 3200 m ai 3400 m.

Bollettino n° 180 Anno : 2006 Del 15/09/2006	Emissione : ore 13.26 del 15/09/2006 Inizio validità : dal 15/09/2006 Fine validità : al 16/09/2006 Aggiornamento : n.d.	Previsioni prossime 24 ore			
Ambito territoriale Zona allertamento	Situazione Meteo idrologica	Tipo rischio	Scenario	Pioggia Media	Quota neve metri slm
Settori A, B, C	Elevata criticità su zona B, moderata criticità su zone A e C	Idrologico localizzato	Localizzati fenomeni di frana e di colata detritica, limitati fenomeni di inondazione su corsi d'acqua a regime torrentizio	Debole su zona A, moderata su zone B e C	2800/3000
<b>Note</b> : La condizione di criticità elevata permane nella zona B in relazione agli elevati valori delle precipitazioni cumulate dall'inizio dell'evento.			N.B. Per una corretta interpretazione consultare sempre il manuale d'uso		

Situazione ordinaria  
 Moderata criticità  
 Elevata criticità  
 Possibile criticità prevista a lungo termine

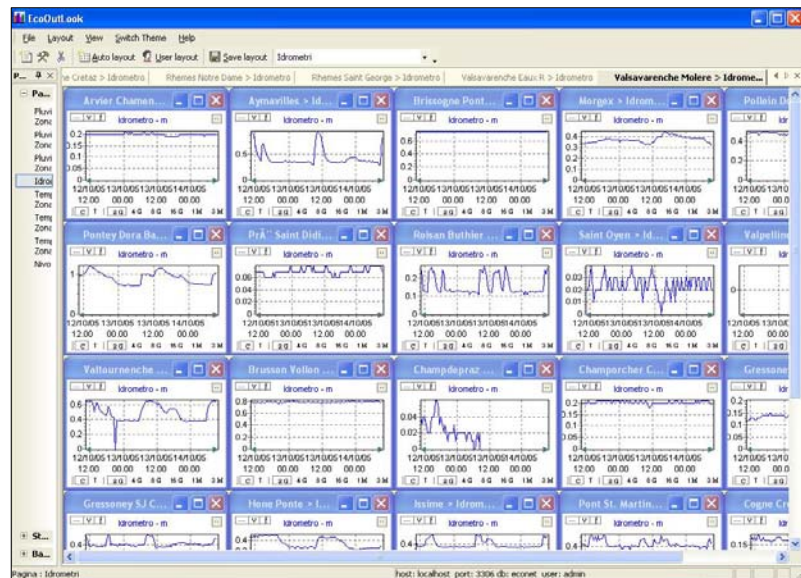
Situazione ordinaria: Criticità assente  
 Moderata criticità: In grado di coinvolgere ambiti territoriali ristretti (a scala comunale) e o di determinare danni di media gravità a scala regionale  
 Elevata criticità: In grado di coinvolgere ambiti territoriali estesi (a scala regionale) e o di determinare danni di gravità rilevante a scala regionale  
 Possibile criticità prevista a lungo termine: Da ordinaria a moderata a elevata ma incerta nel periodo successivo (a più di 36 ore dal momento dell'emissione delle previsioni e da riconfermare entro le 24 ore con nuovo bollettino/avviso)

Il Responsabile di sala: Paolo Ropele

### (3) Phase de monitoring / Surveillance

Le CF assure l'acquisition, la structuration et la représentation des données météo-climatiques et pluviométriques.

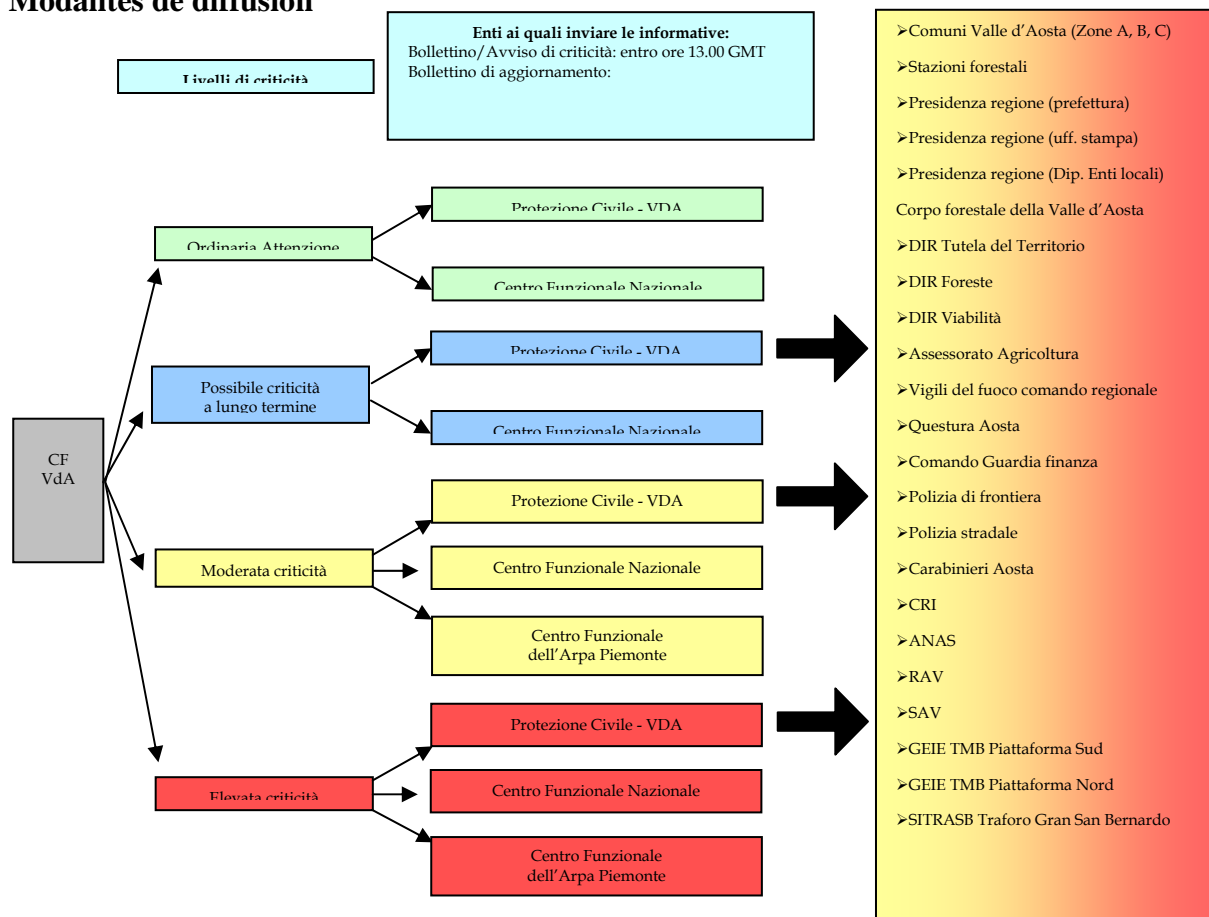
Selon la situation, une prévision à très court terme de l'évolution de l'événement et des effets relatifs est réalisée.



On vérifie ensuite le niveau de criticité actuel et prévu en confrontant les mesures avec les seuils adoptés et / ou éventuellement avec les informations fournies par les observateurs locaux. Les dégâts signalés au cours d'un événement (gravité, extension) sont analysés. Enfin, le bulletin de mise à jour de la situation météo-hydrométrique régionale est émis.



## Modalités de diffusion



Schema di trasmissione dei Bollettini dal CF sino all'utente finale

Afin que l'ensemble du Système d'alerte ne soit pas vain, le système de communication revêt une importance fondamentale. Il est important de :

- Représenter les données de façon synthétique et facilement compréhensible par le destinataire final ;
- Définir des procédures et des protocoles de transmission et de diffusion des données qui permettent un transfert **rapide et efficace** de l'information ;
- S'assurer que le destinataire est en condition de recevoir l'information.

Cela passe par :

- une mise à jour des procédures d'évaluation du risque ;
- une simplification des protocoles ;
- des conférences communes / Communauté de Montagne / etc.
- formation des opérateurs communaux ;
- un site internet où sont disponibles les données mises à jour toutes les heures.

D'autres travaux sont en cours ou prévus dans le futur pour l'amélioration du système d'alerte :

- Affiner les procédures d'évaluation des effets au sol pour chaque phase précédemment illustrée ;
- Intégrer les résultats des nouveaux travaux sur la définition des risques actuellement en cours à l'Administration Régionale ;
- Mettre à jour et améliorer le système des seuils d'alerte ;
- Intégrer la modélisation hydrologique et hydraulique ;
- Interconnecter les procédures du Centre Fonctionnel et de celles des autres structures de Protection Civile : monitoring des éboulements, risques d'avalanche...

- Définir des protocoles pour la protection territoriale hydrogéologique et hydraulique pour améliorer la signalisation des dégâts de la part des administrations locales vers les structures régionales de protection civile dans la phase de monitoring de l'alerte.

Des problèmes instrumentaux et organisationnels subsistent :

- Absence de données en temps réel sur les instabilités ;
- Pour être relayée, il faut que la pré-alerte soit émise pendant les horaires d'ouverture des bureaux ! Le problème se pose le week-end. Le Centre fonctionnel essaie de donner les informations 24-36 heures à l'avance, mais le vendredi 36-48 heures à l'avance. Si une alerte est prévue le samedi ou le dimanche, un message est envoyé aux communes de manière que des opérateurs soient présents le lendemain pour attendre un nouveau bulletin.

#### **Discussion (9) – Prévision à l'échelle régionale + surveillance du site de Medji**

Question d'**E. Leroi** : « Est-ce que la non continuité du système d'alerte 7 jours / 7 jours et 24 h/24 et en particulier le samedi et dimanche ce n'est pas une limitation importante du système ? ».

**S. Ratto** : « Oui, mais cette limitation est due au manque de personnel : on a besoin d'être au minimum 6 ou 7 personnes pour fonctionner 24 h / 24, alors que nous sommes 2 avec 4 techniciens des bureaux voisins qui nous aident. Et pour avoir du personnel, il faut convaincre les gestionnaires ! Toutefois on doit penser même aux aspects positif : si, dans l'hypothèse d'un fonctionnement 7j/7, j'envoyais le samedi un bulletin pour alerter les communes le dimanche, je n'aurais aucun effet parce que eux ne fonctionnent pas 7j/7 ; mais si le vendredi je dis : « demain nous serons là parce que peut-être le dimanche il va arriver quelques choses... » alors j'obtiens un effet de protection civile, parce que le samedi les techniciens communaux seront là pour lire notre bulletin ... et donc c'est un aspect positif ».

Question d'**E. Leroi** : « Même si vous aviez le personnel, qu'en font les communes sur le plan opérationnel ? Avoir une approche statistique ou probabiliste à l'échelle d'un territoire et dire que l'on peut avoir des mouvements de terrain parce qu'on a dépassé un seuil nécessite d'avoir une approche spatialisée, que vous n'avez pas à l'échelle des mouvements de terrain. Comment ces données sont-elles utilisées ? ».

**S. Ratto** : « Le Plan de Protection Civile comporte différents niveaux d'activation. L'alerte au niveau régional est une alerte de premier niveau. Cet à dire qui doit préparer les Communes à recevoir des informations plus détaillées au cours de l'événement hydrogéologique. A partir des résultats du monitoring du réseau hydrométéorologique, les autres niveaux d'alerte doivent être déclenchés à l'échelle de la commune en fonction des cartes de danger et des situations particulières sur le territoire. Ces bulletins sont donnés aussi aux autres bureaux de la région. Ainsi, par exemple, le bureau de monitoring en charge des éboulements est pré alerté avec ce bulletin et peut s'organiser pour donner, si sera le cas, des alertes au niveau local ».

**Jean-Bruno Pasquier** (géologue, bureau Geoval, Sion, Valais) : « A propos de l'éboulement de Medji, on a vu sur les photos que la falaise commençait à se dégrader en 2000 alors qu'elle était relativement saine auparavant. Quel a été l'effet des intempéries de 2000 sur la dégradation de la falaise ? Les mouvements ont été déclenchés après une petite secousse sismique en 2002, mais est-ce que tout ne s'est pas joué en 2000 ? »

**E. Pointer** : « Oui, ce séisme a juste été un facteur aggravant mais c'est en 2000 que la falaise a été véritablement affectée ».

**Question** : « Comment se sont déroulées les activités de minage ? ».

**Réponse** : « Nous avons fait le minage à la mi-septembre 2002, avant l'éboulement, avec des forages de 10 à 15m de profondeur et de gros diamètre, qui ont mobilisé plusieurs équipes. On n'avait pas encore vu que toute la falaise était déstabilisée. Après on a vu une accélération des déformations. Ça s'est bien passé, mais s'il y avait eu une accélération brusque, on aurait évacué les foreurs... ».

## 4. Risques hydrogéologiques et changement climatique

### 4.1 Film : « Alerte au climat »

Ce film - quelque peu alarmiste - aborde de manière démonstrative la question des **impacts du changement climatique régional sur les risques naturels en montagne**, à travers l'exemple du **Valais**. Différents spécialistes chercheurs ou experts des risques naturels et/ou des milieux d'altitude témoignent des connaissances et des interrogations auxquelles les conduisent leurs recherches et leur expérience. La problématique est abordée sous l'angle de récents événements catastrophiques qui ont marqué les esprits par leur ampleur exceptionnelle en Valais :

(Début)

«

- avril 1991 : un pan de montagne déstabilisé par un ancien retrait glaciaire s'écroule et détruit le village de **Randa**. 30 millions de m<sup>3</sup> de rochers descendent. On ne déplore heureusement que des dégâts matériels.
- septembre 1993 : le Valais est battu par des pluies torrentielles. La ville de **Brig** est frappée de plein fouet par une crue dévastatrice de la Saltina. Avec l'eau, du limon et des matériaux rocheux envahissent le centre-ville sur une hauteur de 4m. Surprises chez elles, deux personnes perdent la vie.
- octobre 2000 : les pluies frappent encore et font 9 morts à **Gondo**. Le village est détruit par une ovaïlle (coulée de boue) qui frappe en pleine nuit et de multiples inondations affectent tout le Valais.

- Pendant que les experts discutent la part de l'influence humaine dans le réchauffement... :

**Martine Rebetez**, climatologue à l'institut fédéral de recherches sur la forêt, la neige et le paysage (WSL), auteur du livre « *La Suisse se réchauffe* » :

« *Pendant le XXe siècle, on a eu un réchauffement de 0,7°C pour l'ensemble du globe. En Suisse, c'était le double, avec 0,5°C d'augmentation au cours des 30 dernières années. Le réchauffement prévu au XXIe siècle est compris entre 1,5 et 6°C pour la planète, et vraisemblablement approximativement le double pour la Suisse, soit entre 3 et 12 degrés au cours des 100 prochaines années (!)* ». La latitude du pays combiné à son éloignement des océans entraîne ici un réchauffement plus rapide que la moyenne.

« *Le réchauffement actuel est extrêmement rapide. Quelques degrés supplémentaires sur une aussi courte période, c'est quelque chose qu'on n'a jamais vu sur la terre, donc il n'est pas évident qu'on puisse s'y adapter. Aujourd'hui, il est tout à fait clair que le réchauffement observé est dû à l'influence de l'homme* ».

- ... les premières « victimes » du réchauffement sont les glaciers :

**Martin Funk**, glaciologue à l'école polytechnique de Zurich, spécialiste du glacier qui donne naissance au Rhône : « *Le front du glacier du Rhône en 1856 est marqué par une bande (crête morainique), qui représente la dernière avancée du glacier. Depuis lors il s'est retiré de plus de 1 km et il a perdu en moyenne plus de 30m d'épaisseur. Il s'agit d'un des plus grands glaciers des Alpes et il va certainement survivre encore 50 ans, mais il est sûr que si les prévisions climatiques actuelles se confirment, on va le voir progressivement disparaître* ».

S'il reste environ un demi-siècle à vivre au plus gros glacier suisse, il reste probablement beaucoup moins pour les plus petits. Le rythme de la fonte a considérablement accéléré et l'on s'attend à ce que les ¾ des glaciers disparaissent d'ici la moitié du XXIe siècle.

- Au musée alpin de Berne, le glacier est déjà présenté comme une relique :

**Wilfried Haerberli**, glaciologue, directeur de l'Observatoire Mondial des Glaciers (le département qu'il dirige à l'Université de Zurich depuis 23 ans est une référence internationale pour la glaciologie) :

« *Les glaciers font partie du patrimoine suisse, tout le monde regrette qu'ils disparaissent... Le retrait glaciaire s'accélère beaucoup depuis 1980 à peu près et l'on a maintenant l'impression que c'est l'influence de l'homme sur la composition de l'atmosphère qui joue un rôle décisif sur ce changement des glaciers, qui est une expression des changements climatiques. La différence de 3 à 5°C entre aujourd'hui et le climat vers 2100 est équivalente à la différence entre une période glaciaire et aujourd'hui. Nous faisons donc une expérimentation « énorme » avec la seule différence que l'homme fait cette expérience sur une échelle de temps de quelques dizaines d'années au lieu de quelques milliers d'années. C'est la vitesse du changement qui causera les problèmes principaux* ».

Sur le glacier du Rhône, une crête morainique marque l'étendue maximum du glacier à la fin du Petit Age Glaciaire (PAG) vers 1850. Depuis lors, le glacier s'est constamment abaissé, s'est retiré et l'on assiste actuellement au début de la formation d'un lac glaciaire (au front du glacier).

- Le retrait glaciaire est potentiellement générateur d'aléas :

**M. Funk** (spécialiste des glaciers dangereux) : « *Le problème est que le lac va s'agrandir avec l'intensification du retrait du glacier. Les icebergs qui vont s'en détacher flottent en direction de l'exutoire et risquent de boucher momentanément l'écoulement normal du Rhône. De ce fait, le niveau du lac peut monter et créer une accumulation d'eau qui risque de céder brutalement. Les conséquences peuvent être une onde de crue à l'aval causant des dégâts à Gletsch voire plus bas dans la vallée de Conches* ». En Suisse, une cinquantaine glaciers dangereux ont été répertoriés, dont le glacier du Rhône.

A côté des risques liés aux purges des lacs glaciaires, un autre danger est à craindre : **M. Funk** : « *Avec le réchauffement climatique, les glaciers suspendus au rocher peuvent dégeler et tomber. Avec la rapidité actuelle du retrait, on a quelques peines à suivre les zones qui pourraient constituer une source de dangers* ».

- Aujourd'hui, le pergélisol fond et les terrains bougent :

Au col des Gentiannes, sur les hauts de Verbier dans la vallée de Bagnes à 2900m d'altitude (Valais), un forage a été réalisé pour mesurer les températures du pergélisol (sol gelé en permanence, qui agit comme un ciment en stabilisant les pentes et les flancs de montagne, appelé aussi permafrost ...).

**Emmanuel Reynard**, géographe à l'Institut de géographie de l'Université de Lausanne (IGUL), spécialiste du pergélisol : « *C'est un pergélisol que l'on peut qualifier d'assez « chaud » malgré l'altitude : les températures à 20m de profondeur restent au-dessus de -1°C. Il sera donc certainement intéressant d'observer ce site à l'avenir puisque étant assez proche de 0°C, il risque de connaître une évolution assez dynamique* ». Pour analyser les mouvements du terrain, l'équipe d'E. Reynard utilise le GPS. A partir d'un point fixe, on effectue les mesures sur des repères qui bougent avec le sol.

Sur ce site, le sol fond et se tasse continuellement. Les exploitants des remontées mécaniques ont ainsi observé un tassement de 3m de la moraine sur laquelle repose l'aile nord d'une station de téléphérique, (heureusement, le bâtiment repose sur le substrat rocheux à 20m de profondeur). L'étude du pergélisol a commencé il y a environ 30 ans et beaucoup reste à découvrir sur son évolution. En certains endroits, la fonte du sol sera source de dangers pour l'homme.

**E. Reynard** : « *Il est certain que l'on assiste à une accélération du système. L'été caniculaire de 2003 et la première partie relativement chaude de l'été 2006 (suivie d'un net refroidissement) constituent des sortes de « coups de chalumeau », qui ont des répercussions notables. Contrairement aux glaciers qui réagissent extrêmement vite aux variations des températures et des apports en neige, le pergélisol semble être nettement plus stable d'une certaine manière. Par contre, on peut tout de même s'attendre à ce que dans des cas particuliers et à certains moments, des catastrophes liées au réchauffement du permafrost se produisent sur des secteurs localisés, également en lien avec des événements de précipitations extrêmes* ».

- Des « catastrophes » liées à la fonte du pergélisol ? :

Dans la nuit du 25 juillet 2006, suite à un orage violent en montagne, la crue du torrent Durnand qui charriait une grande quantité de boue et de rochers a entraîné l'évacuation d'un train à proximité de Martigny (le conducteur a été alerté par des cailloux sur la voie), puis son déraillement (cf. J.-D. Rouiller, § 2.3.3, p. 42). 400m de rails et un pont ferroviaire ont été emportés « comme de vulgaires bouts de bois ». Cette crue est l'exemple type d'un accident naturel qu'on n'attendait pas :

**Jean-Daniel Rouiller**, géologue cantonal du Valais : « *Environ 35 000 m<sup>3</sup> de matériaux sont arrivés en bas. C'est un cas typique de quelque chose qu'on ne connaissait pas. Dans notre inventaire, ce site n'était pas ressorti comme prioritaire à investiguer. Il s'agit typiquement d'un problème de glacier rocheux, c'est-à-dire, de débris de roche pris dans de la glace interstitielle, que la fonte déstabilise. « Ce type de sites va poser problème si l'on a ce phénomène de réchauffement climatique progressif, parce que des masses importantes de sédiments peuvent être libérés puis entraînés par des événements pluviométriques tels que celui du 25 juillet 2006* ». Dans la zone de départ (2400-2500m d'altitude), les rigoles d'érosion creusées par le ravinement mettent en évidence les volumes importants mobilisés. Des blocs de taille imposante ont été déplacés avec l'ensemble.

- La fonte du pergélisol est impliquée dans la déstabilisation de ces dépôts sédimentaires :



**J.-D. Rouiller :** « Ces matériaux qui ont été gelés pendant plusieurs milliers d'années dégèlent progressivement. Des masses importantes sont mises en suspend et attendent simplement d'être poussées à l'aval par un phénomène météorologique. Sans l'orage du 25 juillet, ces masses ne seraient pas arrivées en bas. L'orage a favorisé les choses, « il a dissolu tout ça » et entraîné les 35 000 m<sup>3</sup> de matériaux jusqu'au niveau de Bovernier, avec les conséquences que l'on connaît sur le train, l'effet barrage et l'évacuation de Martigny ».

Des blocs rocheux ont été transportés 2000 m plus bas, jusqu'à la confluence du torrent Durnand avec la Dranse. On trouve des blocs de plus de 100 tonnes à proximité de l'embouchure. Le pont sur le Durnand a été emporté par une lave torrentielle, dont le front s'est propagé jusqu'à la Dranse, entraînant la création d'une « poche d'eau » (retenue par effet barrage). La menace que représentait le lac qui s'est créé à l'amont est à l'origine de l'évacuation de Martigny pendant quelques heures, par mesure de sécurité (cf. témoignage de Mr Dumas, § 2.3.3 p.46). L'évacuation (quelques milliers d'habitants) s'est effectuée de nuit, mais dans le calme, la plupart des personnes ayant déjà été évacuées lors des intempéries d'octobre 2000.

**J.-D. Rouiller :** « Il est possible que le même phénomène se reproduise au même endroit d'ici une dizaine ou une vingtaine d'années, avec la possibilité de devoir évacuer Martigny une nouvelle fois. A ma connaissance, il n'y a pas d'autre site avec ce problème de permafrost dans cette vallée, mais il y en a dans d'autres. Avec le changement climatique, ce sont ces zones de permafrost qui vont nous habituer peut-être à des phénomènes de laves torrentielles en provenance de ces altitudes 2400-2500m, où a lieu justement la fonte de ce matériau ». Tous dangers de phénomène gravitaire confondus, une quinzaine de sites critiques menaçant routes et villages sont actuellement surveillés en permanence par le service du géologue cantonal.

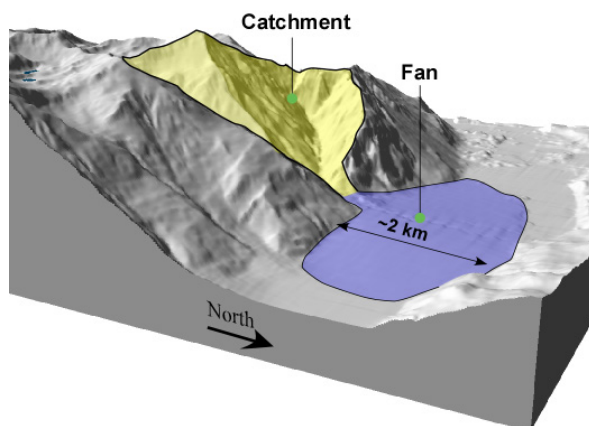
**M. Rebetez :** « En montagne, on a toujours eu des coulées de boue. Les laves torrentielles et la fonte des glaciers ne sont pas des phénomènes nouveaux. Ce qui est nouveau, c'est la recrudescence de ces phénomènes. Lorsqu'on a des températures très élevées comme celles de juillet 2006, des événements catastrophiques se produisent jour après jour en lien avec la fonte des glaces des glaciers ou du sol ».

- Recherches sur le phénomène des laves torrentielles :

Une vidéo illustre ensuite la viscosité et la capacité de transport d'une lave torrentielle (« des blocs de pierre de plusieurs tonnes portés comme de simple bouts de bois par une boue très dense... »). Le site du torrent de l'Illgraben près de Susten (l'un des plus actifs en Suisse) permet d'étudier ce phénomène mal connu d'un point de vue théorique, grâce à la fréquence « extraordinaire » de ses laves torrentielles : on compte 5 ou 6 laves par an (contre une lave tous les 15 ans ailleurs...). Ces laves sont capables de remodeler très rapidement le lit du torrent : le lit actuel d'une profondeur de 15m a été formé en l'espace d'une heure, après comblement de l'ancien lit sur 15m de hauteur en l'espace d'une lave torrentielle ! Ces images illustrent la force extrême du phénomène ainsi que sa puissance de destruction.

**Question :** « Faites-vous un lien entre la recrudescence de ces laves torrentielles et le réchauffement climatique ? »

**François Dufour :** « Très certainement, étant donné qu'on sait que les laves torrentielles sont dépendantes des intensités de pluie, qui elles-mêmes sont plus importantes qu'avant, donc on aura un potentiel de laves torrentielles plus important. Je ne dirais pas qu'on va tout d'un coup être « inondés de laves torrentielles », mais il est clair que le potentiel de danger va augmenter avec les intensités de pluie ».



Vue 3D du BV de l'Illgraben - Source : [www.quanterra.org](http://www.quanterra.org)  
(3D view from Atlas of Switzerland, [Swisstopo](http://Swisstopo))



Passage du front de la lave torrentielle du 3 juin 2000  
(~ 5 km/h et 10 000 m<sup>3</sup>) - Source : [www.crealp.ch\\_ena-vs](http://www.crealp.ch_ena-vs)

Pour étudier les laves torrentielles venant du cirque montagneux, l'institut fédéral de recherche sur la neige et le paysage (WSL) a équipé le lit du torrent avec divers instruments de mesure permettant de filmer, peser, calculer la vitesse des laves et même de donner l'alarme. Le dispositif se déclenche automatiquement dès que le sol se met à trembler sous l'effet des laves. Sur la vidéo, la lave filmée s'écoule au-dessus d'un seuil au niveau d'une section transversale de 10 m de large. Le front mesure 3m de haut, mais « *on peut envisager un front de 10m lors d'un événement beaucoup plus important et alors, ça déborderait* ». L'écoulement très dense porte des blocs pesant entre 10 et 20 tonnes, dans un bruit assourdissant. L'effet est dévastateur : « *si par hasard une lave torrentielle comme celle-là déborde, rien ne lui résiste ; seule une digue de 10 à 20m de haut pourrait la dévier, mais pas lui résister, donc il est clair que si elle arrive sur un village, elle provoque une catastrophe* ».

- Le point sur les risques géologiques en Valais :

**J.-D. Rouiller :**

« *Du point de vue des risques naturels, le Valais est dangereux, par rapport au plateau suisse ou à Genève. Dès l'instant où l'on a des falaises, des pentes, il y a quelque chose qui risque de glisser sur la pente. Il y a une mode actuellement qui fait que l'on voudrait être garanti et couvert contre tout type de risque, mais cette mode coûte cher : si l'on veut l'appliquer en Valais, c'est 3 milliards de FrCH pour la protection des 2200 km de routes cantonales. Tout le monde sait que ce n'est pas possible, donc la réalité c'est de vivre avec, et puis d'essayer de limiter au maximum les gros événements ; malheureusement on ne peut pas toujours prévoir les petits événements, à moins qu'on fasse tout en tunnel...* »

- Le risque torrentiel à Brigue :

**Dominique Bérod**, est responsable valaisan des routes et cours d'eau. Sa tâche consiste à gérer les risques liés aux rivières proches des installations humaines. A ce titre, la crue dévastatrice de Brigues en 1993 est un des pires souvenirs de sa carrière. La catastrophe est encore dans toutes les mémoires. Presque 5 ans de travaux ont été nécessaires pour revenir à la normale et réaliser divers aménagements de protection. Le montant des dégâts et de la reconstruction : 500 millions de FrCH. Question : La rivière causera-t-elle encore des ravages ?

**D. Bérod** : « *En septembre 1993, on a connu une crue qu'on pensait être gigantesque, en octobre 2000 la crue était encore plus importante, donc il y a toujours des scénarios possibles... Par contre, grâce aux travaux effectués entre 1993 et 2000, avec une crue encore plus importante, les dégâts sont aujourd'hui cent fois moindre. On a donc des moyens pour trouver les bonnes solutions* ». La bonne solution est un pont levant sur la Saltina : en 2000, le dispositif a très bien fonctionné. En montant, le pont a laissé plus d'espace aux débris et à l'écoulement, et ainsi évité la formation d'un bouchon qui en 1993 avait fait déborder la rivière. Ce dispositif efficace est nécessaire : à Brigue, pas moins de 3 crues dites centennales se sont succédées en l'espace de 13 ans.

**D. Bérod** : « *Mon sentiment est que l'on va avoir à la fois une répétition d'orages très violents, que l'on a déjà vu en intensité mais peut-être pas en durée, et en tout cas pas de manière aussi fréquente. Les fortes crues et les fortes précipitations qui durent 2 ou 3 jours entre août et septembre pourraient se produire sur une durée plus étendue, de juillet à fin octobre voire novembre, avec des précipitations sur une durée de 5 jours au lieu de 3 jours. Donc pas forcément de grandes nouveautés, mais des petites variations qui peuvent faire une grande différence sur la formation des crues* ».

Les périodes à risques seront donc plus étendues et plus fréquentes. La cause principale serait le réchauffement de la Méditerranée, qui produit plus d'humidité. Sous l'effet de cette énorme pompe à chaleur, les nuages passeraient plus facilement la barrière du Simplon, arrosant les versants nord des Alpes et augmentant le risque de crue.

- L'évolution de la ressource hydro-électrique :

Le réchauffement climatique est source de dangers pour les uns et source de profits pour d'autres. S'il est aujourd'hui des gens que la modification du climat réjouit, ce sont bien les exploitants d'usines hydro-électriques, et les propriétaires de barrages.

**Jean-Michel Bonvin** : « *Evidemment pour nous la fonte des glaciers en tout cas à court ou moyen terme, c'est du pain béni, puisque nous sommes en train de fondre des précipitations qui sont tombées il y a quelques dizaines, centaines ou milliers d'années. Cette diminution de stock, pour nous, c'est de l'eau qui va être stockée dans le barrage et qui va produire de l'énergie* ».

Question : « *N'avez-vous pas le sentiment que le capital sera bientôt épuisé ? Est-ce que ça vous inquiète* ». Réponse : « *Dans un terme d'une dizaine d'années, effectivement, les premiers soucis peuvent venir, mais qu'on soit là ou non, l'eau va quand même couler, donc ce n'est pas nous qui*

*entamons le capital. Le capital fond par le réchauffement des températures. Il faut donc intercepter l'eau puis la turbiner, la prendre au passage ».*

Au barrage de la Grande Dixence, la moitié des eaux sortant du collecteur principal est d'origine glaciaire. A raison de 50 m<sup>3</sup>/s, le lac d'accumulation doit son existence à la fonte de 35 glaciers avoisinants, qui représentent une véritable manne naturelle, du moins pour le moment...

*« On ne va pas le chercher ce profit, ce profit est là, et la disparition des glaciers se produira de toute façon. Si nos parents ont réussi à faire des aménagements comme Grande Dixence, nos enfants pourront se débrouiller en quelques siècles, j'espère... ».*

- Le coût des risques torrentiels en Valais :

En attendant, dans la plaine, ce sont plutôt les problèmes qu'on encaisse : l'heure est aux dépenses. Par exemple, en octobre 2000, au moment où Brig échappait à une deuxième catastrophe, le village de Baltschieder, près de Visp, a été dévasté par une lave torrentielle.. Un fort débordement d'environ 200 000 m<sup>3</sup> de matériaux fins à grossiers se sont déversés à travers une bonne partie du village. D'importants travaux de protection ont été entamés juste après la crue, dont certains sont encore en voie d'achèvement. Une digue a été construite pour protéger le village.

**D. Bérod :** *« Les événements eux-mêmes ont été absolument tragiques, ça a été un grand choc pour la commune, qui a dû réapprendre à vivre avec cette rivière avant de voir se développer le projet puis les travaux... ».* En amont, un barrage de 20m a été édifié pour retenir les matériaux charriés par la rivière. Les premiers travaux ont coûtés 5 millions de FrCH et 4 millions de FrCH supplémentaires ont été investis pour les étapes ultérieures (seconde digue à l'arrière), ainsi que quelques millions de FrCH prévus pour les travaux définitifs.

En Valais, 20 millions de FrCH sont dépensés chaque année pour contrer le danger des rivières. A ce jour, personne n'a pu établir le montant de la facture globale du réchauffement climatique en Suisse. A l'avenir, elle pourrait s'élever à des dizaines de milliards de FrCH. Il faudra payer pour gérer le trop d'eau mais aussi le trop peu, car à terme, c'est tout le cycle de l'eau qui pourrait être bouleversé.

- Le cycle de l'eau bouleversé ? :

**W. Haerberli :** *« Aujourd'hui on a l'impression qu'on va toujours avoir de l'eau parce que les glaciers et la neige fondent, et que même s'il fait très sec et chaud en été comme en 2003, il y aura toujours les montagnes qui vont donner de l'eau. Mais si l'on imagine un été 2003 vers la fin du XXIe siècle avec la disparition des glaciers et la fonte des neiges, alors qu'est-ce qui va alimenter le Rhin et le Rhône ? On pourrait avoir des conditions de sécheresse avec des implications très graves pour l'énergie nucléaire, les poissons, l'agriculture, la végétation, etc. »*

- Conclusions du film :

**M. Rebetez :** *« Il faut éviter de reporter l'effort sur les générations futures. Ces efforts doivent être faits aujourd'hui parce que c'est aujourd'hui que ça coûte le moins cher, avec les conséquences les plus favorables. On est au début du réchauffement, s'il l'on évite d'injecter trop de gaz à effet de serre dans l'atmosphère, la diminution sera beaucoup plus facile. Plus on prend les choses en main tôt, plus on pourra être efficace ».*

Pour certains experts, le climat serait déjà déterminé jusqu'en 2030. Des mesures entreprises aujourd'hui ne produiraient donc guère d'effet avant la moitié du XXIe siècle. Les impacts futurs du réchauffement génèrent encore beaucoup d'incertitudes, sauf peut-être pour ceux qui se projettent bien au-delà, dans des millions d'années :

**J.-D. Rouiller :** *« Un jour, on aura une pénéplaine : les montagnes seront complètement érodées, la vallée du Rhône aura été réhaussée par les matériaux déchargés et l'on aura une belle plaine ressemblant au plateau suisse. Il n'y aura sûrement plus de valaisans à ce moment là ».*

»

(Fin)

### **Discussion (10) – L'impact des changements climatiques sur les risques naturels en montagne**

**E. Leroi :** *« Ce film embrasse une thématique beaucoup plus large que celle qui est traitée dans le cadre du projet RiskYdrogé. L'intérêt de le montrer était multiple : d'une part pour montrer les problèmes liés à la communication, il est évident qu'il ne faut pas prendre au pied de la lettre tout ce qui est dit dans ce reportage, avec des scénarios un peu catastrophistes ; d'autre part il pose le problème de l'évolution, notamment à travers les approches statistiques, avec des séries temporelles*

qui vont évoluer et qui n'auront plus de stabilité dans le temps : il faut identifier les problèmes que ça nous pose, y compris sur les questions de prévision, de prédiction et de dimensionnement ».

**J.-M. Vengeon :** « Je voudrais vous informer du démarrage dans le cadre du programme Interreg Espace Alpin (qui va de la Côte d'Azur à la Slovénie) d'un projet stratégique (regroupant non pas des organismes scientifiques mais des administrations régionales et nationales, avec 22 partenaires dans l'arc alpin) nommé ClimChAlp. Il traite de l'impact du changement climatique sur les risques naturels mais aussi sur l'économie, les transports, le tourisme, l'attractivité naturelle des territoires, etc. Ce projet a démarré en mars 2006 et se termine en avril 2008. Il préfigure l'un des axes essentiels du futur programme Espace Alpin - Interreg IV (reconduit sur la période 2007-2013) : cette thématique sera au centre d'une bonne partie du programme.

Dans l'espace alpin qui est sous dominance germanophone, la question environnementale et la question de l'impact du changement climatique sur le milieu, sur les stratégies de gestion du milieu, sur les nécessités d'adaptation, sur les opportunités économiques vont être au cœur du programme. Il était intéressant de faire le lien car pour l'instant, dans les échanges transfrontaliers, cette dimension n'a pas été tellement mise en avant au niveau des Alpes occidentales. On s'est plutôt préoccupé des méthodes et des outils pour mieux gérer et mieux prendre en compte les risques naturels, avec des hypothèses de travail et les données existantes aujourd'hui. Mais on ne peut pas faire l'impasse sur la question suivante : est-ce que les données et les hypothèses de travail qui servent à concevoir et à dimensionner nos stratégies de gestion des risques naturels sont amenées à changer ?

Dans ce contexte, pour le compte de la région Rhône-Alpes, le Pôle Grenoblois met en place une plateforme bibliographique et de recueil d'avis d'experts à destination de la communauté à la fois scientifique, technique et administrative, pour essayer de faire le tri dans l'abondante bibliographie existant sur ce sujet (et qui rend difficile le choix des hypothèses à prendre en compte...). Cette plateforme sera mise en ligne sur le site internet du Pôle Grenoblois (<http://www.risknat.org>) à partir du printemps 2007. L'objectif est de séparer pour les différents impacts, ce qui est réellement observé (qui résulte de mesures), ce qui est modélisé ou qui résulte de calculs, et ce qui est du domaine de la simple conjecture ou hypothèse, de l'extrapolation (farfelue ou non) non avérée sur de possibles déviations des données extrêmes qui sont bien souvent à l'origine des risques naturels. On essaie de faire ce tri pour que les scientifiques et les techniciens puissent plus facilement évaluer dans quelle mesure ils ont à prendre en compte une modification de leurs hypothèses de travail à l'avenir ».

**J.-D. Rouiller :** « Sur ce film, j'aimerais ajouter que la position de Mme Rebetez n'engage qu'elle. Ce film a précédé un débat sur la Télévision Suisse Romande (TSR), où elle a été « opposée » au professeur Georges Rossi, géographe à l'université de Bordeaux. Elle n'a pas pu vraiment étayer son pessimisme. Contrairement à ce que laisse penser le film, Mme Rebetez n'est pas une scientifique « pure et dure » du changement climatique, elle ne travaille pas sur les modèles ; sa formation littéraire en fait avant tout une géographe apte à vulgariser les résultats scientifiques. Pour situer, on pourrait dire que dans ce sens elle est une « mini Le Roy Ladurie », en référence aux travaux de l'historien Emmanuel Le Roy Ladurie, qui lui accompagne au moins son texte de graphiques qui étayaient ses affirmations. Dans ce débat le professeur Rossi a été beaucoup plus réaliste : il estimait que les pronostics de Mme Rebetez - qui parle de +5°C en l'espace de 50 à 100 ans, voire le double en Suisse, étaient totalement exagérés et n'avaient pas de base avérée.

Donc ce que je retiens, c'est que au sein des variations climatiques qui n'ont cessé d'agiter la terre durant le Quaternaire, nous sommes actuellement dans une phase de réchauffement qui a succédé à celle de refroidissement du Petit Age Glaciaire. Comme l'a démontré Leroy Ladurie, à l'état naturel ces variations progressent très lentement. Le PAG s'est étendu sur une durée de 400-500 ans, tandis que les périodes chaudes peuvent s'étendre sur plus de 1000 ans.

On a donc un phénomène naturel à la base, qui est certainement en train d'être amplifié ou accéléré par les conséquences de l'activité humaine. Mais il ne faut pas faire croire que le jour où l'on aura maîtrisé les émanations de gaz à effet de serre, le réchauffement va cesser. Il sera moins intense. *Les variations climatiques en soi ne sont absolument pas sous contrôle humain, par contre l'homme est certainement responsable des pointes telle celle dans laquelle nous entrons aujourd'hui* ».



**J.-M. Vengeon :** « Il y a 2 angles dans ce débat : d'une part l'angle « réalité » et impacts de l'activité humaine sur le climat (et nous ne sommes pas la communauté scientifique et technique la plus appropriée pour mener ce débat) et d'autre part la question de savoir comment prendre en compte les changements déjà observés (à l'échelle du XXe siècle) et les hypothèses des groupes internationaux ou nationaux (IPCC/GIECC) qui projettent une augmentation des températures de 1,5 à 6°C d'ici à 2100.

C'est sur ce deuxième aspect que notre communauté thématique dédiée aux risques naturelle doit se mobiliser. On ne peut prendre aucun chiffre comme donnée de travail sans sa fourchette d'incertitude, qui est énorme (entre 1,5 et 6°C, avec des variations spatiales qui peuvent être importantes, comme cela a été observé jusqu'à présent). On ne peut pas prendre en compte quelque chose de « brutal » comme hypothèse de travail. La question à creuser est : *quelle sont nos capacités d'adaptation et de flexibilité dans nos stratégies de gestion et d'intervention pour faire face au fil du temps aux changements qui vont effectivement se produire ?*

Il s'agit aussi d'évaluer dans nos stratégies ce qui nous engage pour trop longtemps, par exemple sur des données de dimensionnement relativement rigides, qui peuvent s'avérer contre-productives dans le cadre de changements des hypothèses de travail dans quelques décennies. C'est, je crois - plutôt dans cette direction là que les problèmes vont se poser et que les projets et les échanges vont s'organiser. A titre d'exemple, dans la plateforme bibliographique du PGRN, on essaie de lister dans la bibliographie les impacts traités sur les différents types de risques, et d'ouvrir un dialogue au sein du groupe d'experts (qu'on espère voir s'élargir au fil du temps), afin de savoir, pour un aléa donné, si l'on peut s'attendre à une modification de l'intensité, de la fréquence, de la temporalité (période d'apparition) ou de l'extension géographique des phénomènes naturels générateurs d'aléas ? Sur le très bon exemple vu dans le film du problème des laves torrentielles liées à la fonte du pergélisol, est-ce que de nouvelles zones vont être affectées par cet aléa ?

On ne peut plus faire l'impasse sur cette question et il faut arriver à faire un travail relativement rationnel de remise en cause progressive et assez douce de nos hypothèses de travail. Il faut également se mettre en état de veille et choisir les moyens que l'on se donne pour observer l'évolution effective des conditions naturelles et environnementales dans les milieux que l'on gère ».

**J.-D. Rouiller :** « Nous, praticiens qui sommes plutôt intéressés par les effets météo-climatiques sur le sol, nous ne pouvons que prendre acte du réchauffement actuel. Ce que l'on sait notamment c'est que les chutes de pierres sont et resteront en grande partie imprévisibles. Aux endroits où il y a de l'activité, on les prend en compte, mais là où il n'y a pas d'activité, c'est un peu le hasard. La nature est ainsi faite que l'altération des roches ne cessera pas de produire des chutes de pierres au bas d'une pente... Par contre, ce qui n'est plus acceptable aujourd'hui c'est de ne pouvoir prévoir ou du moins anticiper les événements de grande ampleur comme les éboulements en masse du type Randa en 1991 et Val Pola en 1997. Comme aussi les laves torrentielles issues de la fonte du permafrost qui pourraient affecter les zones d'activités humaines (habitat, voies de communication, etc.).

Les *inventaires* d'aujourd'hui ne doivent plus porter sur les zones de permafrost. On sait que celui-ci est grosso modo partout au-dessus de 2400 m selon l'exposition des pentes. Il faut surtout procéder au recensement des zones à risque, à savoir tous les sites « permafrostés » pouvant libérer potentiellement des laves torrentielles qui pourraient toucher les zones d'activité humaine. La crue torrentielle du Durnand n'était pas prévue ; le torrent était bien dans l'inventaire, mais pas prioritaire, peut-être parce qu'on n'est pas assez incisifs et assez rapides dans nos inventaires, mais aussi parce que le dernier événement s'était produit il y a 100 ans, et le phénomène d'oubli joue... Concernant les grands événements, ce n'est plus excusable de ne pas les prévoir ».

A la question de savoir ce qu'en pensent les juges suisses, J.-D. Rouiller : « Dans l'affaire des avalanches d'Evolène (12 morts en 1999), où ont été aussi bien touchées des chalets que la route cantonale, le tribunal fédéral, qui est en Suisse la dernière instance de recours, a confirmé le jugement du tribunal cantonal, à savoir la condamnation pénale avec sursis d'un mois pour le maire et deux mois pour l'observateur habilité à donner un préavis quant à la dangerosité de l'état du dépôt neigeux en altitude. Ses conclusions étaient: ces bâtiments étaient cartographiés dans une zone bleue. Or la dangerosité déterminée à ce moment-là par l'institut fédéral de la neige et du paysage proposait l'évacuation préventive de ce type de zone, ce qui n'a pas été fait ».

**J.-M. Vengeon :** « Sur cet aspect juridique et réglementaire de la prise en compte des risques, on peut rappeler la définition en France du Plan de Prévention des Risques (PPR), qui s'applique au risque naturel *connu prévisible*... Dans la définition même de ces outils, il y a donc à la fois une notion de connaissance et aussi d'extrapolation des connaissances du passé dans le futur (qui dit « prévisible » dit projection...). Le problème est qu'on a du mal à projeter dans le futur des scénarios d'évolution de ces données. Donc l'aspect réglementaire et juridique qui s'enclenche en aval de ces processus et de ces outils de gestion des risques est quand même mis en cause par cette question du changement progressif des conditions naturelles prévalentes dans les Alpes ».

**E. Leroi :** « Je voudrais faire un commentaire à destination des gestionnaires, par rapport à ce qui a été dit par J.-D. Rouiller sur les nombreux petits phénomènes fréquents dont on a du mal à prévoir la localisation et surtout sur les grands phénomènes, contre lesquels il faut se prémunir. Je ne partage pas nécessairement ce point de vue : je pense que les grands phénomènes ne seront pas forcément ceux qui vont poser le plus de problèmes dans nos pays en termes de gestion et de dommages vis-à-vis des personnes.

Il me semble que les changements climatiques ne doivent pas correspondre à « l'arbre qui cache la forêt » : les activités anthropiques génèrent aussi des changements très importants et beaucoup plus rapides que les changements climatiques. Les mutations d'activités sur le territoire tels que l'abandon de l'agriculture (que connaissent très bien les gestionnaires du RTM) entraînent des mutations très importantes au niveau des écoulements superficiels.

Par exemple, à Menton en 2000, un phénomène pluvieux, d'intensité assez forte mais pas exceptionnelle, a déclenché 400 glissements de terrain superficiels. Simplement, il n'y avait plus d'agriculture pour entretenir les versants, pour canaliser l'eau, ce qui fait qu'avec un seul événement. Pour une commune, ce genre de petits phénomènes avec des routes coupées et 70 MFrF à prévoir pour les travaux après l'événement participe largement à la déstabilisation du tissu économique. Ce ne seront donc pas forcément les grands phénomènes qui seront les plus difficiles à gérer. Sur ce sujet, je souhaiterais avoir le point de vue des gens de terrain et des gestionnaires ».

**J.-P. Requillart :** « Côté Français, on n'est peut-être pas tout à fait dans la même situation que nos collègues du Valais et du Val d'Aoste, au moins concernant les phénomènes de haute montagne. Ce qui me trouble un peu par rapport à ce qui vient d'être dit, c'est qu'on attribue peut-être trop facilement au changement climatique beaucoup d'événements, dans la mesure où l'on n'a pas d'observatoire sur le passé qui soit solide, sauf dans de rares domaines. Aujourd'hui, lorsqu'il se produit un phénomène, on n'a peut-être pas une analyse suffisante des causes amont, parce qu'on n'a pas assez de temps pour discriminer ce qui doit être mis sur le compte de tel ou tel facteur... ».

**J.-M. Vengeon :** Je pense que J.-P. Requillart a tout à fait raison. Il y a une vraie difficulté à appréhender la réalité non pas du réchauffement, mais de ses effets. Par exemple, une thèse très intéressante a été menée sur cet aspect au Cemagref de Lyon par Benjamin Renard, sous la direction de Michel Lang. Ils ont cherché dans les séries hydrométriques disponibles de toutes les rivières de France (mesures de débits) sur les 120 et plus particulièrement 40 dernières années s'il y avait une modification non pas du régime moyen caractéristique de ces cours d'eau mais des extrêmes, à la fois en étiage et en crue. Il y a donc eu un traitement statistique particulier pour essayer de traiter ces problèmes d'extrêmes, avec un aspect méthodologique, qui est aussi une voie de recherche et d'amélioration des connaissances (sur l'aspect « reconstruction des séries de données », la France n'est pas à la pointe de la constitution de bases de données utilisables et valorisables dans le temps...).

Les résultats de ces recherches montrent que sur les 40 dernières années, on n'observe pas de modification significative des extrêmes de débits des cours d'eau français attribuable au changement climatique. Il n'y en a pas globalement même si certaines rivières connaissent des changements sur les extrêmes, mais ce n'est pas organisé régionalement de manière à ce que l'on puisse dire qu'il y a une influence locale du climat qui contrôle ces évolutions.

Ces efforts d'observation de paramètres pertinents pour les risques naturels (que sont les extrêmes de débits) commencent à se mettre en place et il faut absolument les soutenir et les maintenir. En effet, ces méthodes statistiques désormais disponibles (qu'on pourrait peut-être encore améliorer), ces séries de données et cette question du changement climatique renforcent l'intérêt qu'on peut avoir en temps

que gestionnaire de différents ouvrages ou de différentes données pour bien les archiver, les stocker et les valoriser au niveau national. Et ce n'est pas parce qu'on n'a pas distingué d'évolution avec cette méthode là que l'on n'en détectera pas s'il on refait le même exercice dans 20 ans. C'est aussi ça de se préparer aux impacts du changement climatique : se préparer à les détecter... ».

**Manlio Ramasco** (Arpa Piémont) : Je suis complètement d'accord avec J.-P. Requillart. Effectivement, on dispose d'au moins 150 ans de connaissances sur l'histoire de ces phénomènes... Je trouve qu'il est risqué d'attribuer chaque phénomène nouveau au changement climatique. Les données disponibles nous racontent l'histoire de phénomènes qui se sont passés dans le domaine alpin mais aussi dans le domaine extra alpin (reliefs collinaires), qui peut être confronté à des situations très problématiques. La dernière est celle de 2000, où se sont déclenchés des glissements de terrain soit superficiels soit profonds, qui sont liés à des systèmes de pluie et des situations météorologiques qui s'étaient déjà produites dans les années passées.

Il faut donc faire attention à la façon dont on interprète les phénomènes. Il peut être réducteur de penser que les changements climatiques entraînent systématiquement la fonte du pergélisol. C'est vrai qu'ils sont la cause de certains phénomènes localisés, mais il y a toute une série de phénomènes sur les Alpes, tels que les glissements de terrain qu'on avait déjà étudié en 1990, qui sont liés à des situations très particulières. Selon moi, il faut bien distinguer les caractéristiques de chaque type de phénomène : à chaque type de phénomène correspond une problématique très particulière.

**J.-D. Rouiller** : « J'aimerais compléter... L'idée, ce n'est pas de mettre tout sur le dos du changement climatique. Parlons plutôt des variations climatiques qui ont toujours affecté la surface terrestre et continueront inévitablement de le faire. Si l'on va vers le froid, cela fige la dégradation des roches (il n'y a qu'à voir en hiver, quand tout est gelé et que rien ne se passe et que tout se déchaîne au printemps avec la fonte...). Si l'on va vers une période de réchauffement, cela va accélérer la dégradation des roches ; je crois que c'est tout... Ce qu'on peut dire dans les Alpes, c'est que le permafrost se situe au-dessus de 2400m d'altitude et que le réchauffement va agir surtout à ce niveau là en altérant la roche.

S'il se produit les éboulements de haute altitude comme ceux qui se sont produits récemment dans le massif du Mont Blanc en Suisse ou ailleurs, tant qu'ils n'ont pas un impact direct sur les activités humaines (à part peut-être sur les alpinistes), on ne s'en occupe pas. Par contre, si ces variations climatiques ont à terme un impact sur les dépôts d'altitude tels que les glaciers rocheux, qui par le biais de torrents peuvent être amenés à toucher les zones d'activité humaine, il faut alors s'en occuper. Je crois qu'il ne faut pas aller plus loin... ».

**J.-M. Vengeon** : « Je crois qu'il était important d'avoir cette ouverture ce matin car c'est une question transversale aux différents risques naturels, qui se pose sur la façon même de les prendre en compte. Concernant l'influence de la température sur l'altération des roches, certes..., mais le principal moteur de déclenchement des phénomènes hydro-géologiques, ce sont surtout les précipitations. La fourchette d'incertitude est déjà relativement importante sur les températures, mais en ce qui concerne la modélisation et les hypothèses sur les précipitations dans un climat changeant, il y a carrément absence de consensus sur un scénario global et même local ou régional. On sait que cette question est posée et concernant par exemple la modélisation de l'humidité dans l'atmosphère, on ne sait pas prévoir la tendance régionale pour les Alpes, même si la tendance globale commence à être cernée. Le challenge des prochaines années porte donc plutôt sur *l'observation et la modélisation des précipitations à venir* ».

## 5. Ouvrages de protection contre les risques hydrogéologiques

### 5.1 Ouvrages de protection : perspectives d'innovation pour faire face à des contraintes d'emprise, de haute énergie et environnementales :

Jean-Daniel ROUILLER (*Canton du Valais*)

#### **Ecran de protection sur pente à haute déclivité - *La seule solution : des filets à forte capacité d'absorption énergétique***

La présente contribution vise surtout - à partir du travail de compilation et d'actualisation des parades connues (*guide pratique § 5*) - à dégager des pistes pour le praticien confronté fréquemment aux interruptions de trafic routier causées par des phénomènes gravitaires tels que chutes de pierres ou éboulements). Dans les pentes à forte déclivité, la solution la plus prometteuse est celle des filets déformables.

##### 5.1.1 Pratique habituelle en région de montagne

En matière de danger FALAISE, les chutes de pierres et éboulements représentent les phénomènes gravitaires les plus fréquents dans l'arc alpin. Ils affectent les zones d'activité humaines en général mais surtout les infrastructures linéaires de par le recoupement ininterrompu qu'elles occasionnent dans les versants (cf. § 2.2 p. 16).

L'expérience valaisanne montre qu'en matière de protection contre ce type de phénomène, le meilleur ratio coût - efficacité est offert par les **filets à haute énergie**, couplés si nécessaire avec des **mesures d'assainissement** et la **télé-surveillance** (cf. § 2.2) :

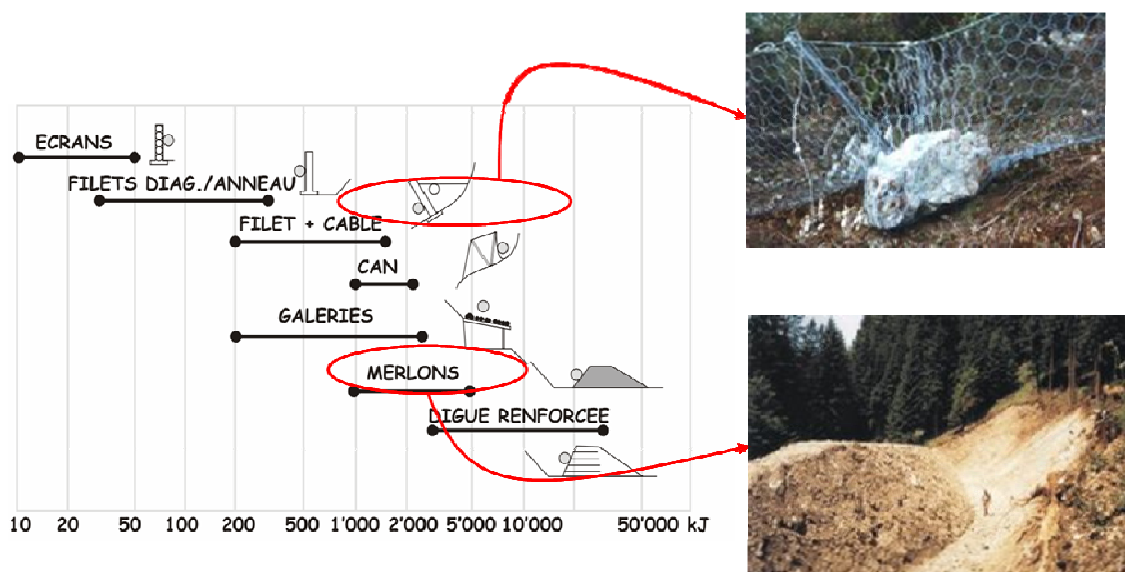
Après un événement de chute de pierre sur le réseau routier valaisan, les mesures d'intervention les plus courantes sont :

- La purge à la barre à mine ou par minage du secteur de provenance des pierres, complétée si nécessaire par la mise en place d'une station de télé-surveillance GUARDAVAL (dans la majorité des cas le trafic est rétabli en moins d'une journée);
- Si nécessaire, confortation des parties instables (piliers, ancrages, filets plaqués, etc.). En général ces mesures sont prises a posteriori dans le cadre d'un projet plus conséquent (mise en soumission des travaux, etc.);
- Si nécessaire analyse géologique du site et surveillance sur le long terme (géodésie, laserscan, etc.).

Parmi les types d'ouvrages contre les chutes de pierres et éboulement, F. Descoedres distingue selon la capacité grandissante d'absorption énergétique des écrans (tableau EPFL 1997 ci-dessous) :

- les écrans simples, les filets diagonaux et les filets-câble ;
- les filets CAN (développés en France depuis 25 ans) pour des niveaux d'énergie de 1000 à 5000 kJ ;
- les galeries pare-blocs pour le réseau routier ;
- les merlons et les digues renforcées qui offrent la meilleure capacité (niveaux d'énergie de 10 000 à 50 000 kJ).





Positionnement des ouvrages de protection (dans ou en pied de pente) sur le diagramme de Descoedres (1997)

### Limites d'intervention

Pour des raisons diverses de telles interventions deviennent vite compliquées voire impossibles :

- L'assainissement de la zone de production n'est pas faisable (dégâts dus au minage, par exemple sur les poteaux électriques en pied de falaise) ;
- Le confortement des compartiments instables, en hauteur, est trop onéreux ou irréalisable ;
- La protection par intervention sur le tracé routier est trop onéreuse, prendra beaucoup de temps (tunnel) ou est difficilement compatible avec le maintien du trafic lors de la construction (galerie) ;
- La trop forte déclivité interdit de construire des merlons ou digues renforcées (seuls les filets sont alors possibles).

### Meilleure maîtrise du danger FALAISE :

Certains développements sont possibles pour améliorer la situation :

- Un système de deux « lignes » de filets : à l'amont un écran de capacité d'absorption existante sur le marché ( $\leq 3000$  kJ) pour arrêter le bloc de dimensionnement et en dessous un filet de capacité plus importante (du genre super-chaussette à 10000 kJ : à développer) pour capter le bloc exceptionnel.
- Des galeries à forte capacité d'absorption (Pare-blocs Structurellement Dissipants dans les gorges de l'Arly, cf. § 5.2 p. 129) ;
- Un système de télésurveillance et d'alerte - alarme (cf. § 3, p. 57) pour prendre en compte le danger généré par le phénomène d'éboulement (de masse) pour lequel les mesures de protection autres que le tunnel sont insuffisantes.

#### 5.1.2 Les filets à haute énergie

##### **Les filets à forte capacité d'absorption**

Actuellement, il existe très peu de filets à forte capacité d'absorption certifiés par le constructeur :

- Les filets français CAN qui devraient être certifiés 3000 kJ ;
- Les filets suisses Geobrugg (licence CAN-France) certifiés 3000 kJ ;
- Les filets Geobrugg 5000 kJ en voie de certification.

Les filets Geobrugg sont coûteux et encombrants à poser (forages pour ancrer les poteaux, etc.) ; ils fonctionnent en répartissant sur l'ensemble de l'écran l'énergie de déformation due à un bloc. Le système CAN travaille davantage sur la possibilité de déformation très allongée à l'endroit de l'impact selon le principe de la chaussette, les poteaux, posés sur assiette, ne servant qu'à tenir la gueule ouverte.

**Les solutions** pour dépasser 5000 kJ :

- Continuer à travailler sur les modes de freinage avec répartition de l'énergie sur toute la surface de l'écran ;
- améliorer encore le principe du poteau sur assiette de CAN-France: le poteau n'a pas de rôle dans l'encaissement de l'énergie (c'est la nappe de filet qui se déforme).

Les **filets CAN-France** présentent une structure relativement souple et légère, (cf.exemple dans le Jura Français, photos ci-dessous). Un câble unique entoure et traverse chaque poteau et les relie entre eux poteaux sur toute la surface de l'écran. C'est ce câble qui induit la possibilité de dissiper très largement l'énergie. Les freins, qui peuvent être bidirectionnels, utilisent des plaques compressibles (photos, voir aussi [Guide pratique § 5.3](#)). Les poteaux ne sont pas fixés par forage mais posés sur assiette.







Filets CAN-France (ex. dans le Jura Français)

Des **filets Geobrug** de 3000 kJ ont été installés à Gondo en 2003 (cf. § 2.2 photo p. 18), village dominé par une falaise verticale de 1000 m (photos ci-dessous) ; l'emplacement restreint entre le pied de falaise et le village ainsi que la forte déclivité empêchait la construction d'un grand merlon classique. On a donc opté pour une solution mixte, soit un ouvrage principal constitué d'un piège à blocs relativement étroit surmonté de filets et complété avec d'autres rangées d'écrans répartis à l'amont sur l'éboulis et sur les vires de la falaise.



Vues de la falaise de Gondo avec à gauche les traces de l'ovaille 2000 (chandelier à 7 branches)





vue des écrans supérieurs depuis le piège à blocs positionné immédiatement au dessus de Gondo

Ci-dessous détail des filets 3000 kJ posés sur le piège à blocs. En bas on voit un bloc de béton servant à arrimer latéralement le filet.

Le système est accompagné d'une série de freins à boucles et d'ancrage des poteaux à l'amont, à la différence du système haute énergie CAN-France qui positionne les ancrages à l'aval de manière à ne pas les exposer aux impacts des blocs (voir [Guide technique 5.3](#) pour d'autres détails).







Système de freins et ancrages amont des filets Geobrugg 3000 kJ

Ci-contre filets Geobrugg 2000 kJ installés à Alphen, plus haut que Gondo sur la route du Simplon (cf. § 2.2, p. 18).



Filets Geobrugg posés au bas de la falaise d'Alphen

### La gamme de filets Geobrugg

Le tableau ci-après donne un aperçu des les produits Geobrugg :

Systèmes de barrières absorbant des énergies de 100 kJ à 3000 kJ



Type	TXI-010	RXI-025	RXI-050	RXI-100	RXI-200	RX-300
Classe d'énergie*	1 (100 kJ)	2 (250 kJ)	3 (500 kJ)	5 (1000 kJ)	7 (2000 kJ)	8 (3000 kJ)
Filet à anneaux	TECCO® G80-4	ROCCO® 7/3/350	ROCCO® 7/3/350	ROCCO® 12/3/350	ROCCO® 16/3/350	ROCCO® 16/3/300
Ø filet	4 mm	3 mm	3 mm	3 mm	3 mm	3 mm
Ø anneau	80 mm	350 mm	350 mm	350 mm	350 mm	300 mm
Type de support min.	HEB 140	HEB 100	HEB 120	HEB 140	HEB 160	HEB 200
Type de support max.	HEB 160	HEB 140	HEB 140	HEB 200	HEB 220	HEB 240
Distance entre les supports	6 - 12 m	6 - 12 m	6 - 12 m	6 - 12 m	8 - 12 m	8 - 12 m
Diamètre min. câble	12 mm	12 mm	14 mm	18 mm	22 mm	22 mm
Diamètre max. câble	14 mm	18 mm	20 mm	22 mm	22 mm	22 mm
par 60 m de barrière:						
Nombre d'anneaux de freinage sur le câble porteur	4	8	8	16	32	100
Nombre d'anneaux de freinage sur le câble de retenu	--	0	0	0	14	14
Hauteur min. du système	2 m	2 m	2 m	3 m	4 m	5 m
Hauteur max. du système*	3 m	4 m	4,5 m	6 m	7,5 m	7,5 m
Distance de freinage max.**	2,15 m	4,05 m	5,07 m	4,6 m	6,7 m	6,6 m
Hauteur utile résiduelle min. dans la zone de l'impact**	85 %	68 %	61 %	66 %	64 %	53 %
Hauteur utile résiduelle min. dans les sections voisines	100 %	100 %	100 %	100 %	100 %	80 %
Traction de service max. ancrages latéraux**	120 kN	140 kN	170 kN	230 kN	230 kN	300 kN
Traction de service max. ancrages amont**	--	50 kN	70 kN	140 kN	250 kN	330 kN

\* selon la Directive suisse \*\* d'après les tests effectués

Toutes modifications techniques réservées

01/2006

La gamme Geobrugg

## Condensé du film de Geobrugg

Ce film publicitaire de 10 min. présenté par J.D. Rouiller est suffisamment instructif pour mériter d'être condensé ci-après. Relativement spectaculaire, il illustre bien les travaux entrepris pour tester et améliorer la capacité de résistance des filets à haute énergie :

### Conception des filets à anneaux Geobrugg :

Ces filets visent une protection maximale assurée par :

- des essais avec des impacts répétés en bord de nappe,
- une hauteur utile maximale après impact dans la section sollicitée (gage de protection contre les événements futurs),
- une hauteur des barrières intégralement conservée dans les sections voisines après un impact,
- une distance de freinage < 6m.

Lors d'une chute de blocs réelle, la vitesse des fragments rocheux percutant l'ouvrage est généralement comprise entre 10 et 25 m/s et plus rarement  $\geq 25$  m/s. Les filets Geobrugg sont donc testés depuis 2001 avec des vitesses de 25 m/s, conformément aux directives suisses pour l'homologation des filets de protection contre les chutes de pierres.

### Principe de fonctionnement :

Lorsque la pierre percute le filet, elle le tire vers le sol, tandis que le filet est maintenu par des câbles porteurs. Ces câbles sont équipés à leurs extrémités d'éléments de freinage, qui commencent à se déployer lorsque la force générée par dans le filet s'accroît. Ce mode de fonctionnement favorise le glissement du filet tel un rideau vers le bas. A partir d'un certain point, des câbles filant sont activés et libère une surface de filet supplémentaire dans le secteur sollicité. C'est ainsi que le jeu combiné des éléments de freinage montés sur le câble porteur et du filet coulissant produit un freinage relativement doux.



Essai d'impact



Élément de freinage



Effet rideau



Activation des câbles filants



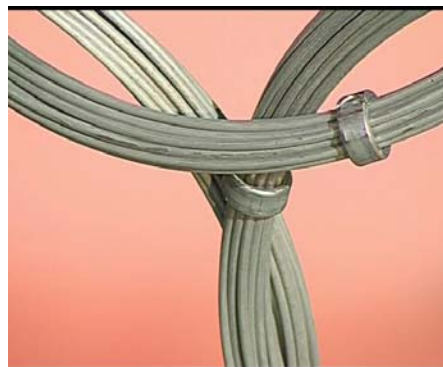
### Caractéristiques techniques :

Un revêtement en aluminium et zinc protège le filet à anneaux contre la corrosion. Des essais en laboratoire (séjour d'une semaine dans une enceinte à brouillard salin) montrent que sa longévité est quadruplée par rapport à un zingage traditionnel.

Les anneaux constituant les filets sont composés de 4 à 19 spires selon le dimensionnement de l'ouvrage pare pierres. Ils se distinguent des filets à maille diagonale, des filets à anneaux à 6 points de contact et des autres filets de câble. Chaque anneau a 4 voisins. Ce mode d'entrelacement peut aussi être utilisé le long des raccords verticaux où les différentes nappes de filet sont rattachées les unes aux autres. Il en résulte un système entièrement homogène.



Les anneaux



Spires constituant les anneaux

Les anneaux présentent un comportement élastoplastique lorsqu'ils se déforment. Chaque anneau absorbe ainsi de l'énergie en se déformant. Seule l'éventuelle énergie résiduelle est transmise par les câbles porteurs aux anneaux de freinage qui l'absorbent. Il est en effet souhaitable d'absorber un maximum d'énergie dans le filet avant que les anneaux de freinage ne soient sollicités. C'est pourquoi des câbles filants sont utilisés.

Les câbles filants laissent glisser une portion de filet accrue, ce qui permet au filet de travailler sur une surface supérieure de 40% par rapport à la version standard. Des essais ont montré que ce comportement est pratiquement indépendant du lieu d'impact à l'intérieur de la barrière. Les ancrages et autres composants du système sont moins sollicités. Cette technologie (RUNTOP) a permis de réduire considérablement le nombre d'anneaux de freinage requis. Ainsi, par exemple, une barrière longue de 40 à 60m et dimensionnée pour 500 kJ ne nécessite plus que 8 anneaux de freinage (soit moins de la moitié que pour une barrière traditionnelle). Le coût d'entretien s'en trouve sensiblement réduit.

### Avantages des filets Geobrug :

Dans la pratique, un ouvrage de protection subit généralement des impacts répétés. La technologie des câbles filants (RXI) a été spécialement conçue pour maîtriser de tels événements. Elle procure de nombreux avantages au niveau des coûts dans les phases de montage et d'entretien :

- La réduction des efforts dans les ancrages permet de diminuer leur longueur ainsi que le temps nécessaire au forage.
- La faible distance de freinage lors d'un événement permet d'installer la barrière plus près de l'objet à protéger.
- L'utilisation de pièces légères facilite le montage et l'entretien ;
- Les frais d'entretien sont réduits car seuls les anneaux de freinage doivent être remplacés ;
- Les modules d'extrémité offrent une protection complète avérée. Il n'est pas nécessaire de les surdimensionner comme dans les systèmes traditionnels.



Câbles filants



Fusible mécanique



Forces divergentes de l'axe du forage

Une particularité de ces systèmes réside dans le fait que les pièces coûteuses qui sont en contact avec le sol sont protégées lors des impacts contre les supports. Les fusibles mécaniques ne subissent aucun effort lors d'un montage usuel et ne cèdent que lorsqu'un support est touché.

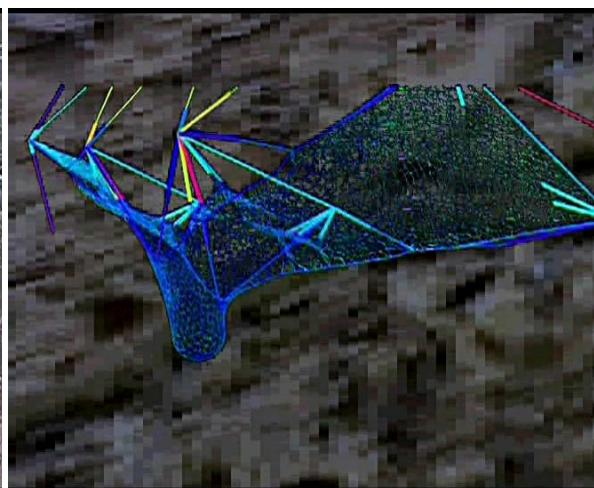
« Ce qui peut plier ne se rompt pas ». C'est pourquoi les ancrages à câble spirale mobile sont supérieurs aux ancrages à barre traditionnels. Ils sont à même de reprendre sans perdre de leur résistance des forces divergeant de l'axe du forage d'un angle pouvant aller jusqu'à 30°.

#### Essais d'impact et modélisation numérique :

Une série d'essais de chutes d'arbre ont été effectués avec l'institut de recherche WSL sur la série dimensionnée pour 1000 kJ. Trois troncs d'arbre de poids différents ont été lâchés dans un seul et même filet qui n'a subi aucun entretien entre les essais. Le tronc le plus lourd pesait 2 tonnes. Sa hauteur de chute était de 30m.

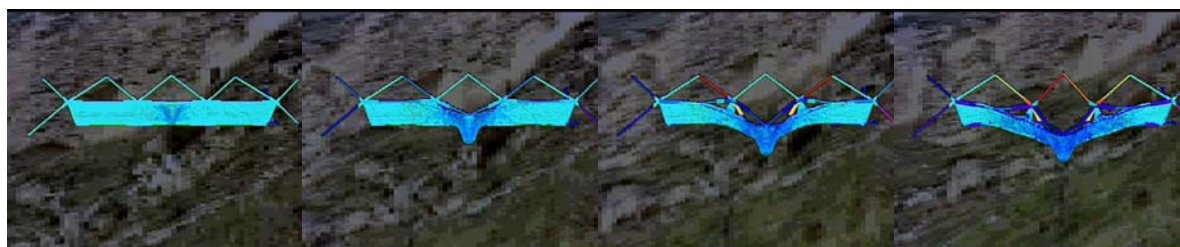


Essai d'impact de tronc d'arbre



Simulation numérique d'un impact de bloc

Les exigences posées aux ouvrages de protection sont aussi diverses que la nature est variée. Quand les événements menaçants sortent des hypothèses de base, par exemple, lorsque l'espacement entre supports ou la distance de freinage est soumis à des contraintes particulières ou que la vitesse des projectiles est supérieure à 25 m/s, les chutes de pierres peuvent être simulées à l'aide d'un logiciel (Faro) travaillant avec la méthode des éléments finis, selon un modèle développé par l'Ecope Polytechnique Fédérale et l'institut WSL.



Simulation numérique du fonctionnement de l'ouvrage soumis à une chute de bloc

Les barrières de protection haute énergie à support de grande taille (par exemple de 7m) peuvent aussi être installées rapidement par hélicoptère en terrain difficile après avoir été partiellement pré-montées.

#### Conclusion :

Les barrières pare pierres Geobrugg conçues pour des énergies de 100, 250, 500, 1000, 2000 et 3000 kJ :

- ont réussi des essais avec des impacts répétés,
- ont retenu les projectiles atteignant les bords de l'ouvrage,
- présentent les mêmes caractéristiques sur toute la barrière où que se produise l'impact,
- fonctionnent même avec une portée de 60m sans haubanage intermédiaire.

(Fin du film)



J.-D. Rouiller tenait à préciser que le coût de ces ouvrages (3000 € le mètre linéaire pour ceux qui ont été posés à Gondo) varie selon les offres mais que seule la société Geobrugg fait des ouvrages certifiés jusqu'à 3000 kJ. Les praticiens sont donc un peu prisonniers de ce monopole. La solution employée pour éviter cela consiste à doubler les écrans (par exemple poser deux écrans de capacité 1500 kJ coûte souvent moins cher qu'un écran de 3000 kJ).

L'idée est d'aller le plus loin possible dans la capacité d'absorption des filets. Il faut donc stimuler la recherche pour trouver des solutions techniques, comme cela peut se faire dans le cadre des projets Interreg. On pourrait ainsi lier l'idée de CAN-France avec l'idée de Geobrugg axée sur la force pour arriver à des solutions mixtes qui pourraient être très intéressantes.

J.-D. Rouiller préconise que les travaux en cours sur les galeries (en France) soient vivement encouragés parce qu'ils peuvent là aussi augmenter la capacité des galeries (problème spécifique : « avec le béton armé on est vite limité... »).

#### **Discussion (11) – Filets pare-blocs CAN et Geobrugg : perspectives**

**Pierre Guillemin (Cete Lyon) :** « A-t-on des données sur les efforts qui sont reportés dans les ancrages latéraux et amont dans le cas des filets 3000 et 5000 kJ ? »

**J.-D. Rouiller :** « Je n'en ai pas : les aspects purement techniques sont sous-traités (appels d'offre et vérification par un bureau si nécessaire). L'aspect résistance n'intervient pas directement pour le client que nous sommes en bout de chaîne. Nous essayons simplement de promouvoir des solutions qui répondent à nos besoins, or nos besoins vont actuellement au-delà des 3000 kJ.

Je demande votre avis, mais il me semble que l'idée initiale de CAN de répartir le plus loin possible l'énergie du filet est la meilleure et qu'il faut continuer dans ce sens là. Malheureusement, les sociétés françaises manquent de stimulation. Elles ne souhaitent pas intervenir en Suisse car Geobrugg bénéficie d'une licence CAN-France très protectionniste qui la met actuellement en situation de monopole.

J'imagine qu'avec un projet transfrontalier axé sur ce thème, on arriverait peut-être à aller plus vite et plus loin dans la recherche de solutions à haute énergie. Geobrugg fait actuellement cavalier seul avec ses idées qui sont bonnes mais pas nécessairement les meilleures.»

**P. Guillemin :** « Les entrepreneurs français sont toujours dans l'attente d'une station d'essai, en projet depuis longtemps (LCPC). Ils hésitent à se lancer dans le montage de stations communes entre diverses entreprises, alors qu'avec station 'nationale', chacun pourra venir tester et développer ses produits ».

**J.-D. Rouiller :** « En attendant, je ne vois pas pourquoi ils ne pourraient pas venir faire leurs essais sur le site de Wallenstatt (canton de St-Gall) d'entente avec Geobrugg.»

**P. Guillemin :** « Certains ont voulu y aller, se sont renseignés sur les tarifs et la réponse a été assez dissuasive ».

**J.-D. Rouiller :** « Il faudrait négocier. Si plusieurs sociétés interviennent ensemble auprès de Geobrugg il y a peut-être une possibilité acceptable.»

**P. Guillemin :** « Pour cela, il faut que les 6 fabricants français s'unissent, ce qui n'est pas nécessairement très naturel, et discutent... ».

**J.-D. Rouiller :** « Oui, on peut imaginer qu'en marge, ce genre de projet transfrontalier pourrait aller dans cette direction : il faut rassembler les gens pour commencer à les faire discuter ».

**Eric Leroi :** « Quand on visionne le film, tout paraît parfait. Il existe quand même des inconvénients avec ce genre de filets, notamment en terme d'impact visuel. Il ne convient peut-être pas de les préconiser partout ».

**Raphael Mayoraz :** « A propos du site de Wallenstatt, il s'agit d'un site fédéral mais qui appartient à Geobruigg. Ils peuvent réaliser tous les essais qu'ils veulent, mais pour les extérieurs, les essais sont très chers. Pour une société qui commence dans le domaine, c'est quasiment irréalisable : une société a dû fermer car l'homologation de ses filets lui coûtait 50 000 € l'essai, donc inabordable.

Un autre problème avec ce site est que les essais sont réalisés en chute libre, ce qui est contestable : il n'y a par exemple pas de prise en compte de la rotation de l'objet, qui peut avoir une action destructrice sur les filets. De ce point de vue je crois que le futur site français est beaucoup plus intéressant : il est sur un plan incliné et on peut donner de la rotation aux blocs, etc. Je me demande ce que vous attendez pour le faire ».

**J.-P. Duranthon :** « Statistiquement, en moyenne est-ce moins cher de poser 2 rangées de 1500 kJ ou une seule de 3000 kJ ? As-tu déjà été confronté à ce problème là ? ».

**J.-D. Rouiller :** « Ce qui pose problème, ce sont toujours les prix. Lorsque nous travaillons à des niveaux d'énergie inférieurs à 1500 kJ, plusieurs fournisseurs peuvent répondre à l'appel d'offres. D'un site à l'autre, on obtient des variations de prix incroyables : celui qui était moins cher la première fois est plus cher la seconde, les prix passent du simple au double. Il faudrait peut-être commencer par faire une analyse sérieuse de ces coûts, sans tenir compte des offres que nous font ces sociétés. Doubler des écrans de 1500 kJ pourrait dans ce sens permettre de contourner le monopole de Geobruigg.

Un autre problème récurrent avec les décideurs en matière d'équipement est le surdimensionnement des ouvrages de protection. Certains décideurs arguent par exemple que lorsque les calculs trajectographiques proposent 1000 kJ il vaut mieux doubler cette capacité par mesure de précaution, surtout qu'il y a peu de différence de prix. Or jusqu'à preuve du contraire, il n'y a aucune raison de le faire car d'une part cela reste à démontrer et d'autre part au-delà de 1000 kJ les coûts de pose deviennent rapidement plus élevés (encombrement, ancrages, etc.)

**E. Leroi :** « Les doubles 'rideaux' de filets ont un avantage : on revient sur la notion de trajectographie et sur la notion d'intensité des phénomènes au niveau de l'aléa. Plus on travaille en amont et moins on a d'énergie à capter. C'est ce qui a été mis en place à Andorre, avec des filets proches des ouvrages à protéger et une première ligne de filet le plus haut possible pour arrêter les blocs avant qu'ils n'aient acquis une vitesse importante. On réduit ainsi énormément les niveaux d'énergie à bloquer. Naturellement cela a un coût supplémentaire, mais avec l'intérêt de réduire la maintenance en protégeant les filets à l'aval. Par contre encore une fois, l'impact visuel est quand même assez négatif ».

**J.-D. Rouiller :** « Quand on dimensionne un écran de protection, on travaille avec les modèles trajectographiques monobloc. On fixe le bloc de dimensionnement à partir du bloc moyen, et non pas du bloc extrême. Si on se trouve dans une zone sensible ou avec un enjeu vraiment important à l'aval, l'idée est d'arrêter le bloc moyen à l'aide du premier écran (par exemple 1500 kJ) et celui de taille exceptionnelle avec un 2<sup>ème</sup> écran de plus grande capacité sis en dessous (3000 ou 5000 kJ). Le positionnement aval du second écran permet de l'économiser sur le long terme. Mais ça, c'est peut-être le début du luxe... ».

**P. Guillemain (CETE Lyon) :** « Au niveau des bémols, le problème de ces écrans de filets est qu'une grosse partie de l'énergie est transmise au sol, or on se trouve souvent sur des versants de pierriers, d'éboulis vifs, etc., où il est très difficile de réaliser des ancrages vraiment résistants ».

## 5.2 Ouvrages de protection contre les chutes de blocs, un concept nouveau : les Pare-blocs Structurellement Dissipants (PSD)

Pascal PERROTIN (LOCIE, Polytech'Savoie, Université de Savoie) et Jean TONELLO (Tonello I.C.)

P.Perrotin et J.Tonello présentent leurs travaux de recherches et applications sur les ouvrages Pare-blocs Structurellement Dissipant (PSD), nouvelle famille de pare-blocs à même de dissiper des niveaux d'énergie extrêmement importants et ne nécessitant pas l'ajout d'une couche granulaire.

### Contexte de l'étude

Les risques naturels (avalanches, chutes de blocs) perturbent énormément l'activité économique, surtout dans les vallées alpines : la pression du tourisme étant très forte, il faut absolument se protéger pour « vendre » ces vallées.

En Savoie, le Val d'Arly, accès entre les stations de Tarentaise et du secteur de Megève, offre un excellent site d'expérimentation car les éboulements, chutes de blocs, coulées de boues y sont très fréquents. Aujourd'hui, sur une portion de 2 km aux niveaux du secteur des Essariaux, il existe déjà 7 ouvrages de protection, positionnés sur les endroits prioritaires où les énergies sont les plus fortes.

La présentation s'intéresse plus particulièrement aux ouvrages des Essariaux (visités lors de l'*Atelier 3 Albertville*) et de Poniente (en cours de réalisation).

Pour dimensionner les ouvrages de protection, l'ingénieur dispose d'énergies d'impact sur l'ouvrage, déterminées à partir de l'analyse de l'aléa par le géologue et d'études trajectographiques.

Pour l'ouvrage des Essariaux (Mur Basso), l'énergie maximale attendue (E1) est de 3360 kJ (tableau ci-dessous), avec des vitesses de bloc de 41,5 m/s.

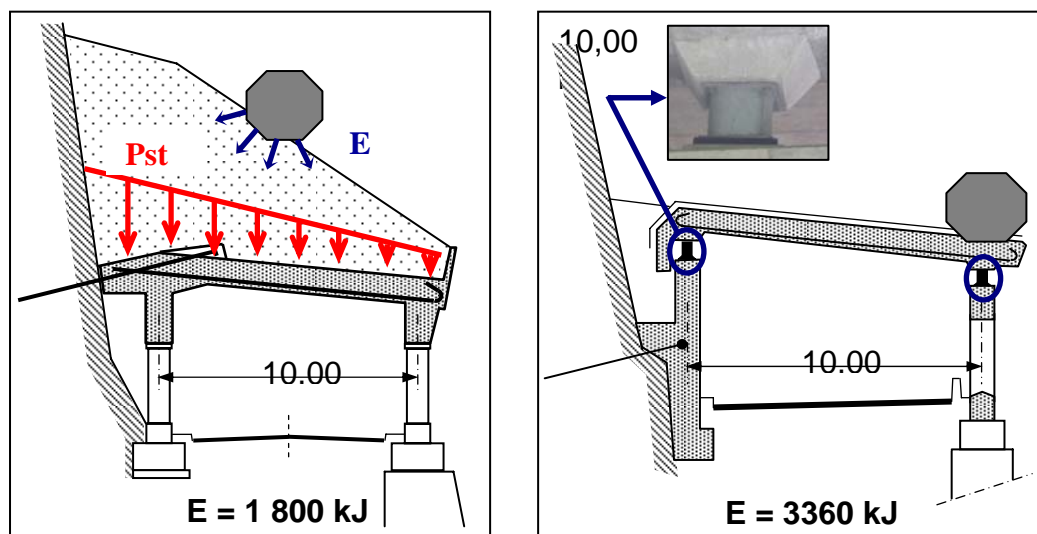
Lieu dit	PR 13,600 LES FOURCHES		PR 9,100 MUR BASSO	
	1	2	1	2
N° de profil	1	2	1	2
Alt de départ en m	750	750	830	860
Hypothèse du poids des blocs au départ en t	13 à 18	10 à 15	1 à 4	1 à 0,6
Energie maximale E1 en KJ	6700	11 450	3360	650
Vitesse verticale maximale en m/s	33	41,3	41,5	35,8
Vitesse horizontale maximale en m/s	24,1	21,2	19,8	18,4
Poids à l'arrivée maximal en t	12,3	13,4	3,9	1
Energie maximale observée E2 en KJ	1970	9500	3100	580
Poids associé avec la vitesse verticale en t	0,3	11,1*	3,6*	0,7
Vitesse associée avec le poids maximal en m/s	17,9*	25,7	24,3	33,8*
Energie optimale E3 en KJ	1100	2560	1750	650
Poids le plus courant en t	2	3	2	1
Pourcentage des blocs inférieurs à ce poids	92	86	90	100
Energie moyenne optimale E4 en KJ	380	600	400	430
Vitesse verticale moyenne en m/s	19,4	20	19,8	29,1
Vitesse horizontale moyenne en m/s	16,3	13,1	12,5	13,6

### Concept de Pare-blocs Structurellement Dissipant (PSD)

Les ouvrages classiques (schéma ci-dessous à gauche) sont basés sur le principe de dissipation de l'énergie d'impact du bloc dans le remblai supporté par une dalle en béton armé. Les inconvénients de ce système sont multiples :

- Le dimensionnement de la dalle est basé essentiellement sur une approche pseudo-statique ; on peut s'interroger sur l'adéquation du système pour lequel un remblai de 4,5m de terre est conçu pour dissiper « seulement » une énergie de 1800 kJ ;

- Le poids propre de l'ouvrage est élevé, ce qui implique une structure massive, des fondations problématiques ;
- Le remblai est difficilement accessible, ce qui pose des problèmes de maintenance de la structure.



Ces différentes observations ont progressivement amené Tonello I.C. à réfléchir à des alternatives possibles.

La démarche a été de travailler sur des dalles nues, sans remblai, pour juger de la pertinence du dimensionnement, sur un contrat supérieur à 1800 kJ (actuellement 3360 kJ, ci-dessus à droite). Pour un choc en travée, la dissipation se fait donc directement dans la dalle, avec acceptation d'un certain niveau d'endommagement ; pour un choc en rive, elle se fait dans des appuis fusibles (cerclée en bleu ci-dessus). Le dimensionnement de la dalle se fait cette fois sous des sollicitations dynamiques.

En 1998 a lieu la construction du pare-blocs « Les Essariaux », sans essai préalable, si ce n'est celui « grandeur nature » de la réception d'un bloc de 30 tonnes sur un pont de bretelle de voie rapide (qui a résisté, voir photo de la [diapo 4](#), Moutiers 1998). Ensuite, en Juillet 2000, Novembre 2002 et Mars 2003 se succèdent trois campagnes d'essais avec le LOCIE. Les résultats montrent qu'une réduction de 30 % de l'épaisseur de la dalle est possible, avec pour conséquences une diminution du poids propre, un ouvrage accessible et une maintenance et une surveillance facilitées.

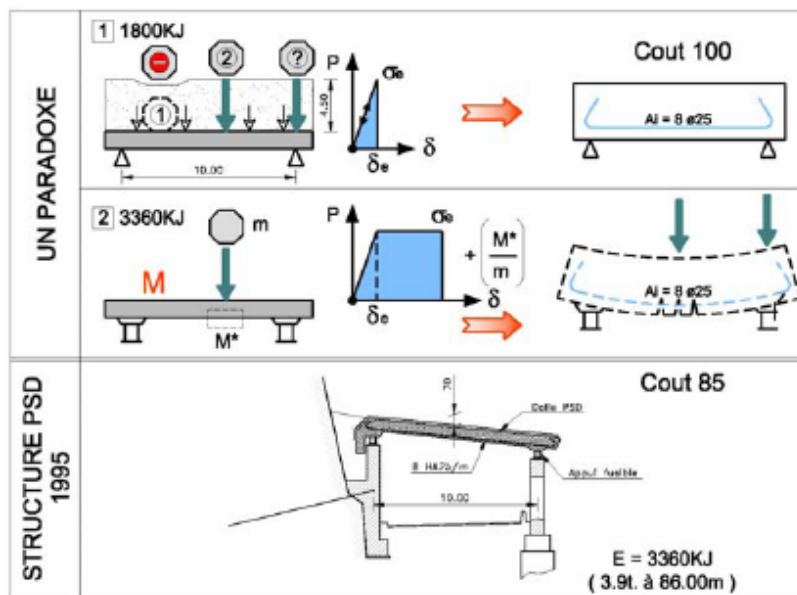
Au niveau des appuis interviennent des éléments qui ne sont pas uniquement dissipants, mais qui sont des limiteurs d'efforts. Ils ont été conçus de manière assez rustique, en prenant en compte le flambement du pourtour de l'appui.

Essais sur appuis fusibles (galerie de Poniente) : avant et après essai d'enfoncement.



La démarche a été guidée en analysant le paradoxe suivant :





Sur une dalle supportant un remblai de 4,5m (cas 1), dimensionnée pour recevoir des énergies de 1800 kJ, un second bloc ne « doit pas » tomber sur une zone déjà impactée car le remblai n’est jamais refoisonné ; d’autre part les impacts sur les appuis sont mal pris en compte . Pour le dimensionnement de ce type d’ouvrages, il n’y a que le domaine "élastique" du matériaux qui est pris en compte (en terme d’armatures un calcul classique donne 8  $\phi 25$  /m, ce qui est assez conséquent).

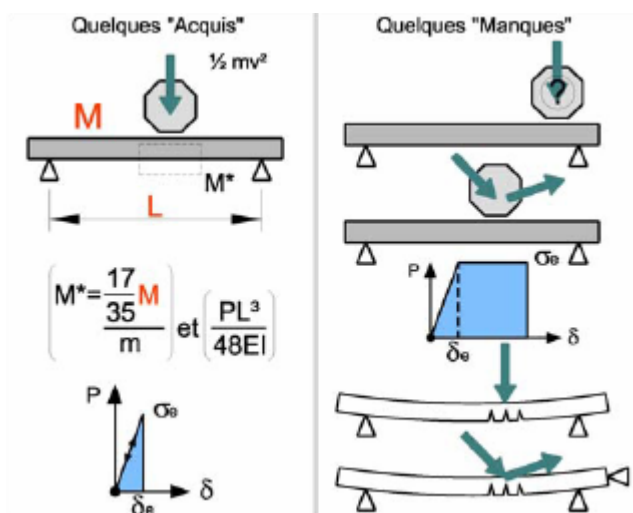
Sur une dalle sans remblai (considérée à 2 dimensions, cas 2), un impact de bloc profite de la première phase de contact (choc mou, dissipante sur le plan énergétique), puis sollicite une phase d’endommagement (domaine de plasticité en terme de contraintes) : avec la même quantité d’armature (8 $\phi 25$ /m), la structure accepte des énergies de 3360kJ.

C’est ce concept qui a mené à la réalisation de la galerie des Essariaux, avec au final un gain de coût par rapport à une structure classique de 15%, gain non négligeable étant données les sommes engagées

Dans la littérature (« Acquis » ci-contre), on connaissait le choc d’une masse  $m$  (bloc) contre une masse  $M^*$  (masse équivalente de la dalle) avec une première dissipation (choc mou, supposé puis confirmé par les essais, voir ci-après) puis une phase élastique.

Par contre certains aspects avaient été très peu étudiés (« Manques » ci-contre):

- Un impact sur appui, qui ne peut pas mobiliser la déformation de la dalle pour dissiper l’énergie cinétique et se répercute directement dans la fondation : l’idée innovante a été de créer un système qui permette ce cas de choc ;
- Un choc oblique, avec renvoi du bloc : le bilan énergétique n’est pas le même que lorsque le bloc s’arrête sur la dalle ;
- La prise en compte du comportement "élasto-plastique" des matériaux.



## Campagnes expérimentales

Les concepts proposés ci-avant ont été validés par une importante étude expérimentale, réalisée par le LOCIE et soutenue par Tonello I.C. et d'autres partenaires (DDE Savoie, SETRA, CETE Lyon, RNVO, LCPC, Léon Grosse).

### Remarques préliminaires :

- (1) Aujourd'hui, les études trajectographiques fournissent des niveaux d'énergie ; or (en France tout du moins), les ingénieurs ont l'habitude de dimensionner les structures à partir d'efforts : le pas à franchir entre les deux est loin d'être simple.
- (2) Dès le dimensionnement de l'ouvrage, un certain niveau d'endommagement de la structure est accepté.

Sur une maquette à l'échelle 1/2,5, trois types d'essais ont été réalisés :

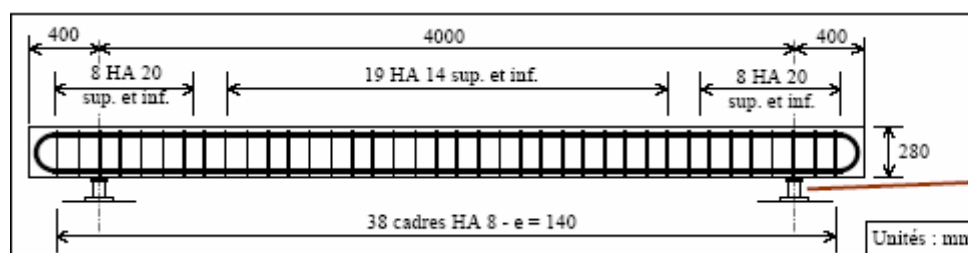
- Des chocs « courants », correspondant à un niveau d'énergie de 67 kJ, qui ne provoquent pas d'endommagement significatif de la structure = un bloc de 450 kg lâché verticalement d'une hauteur de 15m ;
- Des chocs dits « exceptionnels », à 135 kJ, qui font apparaître des déformations permanentes nécessitant la réparation de la structure (énergie maximale) = un bloc de 450 kg lâché de 30m ;
- Des chocs « hors dimensionnement », à 294 kJ, testés pour endommager le plus fortement la structure = un bloc de 810 kg lâché de 37m (essais T6).

Pour réaliser un cycle complet d'étude, les essais ont été réalisés dans différentes conditions :

- Etat de la dalle avant le choc : intact (T1, T2), endommagé (T5) ou réparé (T4, T6) ;
- Position de l'impact : en travée (T1,2,4,5 et 6) ou sur appuis (T3).

La structure d'essai est une dalle horizontale de 4,80 m x 12 m x 0,28 m, avec un ratio d'acier de 1,12 % (soit 270 kg d'acier par m<sup>3</sup> de béton), réalisée avec des gammes d'acier et de béton très courantes, telles que celles susceptibles d'être mises en œuvre dans le Val d'Arly :

- FeE 500 (valeur garantie)
- fbc = 30 MPa (essai de compression)
- Béton = 30 700 MPa (extensométrie)



La dalle repose sur 22 appuis fusibles (ci-dessus à droite), constitués de tubes métalliques de 2,9 mm d'épaisseur soudés entre deux plaques d'acier, d'une hauteur de 100 mm et de 70 mm de diamètre, posés sur des patins en néoprène de 10 mm d'épaisseur.

Cette dalle d'essai est instrumentée avec

- des mesures de déplacements verticaux maximaux ;
- une centrale d'acquisition (fréquence de 7000 Hz) qui gère :
  - des capteurs de déplacement LVDT (photo ci-contre) ;



- des accéléromètres en sous-face de la dalle ;
- un accéléromètre dans le bloc d'impact ;
- des jauges de déformation sur les armatures ;
- des capteurs d'effort sous une ligne d'appuis fusibles.

Enfin, une caméra ultra rapide à 1000 images / seconde filme les essais.

## Résultats

*Essais en travée :*

Test	Position	Énergie d'impact (kJ)	Flèche max (mm)	$\varepsilon$ max enregistrées Armatures inférieures ( $\mu\text{m.m}^{-1}$ )	Endommagement
T1	En travée	67	14,5	1200	- Faible fissuration du béton en sous face.
T2	En travée	135	22,5	1980	- Fissuration importante du béton. - 5 brins (HA 8) de cadres rompus.
T4	Idem que T2	138	19,7	-	- Faible fissuration du béton en sous face.
T5	Idem que T1	134	23,2	2290	- Fissuration importante du béton en sous face.
T6	En travée	294	-	Plastification	- Ejection du béton d'enrobage. - Plusieurs épingles (HA 10) rompues. - Armatures supérieures et inférieures cisailées. - Plastification de six appuis.

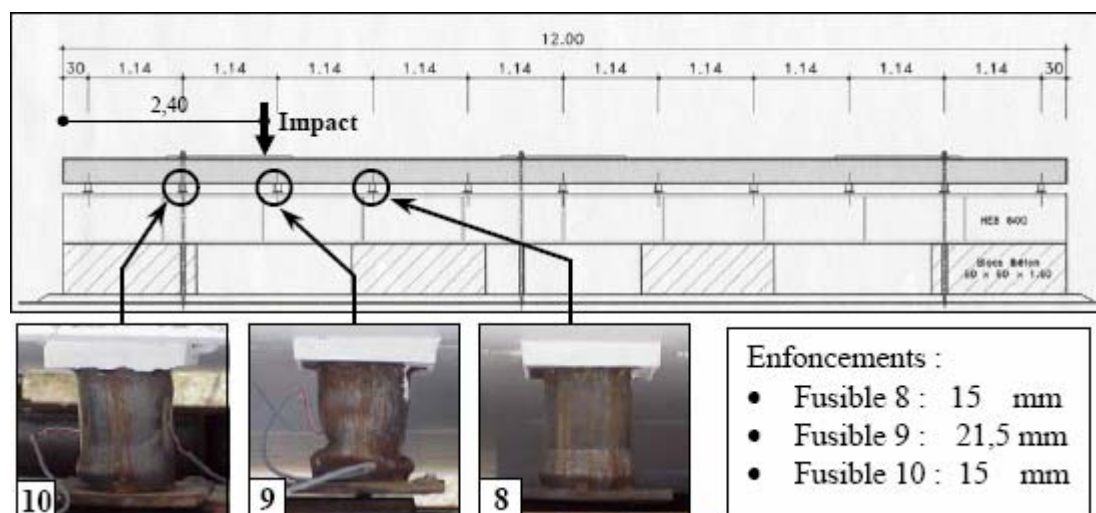
La déformation maximum (limite élastique) pour un acier est proche de  $2500 \mu\text{m.m}^{-1}$  : les essais T1 à T5 montrent des déformations dans les armatures en deçà de cette limite.

Pour l'essai T2, on observe des ruptures de cadres d'armature, qui s'expliquent par une évaluation insuffisante de l'effort de poinçonnement au moment de l'impact. Ceci a été corrigé pour l'essai T4 : une partie du béton a été hydrodémolie pour remplacer des armatures, puis recoulé ; l'essai qui a suivi (T4) a montré un niveau de flèche inférieur.

Lors de l'essai T6, la structure s'est complètement plastifiée, mais il s'agit bien d'un essai « hors dimensionnement ».

*Impact en rive à 135 kJ - Essai T3 :*

L'objectif du dispositif est de dissiper un maximum d'énergie dans les appuis fusibles, très peu au niveau de la dalle pour ne pas l'endommager. Cela a bien été vérifié, avec une forte plastification des trois appuis (ci-dessous).

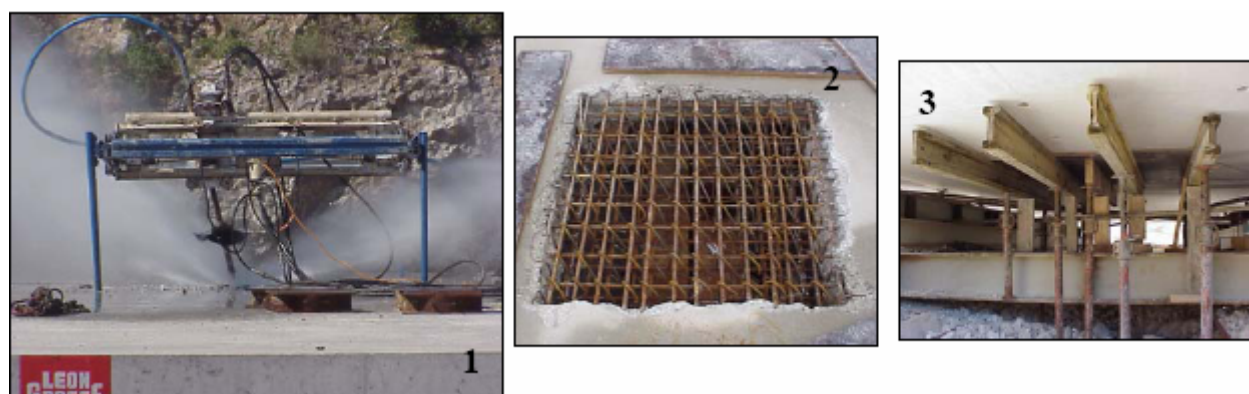


Aucun endommagement significatif n'a été observé dans la dalle, ni dans les éléments supportant les appuis fusibles : l'énergie d'impact a bien été absorbée par le cloquage des appuis.

Au niveau de la dalle réelle, lorsqu'un appui est endommagé, le mode opératoire prévoit de lever la dalle à l'aide de vérins pour remplacer les appuis endommagés.

Lors de l'essai T6 « hors dimensionnement », on a observé une expulsion du béton d'enrobage, une déstructuration de l'ensemble du béton avec des fissures à 45°, des ruptures de cadres d'armatures (pourtant augmentées de  $\phi 8$  à  $\phi 10$ ) (illustration dans la présentation, dia 24). Par contre, confirmant une importante réserve de "capacité", le bloc (810 kg lâché de 37m) n'a pas traversé la dalle.

Dans le cycle de vie complet d'un ouvrage, celui-ci peut être impacté et endommagé ; il faut donc prévoir de le réparer. Le béton peut donc être hydrodémoli (1) sur la portion fissurée (les essais ont montré que cette zone est assez restreinte, l'essentiel de la dalle restant dans un domaine semi-élastique) ; le ferrailage est ainsi mis à nu (2), ce qui permet de remplacer les armatures plastifiées ; du béton est ensuite recoulé pour compléter la dalle (3). Les essais après réparation ont fait ressortir des caractéristiques plutôt meilleures que les précédentes, ce qui prouve que le principe de réparation est efficace.





En résumé de ces essais, la simulation d'un cycle de vie complet de l'ouvrage a été réalisée, avec :

- des chocs « courants » à 67 kJ, qui provoquent un faible endommagement et ne nécessitent aucune réparation (la dalle a résisté ensuite à un 2<sup>e</sup> impact « exceptionnel » à 135 kJ) ;
- des chocs « exceptionnels » à 135 kJ qui provoquent un endommagement uniquement localisé à la zone d'impact.

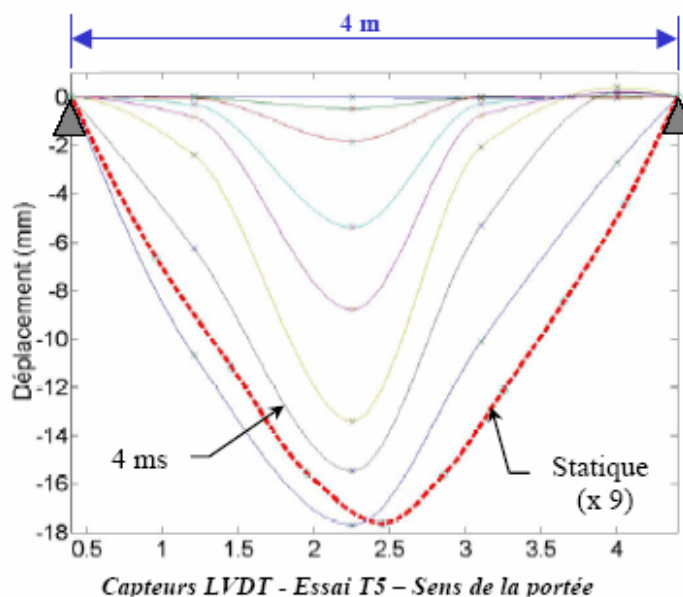
Avant ou après réparation, le comportement de la dalle s'est avéré globalement identique. Enfin, le cloquage des appuis intervient uniquement pour les chocs en rive, jamais pour des chocs en travée bien que cette circonstance ne soit pas à écarter exceptionnellement.

Les campagnes d'essais ont donc permis la **validation du principe de fonctionnement et de réparation des Pare-blocs Structuellement Dissipants**.

### Mise en mouvement de la dalle

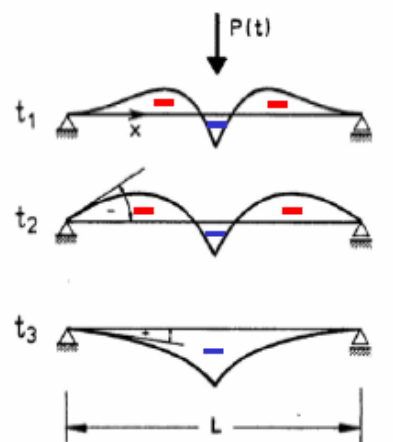
D'un point de vue plus théorique, le graphe ci-contre présente les courbes de déplacement de la dalle, toutes les 0,5 millisecondes environ. On observe qu'en fin de choc les déplacements sont pratiquement conformes à la courbe de déplacement statique bien connue des mécaniciens (pointillé rouge).

Par contre, au tout début de l'impact, les déplacements sont très faibles, ce qui induit des efforts très importants : c'est ce qui explique la rupture des cadres (armatures d'effort tranchant) lors des premiers essais.



D'autre part, lors d'un impact tel que celui d'un bloc sur une dalle, des phénomènes de vibrations se déclenchent, qui ne sont pas selon le premier mode mais selon des modes plus élevés. Entre autre, dans la zone d'étude, au niveau des armatures inférieures (qui sont théoriquement toutes en traction dans un phénomène de flexion statique), certaines jauges montrent bien de la traction mais d'autres commencent par être en compression pour passer ensuite en traction (schéma ci-contre et graphiques des [diapos 28-29](#)) : cela est dû à un phénomène de mise en mouvement progressive de la dalle, qui n'avait pas été pris en compte avant les essais mais est désormais bien intégré dans les modèles :

- Une surface réduite de dalle est mise en flexion lors du choc ;
- Il y a apparition de contraintes de compression dans les armatures inférieures éloignées de l'impact au début du choc ;
- La déformée dynamique a la même allure que la déformée statique au bout d'environ 3,5 à 4 ms.



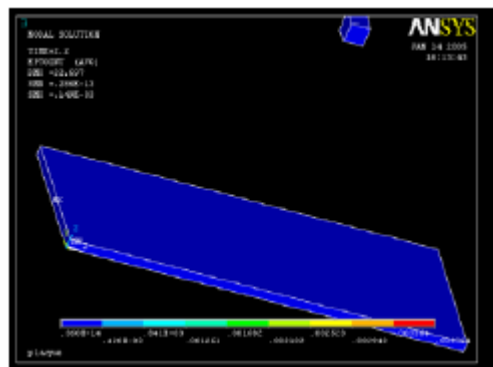
### Bilan énergétique

L'énergie cinétique du bloc est en partie transmise à la dalle (énergie cinétique et énergie de déformation), en partie dissipée par le phénomène de poinçonnement de la dalle ; les appuis peuvent également fonctionner sous certains chocs, et si le bloc est éjecté (essais sur dalle inclinée) une partie de l'énergie est transformée en énergies de translation, de rotation et de la déstructuration des matériaux.

### Modèles numérique et mécanique

Pour comprendre tous les phénomènes mis en jeu, une modélisation numérique (ANSYS) a été réalisée dans le cadre d'un projet de recherche avec le groupe RNVO (Risques Naturels et Vulnérabilité des Ouvrages) :

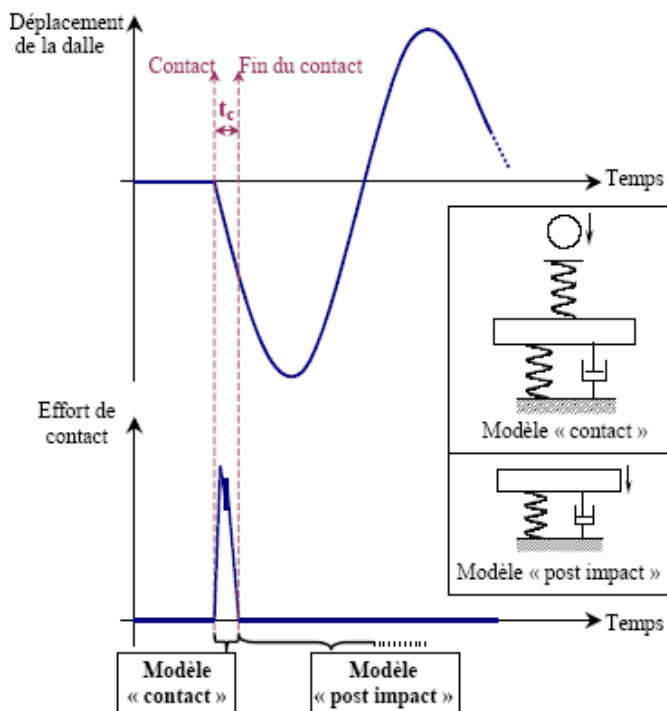
- Approche multicouches 3D : 4 couches dans l'épaisseur ;
- Armatures et béton homogénéisés : SOLID65 ;
- Analyse transitoire implicite : schéma d'intégration temporelle de Newmark ;
- Béton : critère de rupture de Willam-Warnke ;
- Armatures : comportement élasto-plastique ;
- Maillage : 7168 éléments.



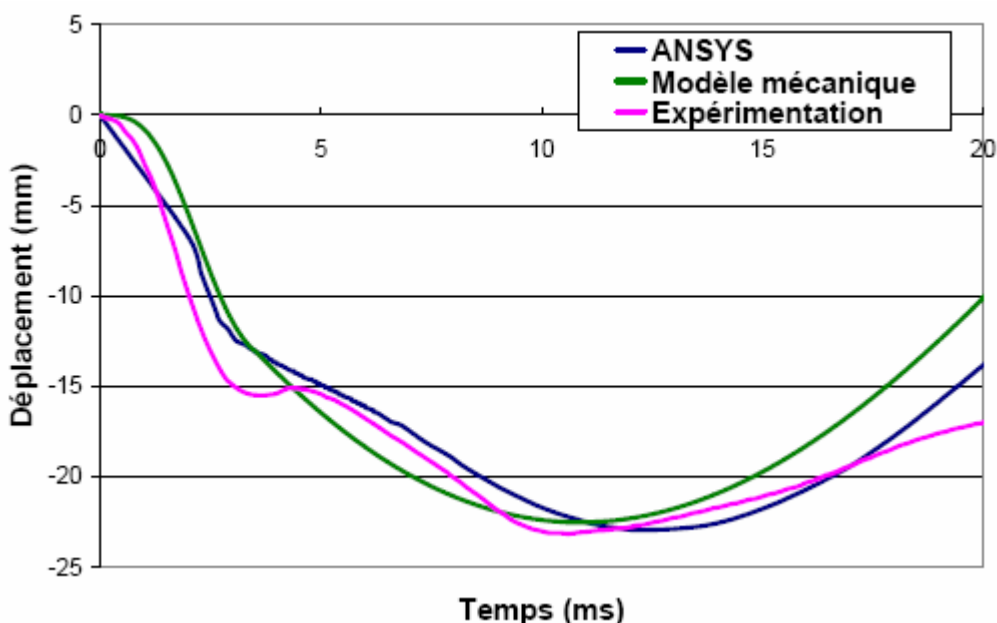
Le modèle a été calé avec des essais statiques et l'essai T5, puis validé avec les essais T2, T4, T6.

A l'issue de cette modélisation, la compréhension des phénomènes a permis de créer un modèle mécanique simplifié pour réaliser les premières démarches de dimensionnement, ce dont l'ingénieur a effectivement besoin. Il s'agit d'un modèle de type masse-ressort simple, décomposés en deux sous-modèles :

- un « Modèle contact » : il prend en compte la surface réduite de la dalle mise en mouvement au départ ( $0 < t < t_c$ ) et intègre l'effort de percussion, le déplacement de la dalle et l'énergie transférée ;
- un « Modèle post-contact » (post-impact sur la figure): modèle de flexion globale ( $t > t_c$ ), il reproduit le déplacement maximal de la dalle et les déformations des armatures.



Les résultats des simulations montrent une très bonne concordance entre les essais réels, numériques et mécaniques (courbes et tableau ci-dessous). Le modèle numérique est malgré tout compliqué à mettre en place.



		Déplacement (mm)		Effort (MN)
		à $t_c$	max	
Essai T5 (135 kJ)	modèle numérique	13,5	23,0	3,3
	« masse – ressort »	13	22,5	5
	expérimentation	15	23,2	2,8
Essai T1 (67 kJ)	modèle numérique	8,5	15,0	1,8
	« masse – ressort »	9	15,4	3,3
	expérimentation	-	14,5	-

Les niveaux d'effort très importants mis en évidence au moment de l'impact (3 à 5 MN) expliquent la déstructuration des matériaux observée dans l'expérimentation.

Les modèles simplifiés permettent donc de dimensionner :

- les armatures longitudinales à travers les phénomènes de flexion ;
- les armatures d'effort tranchant grâce à l'effort de contact (poinçonnement).

D'autre part :

- les temps de calcul et de modélisation sont réduits ;
- le changement des caractéristiques de la dalle est facilité ;
- le modèle « masse – ressort » prend en compte les phénomènes dynamiques.

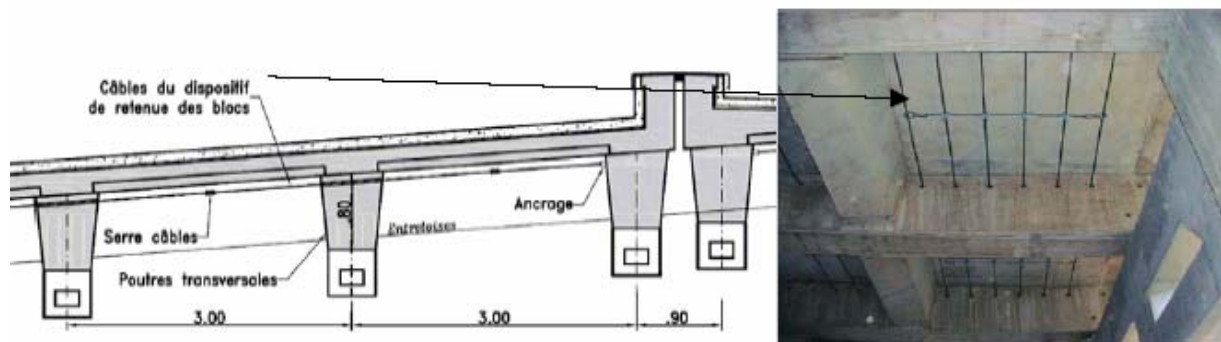
Ils constituent donc une **première approche dans le développement d'outils de calcul pour l'ingénierie.**

**Ils confirment aussi les valeurs de la percussion dissipante (choc mou) et celle du travail élasto plastique avec "rotule" unique simplifiée.**

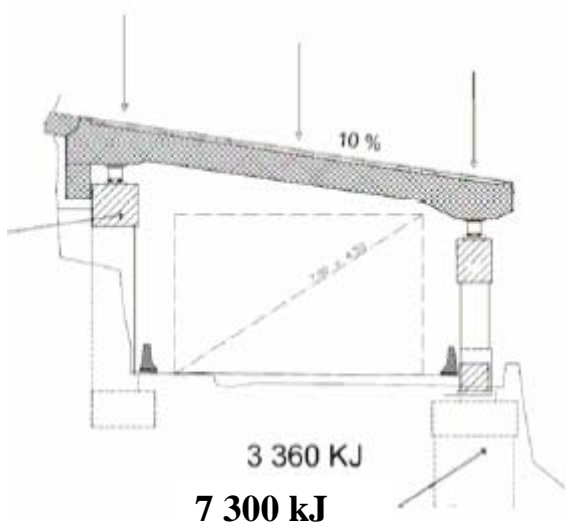
## Ouvrages réalisés et en projet :

### Neige et blocs associés

La réalisation d'un important paravalanche à Val Thorens avait été prévu selon une méthode de préfabrication intensive, car les délais de chantier en montagne à 2000 m sont courts, d'avril à octobre. Or il a fallu très tard dans le projet prendre en compte au-delà du risque d'avalanche un risque de chute de blocs, qui n'était de prime abord pas facilement conciliable avec le projet initial (hourdis entre poutres important, ne permettant pas de mobiliser l'effet bidimensionnel de la dalle nécessaire pour accepter des impacts de blocs) : il a fallu entretoiser les poutres, mais le niveau d'énergie atteint n'était toujours pas tout à fait suffisant. La sous-face de la dalle a donc été équipée de câbles dissipants (ci-dessous).



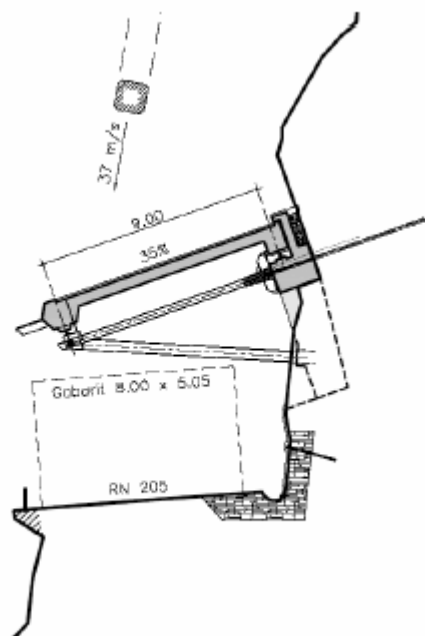
### Galerie pare-bloc de Poniente (Val d'Arly)



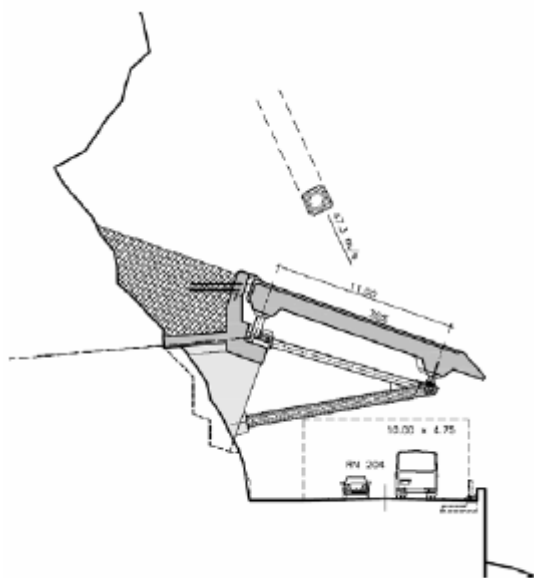
Initialement conçu pour 16 000 kJ, le projet a dû être ramené à 7300 kJ pour des raisons de coût, une zone de falaise ayant été purgée pour limiter le risque d'éboulement et réduire le niveau d'énergie.

### Route des Egratz Passy-Chamonix (Haute Savoie)

Une « casquette », sans capacité d'appui arrière mais toujours avec appuis fusibles, est en projet (2700 kJ).







Gorges de Paganin (Vallée de la Roya) :

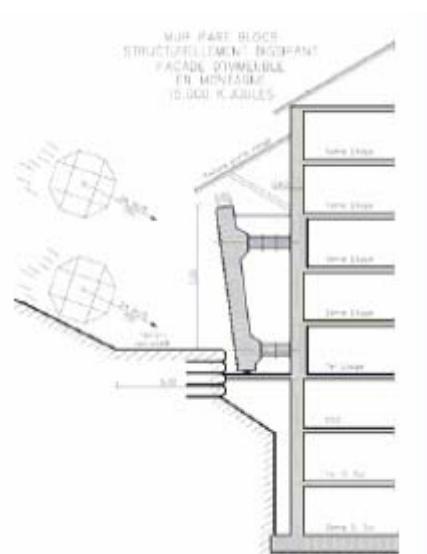
Une étude préliminaire est en cours pour une casquette à 14 000 kJ, inclinée pour que la flexion soit optimale.

La galerie pare-bloc de Grand-Platte (Champagny en Vanoise), a été réalisée pour une énergie de 6000 kJ, avec une dalle à contre-sens qui doit pouvoir stocker un cubage de matériaux important : les études trajectographiques avait montré qu’une inclinaison classique risquait d’aggraver la situation à l’aval où se trouve un village.



Mur Pare-blocs Structurellement dissipant :

Projet pour protéger une façade d’immeuble en montagne (15 000 kJ)



## Conclusions

Les expérimentations ont permis de :

- Valider le principe de fonctionnement et de réparation des PSD ;
- Déterminer expérimentalement les efforts de percussion **dissipante** appliqués à la dalle ;
- Dimensionner la dalle vis à vis du phénomène de poinçonnement ;
- Estimer les différents transferts et dissipations d'énergie lors d'un impact sur une dalle.

Des simulations du choc ont été réalisées à l'aide de deux modèles simplifiés :

- éléments finis multicouches ;
- masse-ressort-amortisseur.

confirmant bien les trois phases :

- percussion dissipante ;
- travail élasto plastique ;
- restitution.

## Perspectives

Dans un futur proche, il s'avère nécessaire de poursuivre l'analyse des phénomènes de dissipation durant la phase de contact (chaleur, compaction, ...), ainsi que de prendre en compte l'influence d'une couche amortissante mince. On envisage également une étude dynamique de la résistance au poinçonnement des dalles.

Le développement des modèles simplifiés va se poursuivre : étude de sensibilité, chocs à des positions intermédiaires, loi de contact.

### Instrumentation d'un Pare-blocs Structurellement Dissipant réalisé :

Après les essais réalisés sur une structure à l'échelle 1/2,5, il paraît particulièrement intéressant d'obtenir des essais sur un ouvrage en vraie grandeur. L'ouvrage de Poniente, actuellement en cours de réalisation, est ainsi en train d'être instrumenté. Le premier objectif est de savoir comment il va fonctionner dans la réalité, observer comment il va s'endommager et suivre tout son cycle de vie.

D'autre part, cet ouvrage est situé dans une zone très active : il pourrait donc servir de « capteur d'aléa » en détectant les blocs qui tombent sur la dalle, afin d'aider les décideurs à gérer le risque sur cette route très exposée (à condition de pouvoir mettre en parallèle l'activité sur cet ouvrage et l'activité de l'ensemble du versant).

### Analyse concertée des niveaux d'énergie arrivant sur les ouvrages :

Pour un travail cohérent entre d'une part les chercheurs et les ingénieurs qui dimensionnent les ouvrages et d'autre part les experts de terrain qui déterminent l'aléa, il paraît important d'avoir une réflexion commune sur les niveaux d'énergie annoncés :

- L'énergie maximale E1 (ex. 3360 pour l'ouvrage des Essariaux) correspond à des probabilités d'apparition très faibles (en général  $< 10^{-4}$ ).
- L'énergie maximale observée E2 correspond à la plus grande valeur faisant partie de la série de calculs. Sa probabilité d'apparition peut être estimée  $< 10^{-2}$ .
- L'énergie optimale E3 correspond à une probabilité d'apparition plus grande puisqu'on associe aux vitesses maximales une valeur de poids qui ne résulte pas des calculs à partir des valeurs de poids au départ supposées.

A quoi correspondent véritablement ces niveaux ? La question est ouverte, en l'associant à la notion de risque résiduel.

### 5.3 Les ouvrages de protection en terre : innovations et re-ingénieries

Philippe GOTTELAND (*Université J. Fourier- LIRIGM/3S*)

Cette présentation aborde les ouvrages en terre (merlons) et propose un tour d’horizon des ouvrages du passé, de leur évolution et de leur possible ré-ingénierie, avec les questions suivantes : sont-ils matures et peut-on encore innover ? La recherche présentée ici a été menée en collaboration avec le Cemagref de Grenoble et associe les co-auteurs : François Nicot, Stéphane Lambert, David Bertrand, Vincent Gras.

#### ✚ D’une technologie « mature » vers des développements nouveaux

En matière d’ouvrages en terre, beaucoup a déjà été fait mais il reste encore beaucoup à faire (ouvrages à construire ou à re-qualifier). Malgré les évolutions technologiques passées et récentes, de nombreuses incertitudes subsistent dans la connaissance des phénomènes et un effort de recherche reste nécessaire pour répondre aux besoins opérationnels des aménageurs.

Les possibilités actuelles d’innovation sont liées à l’évolution des techniques et des modes de calcul. Les nouvelles méthodes de calcul 3D désormais accessibles à l’ingénierie permettent une approche plus réaliste des phénomènes, moyennant un transfert recherche – opérationnel (recherche et développement), avec une innovation possible dans le domaine de la technique des ‘merlons composites cellulaires’. A ce titre, les projets de recherche Interreg financés par les états et l’Europe fournissent des exemples de transfert de la recherche vers l’opérationnel, dont le projet REMPARE (cf. infra).

#### ✚ Introduction, cadre de l’étude - *Un risque gravitaire : l’éboulement rocheux*

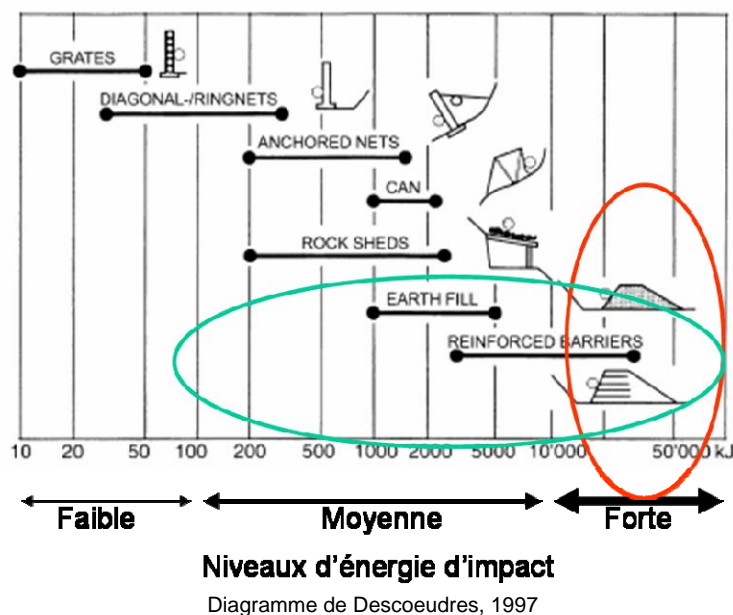
- Nécessité de protéger les infrastructures et les personnes :



- Stratégie dite passive: galeries, filets, merlons... :

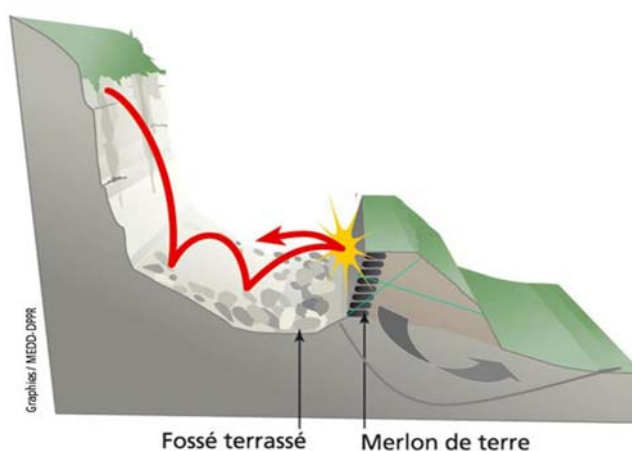


- Capacités de dissipation et types de structures :



Cette présentation s'intéresse aux ouvrages de grande capacité en s'interrogeant sur la possibilité de se positionner vis-à-vis d'autres techniques en réétudiant les ouvrages en terre (notamment pour des raisons environnementales...) : est-il possible d'adapter ces ouvrages pour des niveaux d'énergie plus faible à des tarifs concurrentiels ?

#### ✚ Les ouvrages en terre: les merlons, état des lieux

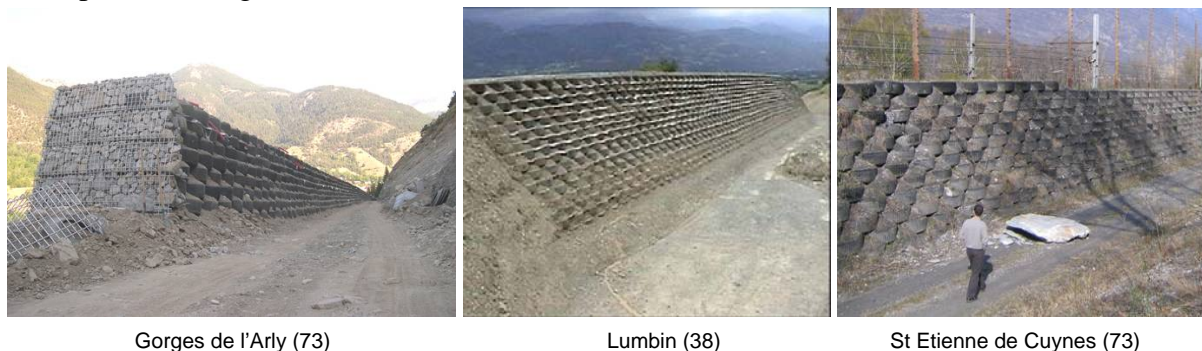


#### Conception :

- Les ouvrages de type remblai sont conçus en surélévation (construits de bas en haut). Ils peuvent être simples (butte de terre), en sol renforcé ou autres.
- L'implantation et la géométrie de l'obstacle à créer sont basées principalement sur des études trajectographiques et sont fonction de la zone à protéger, ainsi que de la nature du site (pente) qui conditionne la fondation de l'ouvrage (étude de stabilité).
- Le dimensionnement est basé sur des niveaux d'énergie (choc auquel l'ouvrage peut être soumis) et se fait en 'pseudo' statique, en transformant le niveau d'énergie reçue en surface de charge équivalente. Il faut également veiller à la stabilité interne de l'ouvrage (sous son propre poids et sous impact 'pseudo statique') ainsi qu'à sa stabilité externe (ou globale) qui est fonction du type de sol sur lequel le merlon apporte une surcharge. L'ouvrage doit être capable de tenir dans la pente sous son propre poids.



Exemples d'ouvrages :



Gorges de l'Arly (73)

Lumbin (38)

St Etienne de Cuynes (73)

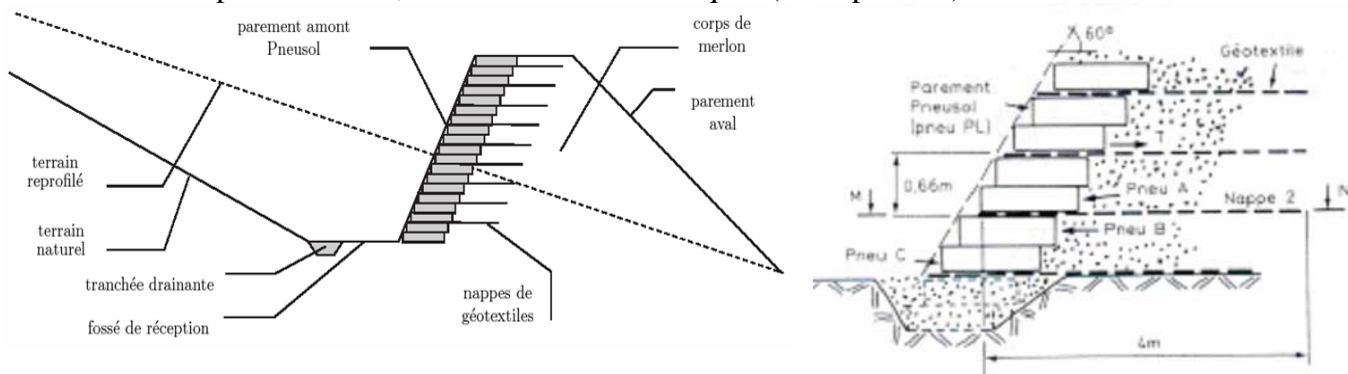
Fonctionnement :

- L'arrêt du bloc se fait grâce à l'inertie (masse, volume) de l'ouvrage. La dissipation de l'énergie se fait par déformation des matériaux internes et/ou par rebond du bloc, si possible à l'amont (on joue donc sur les formes de l'ouvrage pour obtenir un rebond 'efficace').
  - Du fait des méthodes de dimensionnement en pseudo statique (charge statique équivalente), ces ouvrages sont massifs, avec généralement une grande emprise au sol.
- L'évolution actuelle est liée à la possibilité d'un dimensionnement sous sollicitation dynamique (en utilisant des codes de calcul en dynamique).

 **Les évolutions technologiques**

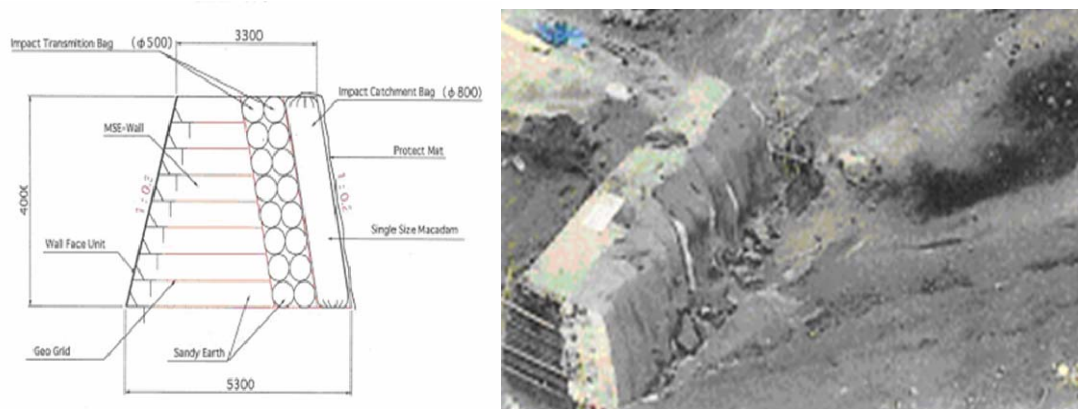


On est passé du simple remblai compacté (ouvrage massif, emprise au sol importante) au remblai renforcé : parement amont raidis et renforcés par des systèmes « géocomposite » (renforcement par nappes bidimensionnelles : géotextiles, géogrilles, grillage (PNEUTEX), treillis métalliques). Les pneus sont couramment utilisés en parement pour encaisser et amortir l'impact des blocs, avec différentes techniques (Armapneusol).



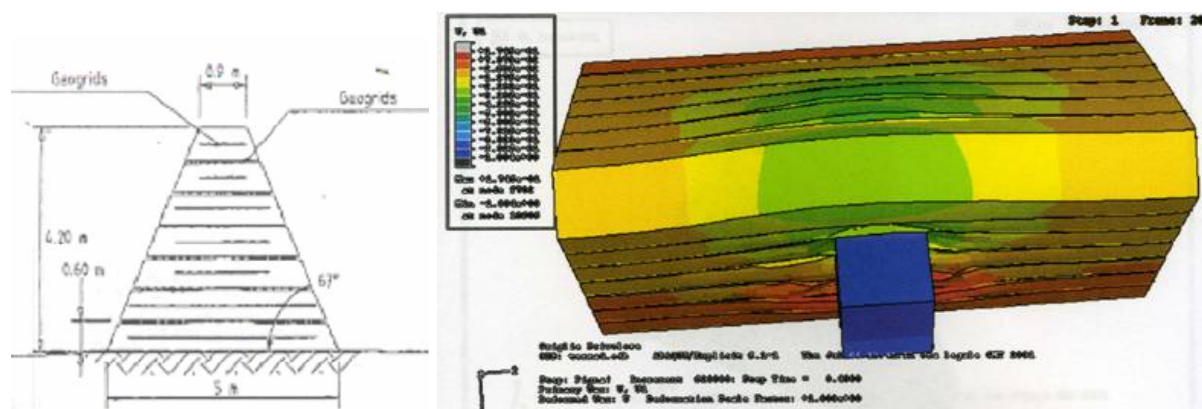
Le passage d'un concept à l'ouvrage réel dépend de la faisabilité de sa fabrication (coût, fonctionnement). Deux concepts récents sont apparus :

- Le parement amont dissipateur : ce dispositif vise à déconnecter la zone impactée par les blocs de la zone aval (remblai technique) par une zone dite dissipative (de transition) avec confinement de géomatériaux.



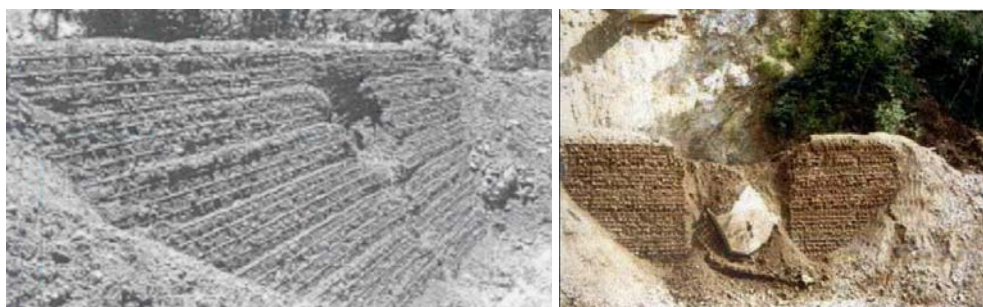
Parement amont dissipateur : GEOROCK wall – Yoshida, 1999

- Le remblai renforcé à double parement raidis (amont et aval) de manière à réduire l'emprise. Le renforcement utilise des géotextiles ou des géogrilles bilinéaires dans le sens longitudinal de l'ouvrage, qui doivent lui apporter rigidité et homogénéité. Cette technique permet de réduire le volume de l'ouvrage pour un même niveau d'énergie.



Remblai renforcé (géogrille) – Peila, 2002

Ce type de techniques a fait l'objet d'essais en vraie grandeur (réalisés en Italie). Ces essais ont été corrélés avec des modélisations de type recherche afin d'expliquer des phénomènes que l'on pourra ensuite extrapoler à des systèmes d'énergie différente.

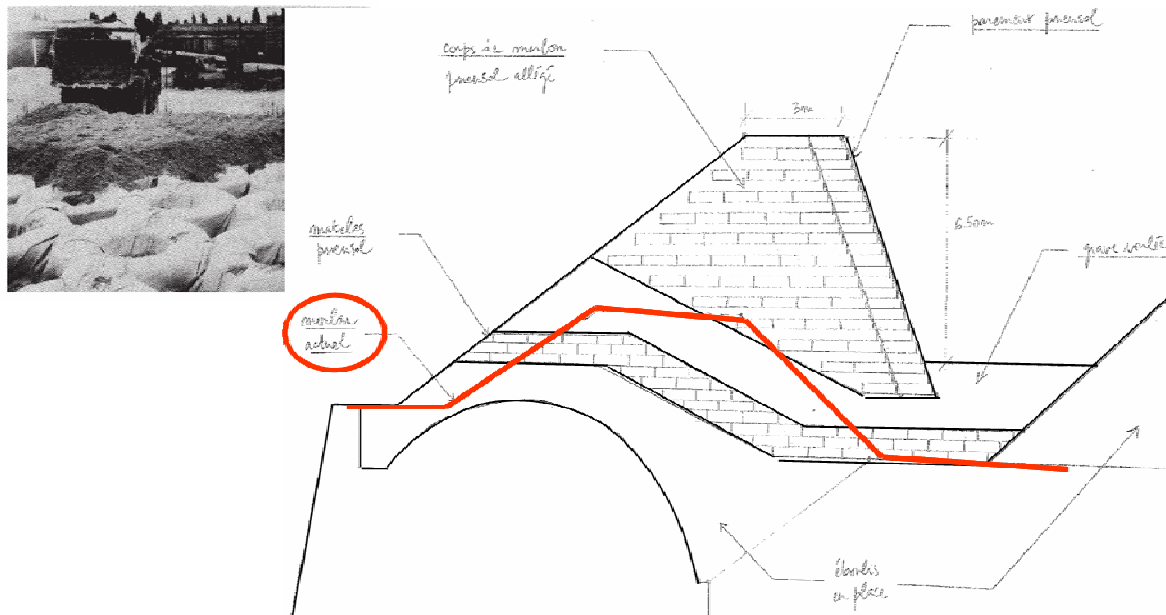


Mur renforcé en géogrille ayant subi plusieurs impacts – Peila, 2002



### Des besoins d'opérationnels (aménageurs : collectivités, états, communes ...)

Un exemple de ces besoins nouveaux est celui d'un projet de tunnel en cours, nécessitant de concevoir un nouveau merlon en requalifiant le risque. Différentes possibilités ont été étudiées au CETE à l'aide de modèles numériques basés sur des nouveaux moyens de calcul (qui nécessitent un long apprentissage et sont encore du domaine de la recherche). Une solution possible est celle du merlon « fusible » (Subrin, 2006) :

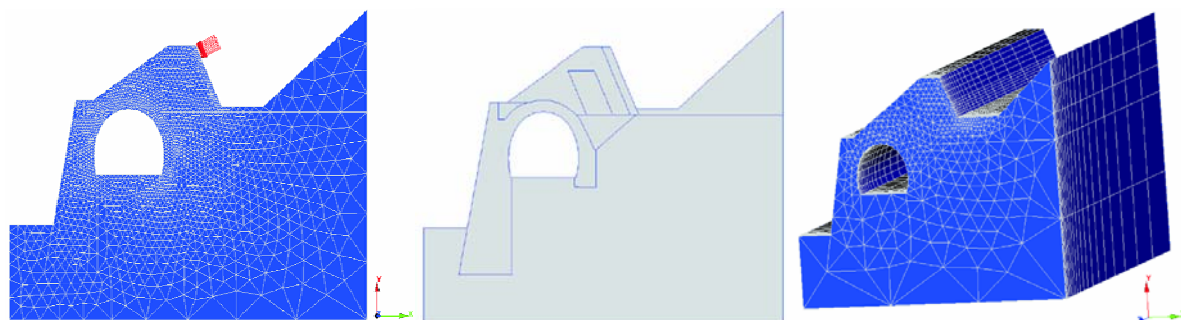


Merlon « fusible » – Subrin, 2006

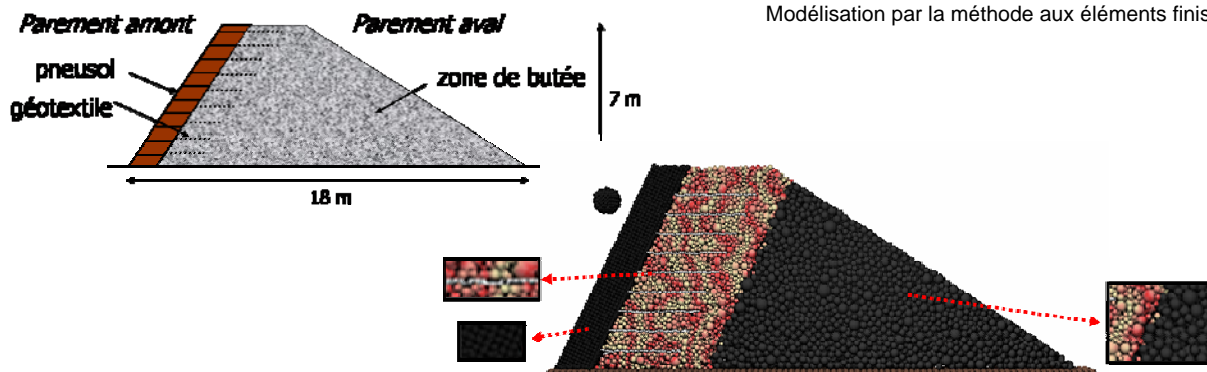
### Des moyens de calculs nouveaux

#### Approche numérique :

- Modèles continus reposant sur la méthode des éléments finis (logiciel CESAR développé au LCPC) appliquée à des cas complexes sol – structure – merlon.

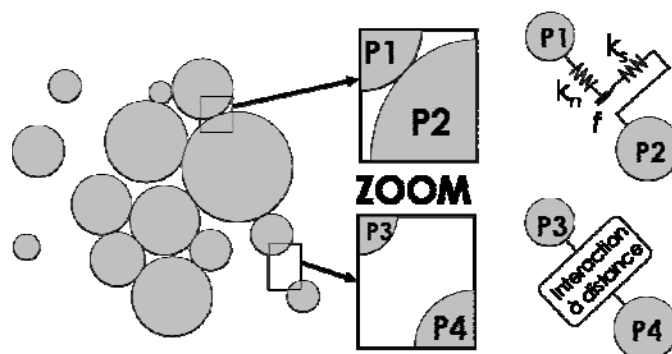


Modélisation par la méthode aux éléments finis



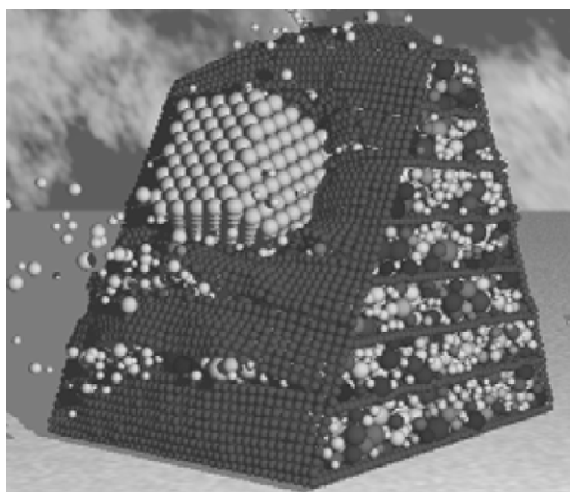
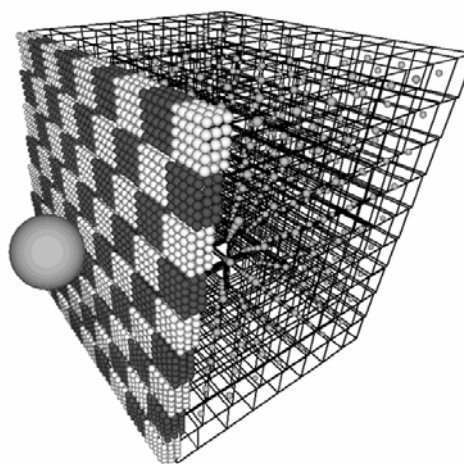
Modélisation par la méthode aux éléments discrets – Plassiard *et al.*, 2006

- Modèles discontinus reposant sur la méthode aux éléments discrets (MED) (Cundall et Strack 1979), PFC3D, SDEC (Plassiard et al, 2006), à l'échelle des ouvrages.



La méthode aux éléments discrets (MED) – Cundall et Strack 1979

La MED peut être utilisée par exemple pour modéliser un merlon type (ex. parement avec zone de renforcement avec un remblai de masse à l'aval). Cette méthode permet de modéliser des sols à partir d'un assemblage de grains (cercles en 2D et sphères en 3D) en faisant interagir des éléments par des lois de contact plus ou moins complexes, avec la possibilité de faire intervenir des lois d'interaction à distance entre les éléments constitutifs d'un volume de sol. Les codes de calcul employés sont disponibles dans le commerce ou dans les laboratoires de recherche.

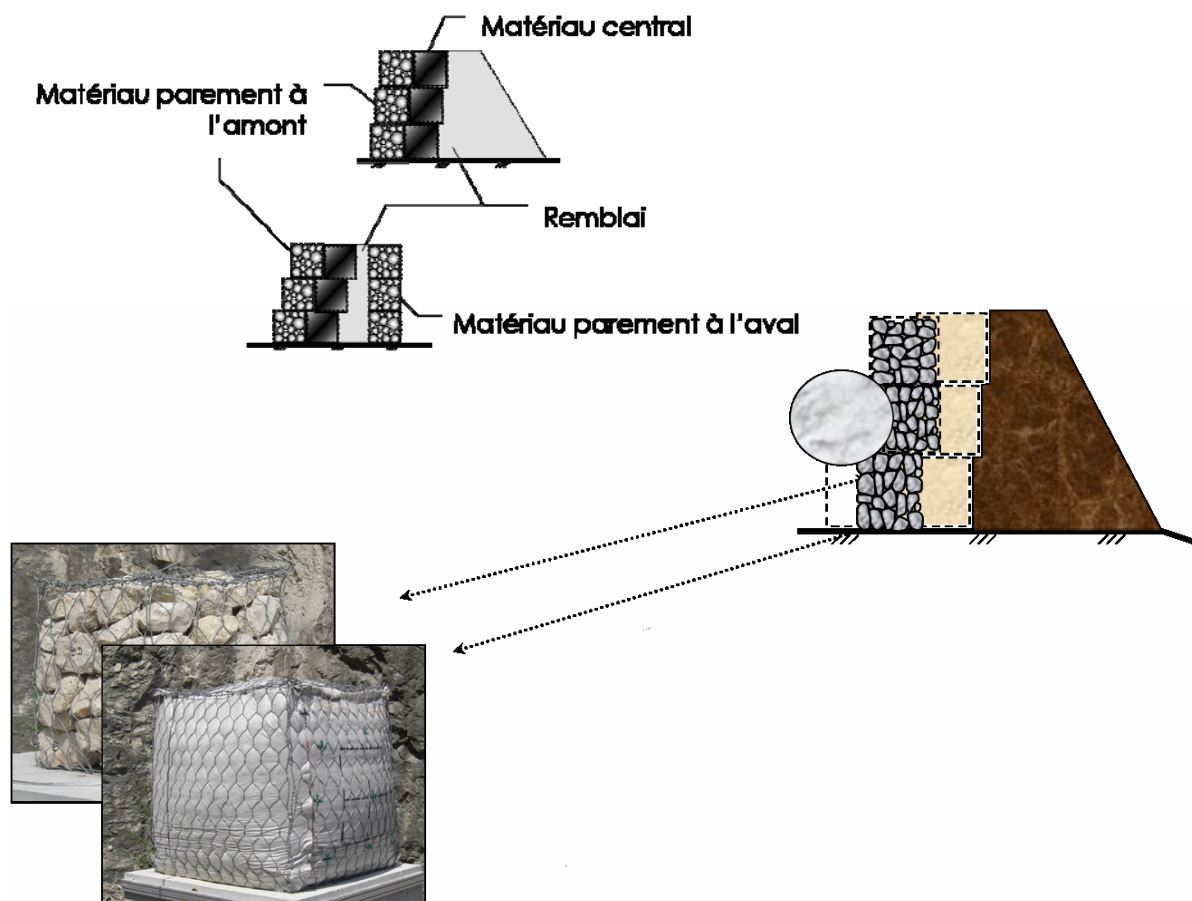
Plassiard *et al.*, 2006Bertrand *et al.*, 2004

Le code élément discret permet donc une modélisation à l'échelle des ouvrages, en simulant par exemple l'impact d'un bloc sur un élément de structure de type double parement raidi (Plassiard *et al.*, 2006). Une autre approche dite multi-échelles (Bertrand *et al.*, 2004) repose sur un concept de fonctionnement global des ouvrages (cf. *infra*).

#### 🚧 Une réponse possible: les merlons composites cellulaires

Cette technique part du concept de parement amont dissipateur (Yoshida, 1999) consistant à dissocier le remblai aval de la zone d'impact par un dispositif 'dissipatif' dans lequel on associe des éléments modulaires (cellules). Ce type d'ouvrage peut avoir un remblai aval de type sol compacté classique, sol renforcé, sol 'allégé' renforcé. Pour des niveaux d'énergie plus faibles, des associations de type cellule avec des écrans vont pouvoir concurrencer les parements de type écrans de grillage ou de filets, en étant plus satisfaisants du point de vue esthétique.





Les merlons composites cellulaires

### Fonctionnement :

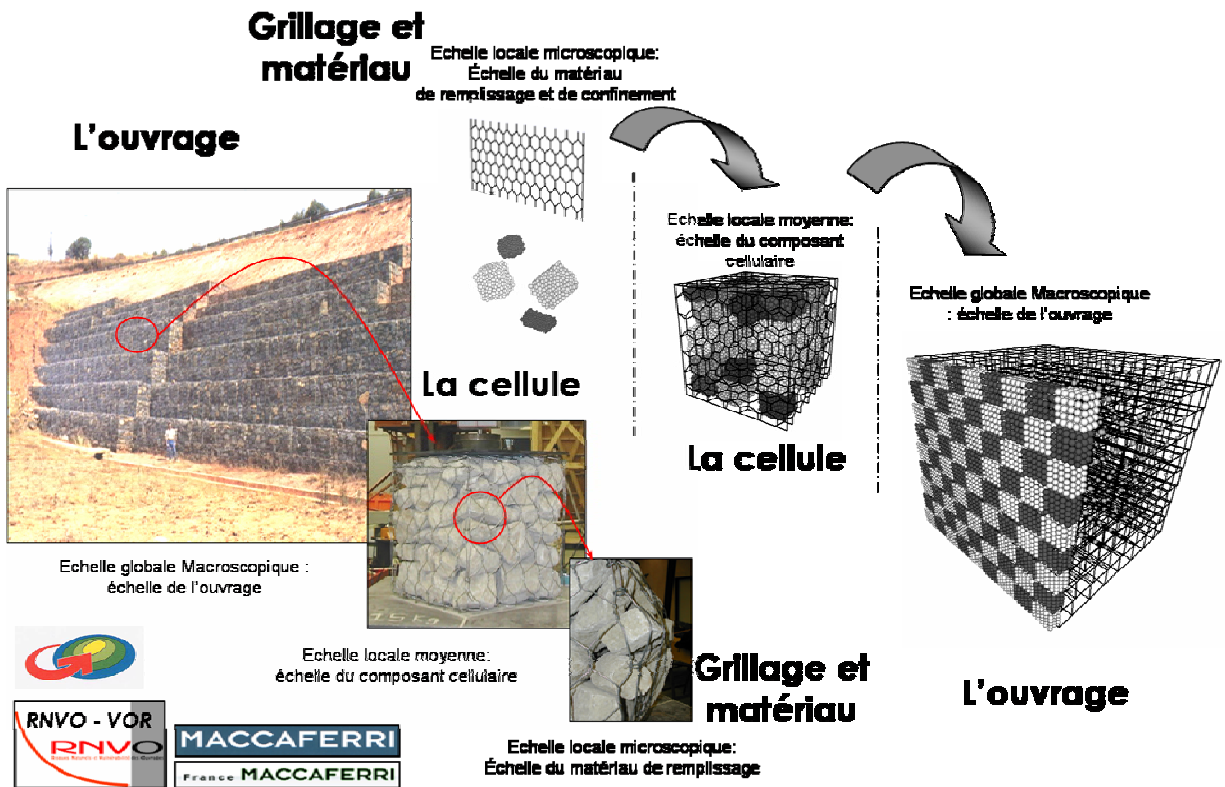
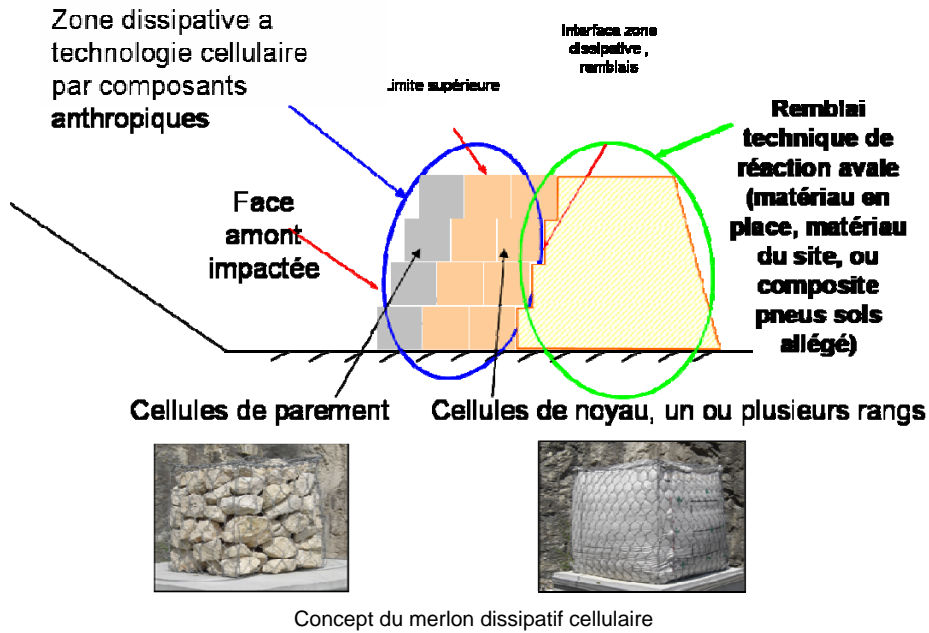
Le concept de structures pare bloc avec matériau central dissipatif repose sur l'idée d'une meilleure maîtrise des mécanismes de déformation en canalisant celle-ci par des systèmes de liaisons entre les composants modulaires. La méthode repose sur les principes suivants :

- ✓ Localisation des déformations ;
- ✓ Zones de "faiblesses" maîtrisées ;
- ✓ Endommagement contrôlable et limité à la partie amont (peu d'interactions entre la zone amont et la zone aval grâce au noyau dissipatif) ;
- ✓ Allègement de la structure en réutilisant des matériaux spécifiques (réingénierie). La valorisation de sous-produits industriels, en particulier les pneus, est envisagée. Par rapport aux techniques antérieures, les pneus sont réutilisés différemment et de manière plus optimisée, répondant à la demande actuelle de réutilisation des 'résidus' valorisables dans un but technique (fonction de dissipation).

Les avantages sont les suivants :

- ✓ Emprise réduite en pied ;
- ✓ Modularité, réparabilité (parements amont) ;
- ✓ Forte dissipation énergétique (meilleur ratio volume / capacité de dissipation) ;
- ✓ Valorisation de sous-produits industriels.

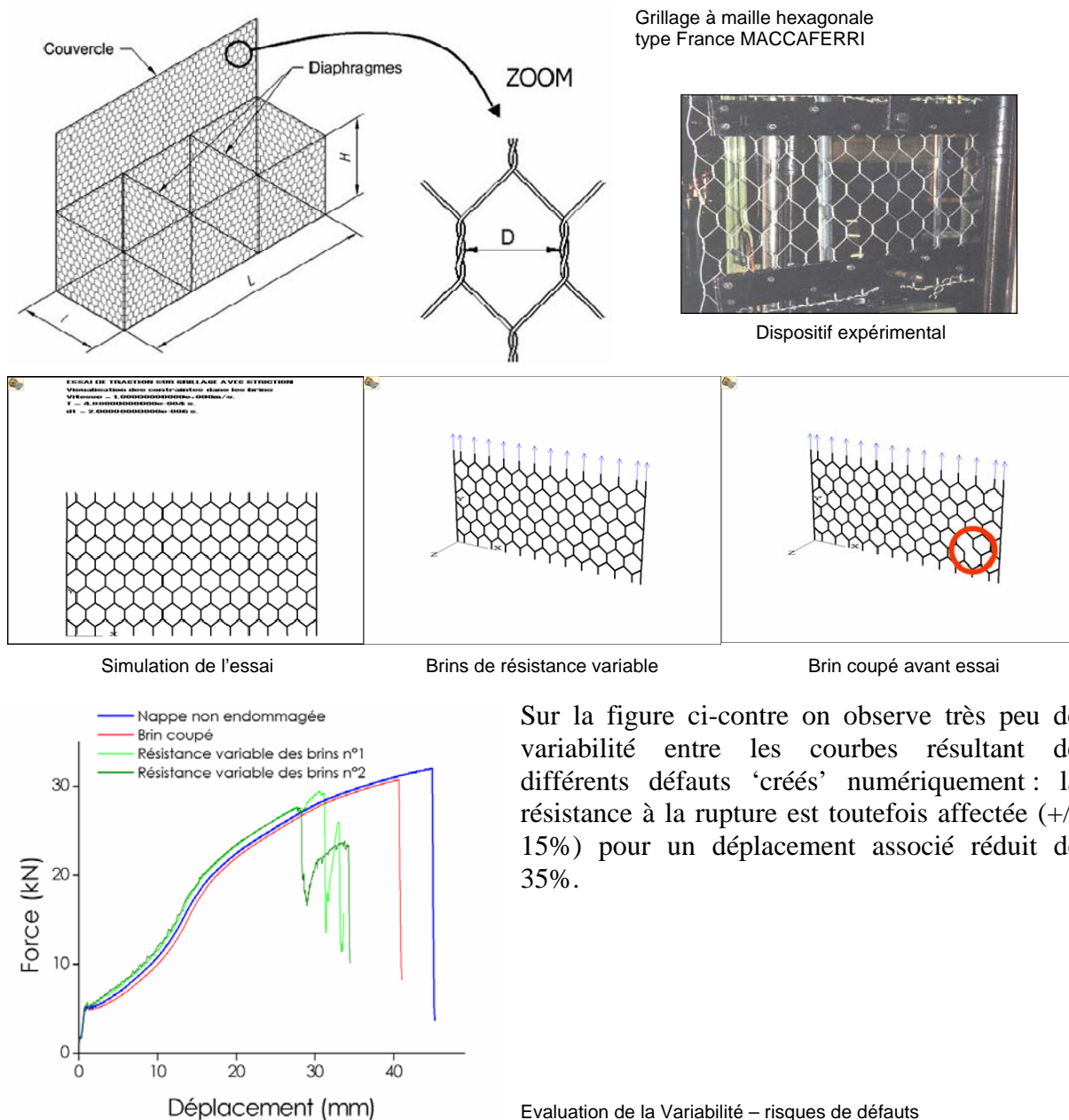
La démarche repose sur une approche multi-échelles : des matériaux à l'ouvrage. Elle décrit tous les niveaux des composants de manière à la fois expérimentale et numérique. Le partenariat avec la société MACCAFERRI a permis d'initier le travail pour un composant modèle : le Gabion MACCAFERRI.



Une approche multi-échelles

▪ **Le GRILLAGE**

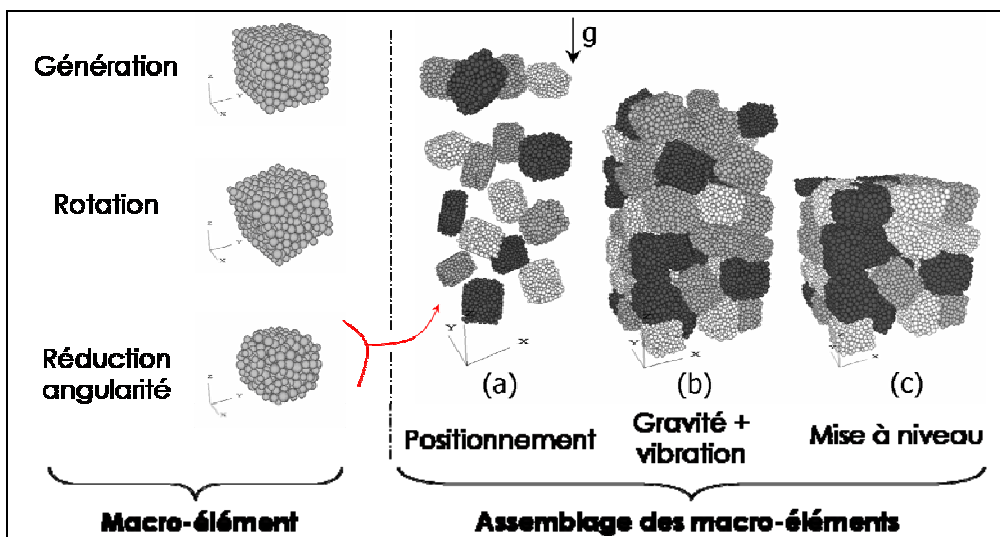
La modélisation permet d'étudier la variabilité de fonctionnement des grillages et les risques de défauts (ce qu'on fait difficilement expérimentalement) et leur mode de rupture.





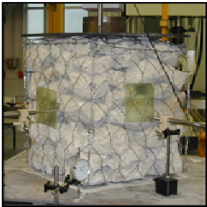

▪ **La CELLULE**

Le passage de la réalité vers le modèle numérique est fait par une approche réaliste. Des granulats numériques sont fabriqués pour que les phénomènes de contact tiennent compte de leur dégradabilité (D. Bertrand, 2006). Plusieurs étapes ont permis d'étudier le comportement de la cellule sous sollicitation (figures pages suivantes) :

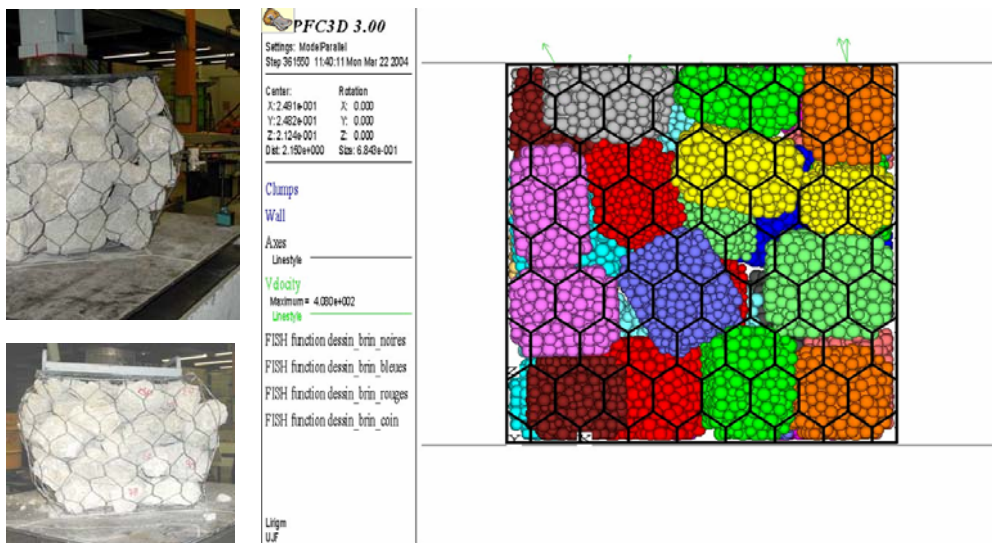
- Génération de macro-éléments 'réalistes' qui interagissent de manière numérique ;
- Remplissage numérique de la cellule ;
- Calibration des codes numériques sur des essais expérimentaux reproductibles sur des cellules en essai confiné ou non confiné, en statique (essais de compression lente). On obtient des courbes de fonctionnement d'une cellule sous sollicitation.
- Essais d'impact (avec plusieurs types d'impacteurs) sur du confiné ou du non confiné (actuellement : essais de performance : on prend les conditions d'environnement dans lesquelles se trouvera la cellule dans l'ouvrage réel en mode de fonctionnement) ;



Génération des macro-éléments

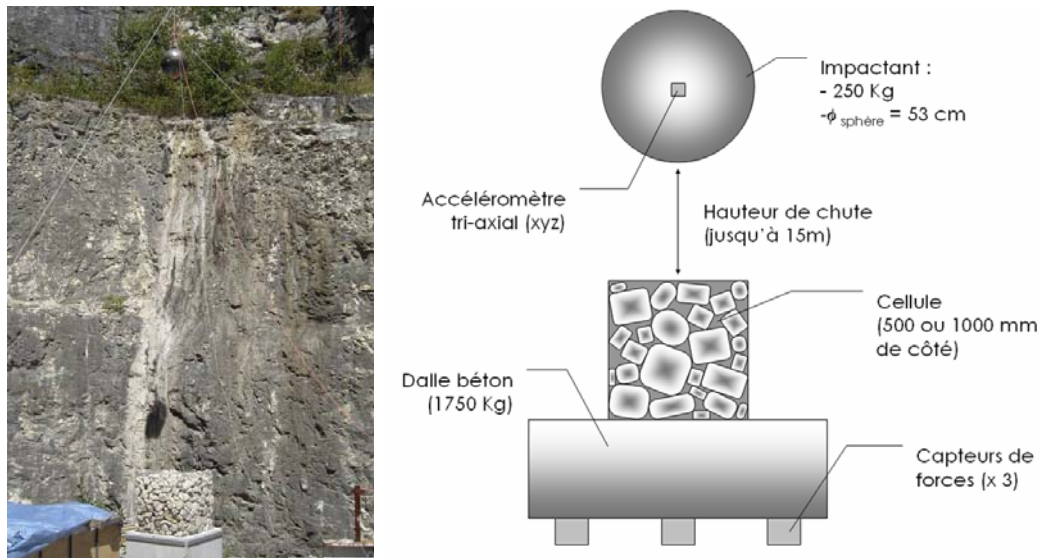
		QUASI-STATIQUE (Compression)	DYNAMIQUE (Impact)
NON CONFINEE	CONFINEE	Nb d'essais : 2 x 500mm 	Nb d'essai : 1 x 500mm 
	NON CONFINEE	Nb d'essais : 4 x 500mm 2 x 1000mm 	Nb d'essais : 3 x 500mm 1 x 1000mm 

Essais expérimentaux sur les cellules



Compression NON CONFINEE quasi-statique : Expérimentation et simulation numérique

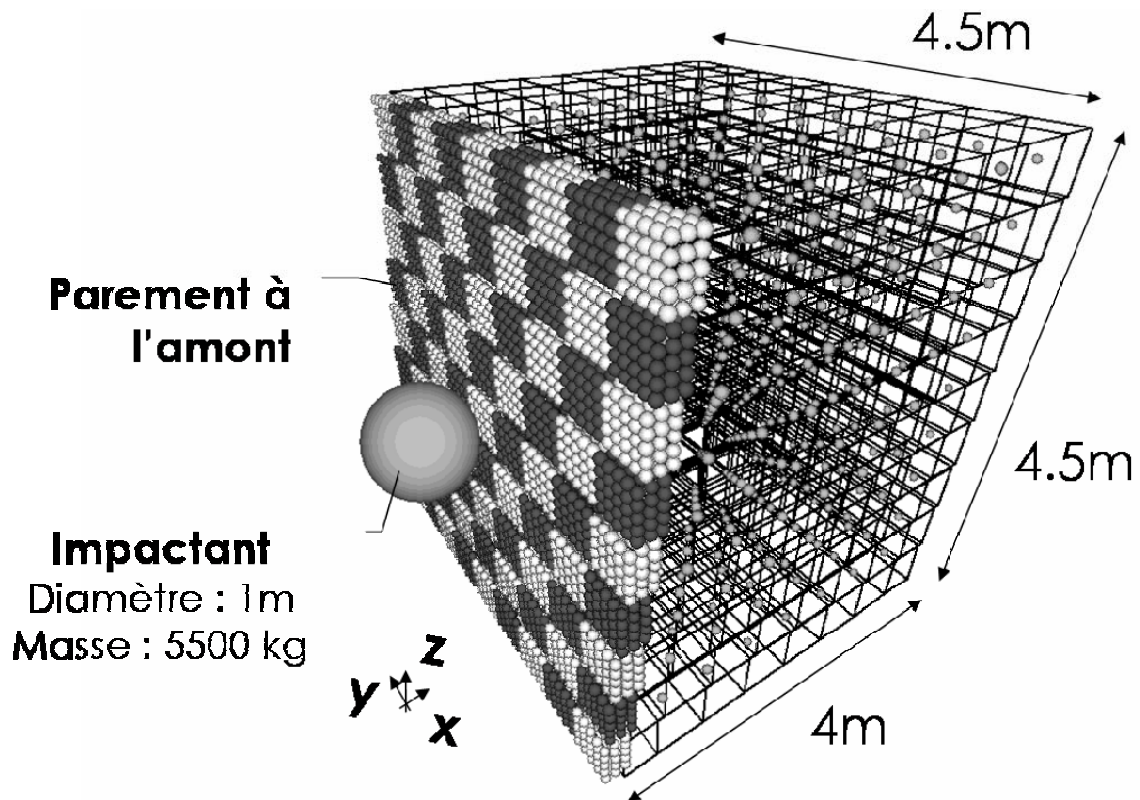




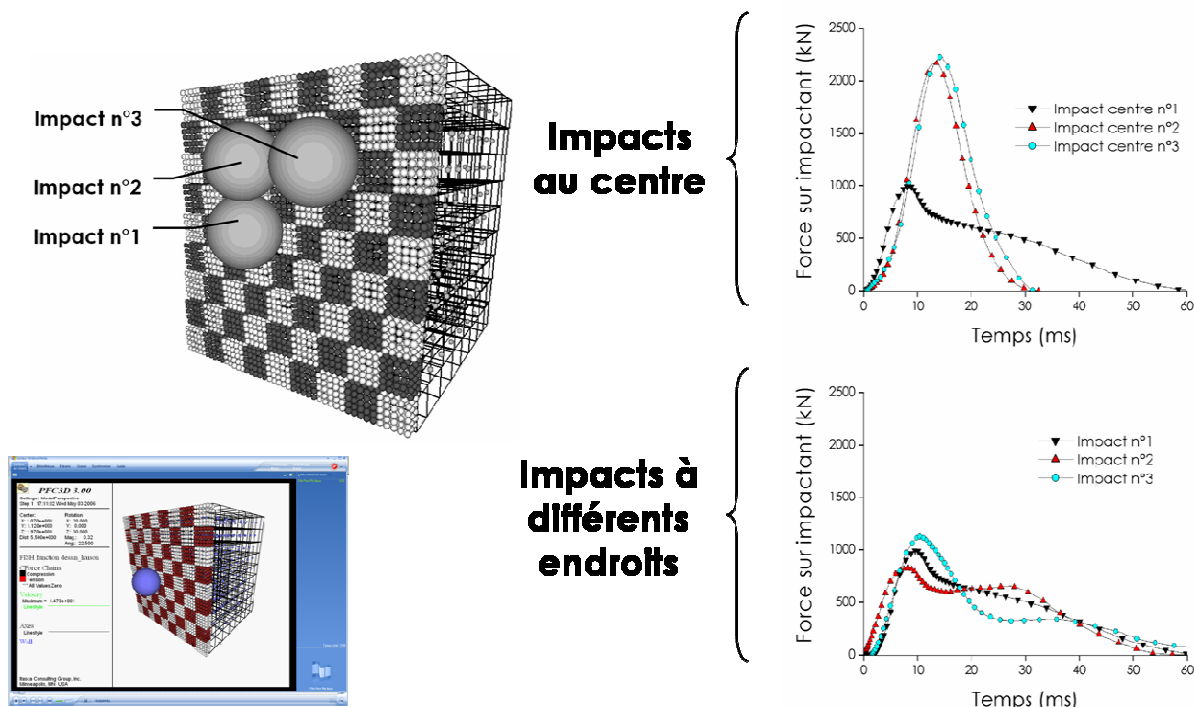
Essais d'impact par lâchers verticaux, site RNVO-VOR

▪ **La STRUCTURE**

A partir des lois obtenues à l'échelle des cellules, on obtient des lois de comportement macroscopique qui permettent de modéliser des tronçons d'ouvrage. Ainsi, par exemple, la dégradation de la structure peut être étudiée en fonction du nombre d'impacts et du lieu d'impact.



Impact sur structure : Structure test



Etude de la dégradation de la structure

Le modèle va donc permettre de faire des études d’endommagement. On pourra donc savoir si une structure endommagée est capable de reprendre un nouvel impact de bloc. Il est ainsi possible d’évaluer l’endommagement de manière déterministe ainsi que la réserve de fonctionnement pour ce type d’ouvrage. Une approche probabiliste associée fournira une aide à la décision de réparer ou non.

**Transfert recherche vers l’opérationnel (Le projet ANR-RGCU 2006 REMPARE)**

Cette recherche est rendue possible grâce à des financements obtenus dans le cadre de l’ANR (Agence Nationale de la Recherche) RGCU 2006 (Ministère de la Recherche France), avec le projet REMPARE : « REingénierie des Merlons de Protection par composants Anthropiques Recyclés », qui doit débiter en 2007.

▪ Objectifs scientifiques et techniques :

- **Amélioration des méthodes de conception** des ouvrages de défense passive vis-à-vis des impacts par intégration de dispositif dissipatif et **valorisation de matériaux résidus anthropiques**.
- Développement des éléments de calcul orienté vers un transfert vers l’ingénierie (modèles simplifiés).

▪ Méthodologie :

Le projet prévoit des approches expérimentales et numériques :

- **Expérimentations pour valider les innovations technologiques** et la réponse des dispositifs anthropiques.
- Approches numériques pour permettre **l’extrapolation des concepts** et le développement de **dispositifs opérationnels de dimensionnement**.

▪ Résultats attendus :

- (1) modèles numériques évolués pour le calcul de merlons cellulaires ;

- (2) optimisation de la conception par valorisation de Résidus ;
- (3) amélioration des méthodes de dimensionnement ;
- (4) validation des concepts d'endommagement localisé et de réparabilité.

### **Les partenaires REMPARE : entreprises, bureaux ingénierie, recherche publics, privés**

- RAZEL
- SNCF, Direction de l'Ingénierie
- Lirigm-3SR EA 3111 (UJF)
- Cemagref – ETNA Grenoble
- 3S UMR5521 (UJF – INPG – CNRS)
- INERIS (Ministère de l'Equipement et MEDD)
- LCPC
- CER– ERA 28 (Rouen)
- SCETAUROUTE, groupe Egis
- GEOLITHE Agence Méditerranée
- SAGE SA
- France Maccaferri SA
- EU.REC Environnement

Ce partenariat bénéficie d'une labellisation du Pôle de Compétitivité Région PACA et du soutien de nombreuses collectivités :

- Conseils Généraux des départements montagneux : CG73, CG38, CG05, CG06, CG13,
- syndicats mixtes (PACA),
- PGRN-CG38,
- fédération RNVO-VOR.

Le projet intègre aussi des collaborations de Recherche Européenne (non financées par l'appel d'offres ANR).

### **Conclusion**

- Les ouvrages en terre apparaissent aujourd'hui matures, leur nombre est important ;
- Les méthodes de dimensionnement peuvent profiter des évolutions des codes de calcul (passage du statique au dynamique, passage du 2D au 3D) ;
- La recherche peut répondre aux besoins des opérationnels (ouvrages structurellement dissipant, requalification d'ouvrages existant, réduction des emprises, ouvrages allégés, modularité de la structure et réparabilité en cas d'événement, endommagement maîtrisé).

### MAIS !!!

- Il est nécessaire de caler et calibrer les concepts et les modèles sur des ouvrages réels (coûteux) ;
- Il faudrait encourager le développement d'outils d'ingénierie adaptés à ces technologies innovantes (besoin d'un langage commun et de communication entre ingénierie, opérationnels et chercheurs) ;
- Ces recherches ont besoin du soutien des aménageurs (collectivités) en terme financier et en termes d'acceptation de l'innovation (acceptation de la notion de risque) et d'incitation à l'innovation : par exemple permettre la réalisation d'un tronçon d'ouvrage test 'innovant' pour voir si les concepts de réparabilité fonctionnent bien en cas d'événement avéré).

### **Bibliographie**

Bertrand, D., Gotteland, P., Lambert, S., Nicot F., Derache, F. 2004. A multiscale mechanical modeling of unusual geocomposite material for rockfall impact. /Proc. 9th Int. Congr. on NUMERICAL MODEL in Geomechanics Rock Mech/, Ottawa (Canada), p. 709-716.

Bertrand D. (2006) Modélisation multi-échelles du comportement mécanique des structures en gabions soumises à l'impact de blocs rocheux. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble 1, Lirigm, Cemagref, Grenoble, 260 pages.

Descoedres F. (1997) Aspects géomécaniques des instabilités de falaises rocheuses et des chutes de blocs. /Publications de la société suisse de mécanique des sols et des roches/. 135, pp. 3-11.

Peila D., Carotti.C., Oggeri C., Guasti G., Recalcati, Rimoldi P. 2002. Testing and modelling geogrid reinforced soil embankments subject to high energy rock impacts. Proc. of the 7th Int. Congr. on geosynthetics, Nice (France), 133-136.

Plassiard, JP, Donzé FV, Plotto P, "MODELISATION PAR LA METHODE DES ELEMENTS DISCRETS D'IMPACTS ROCHEUX SUR UNE STRUCTURE DE PROTECTION DE TYPE MERLON", Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur - JNGG' 2006, Vol III, pp 137-144, Lyon (France).

Subrin, D, "MODELISATION ANALYTIQUE ET NUMERIQUE PSEUDO-STATIQUE DES MERLONS DE PROTECTION CONTRE LES CHUTES DE BLOCS ROCHEUX", Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur - JNGG' 2006 , Vol III, pp145-152, Lyon (France).

Yoshida H., "Recent studies in rockfall control in Japan", /Joint Japan-Swiss seminar on Impact loads by rockfall and design of protection structures/ (Kanazawa) Japan, 1999, pp. 69-78.



## 5.4 Débat sur les ouvrages de protection

Animé par Eric LEROI

**Luca Pitet (RAVA) :** « Pourquoi dans les modélisations simule-t-on toujours des chutes de blocs avec des trajectoires verticales et non pas avec des trajectoires plus réalistes ? »

- **P. Perrotin :** « Dans la partie expérimentale des simulations, il est beaucoup plus simple d'utiliser l'attraction de la Terre et donc d'avoir des trajectoires verticales. Il n'empêche que nos collègues de l'EPFL ont également mis en place un système permettant d'obtenir des trajectoires qui ne sont pas forcément verticales et de tester leurs effets. Pour notre part, nous avons essayé, toujours avec des trajectoires verticales, mais en inclinant l'ouvrage : cela reste difficile, en particulier dans l'interprétation.

- **P. Gotteland :** « Comme on l'a vu dans les trois cas présentés, il est effectivement beaucoup plus simple de faire des expérimentations avec des trajectoires verticales. Pour les numériciens, ces essais sont des 'essais de calibration' : ils permettent de calibrer les modèles à partir d'essais réels, en jouant sur les paramètres d'interaction entre les éléments. Une fois ces paramètres calibrés, on peut extrapoler vers d'autres modes de sollicitation, en simulant des impacts inclinés, avec des blocs en rotation, avec des impactants en forme de cubes et non plus de boules, etc. Mais ces modèles sont encore du domaine de la recherche (les temps de calcul sont encore très longs) et ne sont actuellement pas directement utilisables en ingénierie ».

Question de **L. Pitet** pour **J. Tonello** : « Pourquoi n'avez-vous pas considéré de matériau de remblai sur la dalle ciment ? »

- **J. Tonello :** « Entre les 4,5m de remblai mis en œuvre en France sur ce type d'ouvrage et les 50-60 cm que préconise la norme suisse, une façon d'attaquer le problème est de ne pas en mettre du tout. La démarche actuelle est de considérer que la structure est structurellement dissipante, d'abord par les effets de la percussion de premier temps au cours de laquelle se produit la déstructuration du béton, dont il faut évaluer l'intensité, ensuite par un travail élastoplastique. Il est toujours possible de voir ensuite quelle amélioration on peut apporter au système si l'on y ajoute une épaisseur de matériau dissipant.

Par contre, si l'on veut dimensionner l'ouvrage pour des réponses de 19 000 - 20 000 kJ, et qu'il faut pour cela incliner les structures, le matériau dissipant rapporté sur une structure inclinée n'aura aucun effet car il sera embarqué directement par le bloc qui l'attaque. Nous voulions également connaître les effets strictement déviants d'une structure en béton armé dissipante (par des rotules plastique, par des effets fusible ou par la percussion de premier temps), c'est à dire l'effet de mise à nu de la structure. La structure est malgré tout recouverte avec des 'bétons d'impact', épais de 12 cm et légèrement armés, qui servent à la protéger de toutes les petites chutes non déterminantes dans le calcul de la structure.

Il s'agit donc d'une volonté délibérée de dire : 'on commence sans remblai, on verra après'. Au vu de tout ce qui a été présenté ce matin, je me demande même si nos dalles ne pourraient pas supporter des filets (!). Il semble que le débat puisse s'ouvrir sur ce genre de choses, je demande l'avis de tout le monde à ce propos... ».

**Jean-Pierre Requillart (RTM 38) :** « Je m'interroge sur cette philosophie. Je partage tout à fait la volonté de soutenir les efforts de recherche faits actuellement en la matière, qui me paraissent tout à fait indispensables, mais il faut en parallèle bien envisager la cible à protéger. Je comprends que pour des infrastructures linéaires, vues leur situation et leurs conditions de réalisation, il faille raisonner de façon extrêmement pointue en dimensionnant les ouvrages 'au plus juste'. Mais je me demande s'il n'y a pas un danger à étendre ce type de raisonnement à la protection de lieux habités. Je crains qu'actuellement on n'avance beaucoup plus au niveau de la résistance des ouvrages et de la vulnérabilité que sur la connaissance des phénomènes et de leur impact. N'y a-t-il pas un danger pour des zones habitées à dimensionner 'au plus juste' sans marges de sécurité ? Globalement, les constructions anciennes étaient plus résistantes ; aujourd'hui, à la moindre sécheresse, au moindre glissement, le bâtiment ne résiste pas parce que ce n'était pas prévu dans le dimensionnement des experts.

Une deuxième remarque concerne les tableaux qui ont été présentés : je pense que les merlons peuvent aller jusqu'à des énergies beaucoup plus importantes que celles indiquées, jusqu'à 100 000 voire 150 000 kJ, selon des résultats obtenus pour des dimensionnements avec le bureau d'études SAGE. Le CETE a peut être aussi des éléments de référence. Si l'on a des enjeux importants de type urbain ou autres à protéger, notre problématique est de ne pas dimensionner 'trop juste'.

**P. Perrotin :** « Il existe des ouvrages linéaires couverts avec un matériau dissipant, par exemple une galerie pare-blocs dans le Val d'Arly, qui devait être couverte de 'tout venant' (vue sur les photos de la présentation). Mais il faut savoir que cette technique est assez rarement utilisée. A posteriori, le matériau, n'est jamais remis en place pour renouveler l'effet dissipant.

Par rapport à la question qui vient d'être soulevée, certes nous allons vers une optimisation des ouvrages, mais en connaissance de cause : lors d'un choc au niveau des appuis, nous savons où va être dissipée l'énergie, contrairement au cas d'un ouvrage traditionnel pour lequel le résultat est plus incertain.

Par contre je pense qu'il faut instaurer rapidement un réel dialogue entre les experts qui déterminent les niveaux d'énergie et ceux qui les utilisent pour calculer le dimensionnement des ouvrages ».

**E. Leroi :** « Ce point me paraît important : on nous parle d'énergie, de dimensionnement, de bloc de référence, de distribution probabiliste des blocs en terme de taille et d'énergie, etc. Le dimensionnement en terme d'énergie est un dimensionnement d'ingénierie, mais il faut d'abord répondre à une demande de protection. Comment passe-t-on de la demande de protection sur le terrain à une réponse en terme d'étude, d'analyse puis de dimensionnement ? ».

**Franco Lunghi (Europroget) :** « Jusqu'à récemment, les galeries et les merlons ont été étudiés avec des méthodes classiques (dynamique des forces, seul le triangle effort-déformation dans l'élasticité est considéré). Les nouvelles approches utilisent des méthodes énergétiques. A-t-on pensé à étudier de vieilles structures avec ces méthodes énergétiques, comprenant une prise en compte de la plasticité du matériel, car les galeries d'il y a 30 ans peuvent aussi être plastifiées ? ».

- **J. Tonello :** « Je suis toujours impressionné par le dimensionnement des vieilles galeries aux formes un peu ovoïde et de petite section utilisable. Les praticiens qui les ont conçues avaient suffisamment de savoir faire pour que ces ouvrages tiennent, et on les voit très souvent endommagés, par exemple dans la vallée de l'Arvan, où de vieilles galeries ont effectivement été plastifiées. On a parlé de 'maçonnerie plastifiée', c'est-à-dire disjointe. Pour ma part, je ne connais pas d'exemple de calcul d'agression énergétique sur des ouvrages anciens. Je pense que cela ressemblerait beaucoup à de la mécanique des roches avec la notation dynamique, car ces ouvrages sont souvent en maçonnerie. »...

- **Franco Lunghi :** « Sur les ouvrages de protection de votre première diapositive, où il y a 4 m de terre au-dessus... ».

- **J. Tonello :** « A mon avis, il y a là ce que j'appellerais une 'faute collective' de l'ingénierie en ce sens que, culturellement, l'ingénieur de génie civil / de structure aime trouver dans des règlements les chargements des véhicules, l'intensité des poids d'essieux (avec ou sans Eurocode...) et faire un dimensionnement strictement statique. On étudie parfois l'effet dynamique des véhicules qui ont tendance à avoir une trajectoire légèrement tombante sur le pont, donc il y a une prise en compte de l'effet dynamique, mais c'est encore 'statifié'... ».

J'avais constaté que les ingénieurs de structure ne voulaient pas aborder le problème de dissiper  $\frac{1}{2}mv^2$ . Ils répondaient traditionnellement : *'ce n'est pas ma culture, il faut aller voir quelqu'un d'autre'*, ce qui revient à séparer complètement la dissipation et la tenue des efforts devenus statiques par l'effet des pics d'effort de pénétration, ce qui m'est apparu comme un contresens. Par exemple, pour les paravalanches, si l'on dévie un flux de neige de vitesse  $v$  d'une quantité  $\alpha$ , en pratique, compte tenu de la définition du talus et du vecteur vitesse de la neige sachant que 'la faille' n'est pas corrigée, le résultat des calculs sera faux.

J'ai donc mesuré à quel point se spécialiser ainsi sans se connaître conduisait à 'des orgies de matériaux' (par exemple pour 1800 kJ, devoir porter - avec la même armature que celle des dalles PSD - 4,5m de matériaux qu'il faudrait régulièrement foisonner quand un bloc a pénétré). Cette façon de faire me semble globalement mauvaise... ».

**Raphael Mayoraz :** « Je n'ai pas bien compris comment vous faisiez le calcul pour arriver au dimensionnement des galeries en projet que vous avez présentés. Est-ce que c'est à partir de la dalle d'essai qui est 3 fois plus petite que la normale ? Comment arrivez-vous à calculer l'énergie à partir du profil de l'ouvrage ? ».

- **J. Tonello :** « Nous avons réalisé les essais sur la maquette à échelle 1/2,5. En parallèle, nous avons fait du pré-dimensionnement, selon ce qui nous semblait être la bonne démarche, en 3 temps : percussion dissipante, travail élastoplastique, restitution d'énergie/rebond des blocs. Nous n'avons pas attendu que la maquette nous donne des indications, nous avons prédéterminé les déformations qui ont été ensuite validées par les essais.

En arrivant à des niveaux d'énergie beaucoup plus élevés, pour des ouvrages plus importants, l'administration centrale en la personne des 'Ingénieurs Généraux Ouvrages d'Art' nous a dit : '*si vous commencez à incliner les dalles, j'aimerais beaucoup que le phénomène et la physique de cette inclinaison soient appréhendés*'. C'est la raison pour laquelle vous avez vu une dalle inclinée : un effet tangent entraîne la dalle, en plus de l'effet normal, donc statiquement cela conduit à d'autres dispositions. Il nous a également été demandé de faire un calcul 'abaqus' de ces structures pour vérifier les convergences entre la maquette, le modèle simplifié à 3 temps que l'on proposait et l'abaqus. Ce travail a été effectué par Philippe Berthet-Rambaud qui, en faisant quelques adaptations paramétriques sur la base des modèles et des renseignements apportés par Pascal Perrotin, a confirmé notre appréciation de la galerie de Poniente sous 9000 kJ. »

- **R. Mayoraz :** « Ce dimensionnement est donc basé sur quelques calculs. Accepteriez-vous d'aller sous cette galerie si j'envoie un bloc à 16 000 kJ ? ».

- **J. Tonello :** « Oui j'y vais ! »

- **R. Mayoraz :** « Parce que les lois de similitude, c'est assez délicat... ».

- **J. Tonello :** « On n'a pas fait de similitude... ».

- **R. Mayoraz :** « C'est ce qui me gêne beaucoup... ».

- **J. Tonello :** « Nous n'avons pas cherché à trouver des équations dimensionnelles des phénomènes nous permettant d'extrapoler vers des niveaux d'énergie supérieurs, par exemple de 135 kJ à 10 000 kJ... Nous avons dimensionné sous 135 kJ avec les méthodes de fonctionnement pressenties, c'est-à-dire le choc mou, le travail élasto-plastique et la restitution, et ensuite effectivement, il y a cette phase 'abaqus' qui a fait tourner les ordinateurs quelques nuits... et qui a été entièrement pilotée par Mr Mazars et Philippe Berthet-Rambaud ».

**R. Mayoraz :** « Une deuxième question : ce qui m'embête dans tous ces essais, c'est que vous envoyez toujours un cube bien à plat sur les dalles. J'ai montré un bloc qui avait tranché du béton sur 4m de haut, par effet de poinçonnement : ce n'est pas qu'une question d'énergie, c'est une question de section d'impact... A mon avis, par expérience, la même masse qui tomberait sur votre dalle avec une forme de feuillet plutôt que de cube la traverserait... ».

**J. Tonello :** « Nous avons testé d'abord ces blocs carrés, qui étaient la première version la plus simple et la moins chère, mais ensuite nous sommes passés à des blocs de 800 kg multi-facettes pour que les angles d'attaque soient aléatoires ; nous avons vu qu'effectivement, quand le bloc tombe sur une arête, une bonne partie de la dissipation se passe dans le bloc, avec l'effet 'couteau' dont vous parlez : le couteau s'émousse et explose aussi ».

**Christophe Delacourt** (Univ. Bretagne occidentale) : « Concernant la dernière présentation sur la modélisation numérique d'endommagement, des schémas montraient un bon accord entre la réalité et les modèles numériques, mais par contre, vous avez dit aussi que vous paramétriez vos modèles numériques. Avez-vous tellement de paramètres que vous arriverez toujours à rendre compte de la réalité ou le niveau de maturité de ces modèles numériques en terme de physique, de mathématiques et de résolution numérique est-il tel qu'on arrive maintenant à résoudre à peu près tous les problèmes ? Où sont les verrous actuellement sur les modèles numériques d'endommagement ? ».

- **P. Perrotin :** « Pour la partie pare-blocs, nous avons essayé d'avoir des modèles avec des paramètres physiques réels, et non pas des paramètres qui conduisent justement à faire converger le calcul mais qui n'ont pas de réalité physique.

Deuxième point : certes, nous vous avons montré des belles courbes, mais celles-ci ont été obtenues 'proprement' : tous les paramètres de calage aussi bien au sens physique du matériau que les autres

(interface entre le bloc et la dalle, difficile à gérer au niveau numérique) ont été calés sur un seul essai. Après cela, tout a été du prévisionnel : nous n'avons absolument pas retouché les paramètres des essais numériques effectués. Dans le cas contraire, effectivement, on peut tout faire dire à un modèle numérique : n'importe quel utilisateur de code éléments finis est aujourd'hui capable de retrouver des courbes proches des courbes expérimentales ».

**Jean-Bruno Pasquier** (géologue, Géoval, Sion) : « A propos des 2 dernières présentations, l'idée de travailler sur le renforcement de la structure de la galerie elle-même paraît intéressante, mais avec la couche de protection, la simple force d'impact dépend aussi du remblai présent sur la galerie. Pourrait-on imaginer de combiner les 2 voies de recherche, en appliquant sur le toit d'une galerie le principe de structure cellulaire des merlons ? »

- **J. Tonello** : « Je crois que ces idées nous ont tous parcouru l'esprit à un moment ou un autre... Pour ma part, je suis à peu près convaincu que pour des énergies de 10 000, à 25 000 kJ, il ne faut pas chercher à arrêter les blocs mais à les dévier. S'il faut pour cela incliner des dalles à des pentes de 35% voire 50%, j'aurai un problème d'angle d'attaque du matériau cellulaire, qui ne réagira pas comme vient de le modéliser Mr Gotteland : si un bloc attaque une de ces cellules avec un effort rasant, elle n'aura pas les réponses espérées. Il faudrait que ces cellules soit attelées entre elles encore d'une autre manière que ce que met au point Philippe Gotteland en ce moment.... ».

- **Ph. Gotteland** : « Il est prévu d'attacher les cellules entre elles : il y a des systèmes d'attaches avec des joints de rupture... ».

- **J. Tonello** : « Tout à fait ! Si on incline une dalle, c'est par rapport à une trajectoire qui est elle-même toujours inclinée – une chute strictement gravitaire étant exceptionnelle. Si l'on peut se permettre de dévier le bloc vers une rivière – si l'on n'a pas d'habitat en aval – ces dalles structurellement dissipantes peuvent tenir tous les contrats d'énergie possibles, sous condition de budget. Si dans une pente à 50% on veut stabiliser un matériau qui interviendrait dans la première phase d'impact de percussion dissipante, un problème mécanique se pose tout de suite: le matériau en question se fera éjecter, sauf si on l'attache... On peut imaginer sur une telle pente des sacs de sable attelés à la dalle : ils exploseront mais ils rempliront une partie du contrat d'énergie par leur explosion. Ce qui me gênait dans le fait de rapporter 0,5-1m de matériaux pulvérulents, c'est que cela nous privait complètement de cette possibilité d'inclinaison, nous empêchant de tenir le contrat à 15 000 kJ. Mais l'ambition de 'panacher' les techniques est réelle. Par exemple, concernant les merlons présentés par Mr Gotteland, nous avons fait des croquis avec l'entreprise Géolithe pour des cas où le merlon ne pouvait pas trouver son emprise au sol : nous avons réalisé une structure pour placer le merlon plus haut sur le site. Dans ce cas il s'agit d'une sous-structure simplement porteuse, à laquelle on ajoute une valeur dissipante, mais il ne faut pas l'endommager sous peine de compromettre la stabilité de l'ouvrage dans son ensemble. On peut toutefois l'amener dans des systèmes de déformation qui donnent un bilan énergétique non nul.

Donc, je suis tout à fait convaincu de l'intérêt de ces 'cohabitations'. Pour la société Avarock à qui j'en ai parlé, ces combinaisons paraissaient tout à fait bienvenues et porteuses...

En pratique, est-on gêné les uns les autres car, tout en connaissant un peu son voisin, chacun s'isole dans ses méthodes pour les protéger ? De tels effets intellectuels jouent probablement... ».

**Jean-Louis Durville** (CETE Lyon) : « Ces recherches sur le comportement des différents types d'ouvrages (filets, merlons, structures en béton) et les innovations sont très intéressantes. Tout cela fonctionne avec des modélisations très performantes et de l'expérimentation, y compris en vraie grandeur – côté français, nous attendons la nouvelle station d'essais.

Toutefois une troisième source n'a pas été mentionnée : le retour d'expérience. Peut-être ne fait-on pas assez l'effort d'exploiter au maximum les cas où des événements ont sensiblement endommagé les filets ou les merlons (il n'y a pas eu énormément de cas sur des dalles en béton, c'est d'ailleurs le projet d'instrumentation...).

Deuxième remarque, pour rejoindre ce que disait Mr Requillart : je crois effectivement que la sécurité, quand on est à l'aval de tout cela, c'est d'abord la structure protectrice, dont on voit qu'on arrivera petit à petit à la dimensionner et à connaître sa fiabilité – ce qui n'est pas le cas aujourd'hui – mais c'est aussi le bloc qui arrive à l'amont de cette structure, pour lequel il doit y avoir un bon accord entre les hypothèses du facteur de sécurité que prennent le géologue et celui qui réalise la



trajectographie (dont les logiciels présentent encore de nombreuses variations entre eux...). Il y a encore des incertitudes. Je n'ai jamais entendu parler de coefficients de sécurité pris sur une trajectoire, en tout cas, ça n'est pas exprimé de façon claire. Entre cette partie en amont et l'ouvrage en aval, il faut une bonne concordance pour arriver à une fiabilité appréciable et satisfaisante. Le dernier point étant ensuite que la puissance publique définisse le niveau de sécurité qu'elle souhaite et éventuellement des méthodes de dimensionnement. Il reste donc encore de nombreux points sur lesquels avancer... ».

**E. Leroi** : « Effectivement, il y a encore du travail en la matière, notamment en ce qui concerne la définition par la puissance publique d'un niveau de protection ou de sécurité qui soit accepté. Je crois que l'on pourra gagner énormément dans ce domaine, ce qui permettra de demander ensuite aux concepteurs et à ceux qui réalisent ces ouvrages de donner des informations sur le risque résiduel.

A aucun moment je n'ai entendu parler de cette notion: les ouvrages arrêtent toujours tout et fonctionnent constamment ! Il y a très peu d'analyse sur ce qui effectivement fonctionne et ne fonctionne pas. Or c'est quand même le problème auquel sont confrontées la puissance publique et les collectivités territoriales : quelle garantie de sécurité peuvent-ils avoir et comment peut-on la chiffrer ? Quel niveau de protection a-t-on à l'aval ? ».

**Franck Compagnon** (RTM 05) : « Pour continuer dans le même sens, l'ensemble de ces expérimentations considèrent la chute d'un bloc alors que dans la réalité il s'agit souvent de cortèges de blocs de taille variable. Que se passe-t-il pour les blocs suivants lorsque l'ouvrage a déjà été sollicité une fois pour sa capacité maximale? Pour la réparation, il est nécessaire de mettre en place une procédure sur ce type d'ouvrages ».

- **J. Tonello** : « Vous évoquez ce que l'on appelle 'l'effet de réplique' : un bloc qui en suit un premier, éventuellement sur la même cible exactement. Dans ce type de configuration, nous sommes convaincus que la réplique est possible pour les domaines de mise en plasticité que nous pratiquons (qui sont encore des domaines de plasticité limités par les valeurs de l'Eurocode 2, c'est-à-dire des raccourcissements du béton de 3,5 à 4 ou 5 s'il le faut mais pas plus, et des extensions de l'armature qui vont éventuellement à 20-25/1000). Nous avons bien observé dans nos essais que l'endommagement permet la réplique, puisque l'on a répliqué des frappes à des endroits déjà endommagés.

Il faut savoir que le vocabulaire normé recèle un piège avec le terme Etat Limite Ultime (ELU) L'ELU de déformation (3/1000 sur le béton et 8/1000 ou 10/1000 sur l'acier) ne représente pas une déformation importante : une légère fissuration, pour laquelle il faut commencer à se préoccuper de la durabilité des ouvrages. Il ne s'agit pas d'une ruine ! Dans nos essais, nous étions encore très loin de la ruine... L'avantage de faire ces 'incursions dans le domaine plastique' est bien de pouvoir quantifier l'endommagement. C'est un point très important. Lorsque qu'on avance dans la plastification, la notion de coefficient de sécurité n'est pas du tout déviée : il faut essayer de voir les choses en terme de 'parcours sur le domaine plastique' pour pouvoir tolérer la réplique, c'est-à-dire ne pas épuiser la réserve de fonctionnement en arrivant à la ruine au premier impact ; on doit pouvoir se dire avant une réplique : 'j'ai consommé tant de plasticité de sorte que je peux avoir ensuite un 2<sup>ème</sup> impact'... Il est difficile de se ramener à l'écriture conventionnelle des ELU du règlement, pour lesquels on cherche à savoir si l'ouvrage devient précaire en durabilité. Il faudrait avoir une vision similaire à celle de l'équipage des porte-avions qui se sert de filets pour empêcher les avions de tomber dans la mer : ils pratiquent l'endommagement tous les jours ! ».

**Valerio Segor** (RAVA) : « Je pense qu'on a centré le problème à la fin de ce débat : le vrai challenge pour le futur est la gestion du risque résiduel. Avec la recherche et les études à venir, on pourra déterminer avec plus de fiabilité les énergies auxquelles on peut être confronté ou les débits des torrents qu'il faut choisir pour dimensionner les ouvrages. Mais il y aura toujours des événements qui dépasseront le dimensionnement de projet. Le vrai problème est ce que la société n'accepte pas : le risque résiduel.

J.-D. Rouiller a dit auparavant : 'il faut vivre avec'. C'est vrai, je pense que cela est accepté par les populations habitant en montagne, qui savent très bien qu'il y a des avalanches, des éboulements et chutes de pierres ou des crues torrentielles. Par contre il est quelque fois très difficile de faire passer ce

message auprès des touristes. C'est absurde : j'ai en tête un cas où des touristes ont dénoncé le maire parce qu'ils avaient glissé sur un trottoir gelé, en hiver. C'est une provocation, mais c'est notre société.

Pour terminer, une petite remarque sur les ouvrages : au moins ici en Val d'Aoste, il y a 3 ans, il était plus intéressant de mettre 2 filets de 1500 kJ au lieu d'un filet de 3000 kJ, très cher car il y avait seulement 2 producteurs. Maintenant, le filet de 3000 kJ devient moins cher : il coûte 20% de plus que le filet de 1500 kJ ».

## 6. Utilisation de technologies innovantes

### 6.1 Présentation des résultats du projet : the role of geomatics for territory monitoring

Fulvio RINAUDO (*Politecnico di Torino*)

Cette présentation résume les résultats issus des activités du contrat de recherche « Utilisation de la géomatique pour la surveillance des mouvements gravitaires du territoire valdotain », dans le cadre du programme Interreg IIIA RiskYdrogeo. Cette recherche a été conduite par le DITAG du Politecnico di Torino, sous la coordination de Fulvio Rinaudo et avec la participation d'Andrea Biasion, Enrico Borgogno Mondino, Leandro Bornaz, Fabio Giulio Tonolo et Andrea Lingua.

L'objet de la recherche est de valider les techniques photogramétriques, LIDAR et SAR, instruments opérationnels pour la description géométrique d'événements dynamiques sur le territoire, dans une optique de prévention et dans des conditions d'intervention d'urgence.

La recherche s'est déroulée en trois phases :

- analyse de l'état de l'art des techniques de relevé de terrain pour la modélisation du territoire : cette étape est terminée ;
- expérimentation d'un système LIDAR depuis hélicoptère : l'acquisition des données et leur traitement sont terminés, l'interprétation opérationnelle des résultats est en cours de finalisation ;
- établissement de normes techniques pour la réalisation de relevés du territoire : cette étape est en cours de rédaction et sera définie sur la base des résultats de la phase précédente.

#### Les systèmes de surveillance environnementale

La surveillance des mouvements gravitaires représente une des plus importantes actions actuelles de protection du territoire. Les paramètres utilisés nécessitent toujours une approche de type interdisciplinaire.

Les techniques actuellement utilisées sont de type géomatique, géotechnique et géologique. Les techniques classiques de la géomatique consistent en des relevés, à intervalles de temps prédéfinis, d'une série discrète et limitée de points considérés utiles à la description du phénomène gravitaire. Ces relevés sont réalisés par topographie terrestre (station totale motorisée automatique), ou par une technique satellitaire (GPS). L'ensemble de ces technologies peut être utilisé de façon directe ou par télédétection (permet l'institution de véritables centrales de surveillance géométrique). Ces solutions, installées seulement sur des phénomènes très actifs et bien délimités, fournissent une précision millimétrique. Elles font partie de la série d'interventions qu'aujourd'hui n'importe quel système de surveillance comporte dans les protocoles d'intervention d'urgence. Leur implémentation nécessite des investissements lourds, mais la technologie est fiable et indispensable en complément des systèmes de surveillance géotechniques et géologiques.

Il est cependant possible de concevoir de nouveaux instruments de surveillance du territoire qui peuvent être utilisés en intervention préventive, en présence d'indicateurs de danger, avant de décider d'intervenir, si cela est jugé nécessaire, avec des systèmes ponctuels de haute précision. Il s'agit de techniques capables d'intervenir sur de larges zones en un temps restreint et dont le traitement des données est principalement automatique. Caractérisées par une précision d'un ordre de grandeur inférieur aux techniques géodésiques traditionnelles, elles peuvent contribuer à la mise au point d'un système de surveillance continue d'un territoire.

## Techniques de relevé territorial

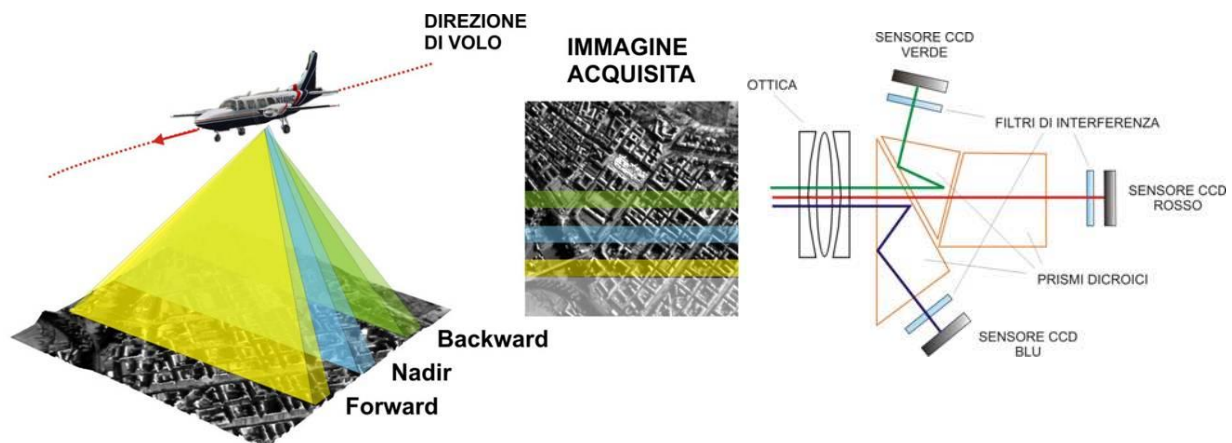
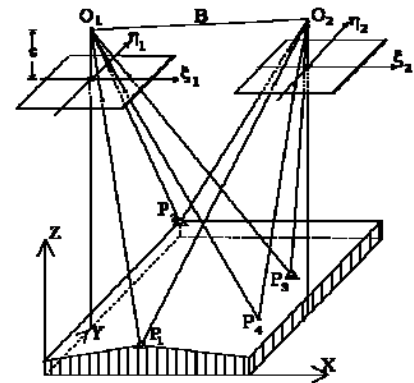
Les techniques présentées ici ne sont pas nouvelles dans le domaine de la géomatique : il s'agit de la photogrammétrie, du LIDAR et du SAR. Les innovations technologiques récentes telles que l'auto-corrélation d'images digitales, l'utilisation de plateformes inertielles pour le GPS, la disponibilité toujours plus grande de couverture satellitaire et les nouvelles techniques de traitement des données, offrent de nouveaux produits de relevés métriques qui, avec une précision peu élevée, permettent d'obtenir des informations sur de vastes portions de territoire dans un temps bref et avec des investissements limités. La suite de cette présentation se focalise sur l'application des trois techniques qui peuvent avoir un intérêt dans un système de surveillance élargi, avec comme but premier la prévention et la prévision des phénomènes dynamiques.

### (1) Photogrammétrie

Principes (rappels) : la photogrammétrie nécessite deux images d'un même objet pour déterminer ses coordonnées dans un système de référence approprié. Pour cela, il faut connaître a priori les conditions géométriques dans lesquelles se sont formées les perspectives centrales (orientation externe) ainsi que les différences entre les images effectivement utilisées et les perspectives centrales théoriques requises par la technique (orientation interne).

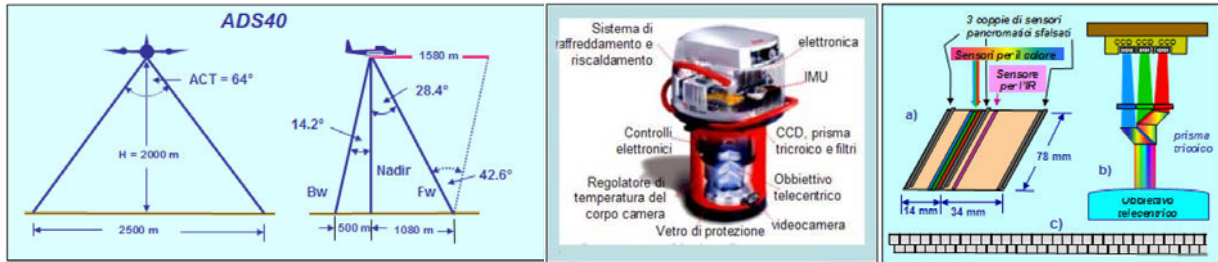
Dans les applications aériennes, l'orientation interne doit être connue a priori. L'utilisation de caméras non métriques n'est pas rentable et ne permet pas de prévoir les précisions obtenues. Pour les applications qui nous intéressent, l'utilisation de caméras photographiques à pellicule est à exclure, car les images acquises devraient ensuite être digitalisées, ce qui prendrait trop de temps.

Acquisition de données : depuis quelques années, il est possible d'installer des caméras digitales de petit format sur des avions et des hélicoptères. Cette application est en fait limitée à l'installation sur les hélicoptères pour garantir la reprise nécessaire à la production d'orthophotos digitales ou plus rarement des prises stéréoscopiques. Plus récemment sont apparues les caméras métriques digitales de grand format montées sur avions. Il existe une technique qui change la solution utilisée des capteurs satellites, pour lesquels l'image est acquise par un capteur linéaire qui enregistre en continu la radiométrie réfléchiée par le terrain, générant des images à perspective centrale multiple, qui nécessite des traitements particuliers pour la solution du problème photogrammétrique.

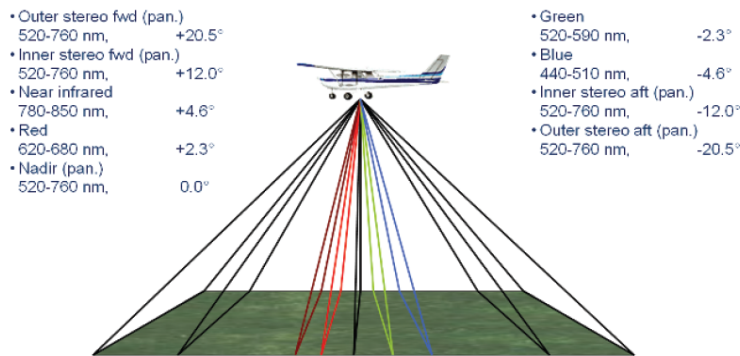




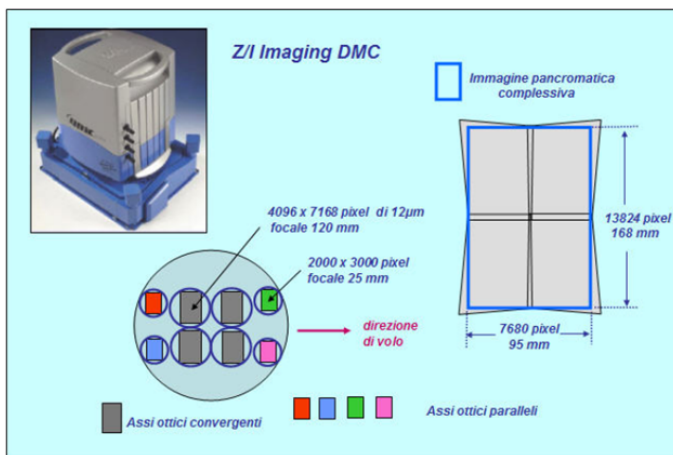
La caméra Leica ADS 40 est actuellement la plus utilisée en Europe: à 2 000m d'altitude, le pixel de la caméra couvre une surface de 10x10 cm. Pour la caméra JAS150 JENA, à 3 000 m son pixel couvre une surface de 8,8 x 8,8 cm. Elles permettent donc d'acquérir rapidement de grandes portions de territoire (schémas ci-dessous).



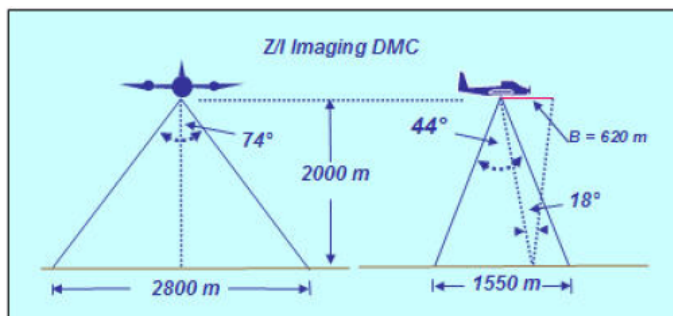
Caméra ADS40 LEICA



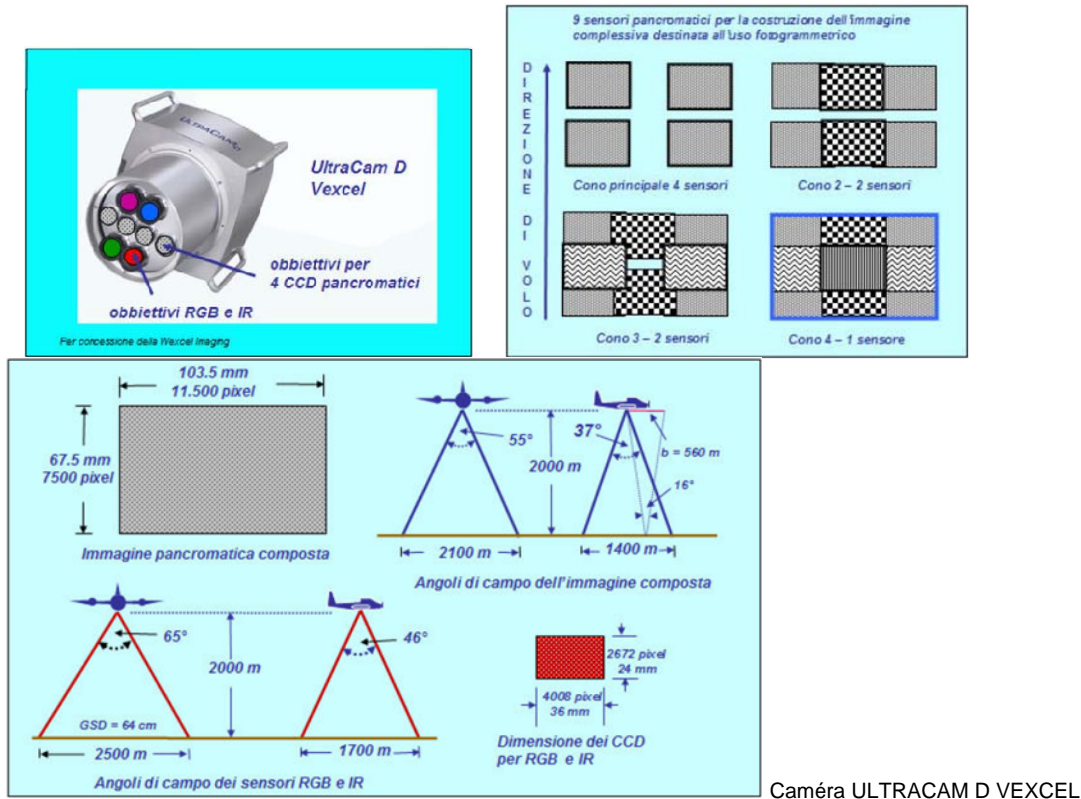
Caméra JAS150 JENA



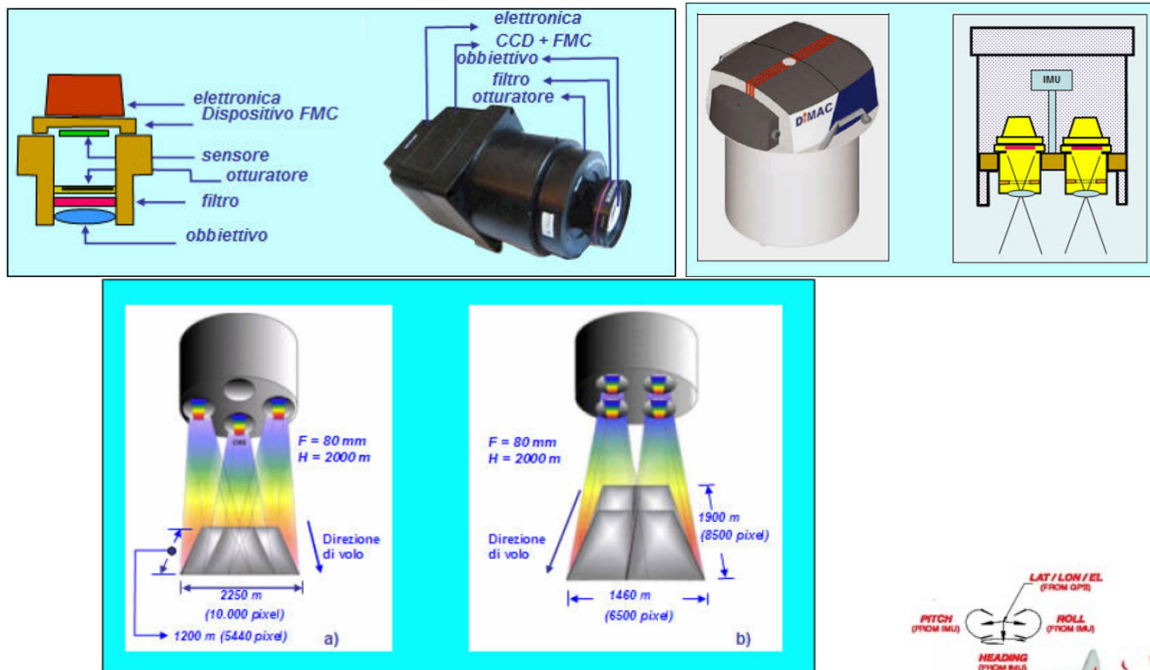
Un deuxième type de caméra génère un grand format à perspective centrale unique, utilisant un ensemble de 2 à 4 capteurs aériens. Avec la caméra DMC Zeiss/Imaging, à 2000m d'altitude le pixel couvre à terre environ 20 cm (schéma ci-contre); pour la caméra Ultracam D Vexcel, à 2000m le pixel couvre également 20 cm (schéma page suivante) et pour la DIMAC 23 cm (schéma page suivante).



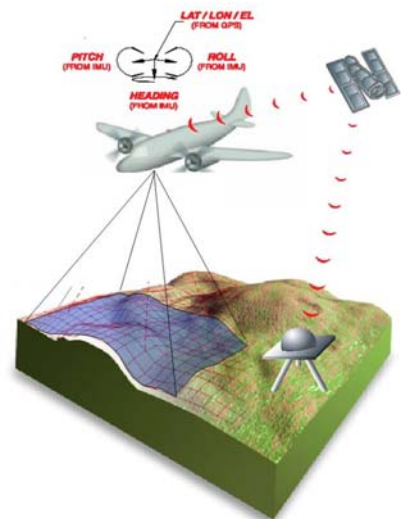
Caméra DMC ZEISS / IMAGING



Caméra ULTRACAM D VEXCEL



Toutes les caméras digitales (aussi bien d’avion que d’hélicoptère) sont intégrées à un système de positionnement GPS/inertiel qui permet de déterminer directement les paramètres de positionnement externe (photogrammétrie directe). On passe directement de l’acquisition à l’extraction des informations géométriques nécessaires à la construction du modèle numérique du terrain (schéma ci-contre).

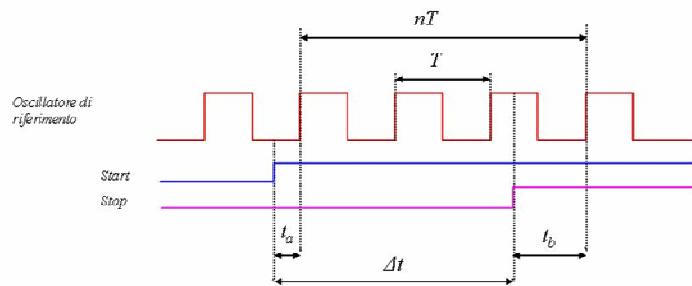
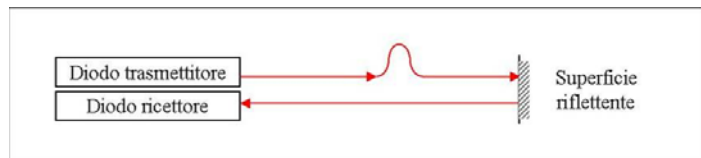


Traitement des données : les algorithmes propres à la photogrammétrie numérique permettent d’obtenir en mode automatique des grilles de points irréguliers ou déjà régularisés, des orthophotos numériques, des orthophotos numériques solides et des modèles 3D réalistes (figure ci-dessous).



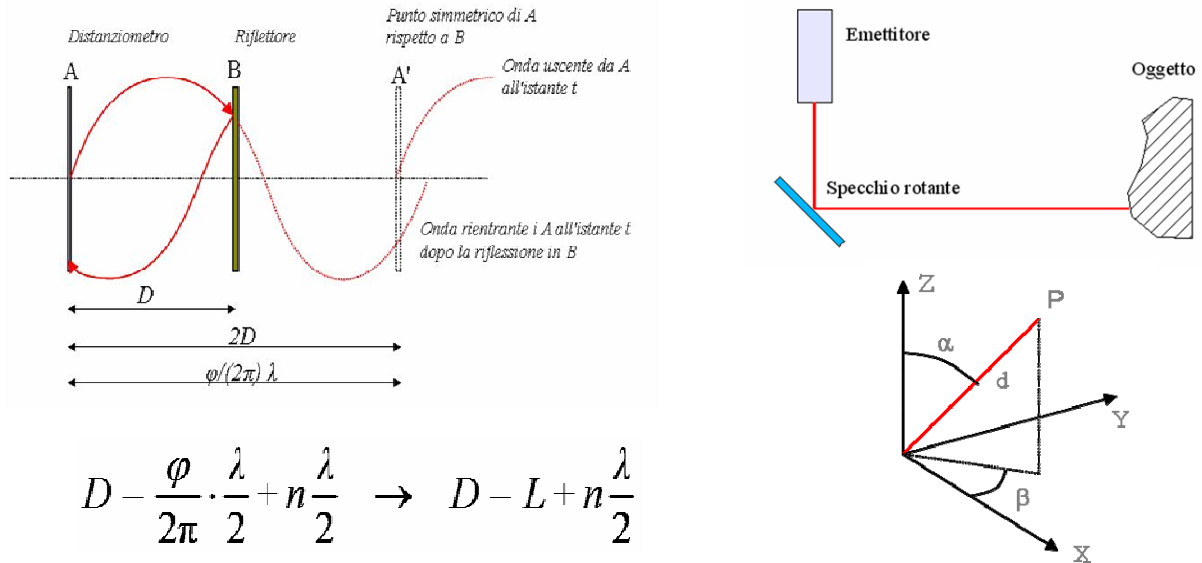
## (2) Lidar

Principes : le laser scanner travaille en utilisant en mode actif un rayon laser pour la mesure de la distance, soit par la méthode à impulsion (mesure du temps de retour de l’onde, schéma :  $2D=v\Delta t$ ), soit par la méthode des phases (mesure du déphasage entre l’onde émise et l’onde reçue :  $D = L+n\lambda/2$ , schéma page suivante).



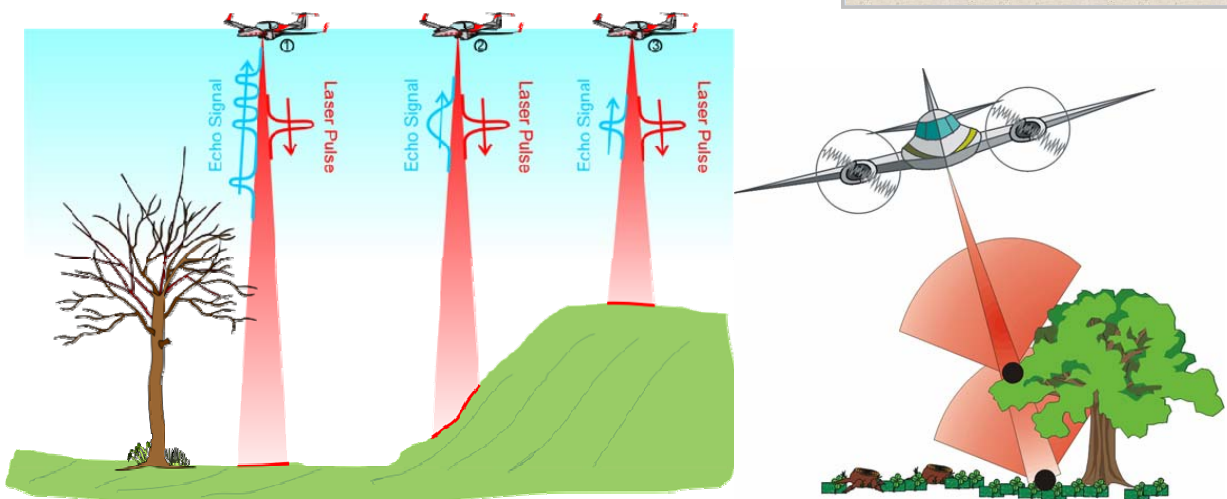
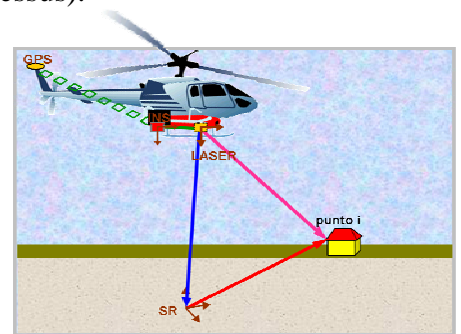
$$2D = v \cdot \Delta t$$





Un miroir pivotant dévie dans l'espace le rayon selon une direction définie : la connaissance de la direction spatiale du rayon et de la distance mesurée selon cette direction permet le calcul des coordonnées spatiales du point (schéma de droite ci-dessus).

Positionnement cinématique : dans les solutions aéroportées, la direction selon laquelle est mesurée la distance est déterminée grâce à l'intégration d'un système constitué d'une plateforme inertielle et d'un récepteur GPS : le laser est fixé sur la plateforme, dont l'orientation est calculée par GPS et plateforme inertielle (ci-contre).



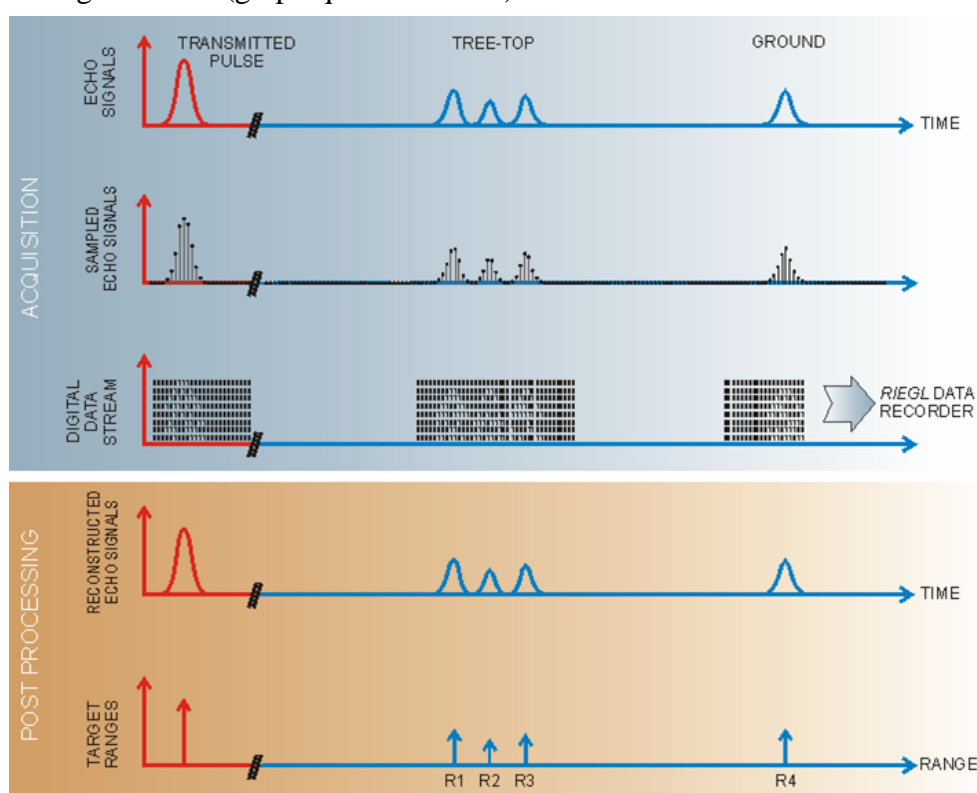
Acquisition des données : le laser émet une impulsion lumineuse qui se propage dans l'espace et se dirige vers le terrain. A cause du phénomène de dispersion, le diamètre du rayon augmente en se propageant dans l'air. Au moment de l'impact avec la surface, l'impulsion laser sera caractérisée par une surface d'impact et non un point unique. Quand la surface d'impact de l'impulsion laser rencontre un obstacle naturel ou artificiel (feuilles, lignes aériennes, corniches), celui-ci est réfléchi à un temps différent (schéma de gauche ci-dessus).



Les signaux de retour sont donc multiples, d'où la possibilité ou le besoin de mesurer un signal spécifique parmi les retours multiples du rayon (par ex. le premier ou le dernier retour) ou une série de retours.

La majeure partie des distansomètres laser permettent seulement d'avoir la mesure de la première impulsion réfléchi (la partie la plus haute de l'obstacle, par exemple les feuilles des arbres) ; dans d'autres cas on mesure seulement la dernière impulsion réfléchi (le terrain à la base de l'arbre, schéma de droite ci-dessus). Dans certains cas il est possible de mesurer jusqu'à 4 impulsions réfléchies. Pour qu'elles puissent être distinguées les unes des autres, il faut que la discontinuité décrite soit plus grande qu'une certaine valeur liée à la forme d'onde du laser (environ 1m). Si la discontinuité est plus petite, elle n'est pas détectable et la valeur de distance obtenue est en gros la moyenne des distances réelles des signaux de retour.

Les nouveaux capteurs sont en mesure de mesurer la forme d'onde complète du signal lumineux réfléchi. Ils calculent toutes les distances correspondant aux maximums de la fonction du signal retour (graphique ci-dessous).



L'acquisition des données peut se faire selon trois options différentes :

- Systèmes aériens fixes (*photos diapo 33*) : l'avion n'est pas prévu pour les situations d'urgence, à la différence de l'hélicoptère.
- Systèmes mobiles par hélicoptère : *photos diapo 34*.
- Systèmes terrestres : la technique LIDAR peut s'utiliser également depuis le sol, pour des applications d'extension plus limitée, en fournissant des précisions centimétriques. Le traitement des données est plus complexe, mais le produit fini reste de toute façon de caractéristiques comparables à ceux obtenus par mesures aériennes (*photos diapo 35 et 36*).

Produits finis : la technique LIDAR trouve dans l'intégration avec la photogrammétrie numérique une de ses applications les plus intéressantes dans le domaine territorial. Les modèles numériques de terrains peuvent être revisités avec la radiométrie pour générer des

modèles 3D réalistes ; plus simplement et plus efficacement, les images utilisées en géologie et géotechnique pour la photo-interprétation peuvent être intégrées dans les informations 3D (images solides)

### (3) Radar SAR

**Définition** : la technique RADAR (RAdio Detection And Ranging) est basée sur l'émission d'ondes électro-magnétiques (EM) et sur le relevé des diffusions relatives. On extrait des caractéristiques du signal de retour les informations sur les caractéristiques et sur la position de l'objet observé. L'interprétation d'images Radar est moins intuitive que celle d'images optiques ; l'interaction entre l'énergie et la matière – à des fréquences de micro-onde- suivent des modalités différentes qu'en optique. Pour les applications qui nous concernent, le Radar a pour but de relever les caractéristiques des surfaces de terrain observées. Dans ce contexte, le cible coïncide avec le point (ou surface) du terrain observé.

Un système Radar est composé de :

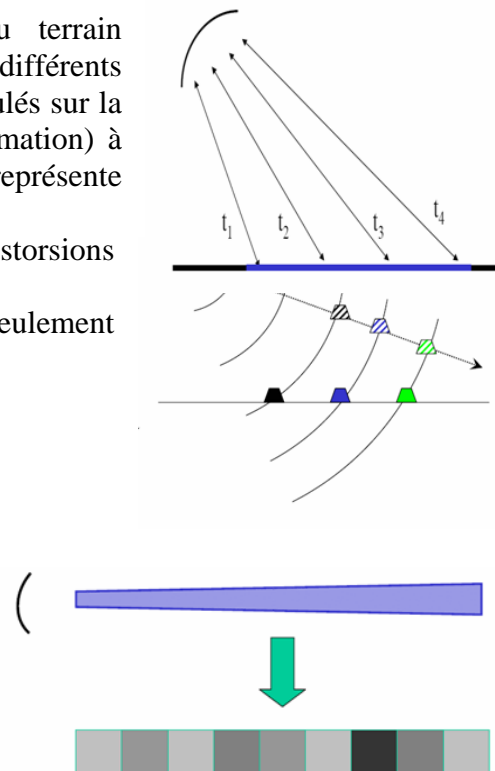
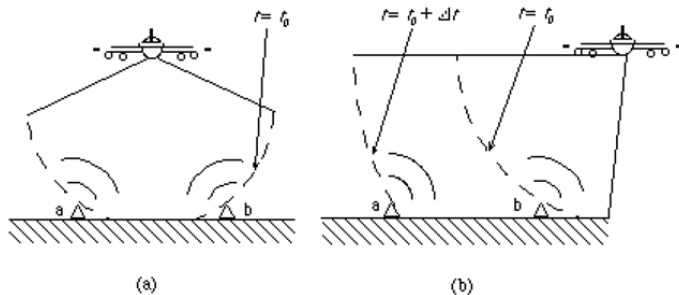
- un transmetteur qui génère l'onde EM et la transmet à l'antenne ;
- une antenne qui émet l'onde vers la cible (surface terrestre ou marine, ou bien atmosphère) et enregistre le signal de rétrodiffusion ;
- un récepteur qui reçoit l'onde rétrodiffusée, l'amplifie et la traite pour améliorer sa qualité, et enfin envoie les résultats à la centrale d'enregistrement / stockage ;
- une centrale qui enregistre les signaux reçus à des fins de représentation et de traitements ultérieurs.

Une impulsion directe génère une série de retours, dus à la rétro-diffusion des parties de la cible. L'analyse de ces retours (signal réfléchi) permet de mesurer :

- la distance de l'objet qui a généré le retour ;
- l'intensité du retour radar.

**Mesure de distance** : à différents points du terrain correspondent différents chemins d'onde et donc différents temps d'allers-retours. Les signaux de retour sont calculés sur la surface terrestre (supposée plate en première approximation) à l'intersection des lignes isochrones et de la ligne qui représente la surface terrestre. Ceci a deux conséquences :

- les images radar sont affectées de fortes distorsions géométriques ;
- la cible peut être éclairée par le signal seulement latéralement.



A une impulsion radar correspond donc une séquence de retours, par ordre de distance croissante à la cible, chacun caractérisé par une intensité et phase propre.

Bande Radar : comme pour l'optique, le radar aussi peut fonctionner sur diverse longueurs d'onde (de 0,5 à 75 cm environ), pour lesquelles les réponses des cibles sont généralement différentes (tableau ci-contre).

Ex. (cf. figure de la *diapo 42*) :

Bande C	→	glace,
Bande P	→	pénétration sous les feuilles,
Bande L	→	interprétation géologique.

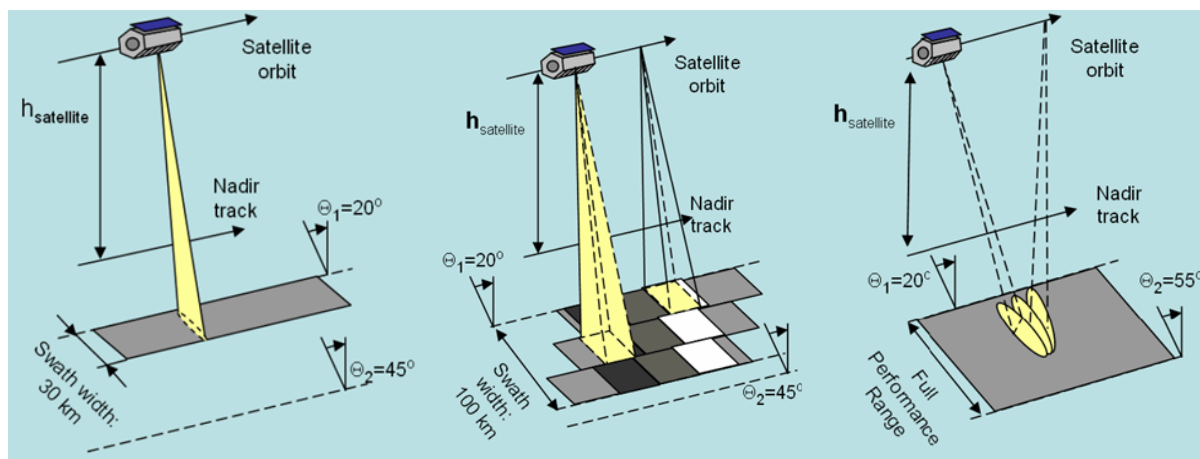
### Résolution

La résolution en distance est la capacité pour le radar de discerner deux objets contigus : c'est la distance minimum qui doit exister entre deux objets qui génèrent un retour pour que le retour du premier ait cessé avant que le retour du second n'arrive.

La résolution en azimut (liée à l'angle de vol) est déterminée par la largeur du faisceau et les résultats sont moins bons avec la distance au capteur.

### SAR

Le SAR est un radar de type conventionnel (SLAR, Side Looking Airborne RADAR) monté sur une plateforme mobile (avion, hélicoptère ou satellite). L'antenne du radar est pointée vers le sol orthogonalement à la direction du mouvement de la plateforme, avec un angle latéral compris entre 20 et 80° par rapport au Nord (schémas ci-dessous).



Les inconvénients principaux sont liés à la lourdeur des traitements du signal reçu, qui empêche d'avoir un résultat immédiatement disponible (les objets en mouvement sont en effet déplacés).

Une image SAR est une matrice numérique, dont les éléments sont des nombres complexes représentatifs de l'amplitude et de la phase du signal rétrodiffusé par la surface. Les objets qui se trouvent parallèles à l'antenne radar sont tous à la même distance du radar et sont donc représentés par un même pixel (il n'est pas possible de distinguer des objets entre eux, si distants soient-ils les uns des autres, s'ils sont contenu dans ce plan parallèle).

Sur la base des mesures du signal rétrodiffusé, les applications territoriales des données de SAR satellitaire et/ou aéroporté peuvent être divisées en 2 catégories :

- Identification et étude des surfaces ;
- Mesure des surfaces.

### L'interférométrie SAR :

Elle utilise 2 images SAR de la même scène, acquises de positions légèrement différentes ; elle rend possible la génération et la mise à jour de modèles numériques de terrain, avec des résultats planimétriques qui dépendent des instruments utilisés (typiquement inférieur à 20m) et des précisions absolues, pour la détermination des cotes, de l'ordre de quelques mètres.

La phase interférométrique résulte de deux éléments :

1. La topographie de la scène observée ;
2. L'éventuelle déformation du terrain dans l'intervalle de temps qui sépare les deux acquisitions.

En soustrayant la composante topographique (en utilisant un MNT externe ou dérivé par interférométrie classique), il est possible d'estimer la composante due au déplacement. Cette technique est appelée Interférométrie Différentielle SAR (DinSAR).

Avec l'interférométrie SAR classique, on est en mesure d'estimer des mouvements de l'ordre du cm, mais en général il n'est pas possible de faire des estimations ponctuelles, seulement des analyses d'ensemble pour identifier des phénomènes macroscopiques (>0,2 km<sup>2</sup>).

### **Technique PS**

La technique des réflecteurs permanents (Permanent Scatterers, PS) sert à la surveillance des phénomènes de déformations superficielles lentes (exemple d'application sur la Région Piémont : § 6.3 p. 207); elle est basée sur l'emploi de séries temporelles d'images radar satellites.

Principe : un petit sous-ensemble de cibles radar (PS, ou Point de Mesure Permanent PMP) maintient la même signature électromagnétique dans toute l'image, quelles que soient la géométrie d'acquisition et les conditions climatiques. Les PS sont typiquement des parties d'édifice, structures métalliques, affleurement rocheux ou tout élément toujours présent au sol dont les caractéristiques électromagnétiques ne varient pas sensiblement d'une acquisition à l'autre : ce n'est par exemple pas le cas de la végétation, sujette à des variations continues.

#### Points forts :

1. Possibilité de mesure ponctuelle ;
2. Mesure différentielle de précision élevée (ex. vitesses moyennes jusqu'à 0,1 mm/ an, déplacements verticaux jusqu'à 1mm et planimétriques jusqu'à 1cm).
3. Estimation et prise en compte des facteurs atmosphériques ;
4. Existence d'une archive historique (depuis 1992) qui permet des recherches sur les phénomènes passés ;
5. Réduction des coûts et des temps d'investigation pour la délimitation d'un territoire ;
6. Application « synergique » avec d'autres techniques de relevé (= possibilité de couplages) ;
7. Précision verticale de la mesure supérieure à la technique GPS ;
8. Densité élevée de repères radar (en zone urbaine jusqu'à 400 PS / km<sup>2</sup>), toujours présents sur place.

#### Points faibles :



1. Les mouvements rapides (>1cm/35 jours) ne peuvent pas être suivis sans informations a priori ;
  2. La surveillance en temps réel est impossible : la fréquence d'acquisition des données est trop faible (35jours) ;
  3. La mesure dans des zones sans cible radar n'est pas possible (à moins de prévoir le positionnement de repères artificiels, mais dans ce cas on perd l'avantage de l'archive historique) ;
  4. La faible densité des PS dans les zones non urbaines peut rendre les réalisations difficiles ;
  5. Le processus de traitement, pour être robuste, nécessite une quantité minimum de 25 à 30 images ;
  6. Le temps de calcul est élevé (calculs lourds) ;
  7. Il reste un problème de positionnement planimétrique correct des PS dans un système de référence adapté ;
  8. Les cellules des images radar utilisées aujourd'hui par cette technique (images ERS) ont une résolution au sol de 25 m ;
  9. Il existe une incertitude de positionnement planimétrique externe à la cellule (où est placée la cellule ?) et une interne à la cellule même (où se situe à l'intérieur de la cellule la cible que le signal de retour réfléchit ?)
- Cette difficulté peut parfois être contournée, en utilisant des orthophotos aériennes de la zone pour la reconnaissance visuelle d'éléments du terrain, à proximité de la position estimée du PS, qui peuvent devenir des PS eux-mêmes.

#### Améliorations possibles :

L'utilisation de séries d'images de divers capteurs contribue à :

- augmenter la fréquence d'observation ;
- augmenter le nombre de PS ;
- décomposer la composante du mouvement en vertical et horizontale.

Toutes les mesures effectuées à travers la technique PS sont de type différentiel. Cela signifie que toutes les estimations vont se référer à un point unique, supposé immobile, qui possède des caractéristiques radiométriques optimales. Si une information parvient sur un mouvement de ce point supposé stable, on pourrait facilement corriger la vitesse des autres points en sommant algébriquement la vitesse estimée et l'information relative au point de référence.

#### Applications

Il existe actuellement deux grands types d'application :

- La technique d'analyse SPSA, qui identifie les points de référence (PS), calcule les coordonnées géographiques relatives, estime les mouvements relatifs et la vitesse des déplacements sur une base temporelle différente afin de connaître les variations indicatives des phénomènes de glissement/éboulement en mouvement. Cette technique peut être appliquée à l'étude de portions étendues de territoire (au moins 100km<sup>2</sup>) pour identifier des phénomènes potentiels d'instabilité superficielle, dont le contrôle de détail est du ressort des investigations de terrain.
- La technique d'analyse APSA, qui augmente la densité des points PS, analyse une série multitemporelle complète de points de référence intéressants. Cette technique est appliquée pour l'étude de zones d'extension relativement modeste (environ 20 km<sup>2</sup>).

Pour améliorer et perfectionner l'analyse interférométrique, des études géologiques, géomorphologiques et géotechniques sont nécessaires, soit directement sur le terrain, soit par analyse historique (état de l'art).

## Expériences pratiques

Le test s'est déroulé sur 4 sites :

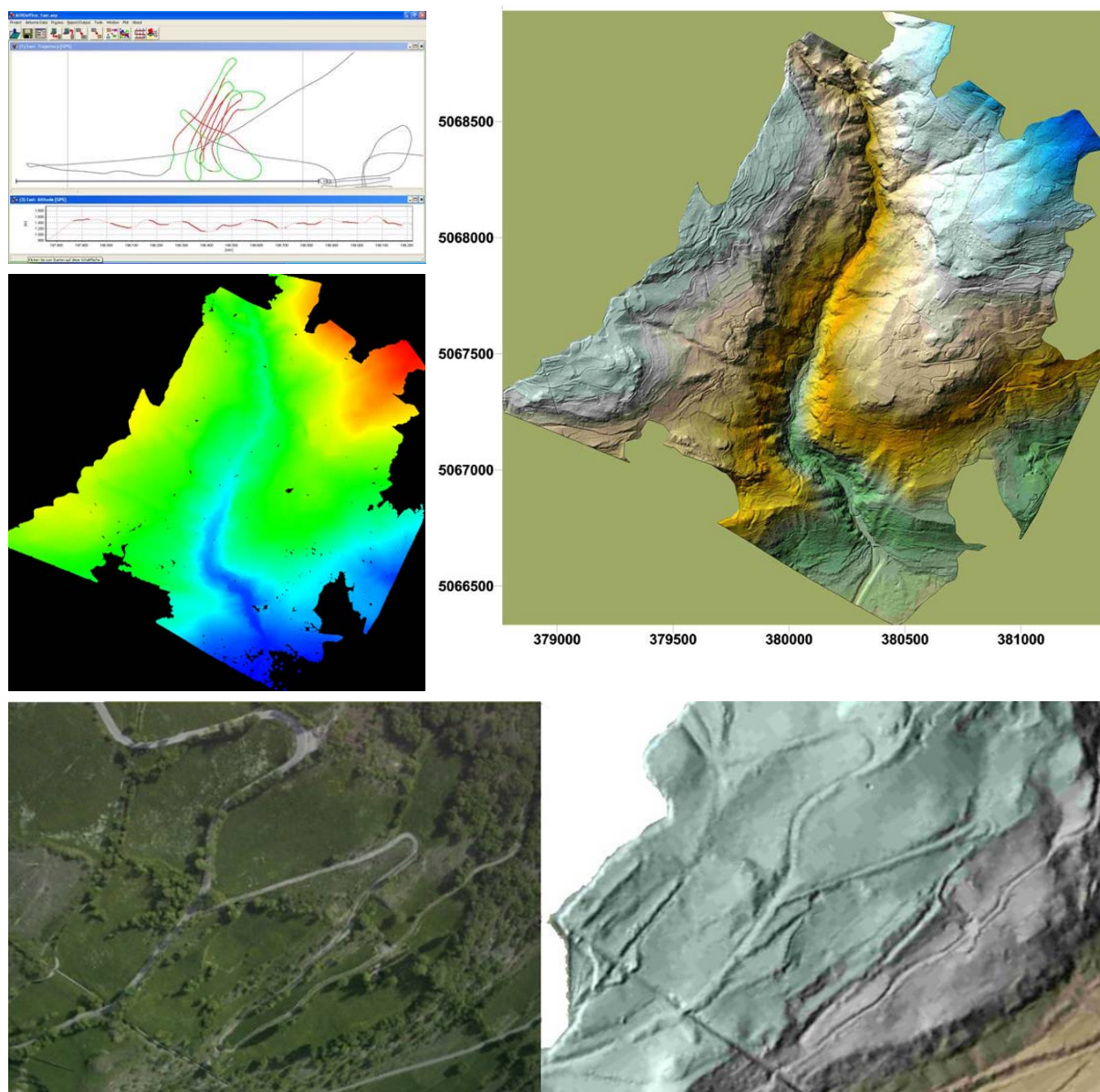
1. VOLLEIN (6.91 Km<sup>2</sup>)
2. CHERVAZ (8.64 Km<sup>2</sup>)
3. VALTOURNENCHE (19.93 Km<sup>2</sup>)
4. BOSMATTO (7.69 Km<sup>2</sup>)

L'équipe de recherche a utilisé un prototype, qui est désormais dans sa configuration de test final. Celui-ci intègre un scanner RIEGL basé sur le principe de l'analyse de l'intégralité du front d'onde.

Le programme des vols, leur exécution et le traitement des données ont permis d'établir des normes pour l'exécution en situation ordinaire et en situation d'urgence (cf. *film des vols*).

Les résultats sur les 4 sites sont illustrés sur les *diapos 55 à 62 du powerpoint*.

Exemple sur Vollein :



Expérience pratique d'acquisition des données SAR : l'exemple de Vollein

(En haut à gauche : cheminement du vol ; au-dessous : MNT brut (MNT non filtré) ; en haut à droite : MNT filtré en fausses couleurs ; en bas : comparaison entre l'orthophoto et le MNT)

### **Propositions de techniques spécifiques**

Les techniques spécifiques pour la gestion des données LIDAR (intégrés à la photogrammétrie numérique) sont en train d'être complétées ; un manuel d'utilisation des données SAR est également en cours de rédaction, en tenant compte du fait que seules deux sociétés en Europe détiennent l'exclusivité du traitement de ce type de données selon des protocoles protégés par copyright.

### **Conclusions**

Les techniques de relevé présentées et l'expérience technique acquise permettent de définir de nouveaux scénarios pour la surveillance du territoire. Des analyses successives de données territoriales peuvent par exemple mener à conseiller l'installation de systèmes de surveillance géodésiques fixes. Les données SAR, couplées aux habituelles visites de terrains et à la vigilance locale, peuvent également alerter sur de possibles déclenchements de phénomènes dynamiques de terrain, ceci sur une portion de territoire étendu.

La disponibilité d'un hélicoptère équipé d'un système LIDAR intégré avec photogrammétrie numérique peut offrir des services d'urgence dans des délais raisonnables (en situation ordinaire également), en ciblant les interventions là où les données SAR indiquent des mouvements anormaux. Ce même hélicoptère LIDAR/photogrammétrie peut être utilisé pour d'autres actions de surveillance : torrents, glaciers, avalanches, mais il est important qu'il soit toujours présent sur place ou à proximité afin de garantir une intervention rapide.

## 6.2. Intervention d'experts extérieurs

### 6.2.1 Caractérisation des déplacements de surface associés aux mouvements gravitaires par Télédétection - Bilan et Perspectives

*Christophe DELACOURT (Université de Bretagne Occidentale)*

Christophe Delacourt présentait un bilan et les perspectives d'application d'un certain nombre de techniques de télédétection pour l'étude des mouvements gravitaires. Deux paramètres principaux peuvent être mesurés à l'aide de ces techniques : la géométrie et la cinématique des mouvements gravitaires, qui sont les deux mesures fondamentales pour la compréhension de la dynamique de ces mouvements.

#### Paramètres de contrôle

Paramètres externes	Paramètres internes
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Météorologie</li> <li>• Teneur en eau</li> <li>• Végétation</li> <li>• Activité sismique</li> <li>• Activité Anthropique</li> <li>• .....</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caractéristiques structurales</li> <li>• Lithologie</li> <li>• Rhéologie</li> <li>• .....</li> </ul>

Paramètres de contrôle des mouvements gravitaires

Chacun de ces paramètres agit sur une échelle de temps et une échelle spatiale caractéristiques. Pour pouvoir caractériser la cinématique d'un mouvement gravitaire, il faut être en mesure de travailler à ces échelles de temps et d'espace, qui couvrent plusieurs ordres de grandeur. Une fois définies les échelles spatiale et temporelle de l'étude, il faut déterminer quelles méthodes de mesures sont les plus adaptées.

#### Mesure des déplacements de surface des mouvements gravitaires

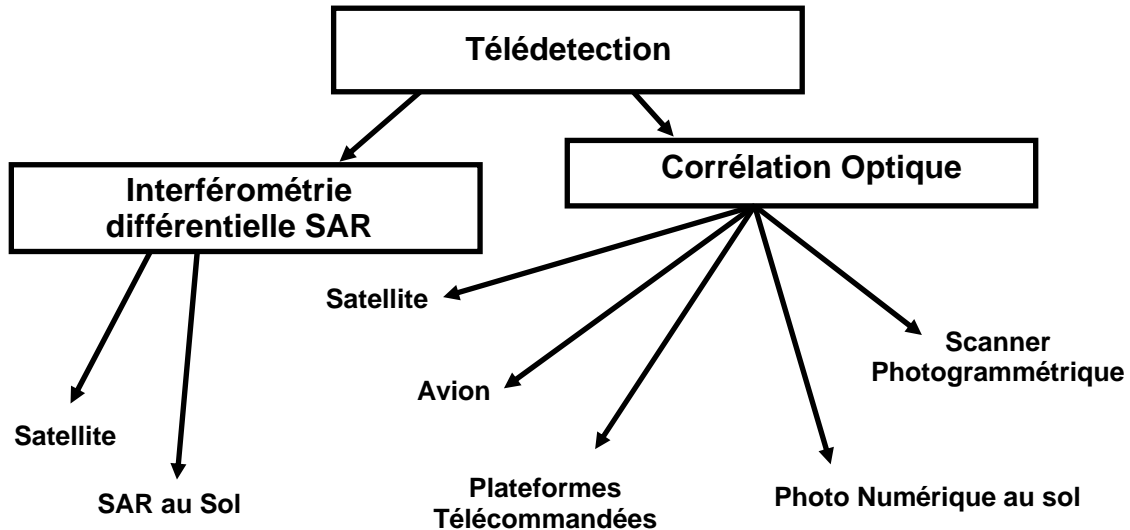
- Mesure de la position d'un ou plusieurs points, qu'on va itérer dans le temps : GPS, Tachéométrie... Points faibles : Ces mesures ne sont pas représentatives de l'hétérogénéité spatiale du mouvement, elles nécessitent un accès au site parfois difficile, elles portent souvent sur des études locales et des archives limitées (l'instrumentation et le suivi d'un site demandent du temps avant de fournir des mesures exploitables)
- Télédétection : Le principe est la déduction d'un champ de déplacement de surface à partir de deux images diachroniques sur la même zone.

#### Intérêts génériques des données de télédétection :

- Historique ;
- Extension de la zone en mouvement sur un intervalle de temps précis ;
- Calcul du champ de vitesse ;
- Calcul des volumes mobilisés (avec informations annexes) ;
- En couplant deux Modèles Numériques de Terrain diachroniques :
  - => Champ de déplacement 3D,
  - => Informations sur la géométrie évolutive 3D du mouvement ;
- Paramètres entrées et de validation des modèles numériques.

Deux grandes techniques existent en télédétection : l'interférométrie radar (qui peut être mise en œuvre à partir d'images satellites ou à partir de techniques au sol) et la corrélation optique (complémentaire de l'interférométrie, en offrant l'avantage de pouvoir être appliquée sur des supports d'images complètement différents, et ainsi de couvrir différentes échelles de temps et d'espace).



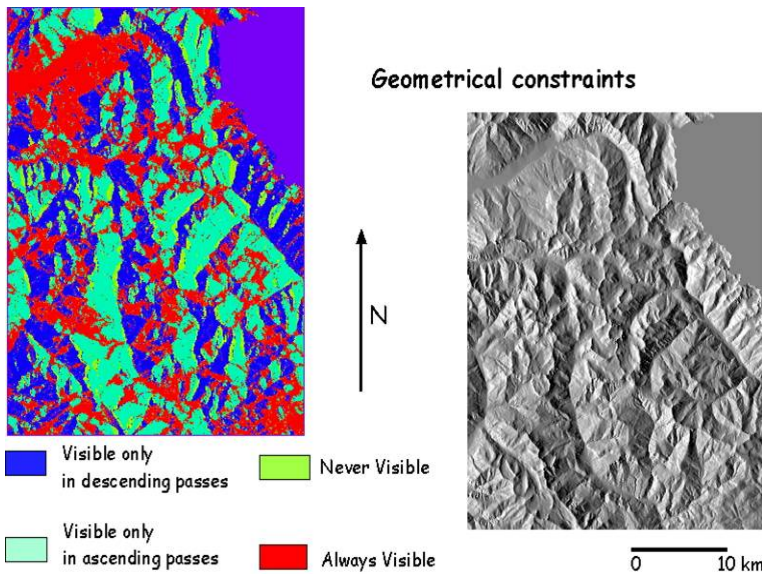


**Interférométrie Radar**

Cette technique n’est pas utilisable de façon systématique. Une simulation du potentiel dans les Alpes du Sud sur une zone de 50km × 50km montre ainsi que presque 10% de la surface ne pourra pas être imagée en raison d’une inadéquation entre l’orientation des pentes et les paramètres de prise de vue. Ces contraintes géométriques empêchent de caractériser les glissements de terrain situés dans ces zones d’ombre. Il faut donc utiliser des combinaisons de différents types d’orbites de satellites, de manière à couvrir des surfaces assez importantes, mais il subsiste toujours des zones d’ombre.



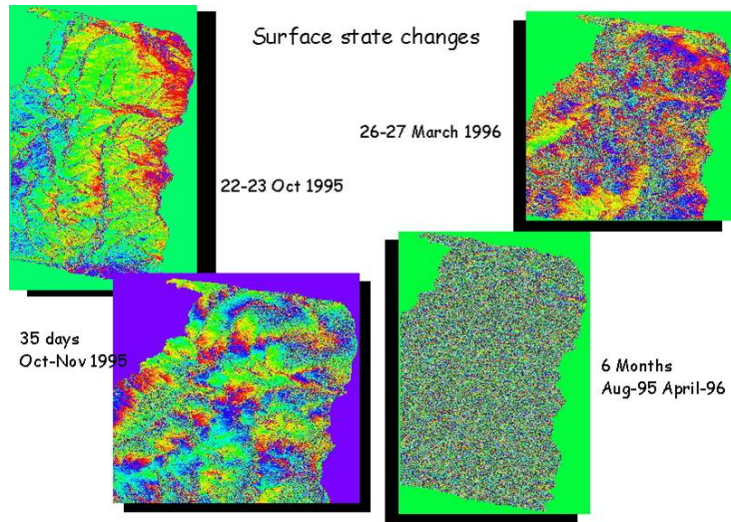
Aire d’intérêt (50x50 km)



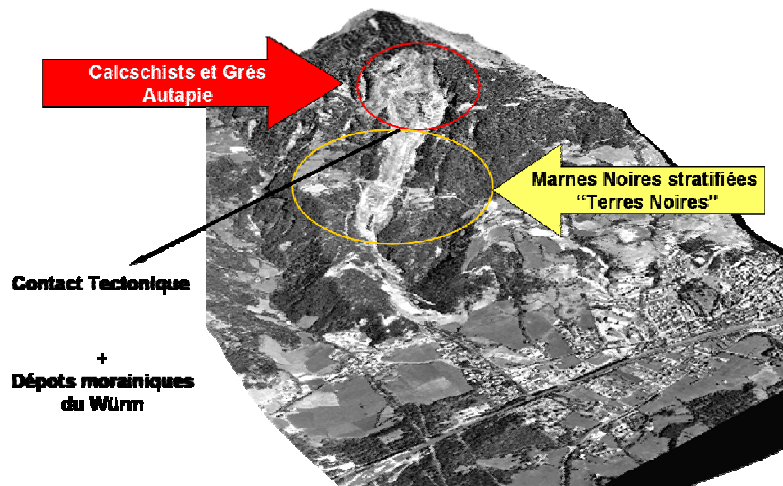
Contraintes géométriques d’application de l’InSAR (ERS) dans les Alpes Françaises

Autre limitation de l’utilisation de l’interférométrie à partir de 2 images : pour détecter le mouvement, on est obligé de supposer qu’il y a eu très peu de modification des états de surface, ce qui n’est évidemment pas le cas dans les zones couvertes de végétation.

Globalement, les couleurs données à l'interférogramme sont uniformes quand le signal est interprétable. Par exemple, le signal enregistré à 1 jour d'intervalle donne une image tout à fait exploitable, tandis que dès qu'on écarte l'intervalle temporel (par exemple 35 jours), certaines zones deviennent difficiles à détecter et que, sur 6 mois, il n'y a plus aucune possibilité d'obtenir du signal dans les zones végétalisées (cf. interférogrammes ci-contre). Cette utilisation est très intéressante, mais seulement dans des cas ponctuels.



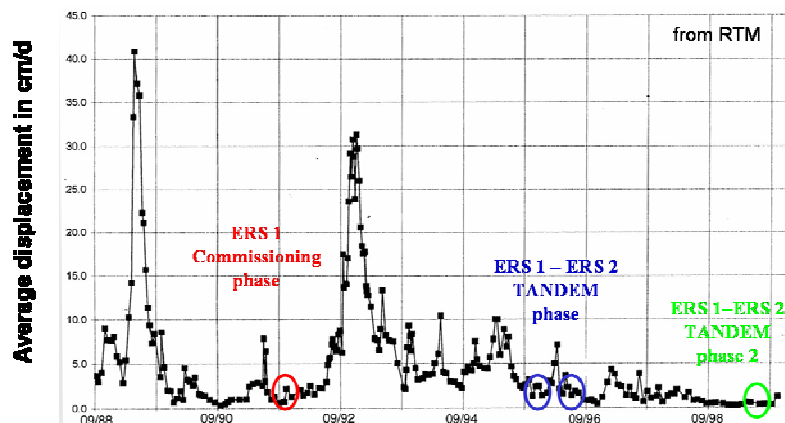
Changements d'état de surface



Exemple : glissement de la Valette dans les marnes noires stratifiées, à proximité du village de Barcelonnette (Alpes du Sud, France), qui mesure environ 1,5 km de long sur 400m de large.

Glissement rotationnel de la Valette en 1982 dans les schistes au niveau du contact tectonique

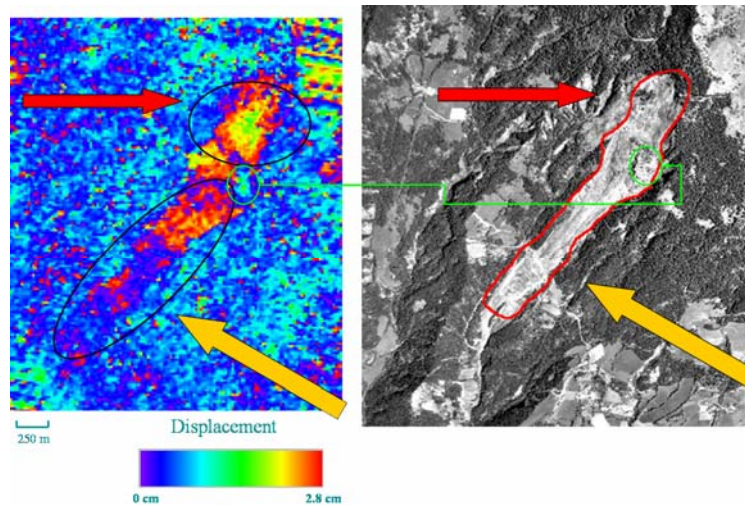
Ce glissement sommital rotationnel a entraîné la déstabilisation progressive de la partie inférieure du glissement, qui est animée d'un mouvement translationnel. Depuis 1982, le glissement « catastrophique » de la partie supérieure s'est transformé en glissement continu et connaît une vitesse moyenne de déplacement de l'ordre de 1 cm/jour (cf. graphique ci-dessous), avec des crises d'accélération, comme l'illustre la carte de déplacement journalier d'un point situé sur ce glissement depuis 1988 (ci-dessous), élaborée grâce à des acquisitions satellites très rapprochées dans le temps.



Vitesse moyenne de déplacement du glissement de la Valette entre 1988 et 1998



Cette carte met en évidence les limites précises du glissement, ainsi que le champ de déplacement, qui montre des vitesses plus élevées dans la partie supérieure que dans sa partie inférieure, et une zone avec un point d'ancrage (cercle vert) où il n'y a pas de déplacement.



Caractérisation des déplacements pour des intervalles de temps court (1 jour)

L'avantage de cette technique est de permettre le suivi de l'évolution saisonnière du champ de déplacement (carte ci-dessous), à l'aide de prises de vue journalières tout au long de l'année. On observe que certaines zones sont plus ou moins actives en fonction de la période de l'année. L'intérêt de la télédétection est ici d'offrir une bonne couverture spatiale et une densité d'information qu'on n'aurait pas avec un seul point de mesure.

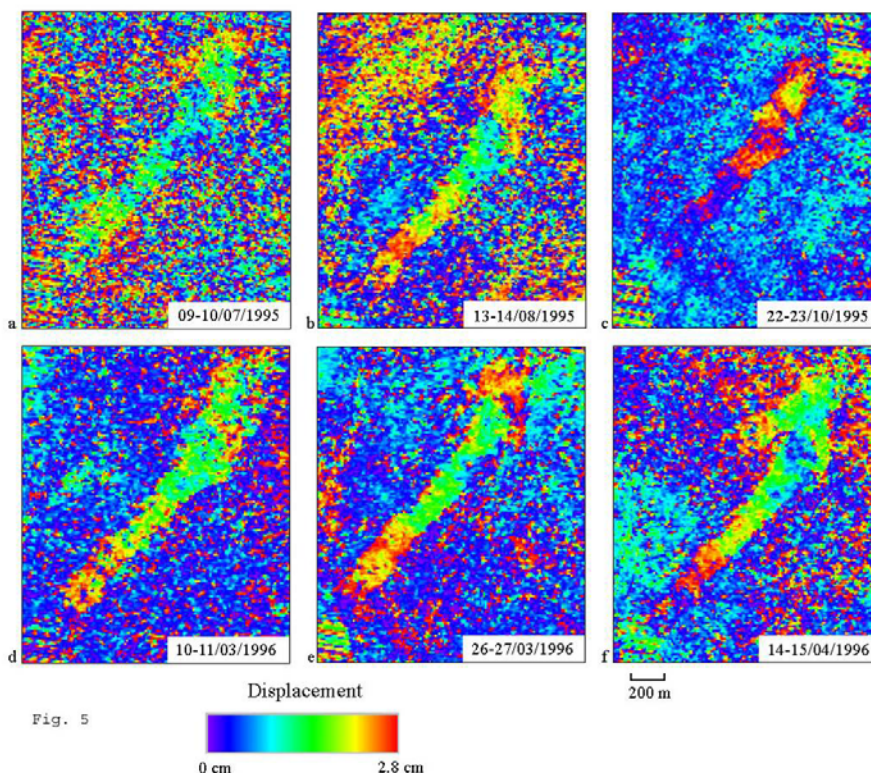
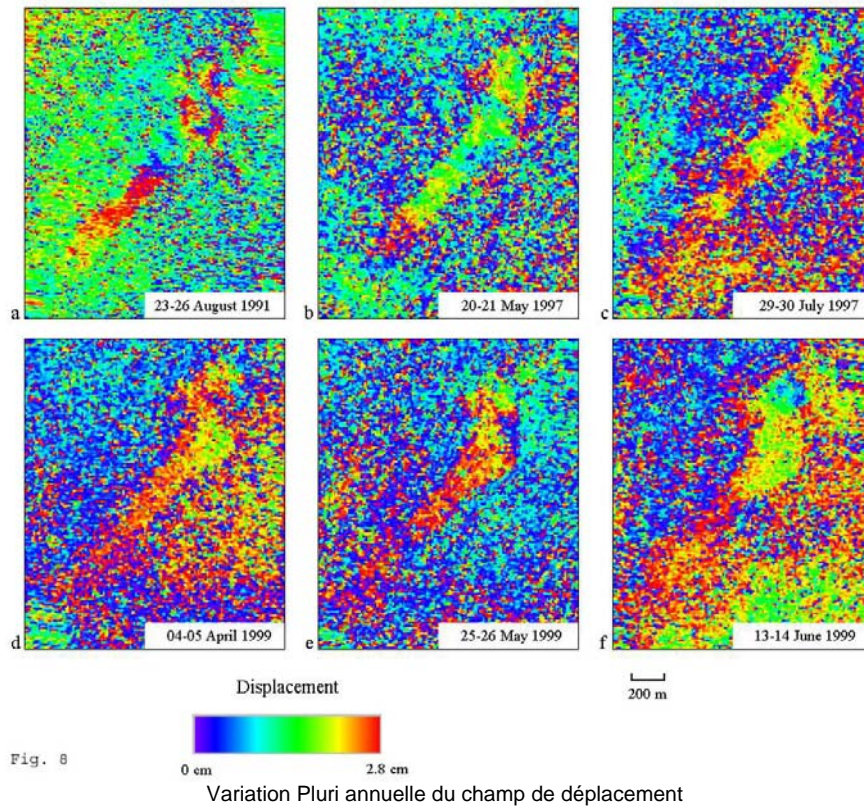


Fig. 5

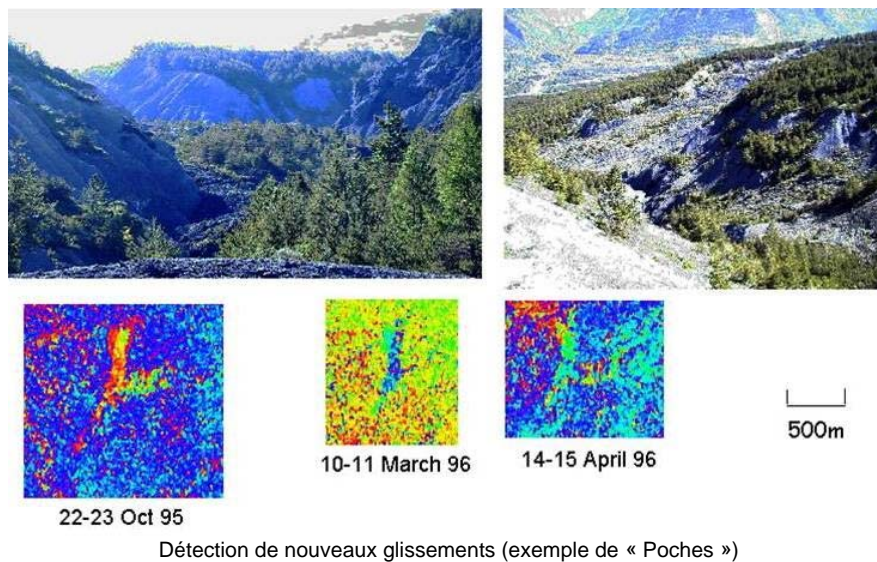
Variation saisonnière du champ de déplacement

On peut également suivre le glissement sur une durée de plusieurs années (ci-dessous), mais toujours sur une période précise, entre des dates données.





L'interférométrie permet de rechercher et d'étudier les glissements sur de vastes zones. Par exemple, toujours sur la même image que précédemment, un autre petit glissement de terrain a pu être identifié (images ci-dessous).



## Conclusions

Pour l'étude des mouvements de terrain en zones montagneuses, l'utilisation de l'interférométrie Radar comporte :

- des limitations fortes... :



- Contraintes Géométriques (en fonction de la pente, on ne peut pas forcément voir tous les glissements de terrain) ;
- Artefacts atmosphériques, les changements de conditions atmosphériques génèrent un système de franges artefact qui masquent le signal de déplacement ;
- Perte de cohérence ou d'information en raison des modifications de l'état de surface (on ne peut travailler sur des zones fortement végétalisées sauf en ayant recours à des acquisitions à haute fréquence temporelle, mais on ne peut étudier dans ce cas que des mouvements relativement rapides) ;
- Limitations liées aux archives et aux acquisitions (les images acquises par des satellites différents ne sont que très rarement combinables).

➤ ...mais des avantages énormes :

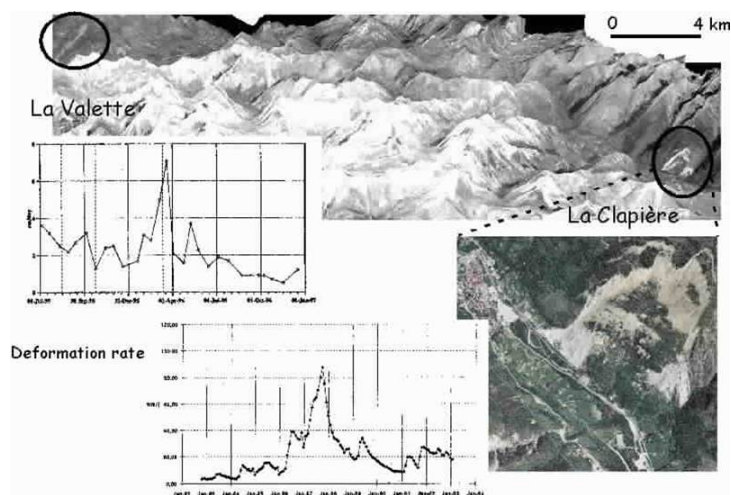
- Précision et densité des mesures, permettant d'obtenir des cartes de déplacement avec une précision d'ordre centimétrique et une résolution spatiale de 10-20m.
- Utilisation de jour comme de nuit, par tout type de tout temps ; on n'est pas soumis aux problèmes de couverture nuageuse.

➤ Les solutions pour palier à ces limitations :

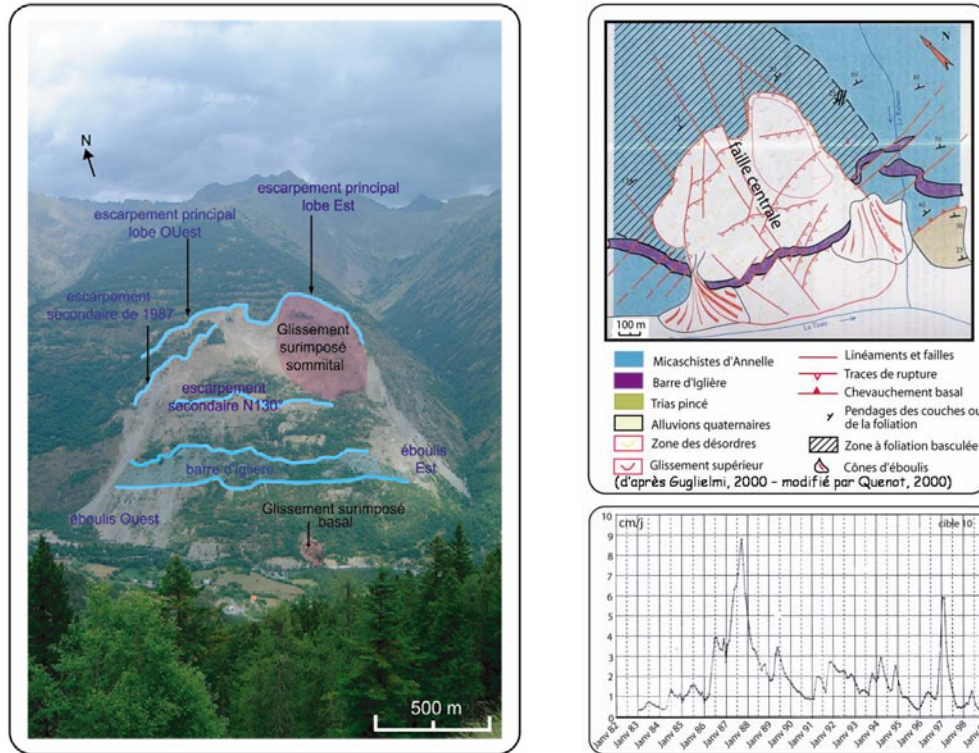
- Réflecteurs permanents. Pour la majorité des mouvements gravitaires, cette technique doit encore faire ses preuves, car elle présente de fortes contraintes d'utilisation : zone de faible cohérence les plus limitées possibles et utilisation impossible avec une forte variabilité spatiale et temporelle des mouvements.
- Interférométrie depuis le Sol (LISA) à l'aide d'un capteur radar, face au glissement. Cette technique revêt un fort potentiel, mais le système est encore très onéreux et les traitements complexes.

### Capteurs optiques et corrélation optique

Jusque dans les années 1999, on ne pouvait pas utiliser d'image de télédétection pour caractériser les mouvements gravitaires, parce que la résolution des images satellites de l'époque était de l'ordre de la dizaine de mètres, ne permettant que d'observer de loin les glissements de terrain les plus importants. L'échelle à laquelle il faut travailler pour la majorité des glissements de terrain étant métrique ou sub-métrique, on utilisait principalement des photographies aériennes. Depuis quelques années, cette situation a évolué et les capteurs des satellites actuels offrent désormais une précision métrique.



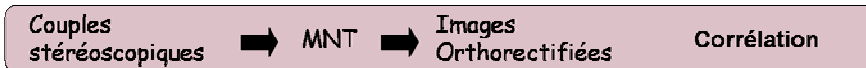
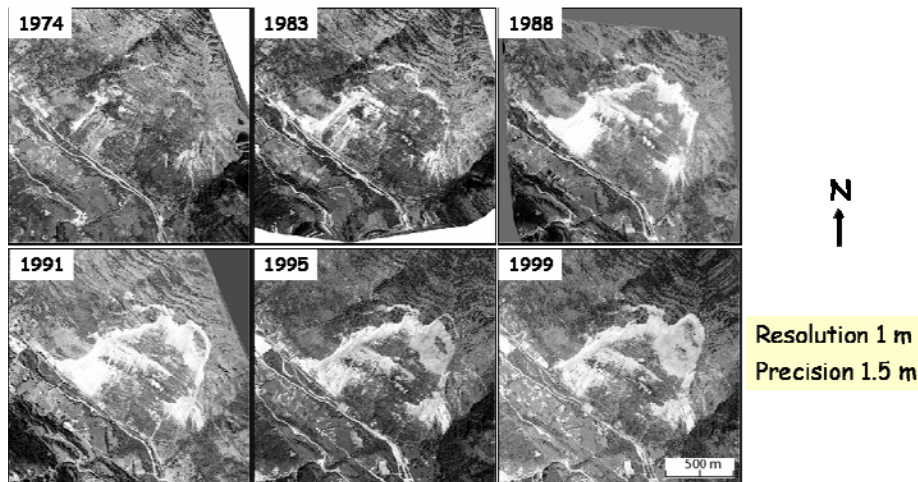
Par exemple, sur le glissement de la Clapière, qui mesure environ 1 km de haut par 1 km de large, avec des vitesses de déplacement de l'ordre du centimètre par jour, avec là aussi des crises d'accélération, (figure ci-contre), on dispose de clichés depuis les années 1950 avec une répétitivité de l'ordre de 5 à 10 ans. On a en effet la chance d'avoir en France une archive aérienne extrêmement conséquente.



Le glissement de la Clapière (Alpes Maritimes, PACA)

Principe de corrélation d'images

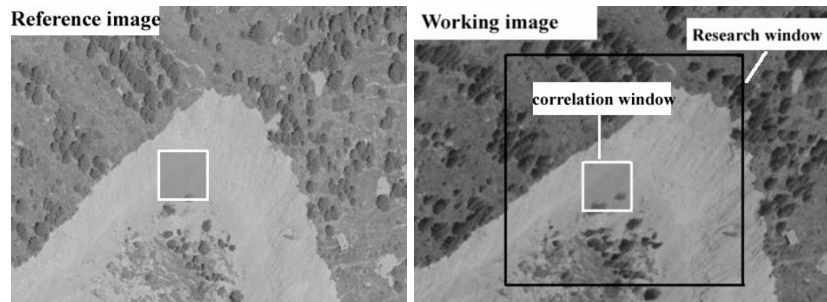
A partir de ces séries d'images (ci-dessous), on calcule des Modèles Numériques de Terrain (MNT) par photogrammétrie, grâce auxquels les clichés sont ensuite orthorectifiés (corrections géométriques de l'image projetée en fonction du relief), avant de corréler les images entre elles. Ces corrélations consistent à essayer de retrouver les mêmes objets sur les différentes photographies de façon automatique.



Images aériennes

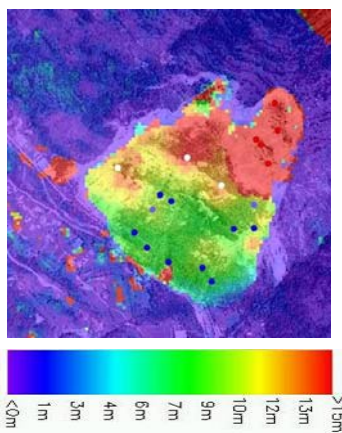
A partir de deux images prises à des instants différents et une fois le décalage repéré sur ces objets (voir figure suivante), l'opération est répétée sur tous les points de l'image, ce qui permet d'obtenir le décalage de l'ensemble des points entre les deux dates et de produire des cartes d'amplitude du déplacement (valeur du déplacement de chacun des pixels).



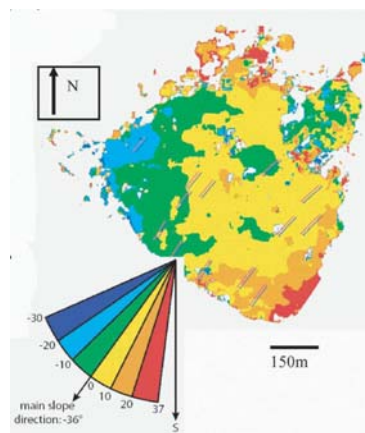


Principe de corrélation d'images

Sur l'exemple du glissement de la Clapière, la carte d'amplitude (figure ci-après) met en évidence une variabilité assez importante du mouvement entre 1995 et 1999 avec des zones sans mouvement dans la partie extérieure (en violet) opposées à des zones en mouvements à l'intérieur du glissement, montrant des vitesses plus importantes dans sa partie supérieure (en rouge) que dans sa partie inférieure (en vert).

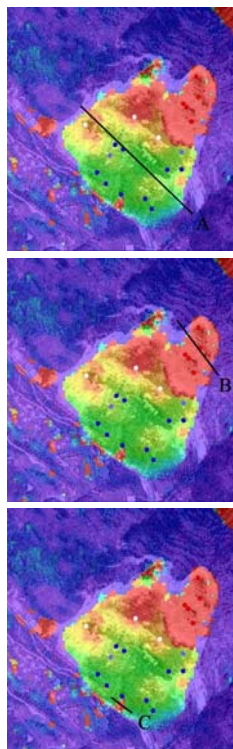


Carte d'amplitude (1995-1999)

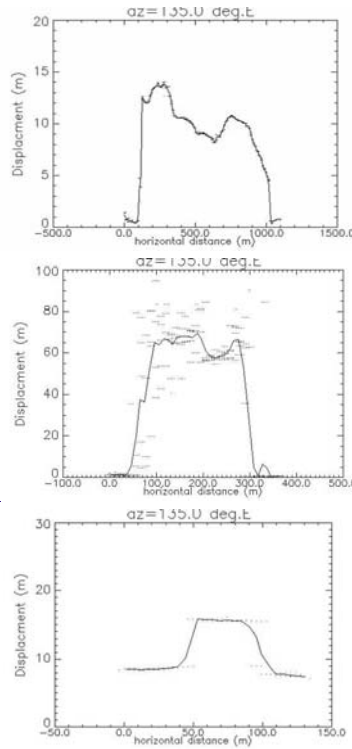


Carte de direction

Cette carte des déplacements peut être aussi utilisée pour mesurer l'orientation du déplacement en tout point de l'image (à droite). On voit une variabilité forte vers le bas du glissement, où un évasement est lié au transfert de matière dans la partie basse.



Cartes et profils d'amplitude des déplacements selon 3 profils transversaux au glissement de la Clapière

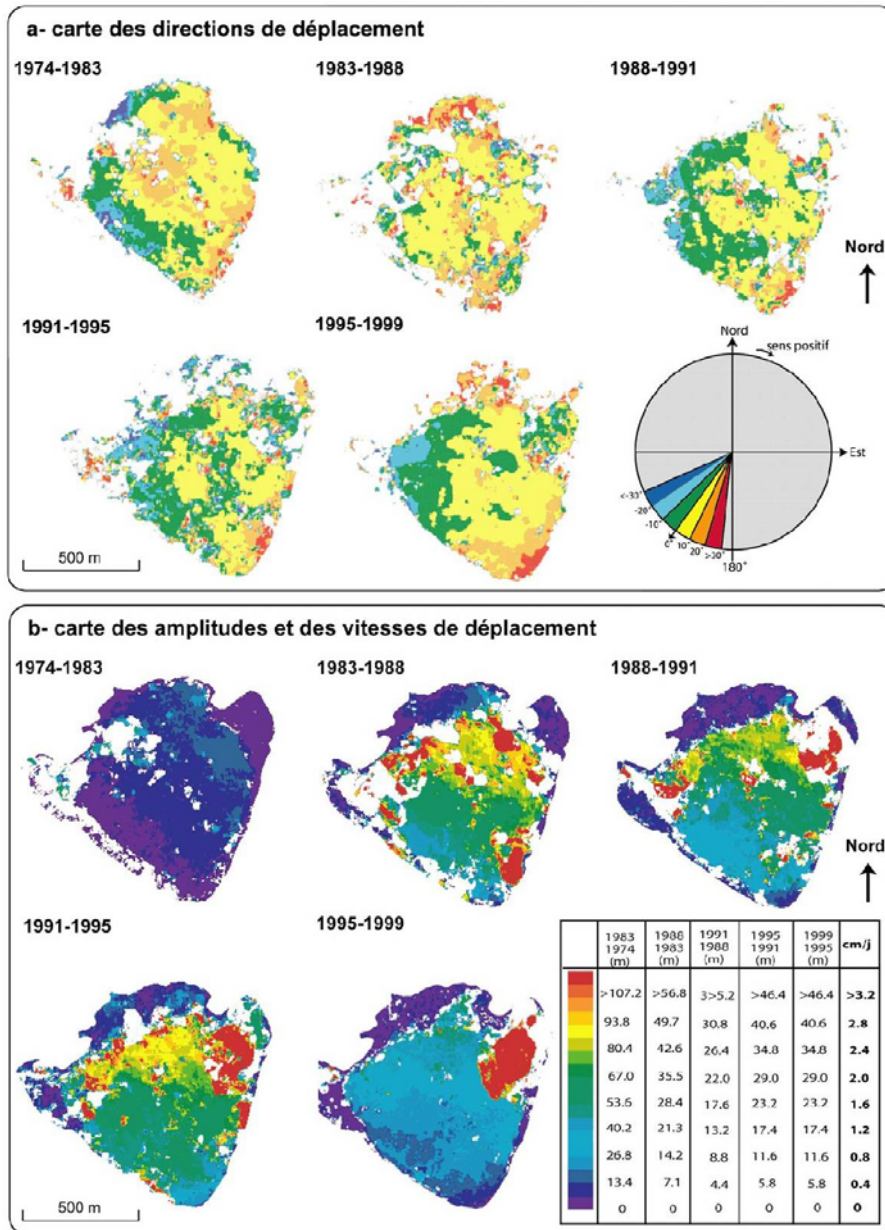


En faisant un profil, on obtient les valeurs du déplacement le long d'un segment. L'intérêt de cette technique est de pouvoir caractériser la variabilité spatiale des déplacements de surface, avec la résolution de l'image aérienne, soit tous les mètres.

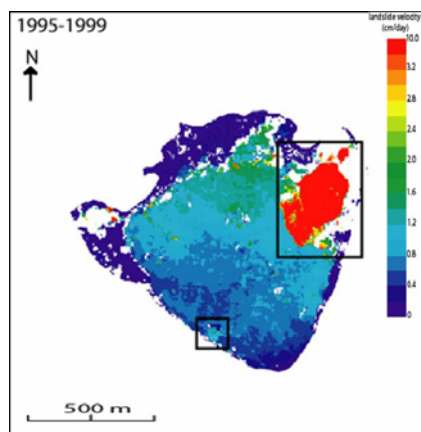
Dans le cas de la Clapière, les mouvements sont compris entre 0 et 80 m de déplacement (figure ci-contre). Dans la partie supérieure du glissement, on détecte ainsi des mouvements supérieurs à 80 m entre les deux dates. Dans ce cas, le signal est fortement bruité en raison des déformations internes du glissement.

L'intérêt de cette technique est d'offrir une très bonne résolution. Par exemple, dans la partie basse du glissement de la Clapière, on a pu identifier un petit glissement superficiel surimposé, dont la vitesse se superpose à la vitesse du mouvement global du glissement (de l'ordre de 10 m entre les deux dates).

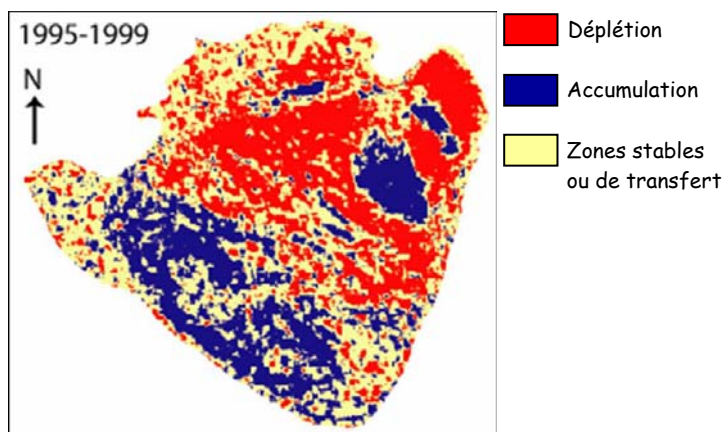
L'utilisation de cartes d'amplitude sur toute une série d'images permet d'obtenir des cartes de la variabilité des amplitudes et des vitesses au cours du temps (figure ci-dessous).



Carte des directions de déplacement + vitesse et amplitude



Carte de déplacements



Carte de différences d'altitudes



De plus, la combinaison de plusieurs MNT permet d’obtenir la variation verticale du mouvement (cf. carte des différences d’altitude, ci-dessus). En la combinant avec la variation horizontale, on obtient le champ de déplacement 3D.

Le problème est que ces images aériennes ne sont disponibles que tous les cinq ans et qu’il faudrait avoir des acquisitions plus rapprochées. Pour le surmonter, on peut combiner une photographie aérienne avec des images satellites de résolutions similaires (d’ordre métrique, par exemple des images QuickBird, ci-dessous).

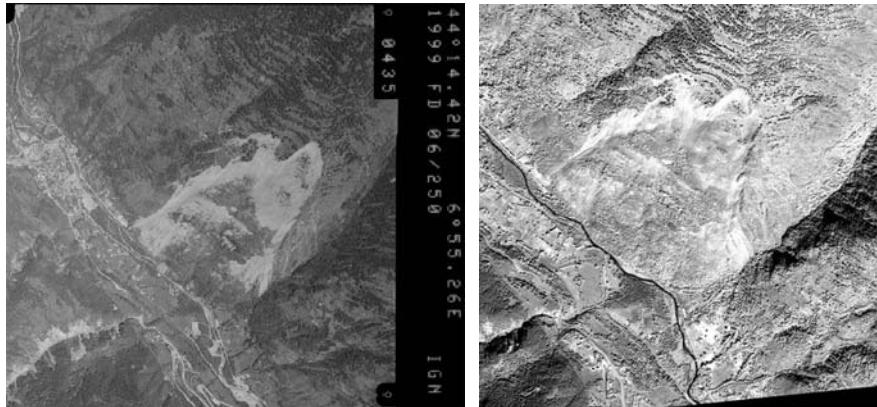
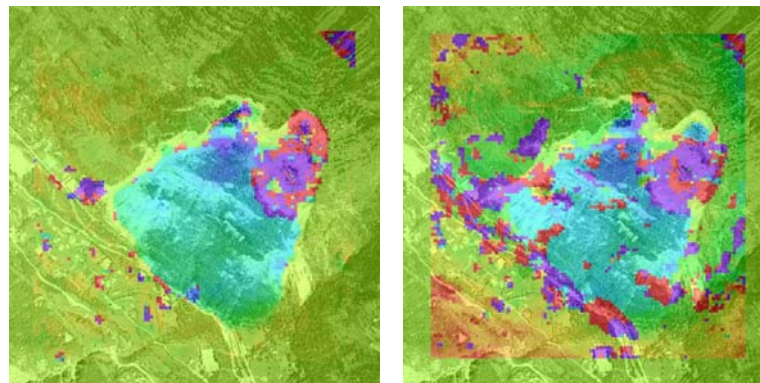


Image aérienne Juillet 1999

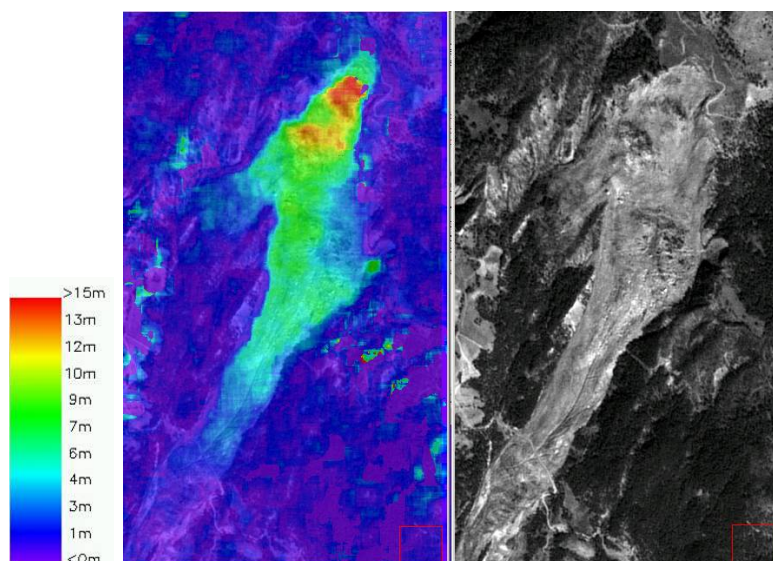
Image QuickBird Sept 2003

On peut alors faire de la combinaison d’images multi-capteurs et obtenir des cartes de déplacement de la même façon que précédemment (ci-dessous).



IGN-99 / IGN-95

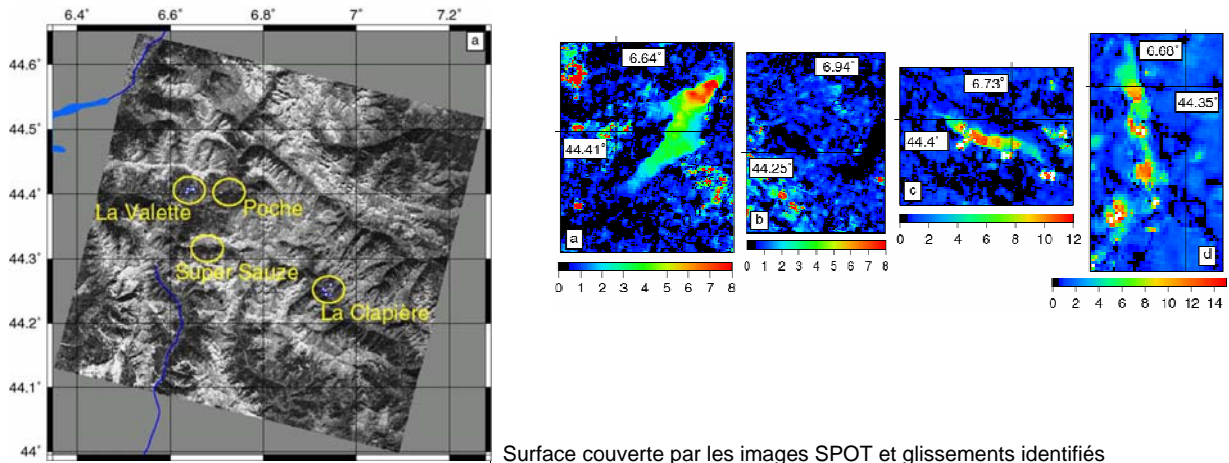
QuickBird 2003/ IGN-99



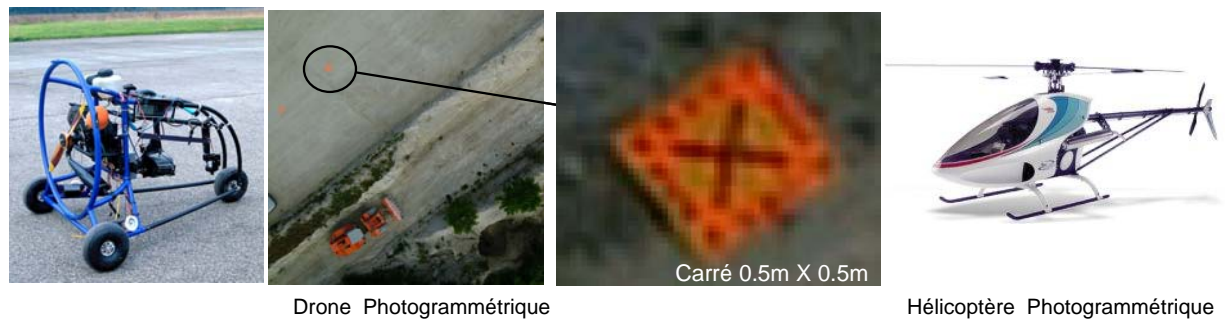
Sur l’exemple du glissement de la Valette (vitesse de 1 cm/jour), cette technique a été appliquée avec des images SPOT-5 et l’on obtient des images et des cartes de déplacement (ci-contre).

Vitesses de déplacement (à gauche) et image (à droite) du glissement de la Valette

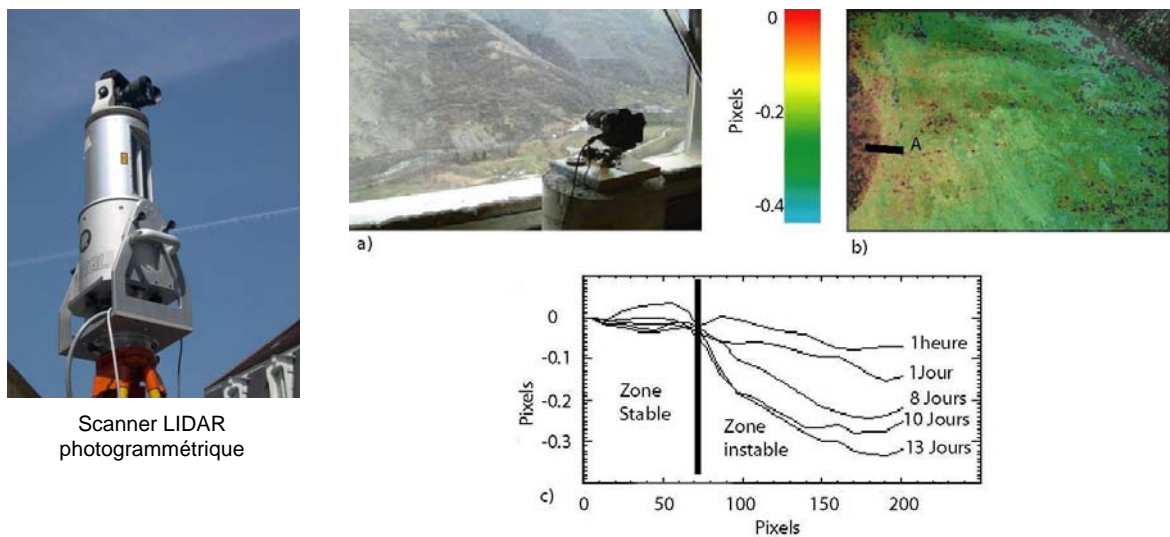
L'avantage des images satellites est de couvrir des surfaces importantes. Dans la zone de 60×60 km couverte par les images SPOT, il y avait 4 glissements de terrain de grande ampleur détectables à cette échelle de travail (figure ci-dessous). Les acquisitions de ces capteurs sont espacées de 28 jours.



Pour augmenter cette fréquence d'acquisition, on peut utiliser des capteurs type drone ou hélicoptère photogrammétrique, qui permettent non seulement d'obtenir des images plus précises, mais aussi avec une répétitivité qu'on va pouvoir imposer de façon précise, en fonction de la dynamique et de la cinématique du glissement.



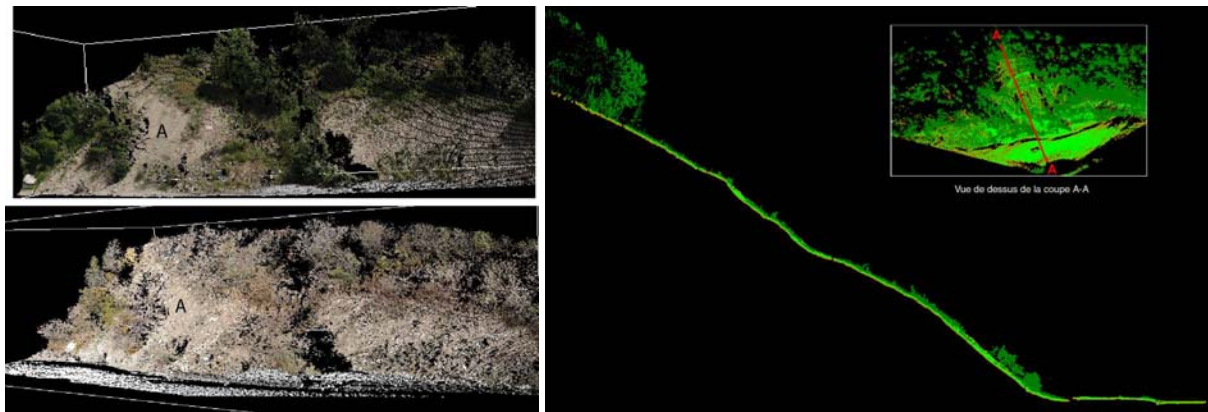
La corrélation optique peut également être utilisée pour faire des mesures en continu, en mettant un appareil photo devant le glissement avec des prises de vues enregistrées avec un pas de temps constant, ce qui permet de suivre l'évolution du glissement.



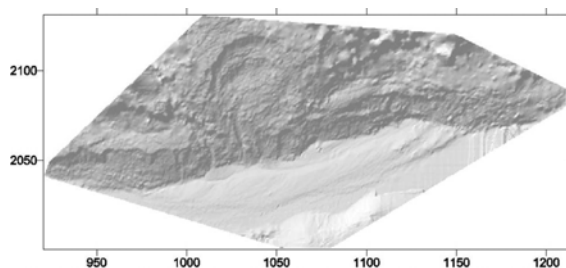
Corrélation de Photographies numériques in Situ



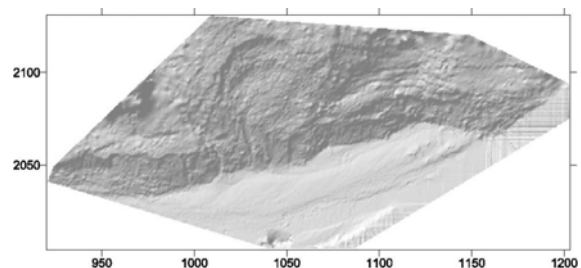
Une autre utilisation prometteuse de la corrélation d'images est son utilisation avec un scanner photogrammétrique. Par exemple, on a utilisé deux acquisitions prises en mai et octobre de la même année sur le petit glissement qui se trouve au pied du glissement de la Clapière pour visualiser et quantifier ses mouvements (figure ci-dessous). La difficulté était d'éliminer la végétation, ce qui se fait avec des algorithmes permettant de détecter uniquement le sol sous-jacent (à droite).



Deux acquisitions prises en mai et en octobre de la même année sur le glissement de la Clapière

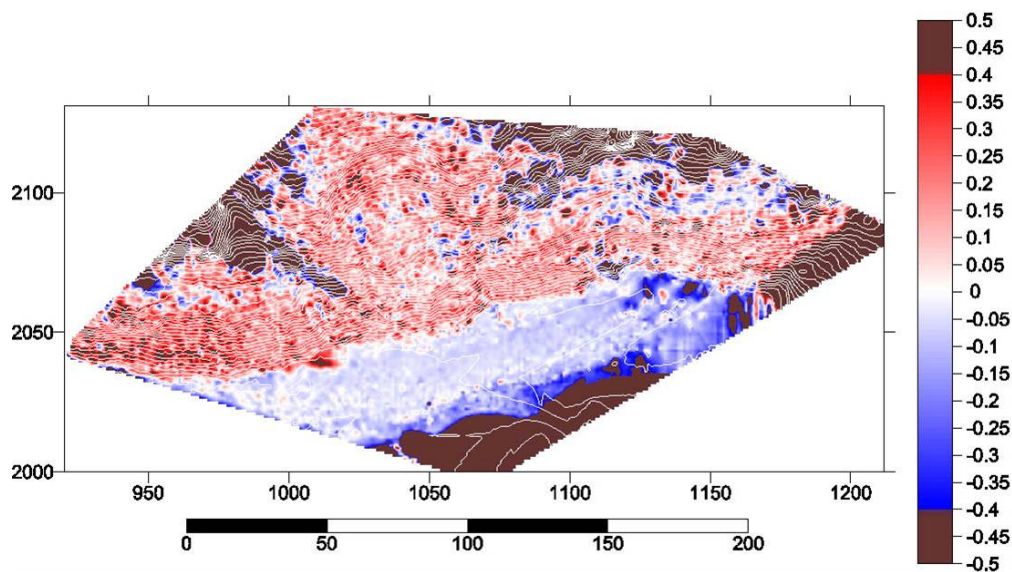


Octobre 2003



Octobre 2004

À l'aide d'un différentiel entre les deux MNT acquis au scanner photogrammétrique, on peut là encore quantifier les mouvements du terrain dans les 3 directions de l'espace.



Déplacements mesurés entre deux acquisitions au scanner LIDAR photogrammétrique

## **Conclusions générales**

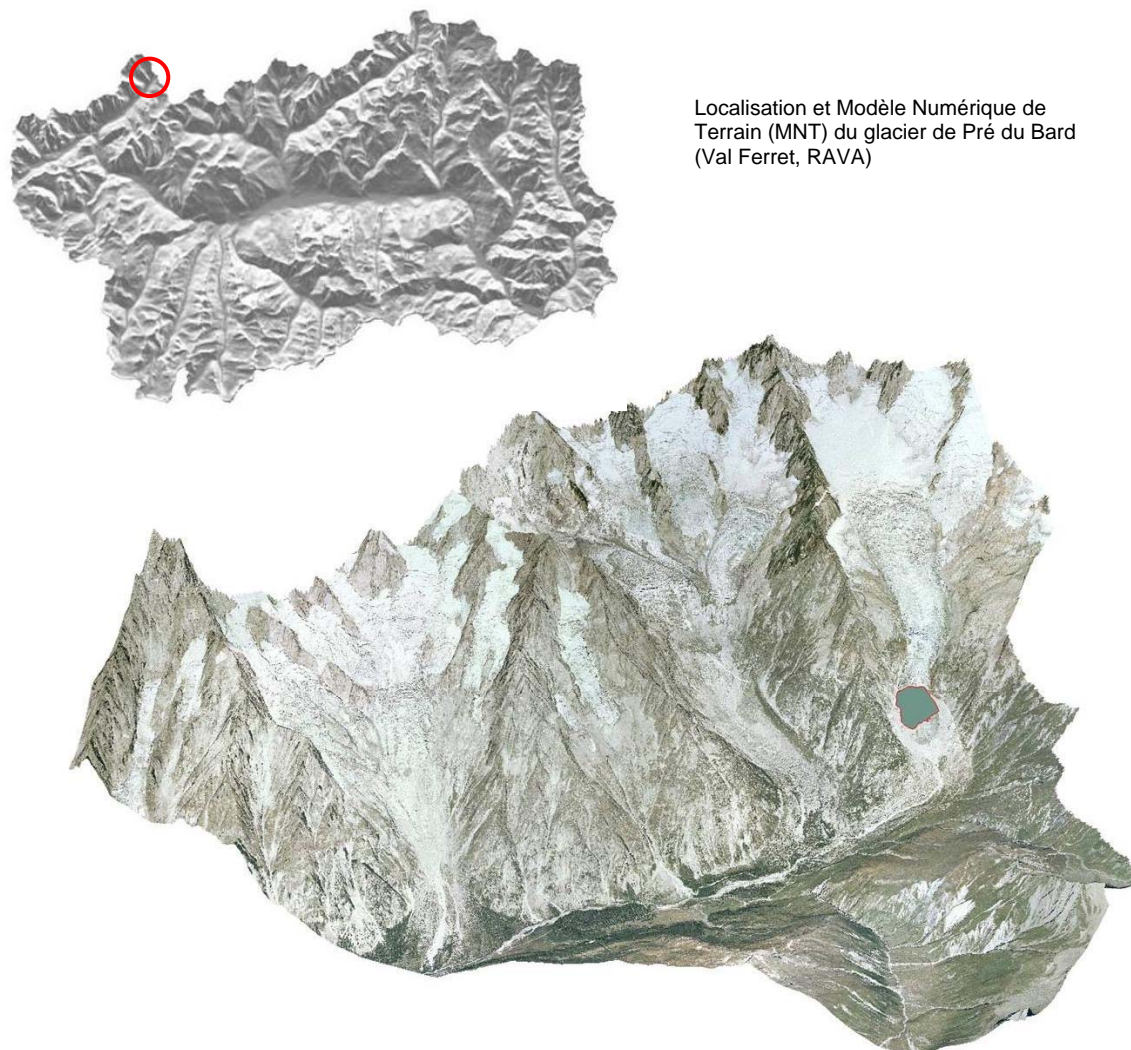
- La corrélation d'images optiques multi-sources est une méthode efficace pour obtenir les champs de déplacement de surface. Elle a l'avantage de pouvoir être utilisée sur différents types de supports.
- Les champs de déplacements 3D peuvent être obtenus en combinant corrélation et MNT diachroniques => information sur la géométrie 3D et son évolution temporelle.
- Lidar aérien et au sol : technique prometteuse (à valider).
- Limitations liées à la couverture nuageuse (capteur) dans le domaine optique et au brouillard. La répétitivité des acquisitions est dépendante de la planification des campagnes aériennes ou satellitaires. Les plateformes aériennes ou au sol sont plus souples d'utilisation.

On relève des complémentarités entre les différentes techniques présentées :

- Les techniques de télédétection sont complémentaires de toutes les mesures ponctuelles et continues, puisqu'elles permettent éventuellement de mieux préciser les zones sur lesquelles il faudrait focaliser ces mesures ;
- La complémentarité des techniques de corrélation optique et d'interférométrie provient du fait qu'elles ont des résolutions, des précisions et des archives complètement différentes ;
- Ces méthodes sont désormais opérationnelles mais ne sont adaptées qu'à la cinématique de certains mouvements gravitaires. Il reste encore à les valider dans différents contextes gravitaires ;



6.2.2. Application de technologies avancées pour l'évaluation des ressources hydriques glaciaires et des dynamiques évolutives relatives (projet LIDARTAVAL)  
Fabrizio DIOTRI



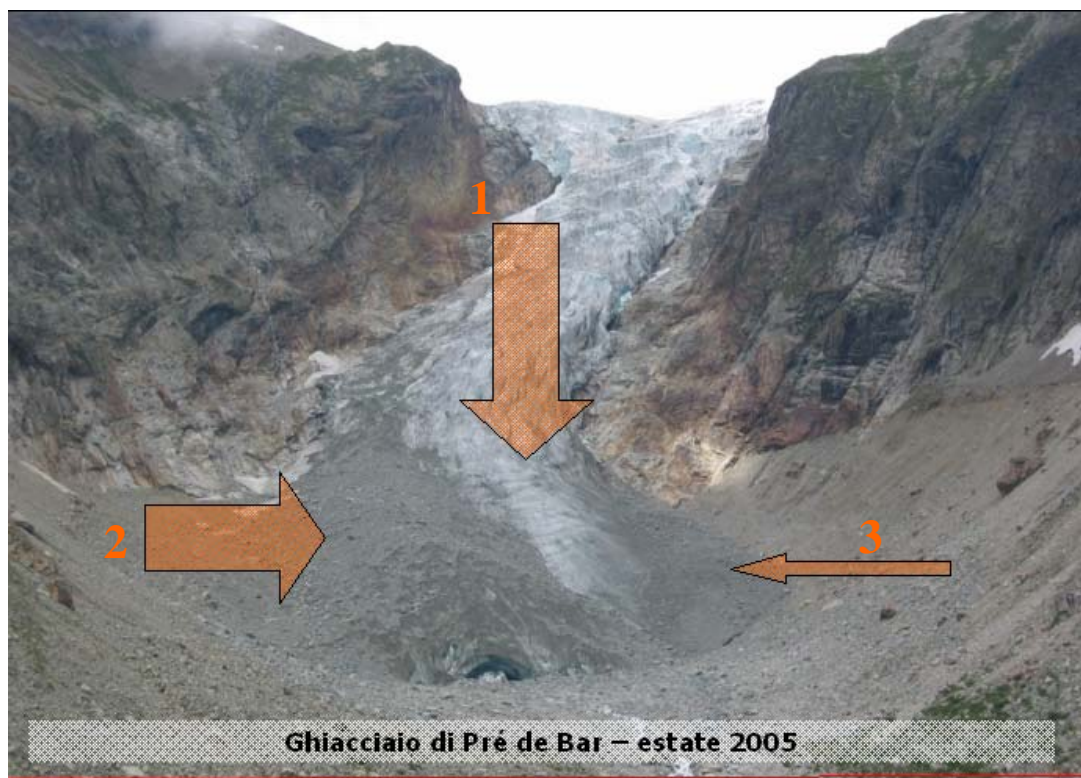
Localisation et Modèle Numérique de Terrain (MNT) du glacier de Pré du Bard (Val Ferret, RAVA)

L'étude concerne le glacier de Pré du Bard, situé au fond du Val Ferret, à la frontière du Valais. Les structures impliquées sont ARPA, FMS (Fondation Montagne Sûre), Università degli Studi di Milano, Politecnico di Torino ; les projets impliqués sont les suivants :

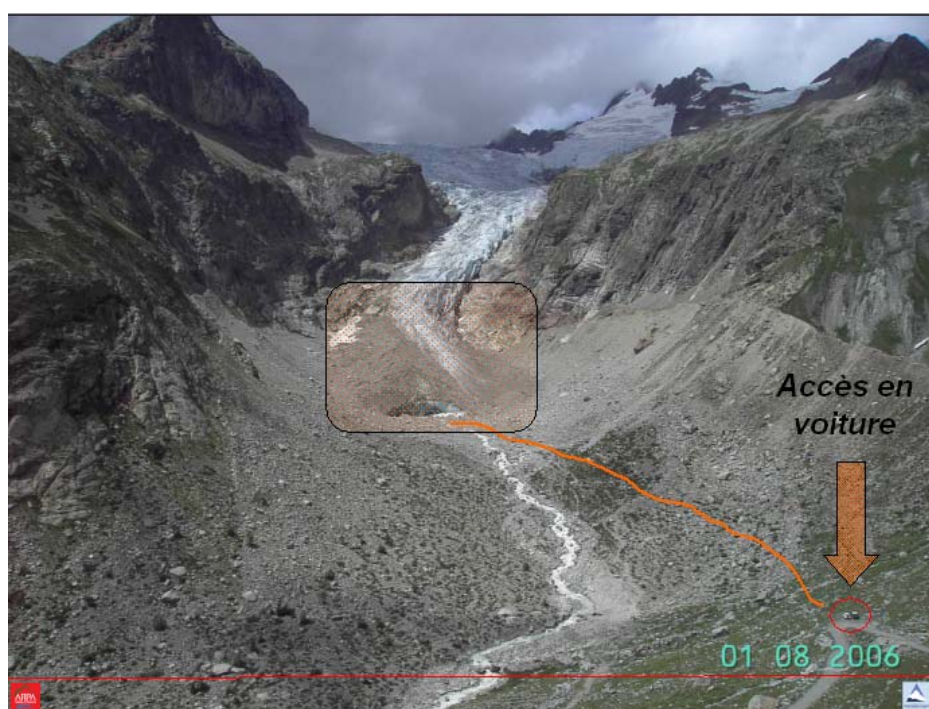
1. FMS : Comune de Courmayeur (+ POLITO)
  2. FMS et ARPA : projet LIDARdataVAL (Fondazione CRT)
  3. ARPA : Projet Interreg III A Alcotra n. 121 COGEVA – VAHSA (Serv. Aree Protette).
- Les activités ont démarré en 2005 et la fin est prévue pour 2007.

Raisons du choix du Pré du Bar comme site d'investigation :

1. Le glacier est « vallivo » : la portion terminale se trouve à basse altitude (environ 2050 m), d'où la possibilité de monitoring dynamique très rapide.
2. La langue terminale (photo ci-dessous) présente une zone de glace découverte (1), une zone couverte d'éboulis (2) et une couverte de fines (3), ce qui offre la possibilité d'investiguer le phénomène d'ablation différentielle.
3. Les aspects logistiques ne sont pas négligeables : l'accès est facile et relativement sûr.



Différentes zones de la langue terminale (voir texte)

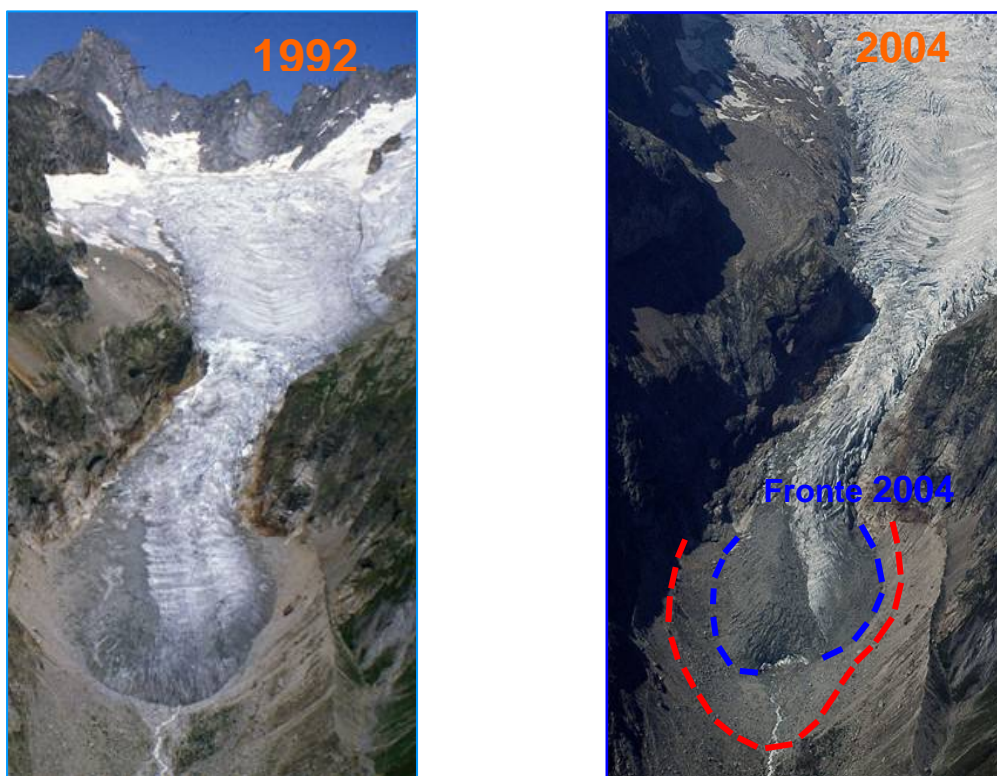


Accessibilité du site

Les activités de surveillance se concentrent seulement sur la langue terminale : les résultats et considérations présentés ici ne sont pas extrapolables à l'ensemble du corps du glacier. Dans le futur, une extension d'une partie des investigations au glacier tout entier est prévue.

Entre 1992 et 2004, le retrait du glacier s'est encore aggravé : les étés très chauds qui se sont succédé depuis quelques années ont induit des variations très rapides (photos ci-dessous).





### Activités réalisées :

En 2005

- deux campagnes LIDAR, en stade initial et final d'ablation ;
- installation de 19 poteaux d'ablation (8+4+7) sur de la glace et des portions couvertes d'éboulis, avec des mesures d'ablation environ tous les 15 jours ;

En 2006

- installation de 22 poteaux d'ablation (9+4+9) sur de la glace et des portions couvertes d'éboulis (repositionnement de poteaux de 2005), avec des mesures d'ablation environ tous les 7 jours ;
- installation de stations météo :
  - o capteurs de température au front et en partie supérieure de la langue pour avoir un gradient altitudinal ;
  - o individualisation de sites de mesures intensives sur la partie couverte d'éboulis.

Objectifs de ces mesures :

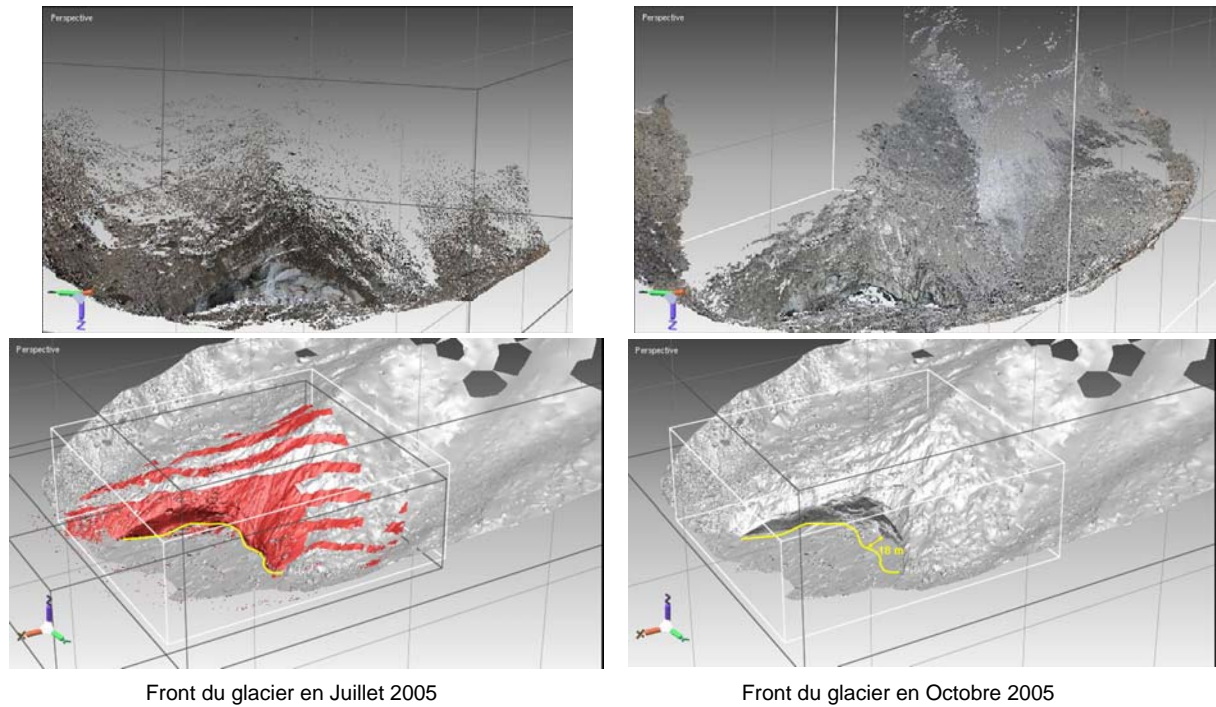
Campagnes Lidar : obtenir des informations détaillées des variations volumétriques au cours des différents stades d'ablation ;

Poteaux d'ablation : analyser l'ablation différentielle glace-couverture d'éboulis et analyser les évolutions temporelles des taux de fusion.

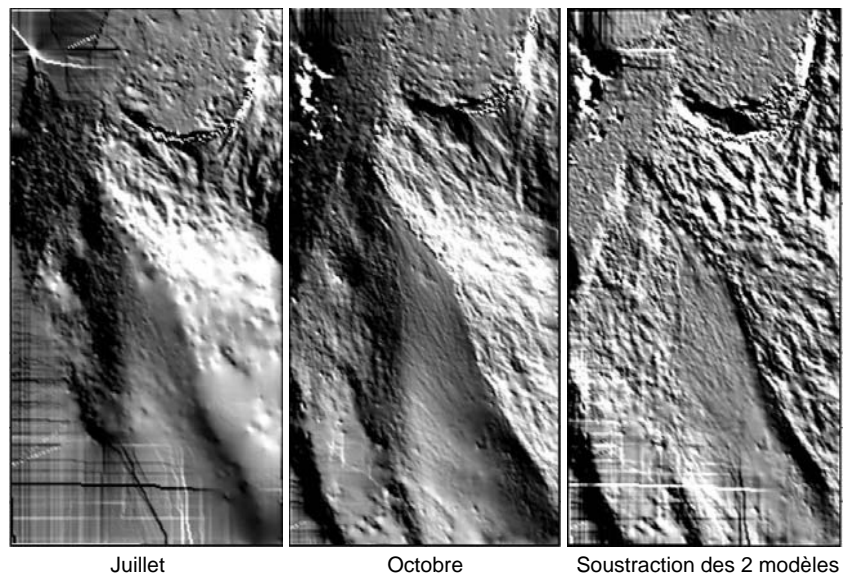
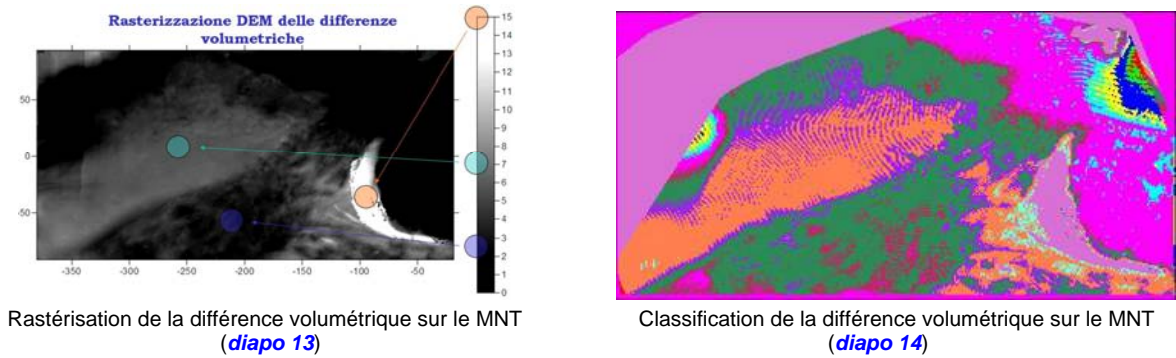
Stations météo : appréhender les propriétés thermiques de la couverture détritique et l'effet relatif d'isolation thermique exercé sur la glace + corréler les dynamiques de fusion avec l'évolution des principaux paramètres météorologiques.

Résultats scanner laser :

En seulement trois mois de suivi durant l'été 2005, le glacier a connu une évolution très rapide avec un recul de 18 m, comme l'illustrent les reconstitutions effectuées avec le modèle 3D (ci-dessous).



Sur la figure ci-dessus, chaque niveau de gris représente la variation d'épaisseur du glacier, qui a diminué de plus de 15 m par endroits. Là où la couverture de débris est importante, l'ablation ne représente en revanche qu'environ 2,5 m. Sur l'image classée des différences volumétriques (ci-dessous à droite), on retrouve ce phénomène d'ablation différentielle (parties découvertes en orange et parties couvertes en vert).





La soustraction des MNT de juillet et d’octobre (ci-dessus) illustre très bien le phénomène et permet de calculer des différences volumétriques, qui sont ensuite comparées aux valeurs obtenues avec la technique des poteaux ablatométriques :

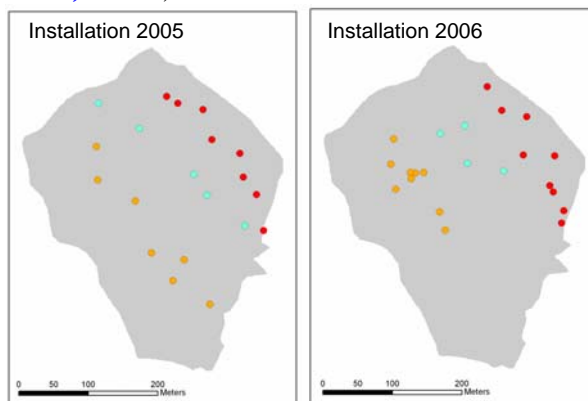
Volumes calculés avec le **scanner laser**, période du 05/08 au 14/10 2005, glace couverte/glace découverte : 225 077 m<sup>3</sup>.  
 Volumes calculés avec les **poteaux d’ablation**, période du 05/08 au 03/09 2005, glace couverte/glace découverte: 203 366 m<sup>3</sup>.

L’ordre de grandeur des deux résultats est le même (la période d’observation étant un peu plus longue pour le scan laser). La technique des poteaux d’ablation fournit donc des valeurs assez fiables.

Installation des poteaux d’ablation (photos *diapos 18, 19 20*) :

Installation en 2005 de 19 poteaux à des périodes différentes (ci-contre):

- distribution homogène sur les trois portions de la langue ;
- distribution selon un gradient altitudinale
- distribution selon une gamme de variation de l’épaisseur des dépôts de couverture.

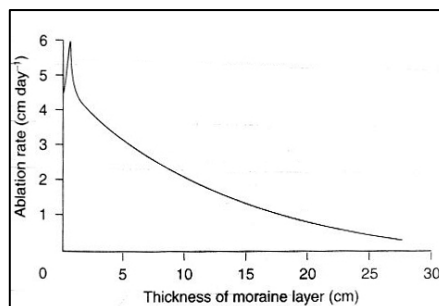


Installation en 2006 de 22 poteaux (schéma de droite): les mesures de 2005 ont montré que la variabilité des taux de fusion est très étalée par la variation de l’épaisseur des dépôts. A une distribution homogène selon l’altitude on a préféré une distribution au hasard qui permet d’échantillonner une meilleure gamme d’épaisseur de la couverture détritique.

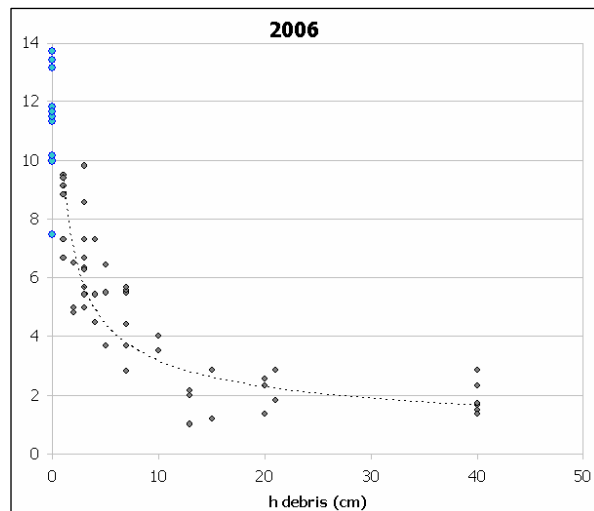
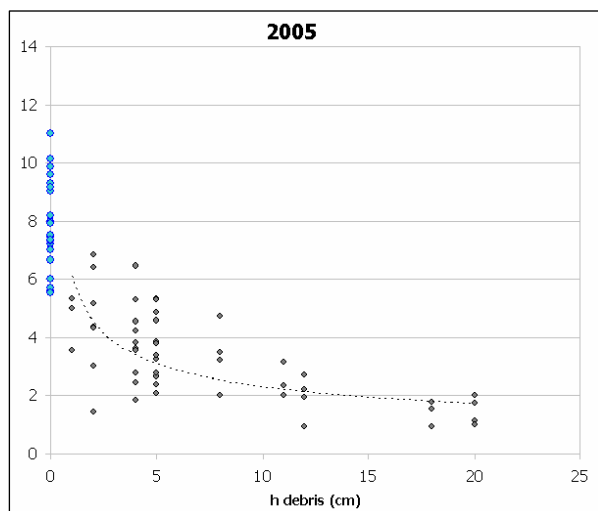
Résultats :

(1) Relation entre les taux de fusion et l’épaisseur de la couverture détritique :

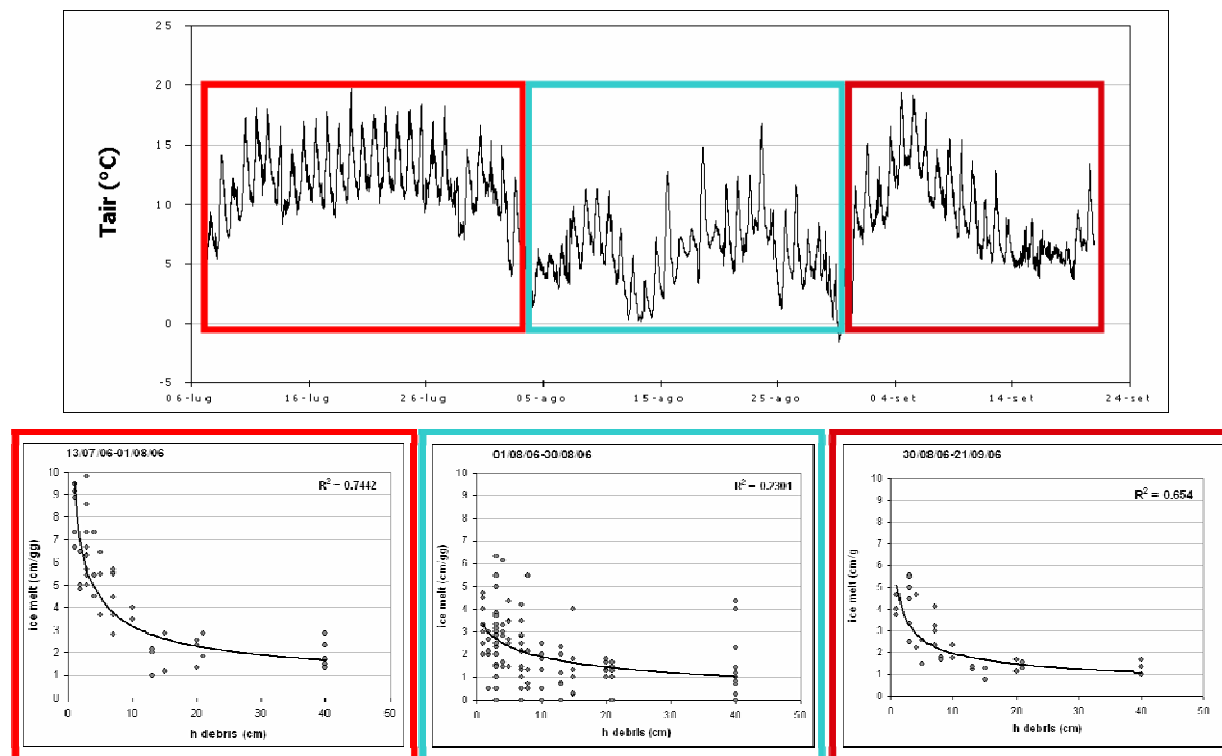
**Relation théorique** entre le taux d’ablation et l’épaisseur de la couverture détritique (d’après Benn & Evans, 1998 : *Glaciers and Glaciation*. Arnold, London, 734)



**Evolutions observées :**



Une couverture de débris d'1 cm protège déjà le glacier de l'ablation. Sur le graphique ci-dessus à gauche (poteaux installés selon une distribution régulière en 2005), on ne retrouve pas la corrélation prévue par la théorie, probablement du fait de la granulométrie des débris. En revanche, sur le graphique de droite (poteaux installés de façon plus dispersée en 2006), les résultats sont beaucoup plus proches de la relation théorique de Bern & Evans (1998).

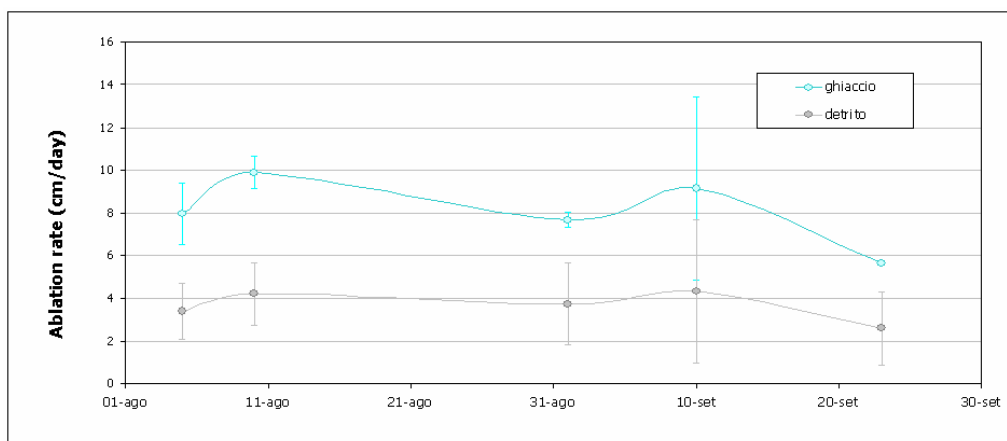


Evolution des taux d'ablation au cours de l'été 2006 en regard de la température de l'air

Sur la période du mois d'août, les taux de fusion sur glace et sur éboulis sont mal discriminés et la relation est nettement moins bonne qu'aux mois de juillet et de septembre. Cette absence de contraste marqué semble s'expliquer par une nette diminution de l'ablation liée à l'abaissement des températures.

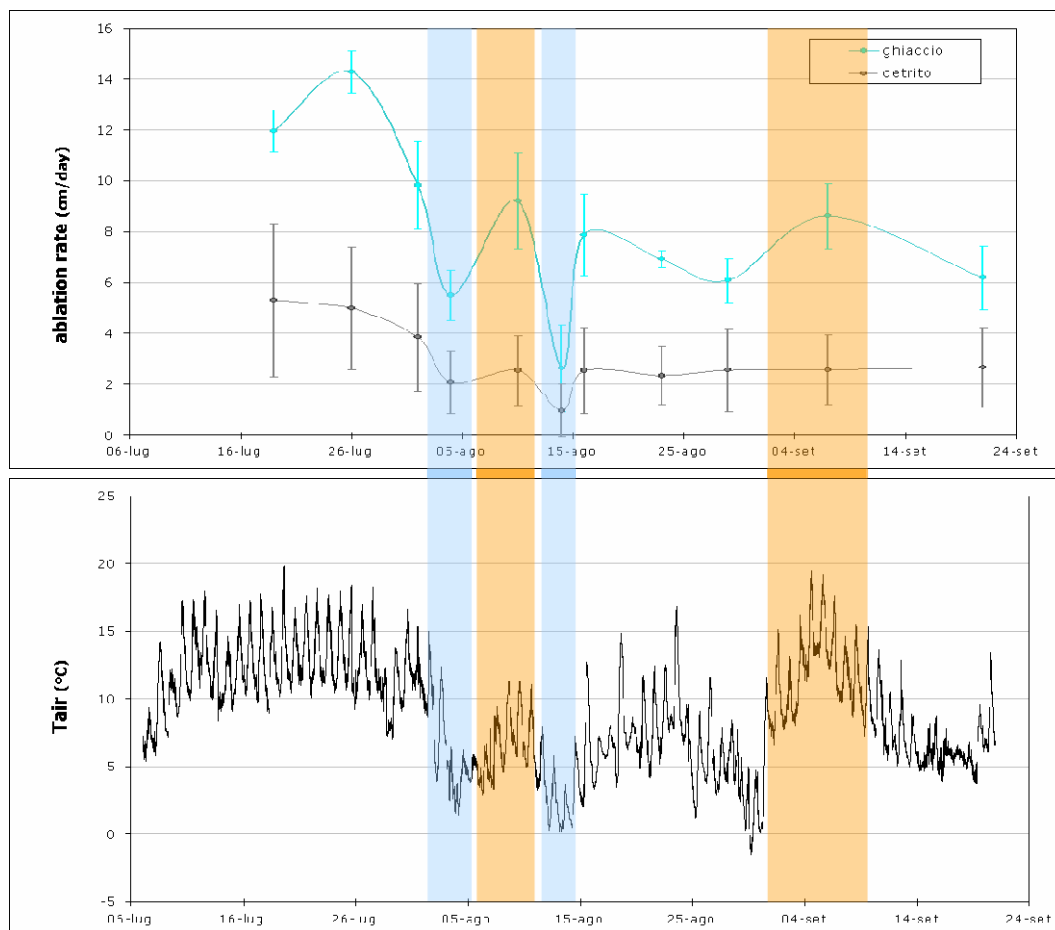
(2) Evolution temporelle des taux de fusion dans la période 2005 – 2006 :

En 2005 (ci-dessous), les taux d'ablation mesurés sur la glace découverte et sur les débris présentent un écart relativement constant, de l'ordre de 4 cm/jour.



Evolution des taux d'ablation sur glace et sur débris au cours de l'été 2005

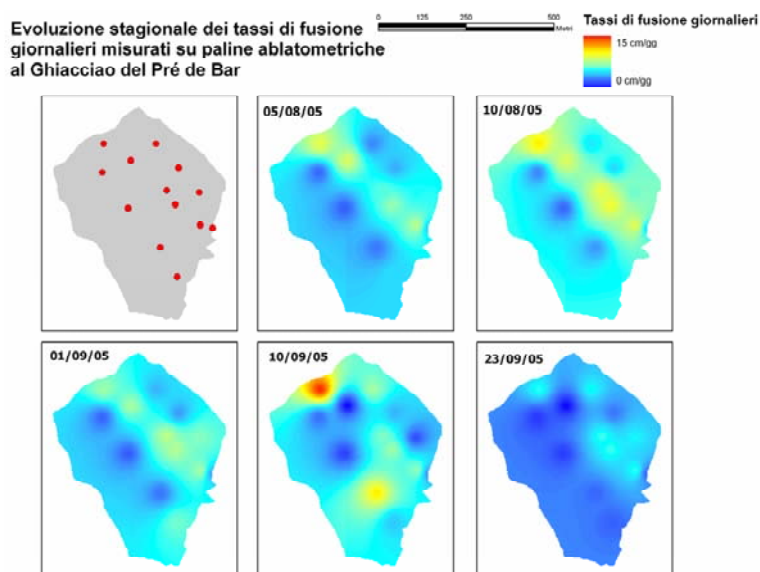
En 2006 (ci-dessous), la variabilité est plus forte, ce qui peut être lié à une quantité plus importante de données. Les premiers jours de septembre, les taux de fusion sont nettement inférieurs à ceux qui ont été enregistrés en juillet, malgré des températures aussi élevées (mais sur une période plus courte). Là aussi, lorsque les températures sont plus faibles, on observe un contraste moins prononcé entre les taux d’ablation sur glace découverte et sous débris.

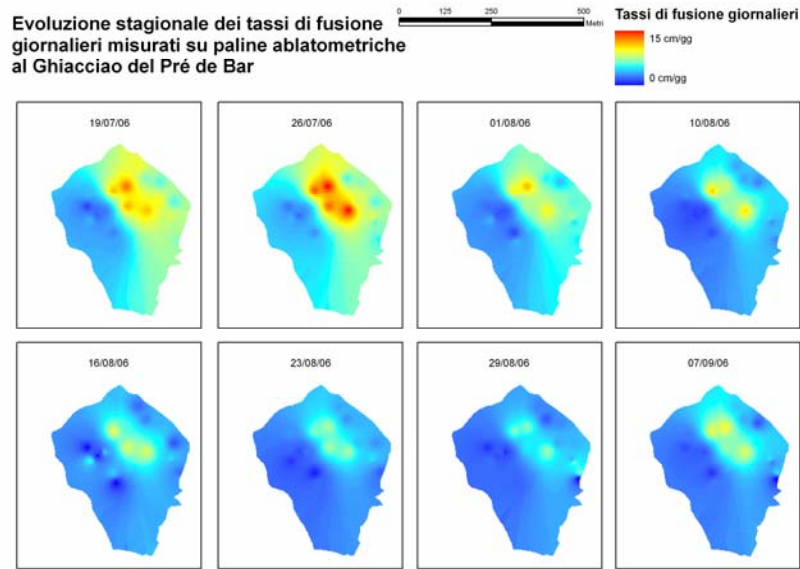


Evolution des taux d’ablation sur glace et sur débris ainsi que des températures au cours de l’été 2006

(3) Variation spatiale des taux de fusion ;

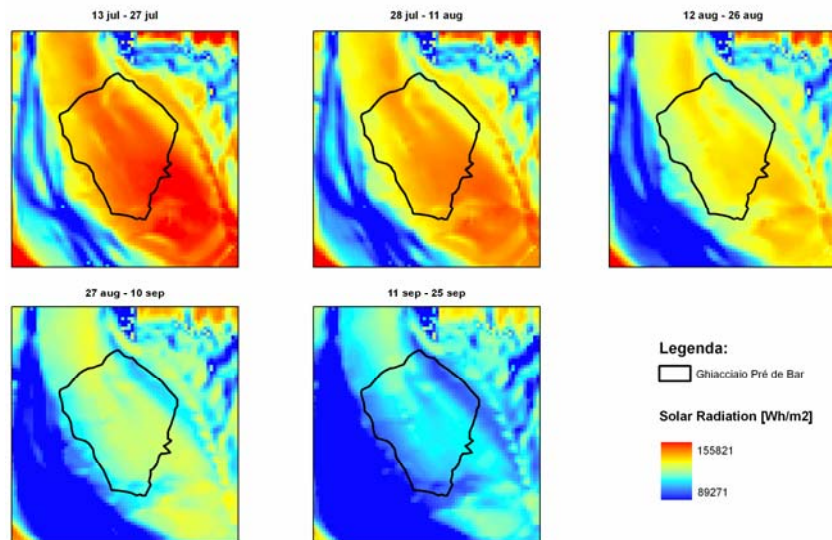
Les données ont été spatialisées par interpolation des taux de fusion journalier sur la période 2005-2006. Ces taux de fusion journaliers sont calculés avec la moyenne de la lecture périodique. L’interpolation est effectuée selon un algorithme non linéaire (IDW) des taux de fusion mesurés sur les seuls poteaux.





L’utilisation d’un modèle empirique basé sur les données météorologiques spatialisables (température et radiation solaire) combinée à l’exploitation de la relation notée entre les taux de fusion et l’épaisseur de dépôt peut fournir une possibilité pour disposer d’une information spatialisée des épaisseurs de débris, mais ce travail s’avère très difficile !

**POTENTIAL INCOMING SHORTWAVE RADIATION**



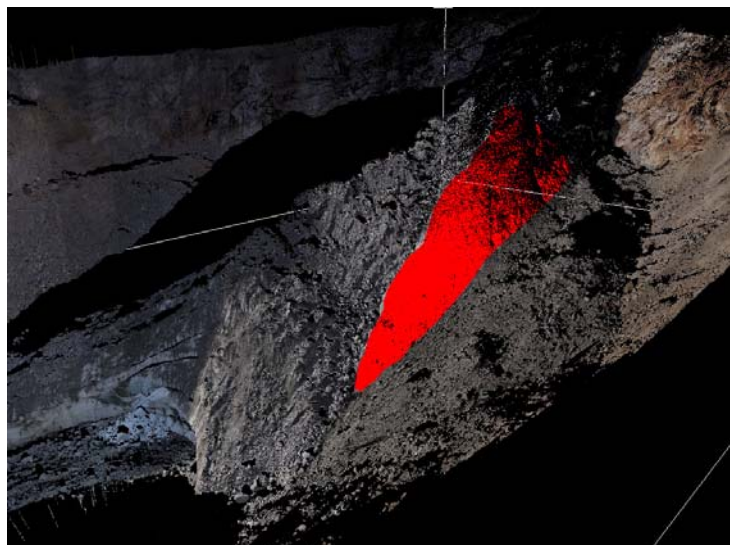
**(4) Quantification des volumes de glace perdus (2005)**

Superficie réelle de glace couverte : 10 200 m<sup>2</sup>.

Fusion cumulée (moyenne des valeurs mesurées sur les poteaux) du 05/08/05 au 23/09/05 : 4.20 m.

Volume de glace perdu sur la période : 42 500 m<sup>3</sup>.

Quantification des volumes de glace perdus à l’aide du MNT



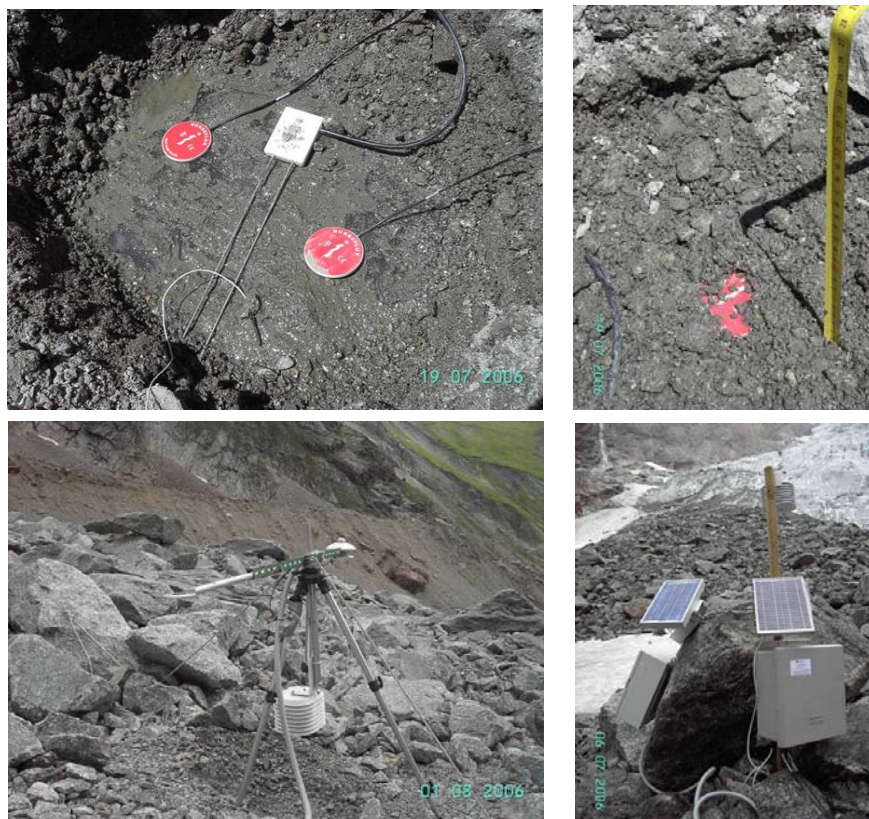


05/08/05-23/09/05	Fusione cum [m]	Superficie [m <sup>2</sup> ]	Volume [m <sup>3</sup> ]
Ghiaccio	4.17	10200	42520
Det_sx	2.31	21400	49514
Det_dx	1.61	69060	111332
TOT		100659	<b>203366</b>
06/07/06-21/09/06	Fusione cum [m]	Superficie [m <sup>2</sup> ]	Volume [m <sup>3</sup> ]
Ghiaccio	6.66	10200	67932
Det_sx	2.58	21400	55212
Det_dx	1.32	69060	91160
TOT		100659	<b>214303</b>

Quantification des volumes de glace perdus

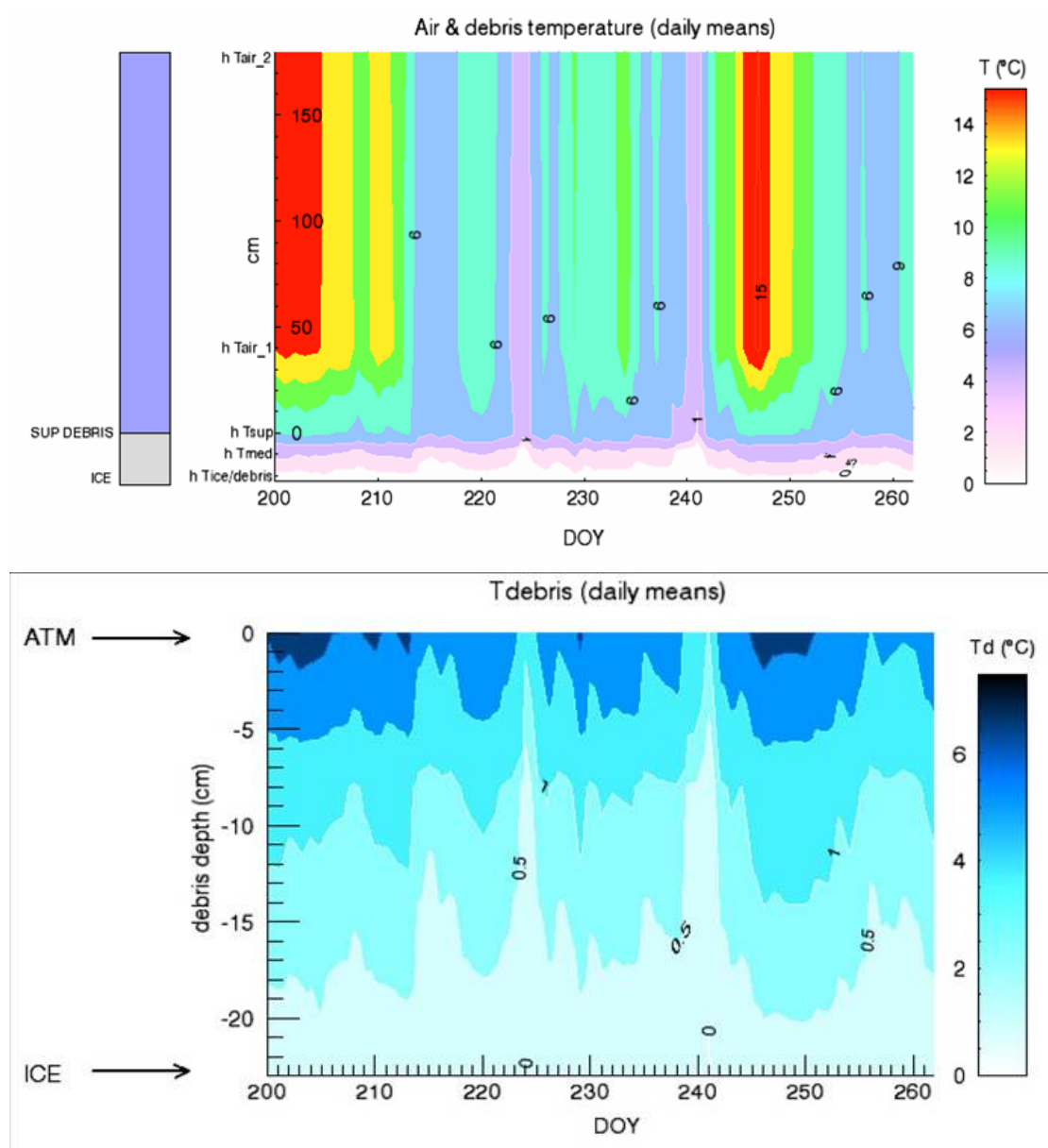
### Site de mesures intensives sur la langue détritique

Le but est d'étudier les propriétés thermiques de la couverture détritique et l'effet associé d'isolement thermique exercé sur la glace.



Paramètres mesurés :

- température de l'air et humidité relative à deux altitudes différentes (pour un gradient vertical) ;
- radiations solaires : radiation de l'onde courte incidente et réfléchie (albédo, [0,305 – 2,8  $\mu\text{m}$ ] et radiation nette [0,2 – 100  $\mu\text{m}$ ]) ;
- température de la couverture détritique à trois profondeurs différentes ;
- flux de chaleur à l'intérieur de la couverture détritique à 3 profondeurs différentes ;
- humidité relative à l'intérieur de la couverture détritique à 3 profondeurs (TDR).



### **Développements futurs et approfondissements :**

Fin de la campagne 2006 et traitement approfondi des données.

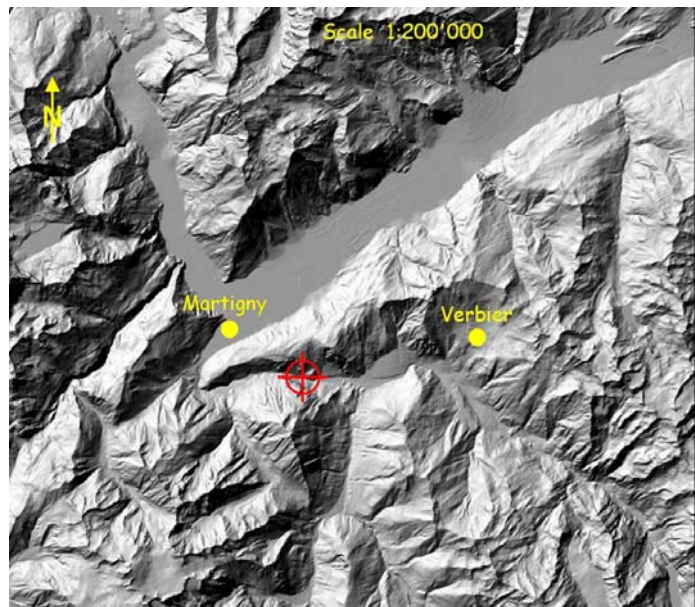
Poursuite des activités 2007 :

- Installation de 2 stations météo pour des mesures en parallèle dépôts / glacier ;
- Utilisation de capteurs de distance à ultrasons pour mesurer les taux d'ablation avec une meilleure fréquence temporelle ;
- Utilisation des données météo récoltées pour la validation des modèles (ex. modèles de radiation, modèles de fusion) ;
- Application des modèles de fusion (ex. grades - jours : nécessite une paramétrisation pour la couverture détritique) ;
- Application des méthodes d'analyse indirecte pour caractériser la température des dépôts (reprise IR).

### 6.2.3 3D modeling of geologic structures applied in rock fall hazard mitigation: the Trappistes case study, Valais, Switzerland

Raphaël MAYORAZ (CREALP - Canton du Valais)

R. Mayoraz présentait le cas de l'éboulement des Trappistes, auquel diverses technologies abordées dans le projet ont été appliquées. Ont également participé à ce travail Olivier Besson (Bureau d'ingénieurs Pascal Tissières, Martigny, Suisse) et Leandro Bornaz (Politecnico di Torino, Dipartimento di georisorse et territorio, Italie) qui a réalisé le Laser Scan.



Localisation de l'éboulement des Trappistes

Le site se trouve entre Martigny et Verbier, sur la route du Grand Saint Bernard, qui assure la liaison avec la Vallée d'Aoste. Cet axe de communication a une grande importance économique : entre 30 000 et 40 000 personnes sont présentes dans ce secteur à Pâques et à Noël. La route, la voie ferrée (en tunnel) et une conduite d'eau passent sous un éperon rocheux à Trappistes. Une galerie a été construite pour protéger la route des avalanches qui descendent du flanc sud (photo ci-dessous).



Eperon rocheux du site des Trappistes sur la route du Grand Saint Bernard



Lors de l'événement du 29 nov. 2003, environ 600 m<sup>3</sup> de l'éperon rocheux sont tombés sur la route, tuant un automobiliste qui passait dans la galerie (voir photos juste après l'accident : [diapos 4 à 7](#)).

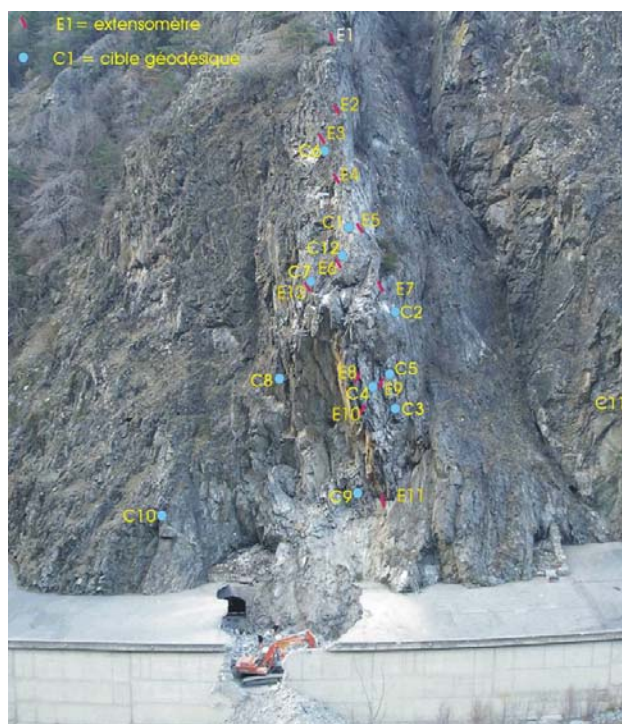


Effet de poinçonnement sur la galerie lors de l'éboulement du 29 nov. 2003

Le bloc principal (environ 100 m<sup>3</sup>) a coupé le béton de la galerie sur 4 m de haut, avec un effet de poinçonnement dans la structure (photos ci-dessus). Une vue de la zone de rupture met en évidence le contour de la niche d'arrachement ([diapo 7](#)).

#### Intervention d'urgence :

Une auscultation du site a été menée pour évaluer le risque de nouvelles chutes de blocs, afin de décider si l'on osait laisser les machines aller au-dessous pour rouvrir la route. Des points de mesures manuelles géodésiques et extensométriques ont été posés.



#### Système d'alarme automatique à deux niveaux :

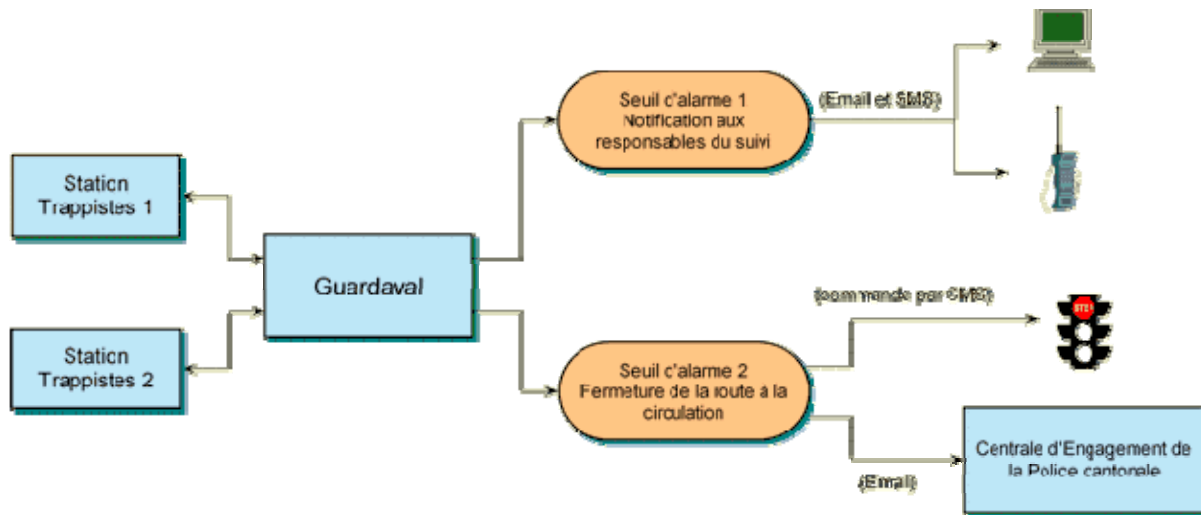
⇒ **Niveau 1 : Alerte** (valeur seuil = 0.4 mm/h.)

- Notification automatique par SMS et e-mail aux responsables chargés du suivi (géologue cantonal et gestionnaires des routes).

⇒ **Niveau 2 : Alarme** (valeur seuil = 0.8 mm/h.)

- Fermeture à la circulation de la galerie par mise au rouge automatique du feu de signalisation via le système AUTOCALL Mobile (activation par SMS) ;
- Mobilisation de la Centrale d'Engagement de la Police via notification e-mail générée automatiquement par Guardaval (extensomètre + station émettrice : cf. [diapo 9](#)).



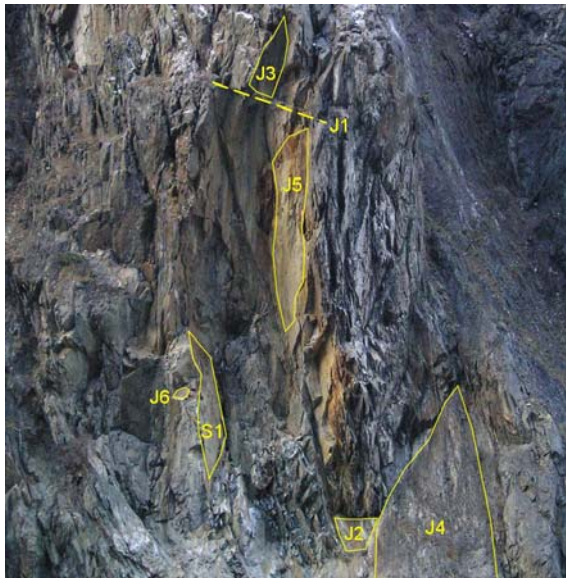


Système de surveillance Guardaval

En raison de légers défauts de fabrication, le feu rouge s'est allumé 2 ou 3 fois par erreur, mais part ça, ce système ne pose pas de problème particulier.

Suite à l'éboulement, une énorme pression économique s'est manifestée pour rouvrir la route. Grâce au système de surveillance, les techniciens en charge du site étaient suffisamment confiants pour procéder à sa réouverture. Il fallait ensuite réparer la galerie et évaluer le risque potentiel de nouvelles chutes de blocs ou d'éboulements importants. Pour ce faire, une analyse structurale et géomécanique a été entreprise.

#### Etude structurale :



#### Station n° 1 (centre galerie) :

Roche : gneiss et schistes cristallins

#### Discontinuités :

S1: 145/70

J1: 065/60

J2: 180/65

J3: 335/65

J4: 255/60

J5: 095/80

J6: 010/20

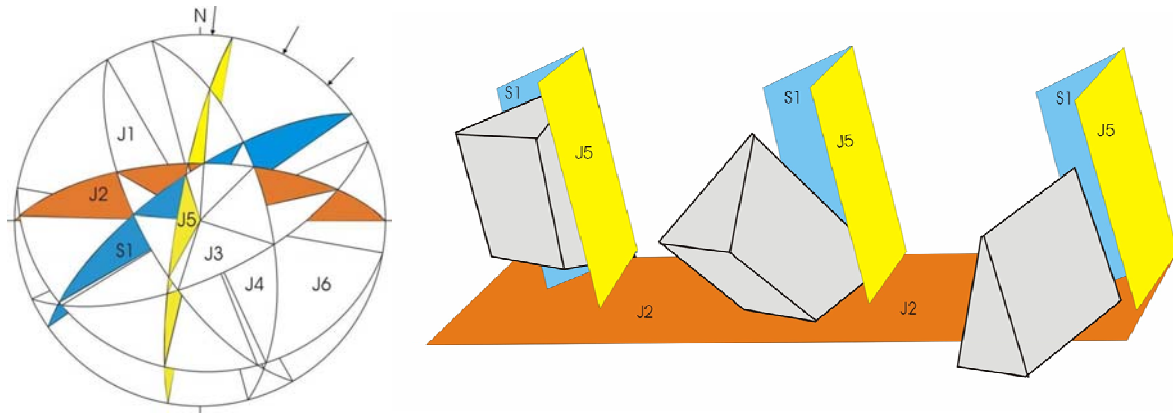
#### Dièdres principaux :

S1 – J2: 184/65

S1 – J4: 209/50

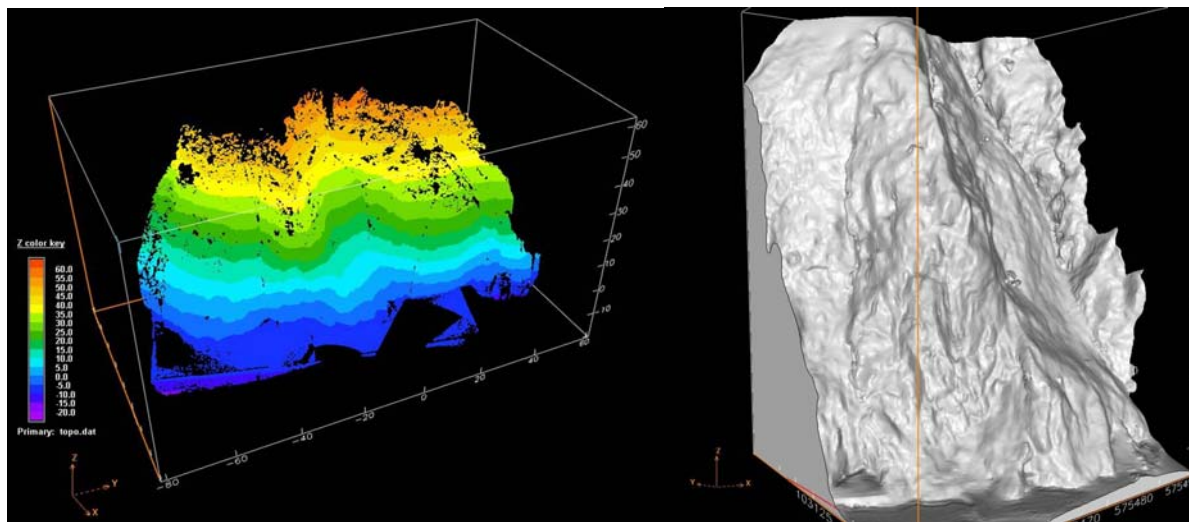
J2 – J4: 225/56

L'étude a mis en évidence divers plans de fracturation. Le stéréogramme (ci-dessous) montre que les blocs peuvent tomber vers le sud, sur la galerie. Elle a aussi montré la présence de dièdres qui permettent le décollement et/ou le basculement de blocs, avec un système plutôt en basculement (mais des discussions ont porté sur la question de savoir s'il ne s'agissait pas plutôt d'un glissement le long de la discontinuité J2, où a été propulsé le gros bloc de 100 m<sup>3</sup>).



Stérogamme et interprétation de l'étude structurale donnée par le géologue

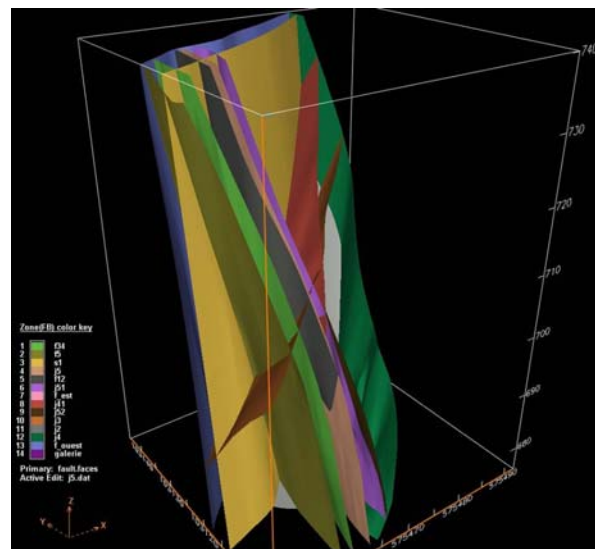
Pour affiner le modèle géologique, on a procédé à un levé Laser Scan (ci-dessous à gauche) avec 4 à 6 millions de points pour déterminer la topographie, puis faire un modèle 3D de la paroi (ci-dessous à droite). Ce travail a été complété par quelques levés pour savoir s'il y avait des déplacements, selon la méthode présentée par C. Delacourt (§ 6.2.1).



Levé Laser Scan et modèle topographique 3D de la paroi rocheuse (voir détail [diapo 17](#))

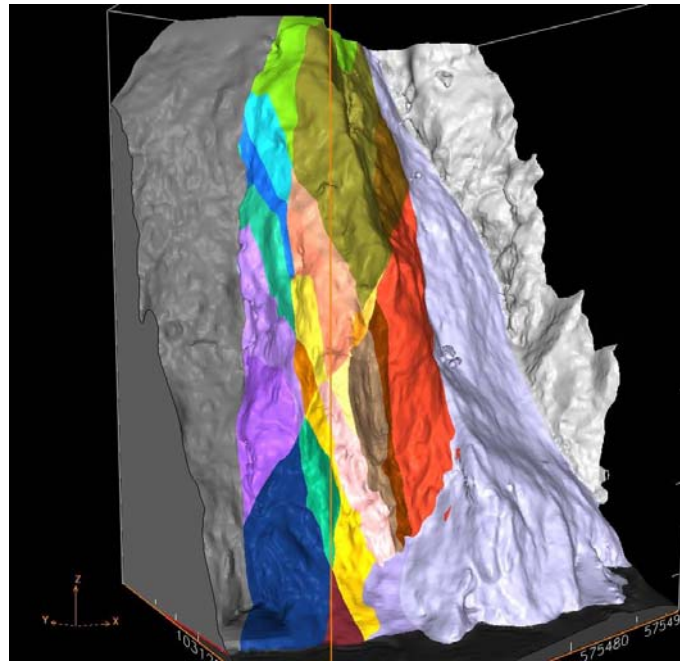
La restitution de la surface montre la niche d'arrachement et la partie sujette à instabilité. Sur ce modèle tridimensionnel, les différents plans de fracturations ont été repérés. Cette analyse est facilitée par des déplacements virtuels à l'aide d'un curseur 3D qui permet de 'piquer' un certain nombre de points et de reconstituer les surfaces de discontinuité et les fractures, puis d'en calculer les intersections (diapos 17 et 18). La maille des facettes est d'environ 15 × 15 cm.

L'image ci-contre illustre les principales fractures qui ont été retenues parmi les centaines de fractures présentes, dont les principaux systèmes sont plus ou moins N-S et E-W, avec 2 ou 3 fractures en travers qui ne sont pas conformes à ces systèmes.



Modèle de fracturation

L'intersection du volume avec ces différentes fractures selon une coupe horizontale met en évidence l'agencement structural de ces fractures (*diapo 20*). Pour ce genre de manip, il importe de bien contrôler l'extrapolation en minimisant l'écart avec la réalité de terrain. Ces traitements permettent de déterminer des 'blocs faillés' auxquels on donne des couleurs pour les visualiser (ci-contre) et pour lesquels on évalue les volumes en jeu.



Différents cas de figure ont été déterminés (*diapos 21 à 26*) depuis la chute de petits blocs (100 litres) jusqu'à l'effondrement du pilier dans son ensemble, en passant par la chute de blocs de taille moyenne (de l'ordre de 20 m<sup>3</sup>).

Pour évaluer la dangerosité d'un éboulement de grande ampleur (scénario I), on a analysé la forme des fractures en profondeur. Pour cela, on a enlevé la partie qui pourrait tomber afin de voir sur quoi elle repose. Les vues produites selon cette méthode illustrent les plans de glissements possibles avec l'intersection des fractures. Les géomécánicos en ont déduit que l'assise était bonne et le danger relativement faible. Le volume total des compartiments rocheux est évalué à 12 000 m<sup>3</sup>. Un autre scénario prenant en compte une rupture selon 7 fractures (scénario II) conduit à un volume total de 5500 m<sup>3</sup>.

Une simulation dynamique est en cours de réalisation (Iris Voyat) et permettra de comparer les résultats avec cette approche relativement classique pour déterminer la dangerosité.

#### Conclusions de l'étude structurale et géomécanique :

##### Eboulements majeurs (> 100 m<sup>3</sup>)

- Degré de risque : faible ;
- Solution : poursuite de la surveillance (monitoring) comme mesure de protection.

##### Chutes de blocs moyens (10 m<sup>3</sup> – 100 m<sup>3</sup>)

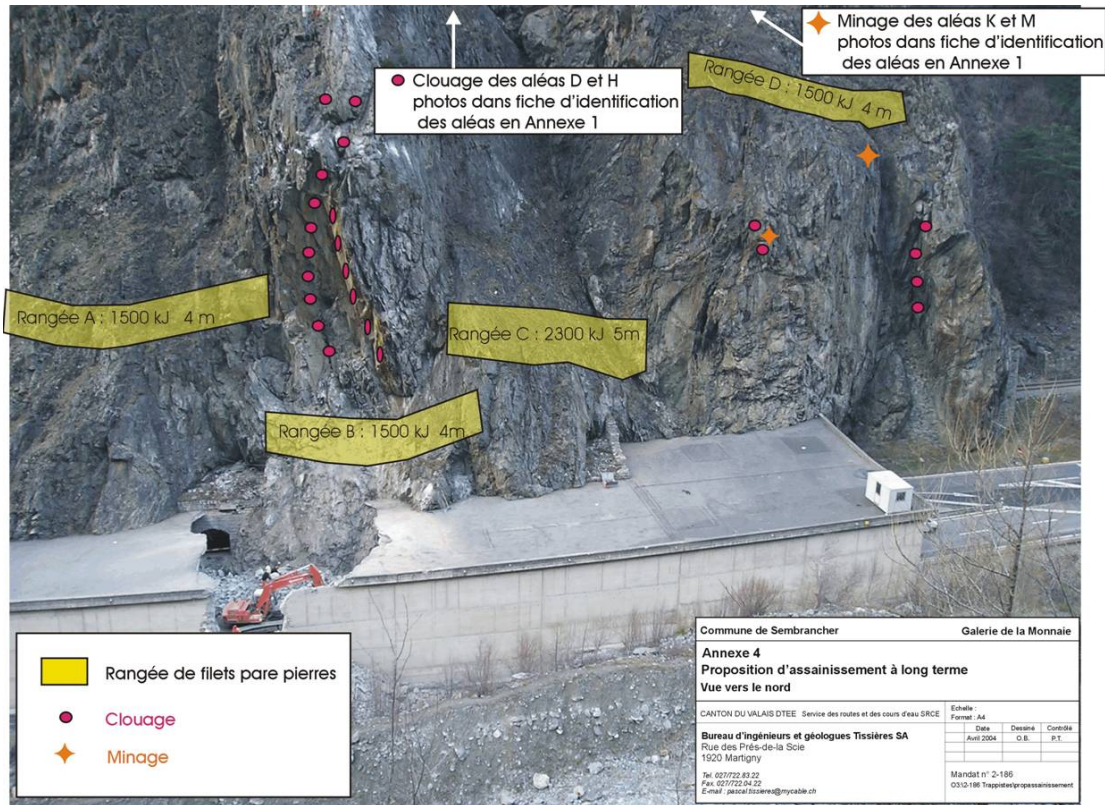
- Degré de risque : dangerosité moyenne sur la cicatrice d'arrachement ;
- Solution : stabilisation des blocs avec des ancrages.

##### Chutes de petits blocs (< 10 m<sup>3</sup>)

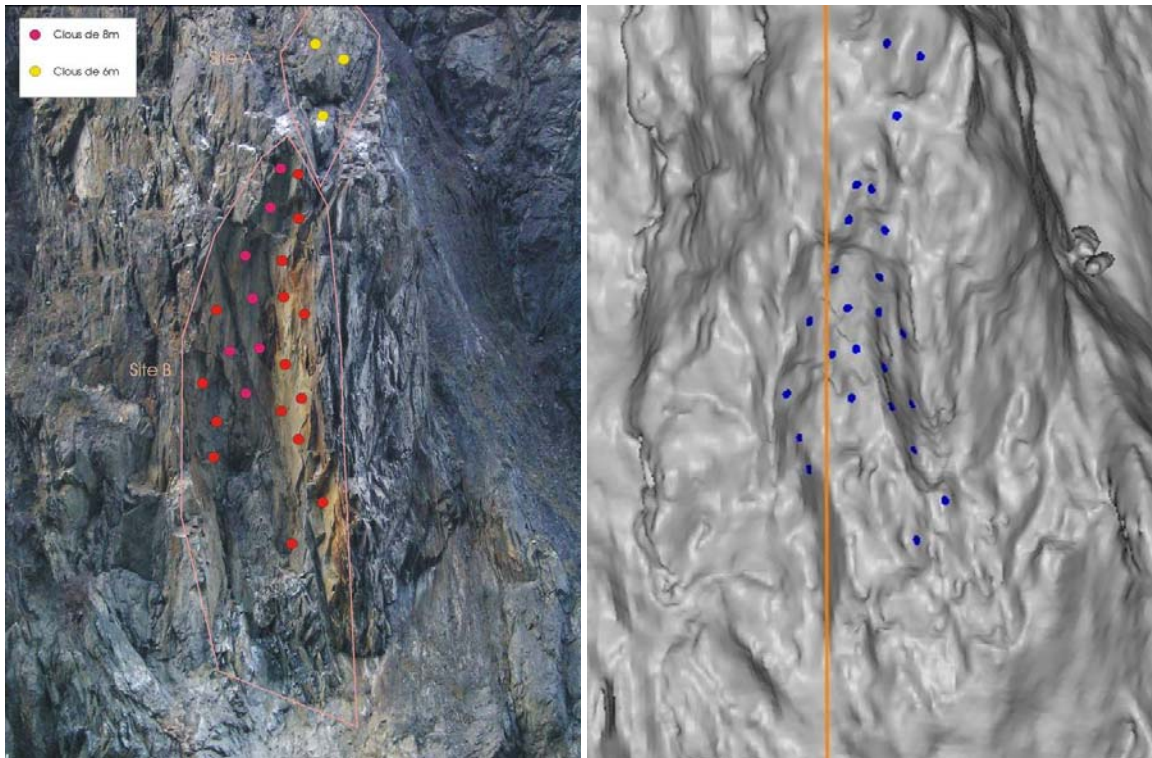
- Degré de risque : dangerosité élevée à peu près partout ;
- Solution: purges en falaise, minages et pose de filets.

La photo ci-dessous présente un résumé des travaux entrepris sur cette paroi rocheuse : ancrages, nettoyage général et pose de filets.





Le principe de mise en place des ancrages consiste à retenir les compartiments dans les deux sens le plus perpendiculairement possible aux fractures (*diapo 29*). Pour simplifier l'analyse, les disques ont été 'posés' directement sur le modèle 3D, puis l'on est 'parti' perpendiculairement à la topographie sur 8 ou 10 m. L'orientation des ancrages a ensuite été corrigée en fonction des besoins pour obtenir un positionnement correct (figure ci-dessous).



Positionnement des ancrages sur le modèle 3D



L'intérêt majeur est d'obtenir directement les coordonnées, la profondeur, l'inclinaison et l'orientation des ancrages avant de les transmettre à l'entreprise qui faisait les forages (*diapos 31 à 35*).

La pose des ancrages (*diapo 36*) a été particulièrement difficile, notamment sur les parties en surplomb. Les éléments ont été amenés à l'aide d'un hélicoptère.

La galerie désormais protégée des chutes de blocs par des filets (*diapo 37*) a été refaite avec le dimensionnement initial, calculé pour protéger la route des avalanches et non des chutes de blocs, car pour la même énergie, le coût de réalisation d'une galerie est beaucoup plus important que celui des filets. De même, l'option de creuser un nouveau tunnel pour la route a été écartée. Il a été évalué comme 'raisonnable' d'intervenir de manière ponctuelle. Les techniciens espèrent qu'un événement comme celui de 2003 ne se reproduira pas, ou qu'ils seront capables de l'anticiper grâce au système de surveillance mis en place.

Cependant il convient de rester modeste face au risque et de prendre en compte le risque résiduel. Celui-ci relève de la responsabilité des personnes qui ont procédé aux choix des interventions réalisées.

#### **Discussion (12) – Technologies innovantes et surveillance des mouvements de terrain (1)**

**Elena Rabbi** (Geo data, Turin) : « Nous avons travaillé sur quelque chose de similaire en Italie et je voudrais connaître quelques détails. Quelles sont les dimensions de la paroi des Trappistes ? Quelle est la quantité de données relevées par le LIDAR ? Combien de familles de fractures avez-vous retenu ? ».

**R. Mayoraz** : « La paroi sur laquelle on a fait le relevé Laser Scan mesure environ 50m de haut. La niche d'arrachement mesure 25 à 30m de haut sur environ 10m de large. Environ 4,5 millions de points ont été relevés au Laser Scan, selon 3 angles de vue, puis un semi de points x, y, z a été reconstitué, à partir desquels un logiciel a permis de reconstituer une surface tridimensionnelle. Nous avons retenu 4 familles de fractures.

Notre démarche est très différente de l'approche 'RésoBlok', dans laquelle on ne retient qu'une seule famille à partir de laquelle on sort plusieurs fractures qui relèvent d'une interprétation du stéréogramme. Dans notre cas, chacune des fractures réelles observées a été introduite dans le modèle. On ignore des fractures qui existent certainement mais toutes les fractures prises en compte existent bel et bien sur le terrain.

**E. Rabbi** : « Le levé LIDAR s'est-il appuyé sur le relevé géostructural ? »

**R. Mayoraz** : « Oui. Pour déterminer les fractures qu'on allait retenir, on s'est basé sur les observations de terrain. En observant la surface 3D du modèle, on peut très bien mettre en évidence des structures avec l'ombrage, etc. ».

**E. Rabbi** : « Pour notre part, nous avons suivi à peu près la même méthode avec le LIDAR, et notre partenaire qui n'est pas expérimenté dans ce domaine nous a dit que le nombre de familles que nous avons retenues n'étaient pas représentatif de la paroi. Nous sommes donc en train de voir s'il est possible de sortir d'autres données du relevé LIDAR et du levé structural que nous avons effectué. La paroi que nous étudions mesure environ 1 km de long avec un maximum de 195m de haut. Nous avons produit environ 22 millions de points, puis reconstitué un modèle 3D et nous avons effectué une trentaine de profils structuraux. Mais le modèle n'a pas été jugé assez représentatif pour décrire la paroi et pour arriver à une évaluation du risque ».

**R. Mayoraz** : « La surface que je vous ai montrée n'est pas idéale car elle a tendance à arrondir les angles. Il faut donc avoir un petit peu l'habitude de la regarder pour ne rien oublier. Mais quand on dispose d'une bonne observation de terrain avec plusieurs photos, on peut toujours comparer le modèle avec les photos. On pourrait aussi faire de l'image solide, qui donne de très bons résultats. A mon avis, faire des populations de fractures où chacune d'entre elles est bien déterminée et bien

positionnée a beaucoup plus de sens que de générer un nombre déterminé de manière aléatoire de fractures avec une inclinaison donnée. Je suis un peu étonné que votre partenaire ne croie pas en cette approche parce qu'à mon avis, c'est celle qui est la plus proche de la réalité de terrain.

**Léandro Bornaz** (Politecnico de Turin) : « Je pense que plus que le nombre de points, c'est la précision du Laser Scan et la densité de points sur la falaise qui sont importants, parce que ce sont les paramètres important pour comprendre les détails.

Avec un modèle à 4 millions de points et un autre à 2 millions de points, on a à la fin pratiquement 1 point par centimètre ».

**E. Rabbi** : « Nous on a des falaises de grande ampleur et on ne fait des mesures tous les centimètres que sur des surfaces échantillons. A ce niveau là on n'a fait qu'un relevé partiel de la paroi ».

**R. Mayoraz** : « Iris Voyat a travaillé sur des falaises de plus grande ampleur et ça marche très bien aussi ».

**I. Voyat** : « Nous avons fait ensemble le travail dont parle Elena avec le Politecnico de Turin. Nous avons ensuite appliqué le modèle solide avec L. Bornaz. Les familles de fractures qui en ont été sorties étaient tout à fait comparables avec les familles relevées sur le site. C'est un autre code de calcul que Léandro a mis au point, mais il repose sur un concept similaire ».

**R. Mayoraz** : « Concernant la représentativité des données sur les fractures observées dans un tel contexte géologique, avec des gneiss très schisteux, on ne peut pas prendre en compte une densité de fractures donnée, les 'scan lines' ne marchent jamais... On observe de fortes concentrations de fractures dans certaines zones et pas dans d'autres. Il est donc préférable de s'en tenir aux observations de terrain et ne pas commencer à inventer des fractures là où l'on pense qu'il pourrait y en avoir. Il y en a déjà bien assez sur le terrain. La situation peut être différente dans d'autres types de lithologie, mais dans ce cas, on avait une très bonne observation de terrain et c'était bien suffisant ».

**C. Delacourt** : « Quand on commence à travailler avec des données de type LIDAR, qui sont échantillonnées de façon irrégulière de par la topographie, à partir du moment où l'on représente les données par interpolation et qu'on essaie de remonter à des objets discontinus, on est toujours confronté au problème de savoir si l'interpolation utilisée est la bonne. On sait qu'il y a des zones d'ombre. Vous avez effectué le relevé à partir de 3 points de prise de vue, mais ça n'empêche pas qu'il y ait encore des zones d'ombre.

Il n'est pas toujours évident de travailler sur des données LIDAR avec des données qui sont interpolées sans connaître la densité des mesures. Actuellement, on bénéficie d'un certain nombre de techniques qui viennent de l'architecture (image solide...) et qui justement ne travaillent pas sur des données interpolées. A mon avis, ces approches sont intéressantes pour travailler sur les familles de fractures ».

**I. Voyat** : « Pour répondre à Raphaël, on connaît le problème de la variabilité du degré de fracturation, avec des zones beaucoup plus fracturées que d'autres comme on peut l'observer par exemple dans des carrières de marbre. Il est tout de même possible de modéliser cette variabilité. je trouve qu'il est quand même important d'avoir des outils qui permettent d'insérer dans le modèle les fractures les plus importantes d'une façon déterministe, en cherchant des outils pour comprendre leur répartition en profondeur, par exemple avec le radar ou avec des forages, en tout cas si possible avec des observations, et de modéliser la génération stochastique des familles. L'important est de bien caler dans un modèle à blocs la distance entre familles de fractures, même s'il est vrai qu'on ne peut pas simuler des fractures avec des distances centimétriques ».

**Franck Compagnon** : « Juste une remarque concernant Christophe Delacourt : je voudrais des précisions sur la synthèse qui a été faite à l'échelle de la vallée de la Tinée et de la vallée de l'Ubaye, où un certain nombre de glissements de terrain ont été identifiés. Sur quelle période ce travail a-t-il été fait ? Je suis surpris parce qu'il y a d'autres glissements dans cette zone, qui n'ont pas été signalés ».

**C. Delacourt :** « L'étude que j'ai montré repose uniquement sur 2 images SPOT qui ont été acquises à 1 an d'intervalle. Typiquement, avec la résolution des images SPOT, on n'arrive à détecter qu'une certaine gamme de glissements de terrain. Les 5 glissements qu'on a détectés ont globalement des vitesses journalières d'ordre centimétrique. Evidemment, on est passé au travers de ceux qui sont beaucoup plus lents ou beaucoup plus rapides ».

**F. Compagnon :** « Je parle de glissements existants dans cette zone avec des vitesses de l'ordre du cm/jour également ».

**C. Delacourt :** « Dans ce cas, avec des vitesses de l'ordre du cm/jour avec un mouvement continu à l'échelle annuelle, vu qu'on a des images avec une résolution de 2,5m, si le glissement est supérieur à 20m, on doit le détecter. Dans cette étude, on s'est intéressé aux mouvements de terrain de très grande ampleur. Nous n'avons pas vérifié dans le détail s'il y avait d'autres glissements que les 5 sur lesquels nous avons focalisé ».

**Luca Pitet :** « Une question pour F. Rinaudo et C. Delacourt : selon vous, quelles sont les technologies innovantes qui vont le plus évoluer dans le futur pour la surveillance des zones de montagne ? ».

**C. Delacourt :** « Si l'on se réfère au dernier congrès sur la question, les réflecteurs permanents ont l'air d'avoir le vent en poupe. Malheureusement, pour les mouvements gravitaires qui nous intéressent en contexte montagneux, il n'y a pas eu de résultat flagrant et évident. Cette technique est à mon avis extrêmement puissante puisqu'on mesure des mouvements de l'ordre du mm ou du dixième de mm. ça marche extrêmement bien sur les villes ou sur les zones montagneuses au-dessus de la limite de végétation. L'effort à faire est de tester ce type de méthodes dans des contextes un peu plus difficiles. Les dernières études montrent que toutes ces techniques marchent de façon ponctuelle dans les cas les plus faciles. Actuellement, on est en train de travailler sur des cas un peu plus complexes, avec des pentes plus importantes, avec des cinématiques qui sont différentes, des mouvements en blocs plutôt que des mouvements généralisés.

Chaque technique a montré qu'elle était utilisable et très utile dans un contexte particulier et l'on est en train de les tester pour voir quelles sont les limites ultimes de ces techniques dans d'autres contextes. Une des applications possibles est d'utiliser le LIDAR en combinant son information altimétrique en faisant juste du différentiel avec l'information propre de l'image, mais cette technique est très coûteuse. Un des défis va donc être d'appliquer plusieurs techniques sur un même site et de trouver la technique adéquate sur un site particulier. Actuellement, on ne peut pas dire quelle est la meilleure technique de télédétection de manière générale. On n'en est pas encore à une technique de surveillance efficace et opérationnelle ».

**F. Rinaudo :** « La conclusion de Christophe est correcte : pas de méthode unique qui puisse sortir du lot et servir de manière générale. C'est un ensemble de techniques associées qu'il faut utiliser...La technique SAR dans certaines conditions très particulières peut servir pour déclencher une alarme. On ne peut pas donner d'élément quantitatif : Avec une résolution de 25m on ne peut pas faire, avec une résolution de 10 × 10m à, on ne sait pas où se trouve le point central et on n'a pas de mesures qui ensuite puissent servir.

Si l'on a besoin d'une connaissance de la géométrie, on peut utiliser la technique de la photogrammétrie ou du LIDAR, ou un mélange des deux, ou encore avec des prises de vue par hélicoptère. On peut prendre plusieurs images, les stacker (addition) et en faire ce qu'on veut. Puisque cette technique peut être utilisée pour d'autres applications, on l'amortit rapidement. Ça peut être l'élément principal de tous ces systèmes de mesure intégrée. C'est une bonne idée de combiner les techniques, mais il importe de se concentrer sur les marges d'erreur

Pour les applications qui nous intéressent, l'aspect le plus important n'est pas en soi la résolution ni la précision mais la tolérance, c'est-à-dire la marge d'erreur. Comme le disait Christophe en parlant des images satellitaires, avec une résolution d'1m, la précision est d'1,20-1,50m (1-1,5 pixels) et la tolérance est quant à elle de 4,5m. Ce que les utilisateurs appellent la précision, c'est ce que nous appelons la tolérance d'un point de vue statistique. De ce point de vue, les techniques métriques

risquent d'être complètement en dehors de ce qu'on recherche parce qu'elles ont des marges d'erreur de plusieurs mètres. Il faut aller vers des techniques décimétriques qui vont donner des marges d'erreur de 30 cm, nécessaire pour des applications géotechniques. Après ça, on a des techniques millimétriques qui sont du ressort du suivi en continu ou de la surveillance et qui, comme l'a déjà dit Raphaël Mayoraz. Sur tous ces systèmes de mesure, il faut donc faire attention à ce qu'on dit.

Une autre question est de savoir si telle ou telle donnée manque, est-ce que ma conclusion tient toujours ? Par exemple, on peut élaborer les plus belles théories mais si les données sont faussées, la théorie s'effondre. »

**C. Delacourt :** « Si l'on veut développer des systèmes de surveillance, il apparaît clairement que les systèmes optiques (à capteur passif) sont toujours limités par la couverture nuageuse et le brouillard. Si l'on souhaite disposer d'un système de surveillance utilisable quelles que soient les conditions météo, il vaut mieux s'orienter vers un système comme le radar (capteur actif) qui lui, fonctionne de jour comme de nuit, par tout type de temps ».

**I. Voyat :** « J'ai deux questions : j'ai entendu parler d'une technique de mesure LASER par hélicoptère pour laquelle il n'est pas besoin de fixer le LASER à l'hélicoptère, par exemple pour la détection des parois rocheuses. Quelle est la tolérance de ce genre de mesures ? Autre question : Je suis d'accord sur le fait qu'une chose est de relever, l'autre de surveiller. Dans le cas d'un laser installé sur un hélicoptère, est-ce que c'est vraiment un problème de retrouver les points fixes ? Avec quelle tolérance peut-on superposer deux MNT pris à des moments différents ? Quels résultats peut-on obtenir ? ».

**F. Rinaudo :** « Pour la 1<sup>ère</sup> question, ça suppose d'utiliser les nouveaux GPS cinématiques. C'est encore un système expérimental qui est développé en Suisse à l'Université de Zürich. La tolérance semble principalement liée à celle des GPS cinématiques et l'on arrive à une tolérance d'environ 10 cm. Avec les nouveaux systèmes en cours de développement comme le GPS 'virtuel' sur lequel on travaille actuellement, on arrivera à améliorer encore un peu cette précision. Dans le futur, le système Galileo va permettre d'abaisser la précision absolue au-dessous des 10-15cm actuels. La précision relative entre des points qui sont reconnus régulièrement va atteindre quelques centimètres. Pour ce qui concerne la 2<sup>ème</sup> question, si l'on effectue la soustraction entre deux MNT d'une précision de 10 cm, du point de vue théorique, on somme les variances et on a une précision finale de 'racine de 2'  $\times$  10 cm. Assembler revient toujours à dégrader la précision.

Il faut dire que ce raisonnement porte sur les valeurs absolues. Pour ce qui est des valeurs relatives basées sur des points fixes qui par chance ne relèvent pas de nous topographes mais de vous, géotechniciens, c'est vous qui nous dites à quels points nous fier. C'est la nécessité qu'on a de travailler ensemble. Nous avons l'œil pour identifier les points fixes par rapport à des points mobiles.

Ce que je constate, c'est que le choix des points fixes sur lesquels on se base pour assembler les MNT est plus du ressort des géotechniciens que des topographes. Ce sont les géotechniciens et les géologues qui peuvent nous dire 'ce qui bouge et ce qui ne bouge pas'.

Puisque les mesures ne sont jamais précises, on peut toujours dire que 'tout bouge'. Si physiquement vous me dites 'ce point ne bouge pas', alors je fixe la statistique de mon modèle et je peux faire mon MNT. Avec les modèles statistiques sur les écarts locaux mesurés basés sur des points fixes bien identifiés, les erreurs relatives descendent jusqu'à quelques cm... »

**Pascal Perrotin :** « Sur la galerie des Trappistes : Quelle est la méthode de dimensionnement qui a été utilisées. Quelles sont les dimensions de cet ouvrage et l'épaisseur de la dalle de béton ? ».

**J.-D. Rouiller :** « Ce qu'il faut savoir, c'est que ce n'était pas une galerie pare pierres mais une galerie pare avalanche. Périodiquement, une avalanche descendait du couloir sur le versant en face et terminait sa course sur la falaise et sur la route. C'est le mur latéral de cette galerie qui est renforcé contre des sollicitations avalancheuses, mais pas la dalle qui n'est là que pour protéger les véhicules de la pluie quand ils sont dans la galerie. Il y a donc 40cm de béton légèrement armé mais qui n'est pas une protection contre une force quelconque... ».



### 6.3 Présentation de l'utilisation de la couverture PS (Permanent Scatterers) pour la détection des glissements de terrain à l'échelle régionale

Alessio COLOMBO (Arpa Piemonte)

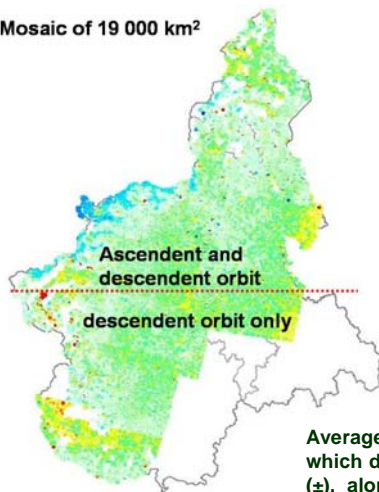
#### The PSinSAR project in Piemonte, first results



- Data are now available for about 19000 km<sup>2</sup>; by the end of the year the whole Piemonte, 25000 km<sup>2</sup>, will be covered.
- This is the first example of coverage of such a large area by this technique.
- Mosaic of 19 000 km<sup>2</sup> : About 390 processed satellite images, about 2 millions PS defined.

PS density Full : 80 PS/km<sup>2</sup> .  
 PS density apr-nov : 89 PS/km<sup>2</sup>.  
 PS density ascendent SPSA : 24 PS/km<sup>2</sup>.

Mosaic of 19 000 km<sup>2</sup>

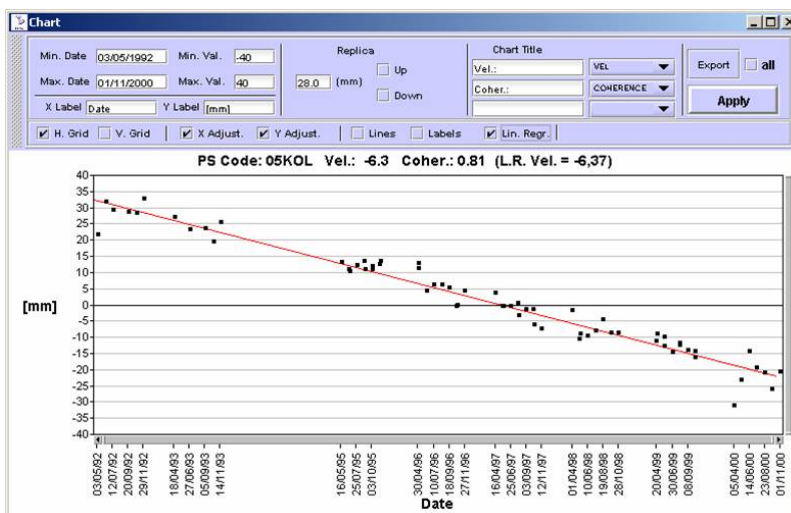


Average deformation velocity, in mm/a, which defines the variation of the distance (±), along the LOS between the satellite and the PS target.

Alphanumeric PS identification code      Longitude UTM ED 52 32N  
 Latitude UTM ED 52 32N

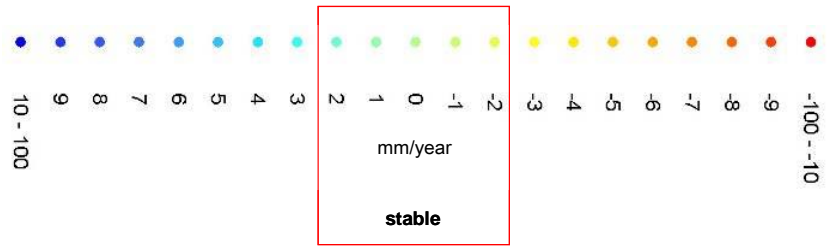
Shape	Code	North	East	Vel	Coherence
Point	00001	5006598.74	420859.24	-0.07	0.73
Point	00004	5006735.14	420296.67	0.05	0.74
Point	00005	5006656.52	420266.19	0.09	0.62
Point	00006	5006652.58	420265.56	-0.41	0.75

PS reliability; it gives the probability of retracing the very same point within the analyzed hystoric series



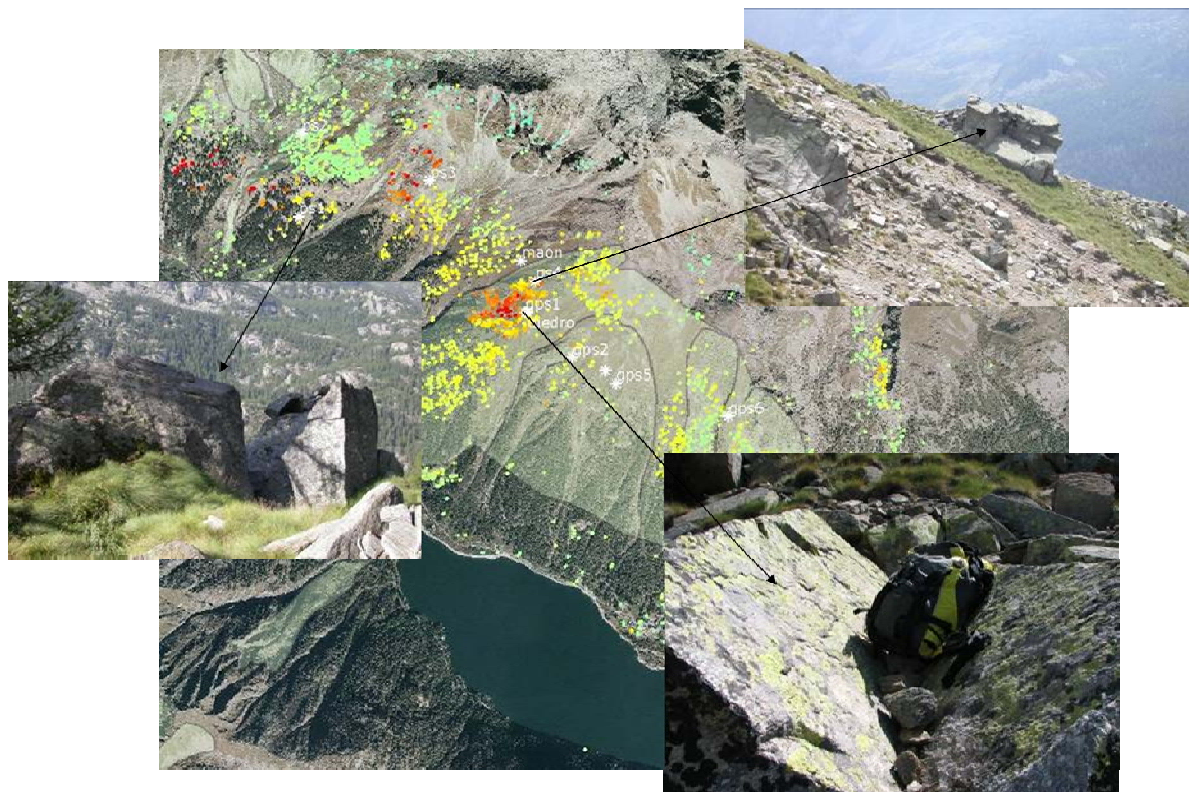
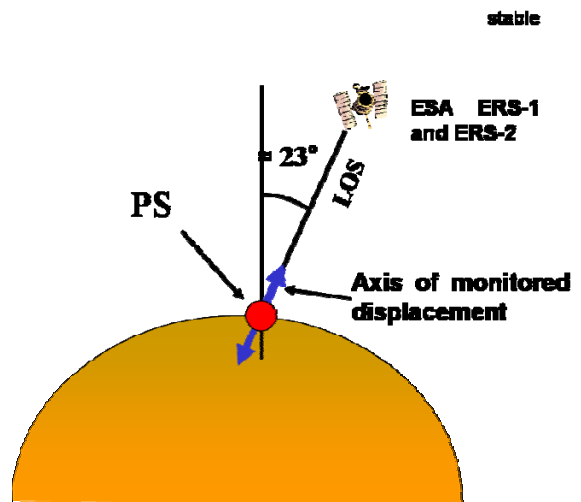
The hystorical series are available for 459860 PS targets. Therefore, for these points the real deformation history can be evaluated.

The typical Permanent Scatterers (PS), good radar reflectors, are buildings, facilities, trellis or bare rock surfaces.

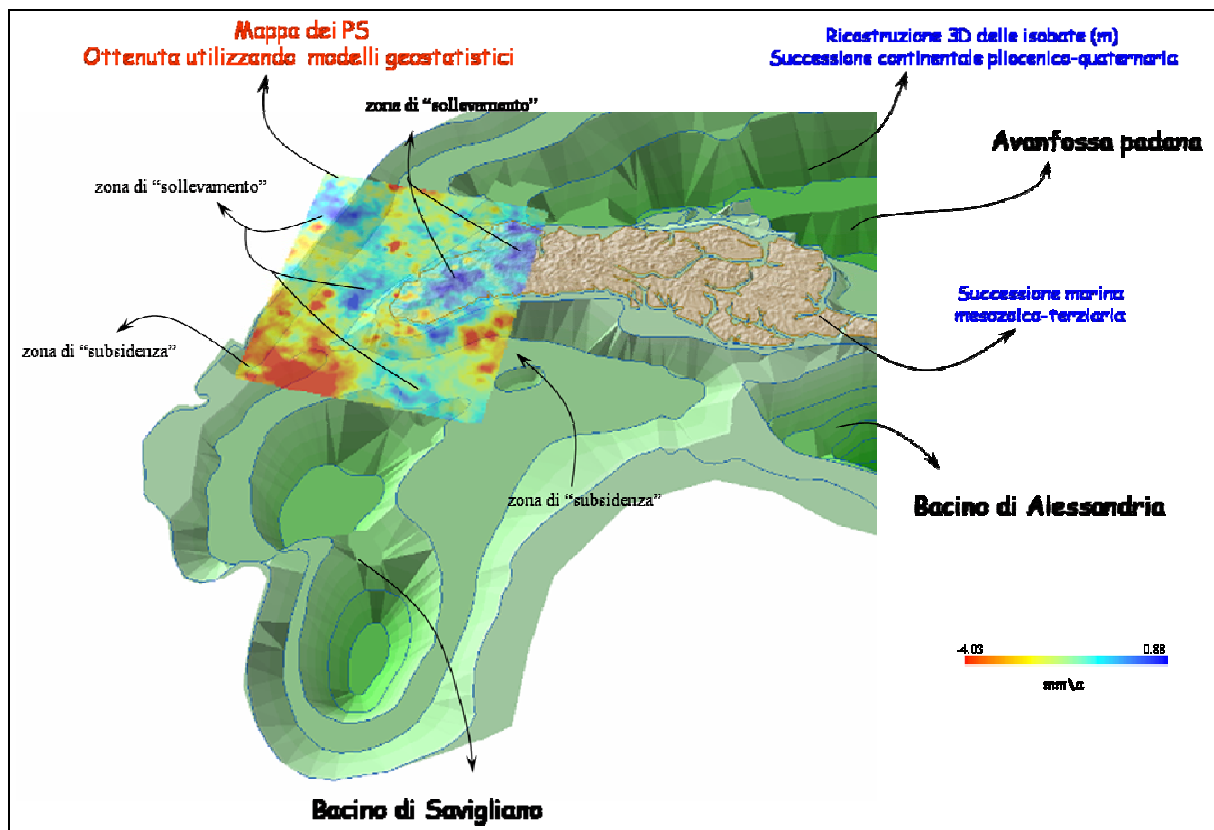
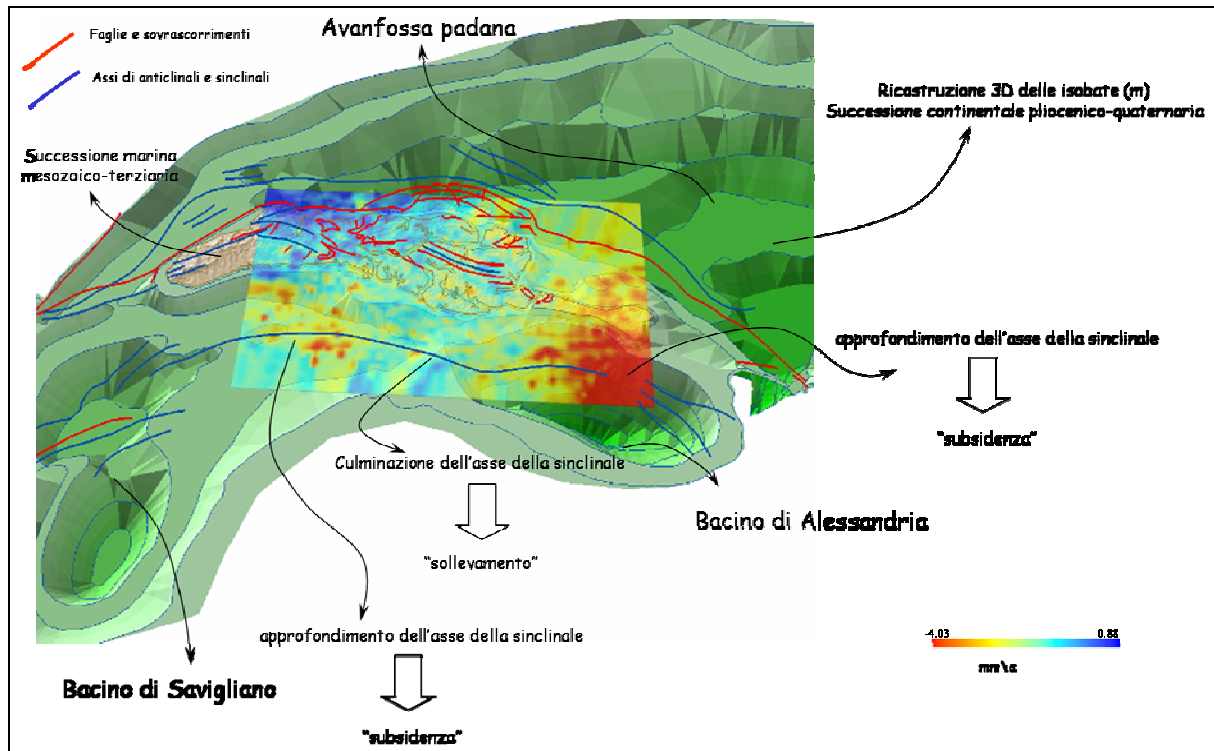


The quasi-vertical displacements ( $23^\circ$  to the vertical) was evaluated over the time span 1992-2001 relative to a ground reference point which is a PS assumed to be stable.

Precision is in the order of some mm/a. We will consider as stable any point with recorded displacement  $< \pm 2$  mm/a.



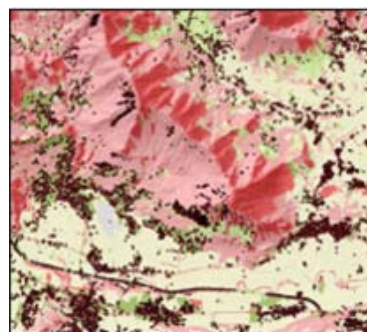
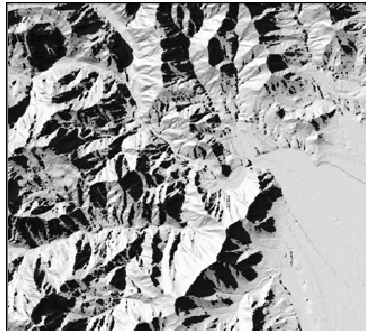
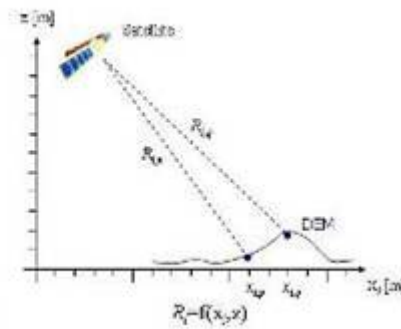
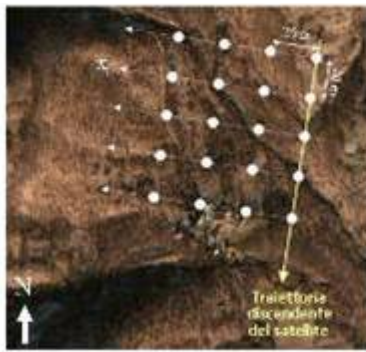
Permanent scatterers in the field



Elaboration des réflecteurs permanents (PS)



**PSinSAR feasibility**



The aim of the study is to develop a methodology in order to map, at a regional scale, areas that can be processed by PS Technique. The project was realized by ARPA Piemonte – *Centro Regionale per le Ricerche Territoriali e Geologiche*, with the collaboration of Tele-Rilevamento Europa. The model was tested on a 4300 km<sup>2</sup> area located in the western middle part of Piemonte Region.

Methodological approach : the project is organized in four main steps:

- 1 - DEM and satellite orbits were compared in order to identify un-radar-covered-areas;
- 2 - Landuse zoning based on both natural elements (exposed rocks, talus slopes) and anthropic elements (buildings, roads, facilities) that may act as PS candidates and landuse zoning of areas where the landcover (woods, grass) makes it very difficult to find potential targets;
- 3 - Dataset overlaying with a raster spatial analysis in order to map, at a regional scale, areas that can be processed by PS Technique.
- 4 - Methodology validation trough overlapping of the obtained zonation with the Standard PS covering currently available for the studied area

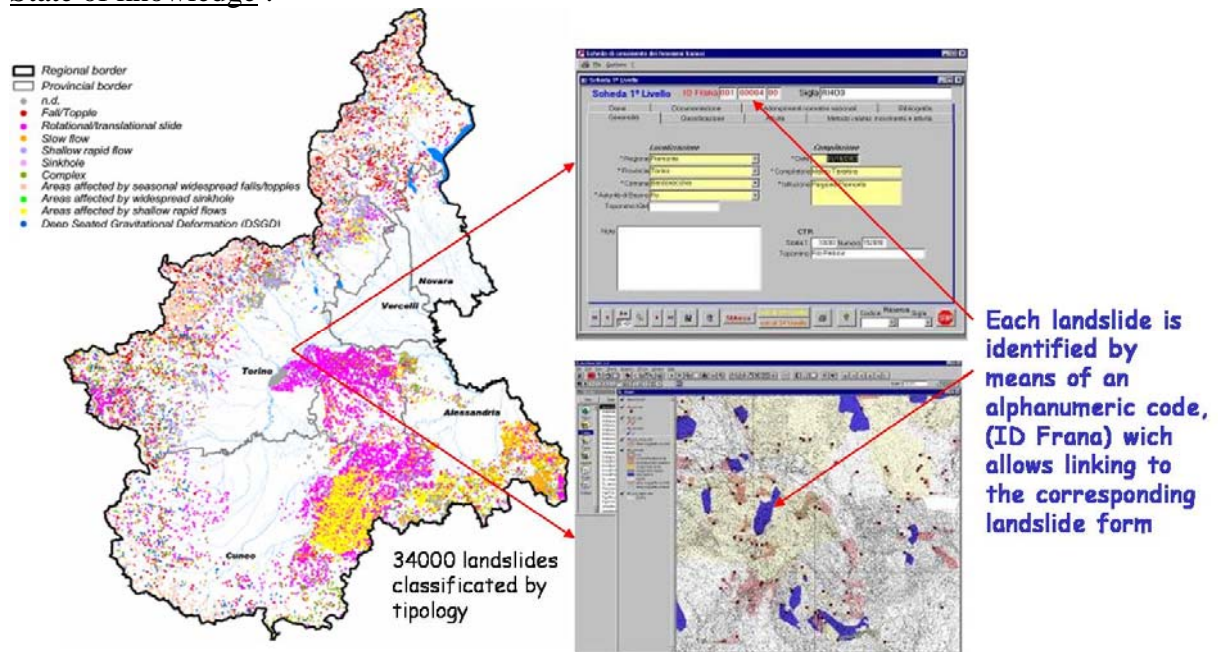
- I - high probability to locate PS Targets *Edifici e infrastrutture / Rocce esposte*
- II - good probability to locate PS Targets *Praterie di montagna*
- III - limited probability to locate PS Targets *Prati e seminativi / Frutteti*
- IV - scarce probability to locate PS Targets *Boschi*
- V - no probability to locate PS Targets *Acque / Ghiacciai*

Uso	Classe	N. PS	% Totale	Area (km <sup>2</sup> )	DENSITA' (punti/km <sup>2</sup> )
Infrastrutture	I	522.452	71,7	450,6	1159
Rocce affioranti	I	96.698	13,3	327,5	295
Praterie	II	44.812	6,2	389,5	115
Prati	III	29.020	3,9	847,4	34
Frutteti	III	2.953	0,4	90,1	32
Boschi	IV	31.519	4,3	1.092,6	28
Acque	V	905	0,1	26,4	34
Ghiacciai	V	46	0,1	10,5	4
Layover/Shad.	VI	7.100	0,6	1084,4	6



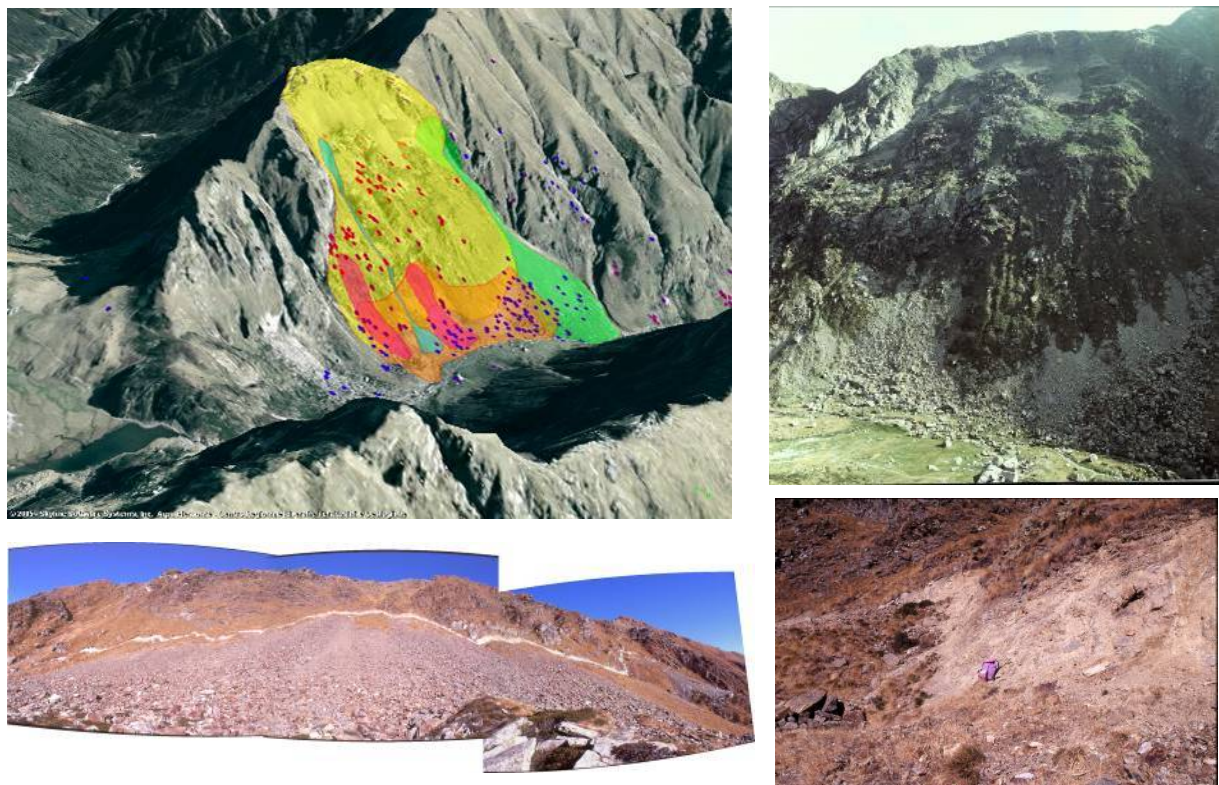
### Some CASES History : Identification of landslides

#### State of knowledge :



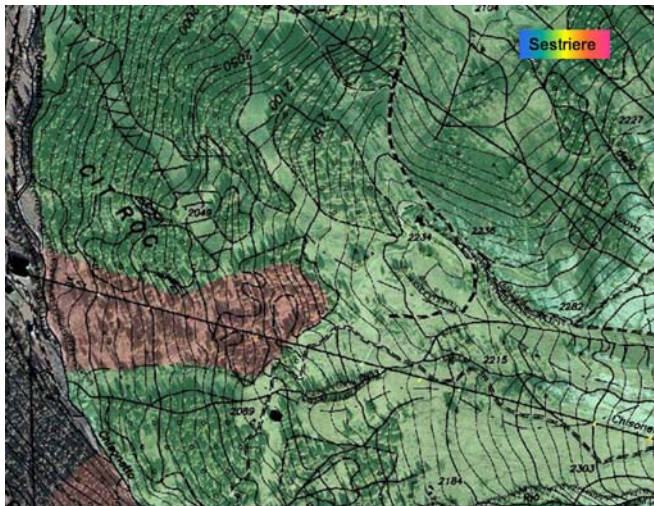
Due to the heterogeneous distribution of several available data on landslides a specific methodology has been worked out in order to uniform, to collect and to analyse the information. Furthermore such methodology (based on collection and analysis of historical data, multi-temporal aerial photointerpretation and spot surveys) allowed to improve and to detail the landslide knowledge at regional scale.

#### Deep-seated deformation (ex. Alpe Baranca) :





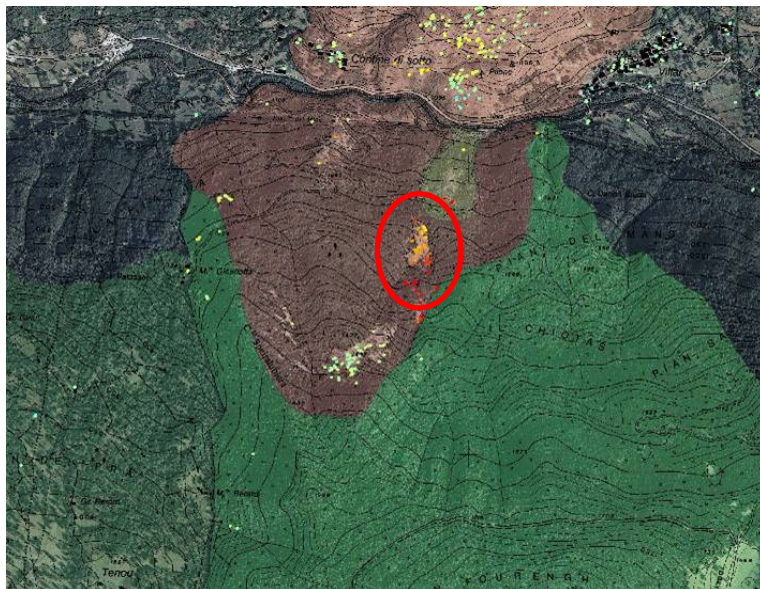
PSinSAR technique confirms previous field survey



In this case the PS, representing cableway pylons, define a sector in the lower part of the slope with relevant displacements.

This confirms the results of the “classic approach”, which defines an active slide sector limited to the brown area

Different State of Activity (ex. : Complex Landslide in Val Varaita) :



The PSinSAR analysis lights on a small part of the slope that shows a different state of activity.

By means of PSinSAR investigation we could re-evaluate landslide geometry and redefine the state of activity.

Movement Evaluation in complex areas :



In this area our landslide inventory defines some limited and rapid phenomena, mainly rockfalls.

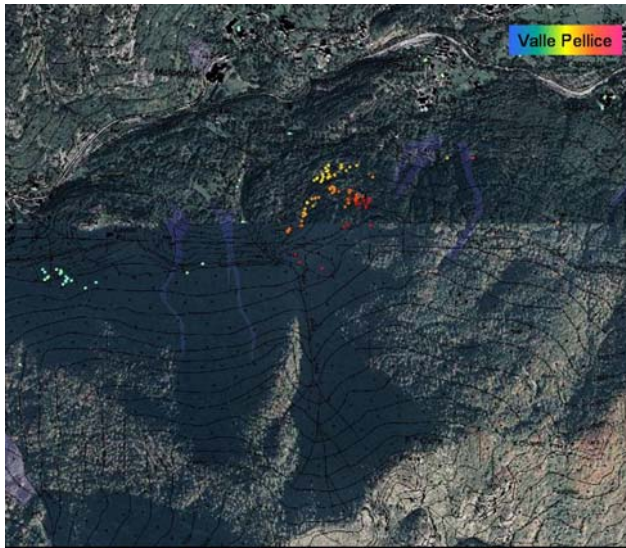
PSinSAR analysis identifies some major displacements around the former sectors.

We use PSinSAR to re-evaluate the actual size of the main rockfalls source area.

In this case PsinSAR analysis clearly points out that the observed rockfalls are actually the “tip of the iceberg”, in that they represent the surficial expression of a, formerly unknown, much larger deformation.



Detection of formerly unknown landslides (ex. : Valle Pellice) :



In this case PSinSAR analysis helps us to identify formerly unknown landslides in areas where no archive informations are available, field survey is difficult and aerial photos shows no clear morphologic evidences of a landslide

Aerophoto Shadowed slope :

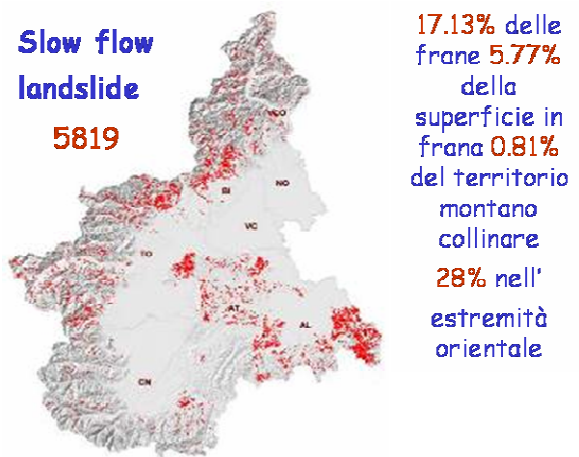


This is an example where standard methodological approach (based, above all, on multi-temporal aerial photointerpretation) is unable to locate and define a landslide.

PSinSAR analysis highlights relevant displacements even where shadowing hampers interpretation of optical images

**Conclusions**

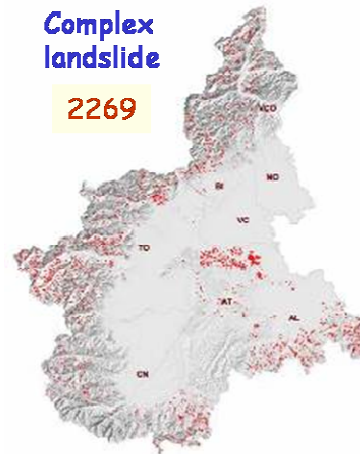
- PSinSAR technique allows a fast identification of vertical deformations ;



- The PSinSAR analysis is useful to define slow –moving landslides (about 5.6 cm/year) ;

**Complex landslide**

**2269**



6.68% delle frane

16.65% della superficie in frana

2.34% del territorio montano collinare



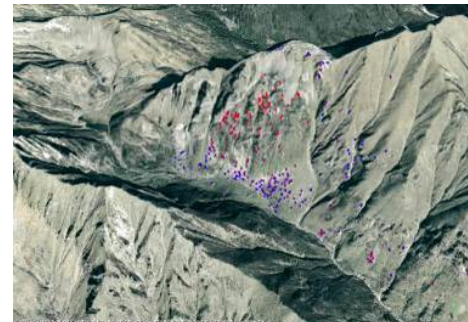
Deep seated gravitational deformations

**560**

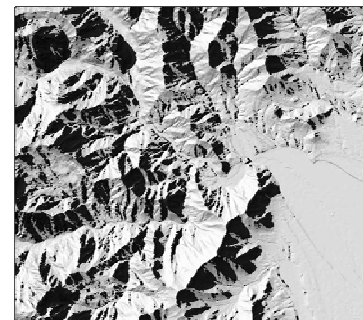
They represent 1.65% of the entire data sample, affect 8% of the alpine area and correspond to 29.83% of the total landslide area.



- Landslides tend to show more PS than the surrounding areas due to pervasive fracturing and to the attitude variety of exposed surfaces, which often creates corner-shaped-reflectors ;



- About one-third of the regional territory has NO radar coverage ;



- PSinSAR technique is now quite developed and reliable from the “electromagnetic” point of view. Some applied research work has still to be done in order to use the technique as a practical tool for general geologic and landslide interpretation.



**Discussion (13) – Technologies innovantes et surveillance des mouvements de terrain (2)**

**E. Leroi :** « Cette méthode apparaît très intéressante, notamment en terme d’inventaire, sur des zones qui ne sont pas connues ».

**J.-M. Vengeon :** « Il est intéressant de relever les ordres de grandeurs donnés en conclusion de cet exposé sur l’applicabilité de la méthode des réflecteurs permanents (PS : ‘permanent scatterers’), qui ne peut être utilisée dans tous les cas ».

**Christophe Delacourt :** « C’est effectivement une application efficace et réaliste de cette méthode. Il est précisé qu’une des conditions est de détecter des mouvements très lents. Il y a une deuxième condition d’application : les récepteurs doivent être stationnaires à l’échelle annuelle, comme c’est le cas dans les exemples présentés. Si au contraire on a des mouvements qui accélèrent à certaines périodes de l’année, ils ne pourront pas être détectés, de par la méthode de traitement statistique des réflecteurs permanents.

La méthode PS marche très bien dans le contexte particulier des exemples présentés : petits glissements dans des zones peu végétalisées et où le sol a des réflecteurs naturels (par exemple si l’on travaille sur les Terres Noires de la vallée de l’Ubaye, on aura beaucoup plus de mal à trouver des réflecteurs permanents). Dans le Piémont, le résultat est vraiment intéressant.

Mais dans le cas des grands mouvements de masse comportant des accélérations quasi mensuelles, l’application de cette technique est beaucoup plus difficile : elle est actuellement impossible à utiliser ».

Question de **J.-D. Rouiller :** « Si j’ai bien compris, l’étude est centrée sur des glissements qui étaient déjà connus, c’est bien cela ? »

**A. Colombo :** « Dans la phase préliminaire d’analyse qualitative, nous avons appliqué une rétro-analyse en partant des mouvements déjà connus, mais le but est de bâtir une méthode valable sur la totalité du territoire ».

Question de **J.-D. Rouiller :** « En faisant ces analyses, n’avez-vous pas détecté des mouvements en dehors des endroits reconnus comme des glissements. La question de base : est-ce que vous ne pensez pas que ‘tout bouge’, sans parler de la roche en place mais des terrains meubles en forte pente, qui sont généralement animés d’un mouvement de base ‘normal’. Il serait intéressant de le détecter en utilisant cette méthode pour ensuite bien distinguer les zones en glissement ou non ».

**A. Colombo :** « La méthode PS permet d’évaluer des mouvements de manière différentielle, par rapport à des repères connus. On pourrait l’utiliser comme on utilise la technique GPS ».

**J.-D. Rouiller :** « Ma remarque n’est pas innocente : on a maintenant un gros problème en Valais avec une autoroute qui passe en tunnel dans un glissement de terrain qui n’avait jamais été répertorié comme un glissement actif. En creusant le tunnel, des mouvements sont apparus. Ils ont maintenant cessé ; le chantier est arrêté depuis une année. Mais nous ne savons pas s’il y a un mouvement ‘normal’ de base préexistant ou non, donc la question se pose : est-ce que c’est le creusement du tunnel qui a déclenché le glissement ou bien est-ce que les déplacements observés de 1-2 cm/an correspondent à un mouvement ‘normal’ ? Economiquement, cela peut être important, puisque c’est un chantier qui coûte environ 500 000 € par mois, pour rien... ».

**M Ramasco :** « Pour répondre à l’ensemble des questions qui peuvent se poser sur ce thème. Le travail effectué en Piémont depuis 20 années repose sur la détection précise des glissements de terrain par des géologues sur le terrain, avec des méthodes géologiques et géomorphologiques très ‘importantes’, en particulier la cartographie (tout comme en Suisse). Ainsi, nous sommes sûrs que les 35 000 glissements de terrain recensés dans ce travail correspondent dans 90% des cas à des cas avérés de grands glissements, qui ont toujours des petits mouvements ; on le trouve dans la littérature.

Dans le cas du glissement traversé par le tunnel évoqué ci-dessus par J.-D. Rouiller, la méthode SAR donne la possibilité de valider l’analyse faite auparavant.

Dans le projet présenté, une trentaine de géologues ont travaillé pendant 2 ans en continu, en reprenant l'ensemble d'un travail sur l'interprétation à l'échelle régionale des glissements de terrain des années précédentes. Ce travail a été effectué à l'échelle 1 / 5000 (puis au 1 / 10 000 dans les 2-3 dernières années), avec le service géologique régional en relation avec les services géologiques des 8 départements du Piémont. L'application de ces méthodes montre que ce travail est validé par ce système de détection et donne, sous certaines conditions (de photo-interprétation, d'analyse géomorphologique, de végétation, de lumière, etc.) des indications sur des mouvements localisés, qu'il faut alors soumettre à l'investigation de terrain. Car au final, c'est le géologue qui a la connaissance et la capacité de dire si ces méthodes lui apportent un support permettant de faire un diagnostic suffisamment précis ».

**F. Rinaudo :** « Vous avez confirmé que le SAR donne des informations utiles. Mais les instruments ne peuvent pas remplacer l'homme. Il faut donc vérifier la pertinence de l'utilisation de ces instruments en confrontant leurs résultats avec des données historiques et techniques de terrain [...] ».

**A. Colombo :** « Je suis d'accord. Cependant, il n'est pas facile de parcourir à pied 25 000 km<sup>2</sup> et l'apport du SAR est de nous donner des indications pour cibler nos interventions ».

**Un participant :** « Il faut effectuer une interprétation critique des données par rapport à des repères stables. A ce titre la BD historique du Valais représente des données précieuses ».

**A. Colombo :** « Depuis les années 1990, on a connu les événements les plus catastrophiques de l'histoire du Piémont (octobre 2000). La base de données relative à la méthode PSInSAR couvre la période 1992-2001 et donc prend en compte les événements alluviaux qui ont le plus concerné la Région Piémont. Par conséquent, il sera possible de faire une analyse détaillée des mouvements en lien avec les alluvions et d'en tirer des conclusions pertinentes. ».

**Luca Pitet :** « Une autres limitation à l'utilisation de ces techniques innovantes est les coûts très élevés. Il faut faire des analyses coûts-bénéfices pour évaluer la faisabilité de leur application ».

## 7. Débat de conclusion : apport du projet / objectifs initiaux

*Animé par Eric LEROI*

**E. Leroi :** « Je remercie l'ensemble des orateurs pour leurs présentations particulièrement intéressantes et bien claires, qui ne sont pas restées dans un domaine purement technique et démonstratif mais ont bien été des communications de synthèse et de bilan.

Ces deux journées ont bien mis en évidence le travail important réalisé dans le cadre du projet RiskYdrogéologie sur des thématiques assez larges :

### ➤ Surveillance

La réflexion sur les systèmes de télésurveillance a abouti à une structuration importante de la démarche (cf. présentation de P. Ornstein, § 3.1 p. 57), qui va maintenant permettre d'aller beaucoup plus loin, notamment en engageant à l'aval une réflexion à destination des opérateurs et des décideurs pour fournir des recommandations sur les typas de surveillances ou capteurs à proposer en fonction des cas rencontrés (typologies à établir).

Nous sommes désormais en mesure de bâtir des guides opérationnels, qui intègrent les volumes mis en jeu, les types de phénomènes et leur cinématique, ainsi que les temps de réponse (temps nécessaire pour installer un système opérationnel - ex. 1 journée pour Guardaval - temps de réponse sur la chaîne de traitements) pour répondre à des besoins pratiques et opérationnels de sécurité civile sur le terrain. Il s'agit de valoriser l'ensemble de ces éléments.

### ➤ Ouvrages de protection

Tous les types d'ouvrages de protection haute capacité ont été abordé (filets, merlons, galeries) en montrant pour chacun d'eux ce qu'il est possible de faire. Les ingénieurs, via les chercheurs, disposent maintenant de techniques de dimensionnement et de modèles performants.

Il reste d'une part à bien faire le pas entre la demande de dimensionnement et la demande de protection, en se basant sur cette dernière pour fournir des spécifications en terme de dimensionnement et être capable de fournir des informations sur le risque résiduel.

D'autre part, il serait intéressant de développer des systèmes mixtes à partir des différentes techniques abordées : on peut s'appuyer sur le travail réalisé dans le projet pour engager des réflexions et des collaborations afin de favoriser des développements futurs.

### ➤ Techniques innovantes

Un bilan très large a été réalisé, qui montre les grands progrès effectués depuis une dizaine d'années. A ce propos, une étude du CNES dressait il y a 10 ans un bilan stratégique de l'utilisation des techniques de télédétection dans le domaine de la surveillance des risques naturels. A l'époque, les résolutions de 10 × 10 m ne permettaient pas de travailler. La précision des outils actuels permet au contraire d'arriver à des niveaux de détails extrêmement performants (cf. présentations de F. Rinaudo § 6.1 p. 161 et de C. Delacourt, § 6.2.1 p. 174) pour prévoir l'évolution des phénomènes.

Toutefois il faut garder à l'esprit que ces outils fournissent des paramètres d'entrée. Ils nécessitent toujours des compétences complémentaires (géotechniciens, géologues de terrain, etc.) pour aller jusqu'au bout de la démarche, depuis la description des phénomènes (connaissance de la géométrie et des discontinuités) jusqu'à la compréhension des mécanismes, afin d'être en mesure d'anticiper / prédire / prévoir leur évolution et de faciliter les prises de décision en terme de sécurité et d'aménagement du territoire ».

**J.-P. Duranthon :** « Un consensus a émergé entre les différents partenaires du projet. Nous avons la chance d'avoir ici un collègue Japonais, à qui il serait intéressant de demander son avis sur le travail réalisé dans ce projet. Pensez-vous que certaines méthodes présentées sont 'avant-gardistes'. Pratiquez-vous les mêmes méthodes d'instrumentation au Japon ? ».

**T. Yamakoshi :** « J'ai vraiment appris beaucoup au cours de ces deux journées. Au Japon, nous n'utilisons pas les mêmes techniques, car les zones montagneuses sont recouvertes de forêt et il est

difficile d'y appliquer ce genre de techniques. Par exemple, plutôt que d'utiliser des capteurs à fibres optiques pour savoir quelles zones sont en mouvement sur les versants, nous préférons utiliser des capteurs de contact pour détecter des mouvements minimes près des routes nationales où il y a des glissements potentiels.

Les techniques évoluent rapidement mais, du point de vue pratique, il est très difficile pour les décideurs de comprendre le contexte d'utilisation de ces technologies. J'ai personnellement essayé d'expliquer les mécanismes de la technologie SAR à des décideurs japonais, mais je ne suis pas parvenu à faire comprendre l'importance de capter des mouvements de quelques millimètres ou quelques centimètres depuis l'espace.

Je suis frappé par les activités entreprises dans ce domaine dans le projet RiskYdrogé ; je pense qu'elles peuvent permettre un rapprochement entre ingénieurs et décideurs ».

**E. Leroi** : « L'objectif d'un projet Interreg comme celui-ci était de faire le lien entre les opérationnels et les décideurs. Quelle est l'impression des personnes ici présentes qui représentent l'Etat ou les régions (DIREN, RTM, MEDD, Urbanisme, Protection Civile...) sur les objectifs, les résultats, les lacunes et les pistes à proposer ? »

**Hélène Delmas** (MEDD) : « J'ai été très attentive pendant ces deux journées de présentation et plusieurs points m'interpellent à propos des systèmes de prévention du risque de mouvements de terrain qui sont en place. L'exposé sur les techniques innovantes m'a beaucoup intéressée et me questionne également.

En couplant les techniques innovantes et les techniques existantes, il semblerait qu'on puisse arriver à une cartographie à 'grande' échelle des mouvements de terrain présents sur une large portion du territoire. Mais il semble que cette démarche ne soit pas encore opérationnelle : quels sont les délais pour la mettre en place ? Est-ce encore du domaine de la recherche ou des bureaux d'études sont-ils déjà capables de proposer des techniques ou des cahiers des charges pour détecter ces mouvements ? Ces outils existent-ils ou à quelle échéance pourraient-ils exister ?

En ce qui concerne les outils de surveillance et de suivi et les systèmes d'alerte, le travail réalisé me semble assez avancé. Il me semblerait également intéressant de développer un cahier des charges à destination des maîtres d'ouvrage pour déterminer les caractéristiques les plus importantes : quels sont les systèmes à mettre en place en fonction du type de mouvement de terrain à surveiller, mais aussi en fonction des enjeux, qui vont souvent déterminer les délais de réponse et les outils utilisables. C'est une piste qui me semble assez intéressante dans le cadre de ces ateliers ».

**E. Leroi** : « Avant de répondre, y a-t-il des questions complémentaires ? »

**Analissa Bethaz** (Direction de l'aménagement du territoire, Assessorat du territoire, de l'Environnement et des Ouvrages publics, RAVA) : « En Vallée d'Aoste, toutes les communes doivent actuellement remettre à jour leur plan directeur (équivalent du Plan Local d'Urbanisme en France). La première chose à faire est de dresser les cartes de danger sur chaque territoire, en particulier en ce qui concerne les avalanches, les inondations et les mouvements de terrain. Je crois que c'est le point fondamental pour faire un aménagement correct du territoire.

En vallée d'Aoste, la loi de 1978 prévoyait déjà que les communes fassent ces cartes mais cela restait facultatif et presque aucune commune ne les a réalisées. Suite aux inondations catastrophiques de l'année 2000, nous avons compris l'importance d'avoir des informations précises sur les risques présents sur le territoire. Maintenant, les communes sont en train de faire ces cartes, qui devront constituer la base des nouveaux plans directeurs. »

**Paolo Turcotti** (Protection Civile, RAVA) : « Je me sens un peu « japonais », car du point de vue pratique, il faut rappeler que la Protection Civile doit intervenir lorsqu'il y a urgence. Je suis content d'avoir vu que l'on cherche à mettre sur pied des systèmes de surveillance de manière plus rapide qu'auparavant.

En ce qui concerne la prise de décision dans l'urgence, je ne sais pas s'il y a des modèles qui peuvent m'aider à faire le bon choix (par exemple pour rouvrir une route fermée à cause d'un risque d'éboulement, d'avalanche ou de lave torrentielle) ?



Comme cela a été dit, il faut encore faire des efforts pour améliorer la connaissance des phénomènes. Cela passe aussi par la connaissance du territoire : nous travaillons souvent au bureau mais il faut bénéficier d'une bonne connaissance du terrain. Par exemple, lors de la survenue d'un événement, J.-D. Rouiller se rappelait avoir repéré le terrain l'année d'avant, ce qui l'a beaucoup aidé pour résoudre le problème. »

**Jean-Bruno Pasquier** (géologue en bureau d'études) : « Une des grosses lacunes dans la problématique des chutes de pierres concerne la probabilité de mobilisation des blocs. J'aimerais savoir si les nouvelles technologies de télédétection permettront d'affiner ces probabilités de mobilisation au niveau des blocs (quelques centaines à quelques m<sup>3</sup>).

Un des problèmes est qu'on dispose de très peu de données historiques sur les événements (production d'une falaise bloc par bloc). Quand des pierres tombent sur la route, très souvent le cantonnier les dégage avant que le géologue ne passe pour établir sa carte de danger. On n'a pas 50 ans de mesures de précipitations ou de débits comme pour les avalanches ou les crues ».

**C. Delacourt** : « On fait de la télédétection soit depuis le ciel (satellitaire ou aérienne), soit terrestre, sachant que l'on voit mieux les structures plutôt horizontales depuis le ciel et verticales depuis le sol. Il est donc difficile d'observer des falaises en télédétection spatiale ou aérienne. De plus, les blocs tombés se trouvent souvent dans des zones d'ombre. Pour les applications falaise – chutes de blocs, la télédétection aéroportée et satellitaire est moins adaptée que la télédétection terrestre, qui a le défaut d'être coûteuse en temps ; il faut échantillonner point par point et l'on perd l'intérêt de la perception globale de la télédétection. L'interférométrie fixe permet de s'intéresser à un site, mais l'on ne peut pas globaliser les études réalisées ».

**E. Leroi** : « Dans le domaine des mouvements de terrain, notamment de petite dimension, on ne remplacera pas tout de suite le géologue de terrain par des instrumentations à distance. De manière pragmatique, pour avoir accès à l'aspect temporel sur l'activité d'une falaise, il faudrait discuter avec le cantonnier : lorsqu'il met un bloc de côté, il peut aussi le noter quelque part. Il y a un gros travail de terrain à réaliser pour améliorer la connaissance historique des chutes de blocs. Pour l'exploiter, de plus en plus de techniques et d'approches quantitatives permettent de développer des outils probabilistes dans le domaine des chutes de blocs et des éboulements ».

**J.-M. Vengeon** : « Une utilisation de ces techniques de télédétection aéroportée ou terrestre : dans le sillon alpin à côté de Grenoble, on a procédé à la détection des risques d'éboulements majeurs ( $\geq 100\,000\text{ m}^3$ ) sur 140 km de falaises qui sont observables depuis le pied des versants. Dans les années à venir, quelles perspectives intéressantes peut-on mentionner pour détecter d'éventuelles évolutions de la topographie de ces falaises, par perte de matière (chutes de blocs) ou par des mouvements relativement faibles (millimétriques ou centimétriques) qui peuvent être précurseurs du déplacement des compartiments rocheux ? ».

**F. Rinaudo** : « Pour les mouvements de quelques cm ou quelques mm, on peut relever les points sensibles là où le géologue a pu identifier des mouvements. Pour des mouvements plus diffus, de mon point de vue, des relevés photographiques effectués par hélicoptère tous les 6 ou 12 mois, reportés sur un modèle tridimensionnel, peuvent être plus que suffisants pour prévoir ces mouvements ».

**J.-P. Requillart** (ONF RTM 38) : « Les phénomènes sont de mieux en mieux connus, les parades mieux dimensionnées. Un de nos points faibles est le suivant : comment traduire toutes ces données pour les intégrer dans les documents de zonage du risque, où chaque technicien a sa propre façon de faire, sans qu'il y ait de réflexion commune sur la manière de procéder et surtout de faire partager aux décideurs les choix qui sont faits ».

**Ph. Raviol** (DIREN Rhône-Alpes) : « A l'issue des présentations de ces 2 jours, parfois très pointues dans des domaines variés, il ressort de manière générale un problème de communication entre les métiers, qui semblent très compartimentés. J'avais déjà amorcé cette remarque lors de la conférence du projet Rockslidetec.

Par exemple, le géologue définit un aléa, mais l'ingénieur qui fait ensuite le dimensionnement aimerait que les conditions aux limites soient plus clairement définies, ou d'une autre manière (§ 5.2). Il me semble qu'il y a des efforts à faire pour répondre aux besoins de compréhension entre les spécialistes qui définissent l'aléa, le risque, les protections, et les décideurs (maîtres d'ouvrage, cofinanceurs des ouvrages-dont le MEDD). Les maîtres d'ouvrage peuvent légitimement avoir ces exigences car ils ont besoin d'arguments solides, clairs et compréhensibles pour prendre leurs décisions, et les responsabilités qui y sont associées.

Les chercheurs ont bien montré la nécessité du passage de la recherche vers l'opérationnel : il faut que les applications existent et qu'elles soient compréhensibles. Plusieurs présentations aujourd'hui ont été centrées sur la protection ; le MEDD, qui est chargé de la mise en place de la politique de prévention des risques naturels en France, considère que la protection n'est pas une fin en soi. Outre le coût de réalisation des ouvrages, leurs limites en capacité conduit à la notion de risque résiduel, qui est difficile à appréhender. Les dispositifs alternatifs à la protection sont la prévention dans la gestion de l'aménagement du territoire, l'intégration du risque dans les décisions, les délocalisations, l'information et la concertation, qui amènent à la culture du risque, qui va permettre à son tour au public et aux décideurs de mieux comprendre les propositions qui leur sont faites ».

**J.-M. Vengeon :** « Sur l'aspect communication, il faut trouver la méthode permettant d'être compréhensible entre métiers et entre fonctions. Les travaux réalisés ces dernières années dans les projets Interreg vont dans ce sens, avec les formations, les confrontations entre métiers, les ateliers, la confrontation avec les élus : les ateliers dédiés aux avalanches, aux crues torrentielles et au risque sismique du projet PRINAT ont réuni à chaque fois une centaine de personnes et une quinzaine d'élus, présents à la demande de techniciens des services pour écouter et participer aux débats.

Il s'agirait de trouver une méthode pour que l'espace créé par ce type d'ateliers puisse toucher plus de monde parmi les élus des communes de montagne, en travaillant sur la communication, sur l'intégration de l'ensemble de la chaîne de gestion du risque.

Actuellement, tout un champ de recherche, soutenu par le MEDD, concerne la prise en compte de l'incertitude au long d'une étude (par exemple de risque torrentiel) : l'objectif est de mettre en évidence les incompréhensions qui peuvent survenir au passage du dossier, dues à une notion différente de l'incertitude par les personnes des différents métiers ou des différents niveaux d'intervention dans les projets. Mais cela reste du domaine de la recherche. A part ces moments collaboratifs et ces actions mises en commun, peut-on envisager des actions plus systématiques pour aller dans cette direction ? ».

**Ph. Raviol :** « Effectivement, les programmes Interreg permettent cela. Il est bon de continuer et d'approfondir ces démarches, mais il faut également identifier les problèmes qui se posent. Par exemple, j'ai pour ma part trouvé étrange d'entendre Pascal Perrotin dire : *'pour dimensionner une galerie, l'énergie que me donne le géologue ne me suffit pass'*. Maintenant que ce point là est identifié, on peut travailler dessus. Ce n'est certes pas en multipliant les réunions publiques ou semi-publiques avec divers interlocuteurs que l'on va toucher tout le monde.

L'essentiel est donc d'identifier les problèmes, de travailler dessus puis de proposer des éléments de réponse qui pourraient être mutualisés, systématisés, ou non. Au niveau du Ministère, un groupe de travail national travaille sur la concertation dans le cadre de la prévention des risques. Bien sûr on ne touche pas tous les maires qui vont avoir à réaliser un PPR sur leur commune, procédure parfois difficile et houleuse, mais on réunit néanmoins un certain nombre de personnes représentatives, volontaires, qui permettent ensuite de développer des méthodes et de faire des propositions. Je pense que c'est dans ce cadre là qu'il faut axer notre travail ».

**P. Ornstein :** « A propos des remarques d'hier sur l'extension possible de la réflexion menée sur les systèmes de surveillance, je pense que la perspective proposée est intéressante. Dans le projet RiskYdrogé, quelques éléments permettraient déjà d'aller dans cette direction, avec le travail réalisé sur l'évaluation des systèmes de télésurveillance (Activité 3) et la réflexion menée sur l'instrumentation (Action 4), qui elle-même intégrait l'aspect typologie des phénomènes. On pourrait déjà croiser les résultats de ces deux actions pour aller plus loin.

Pour répondre à Mme Delmas au sujet de la problématique du cahier des charges, il y a déjà, dans l'action 4 du projet, une réflexion sur la définition d'un cahier des charges intégrant des considérations sur les systèmes de télésurveillance. Dans la réflexion sur les temps de réponse de mise en place de ces systèmes, la composante matérielle est évidemment très forte, mais il faut aussi obligatoirement prendre en compte la composante humaine ; ce thème peut constituer en soi un sujet de réflexion au niveau réglementaire, administratif ou normatif ».

**E. Leroi :** « Au nom de tous les participants, je voudrais remercier Luca Pitet pour l'organisation remarquable de cette conférence et pour la qualité du travail qui a été fait dans ce projet, pour lequel il a été l'une des chevilles ouvrières... ».

## 8 Visite au site de Bosmatto (commune de Gressoney-Saint-Jean)

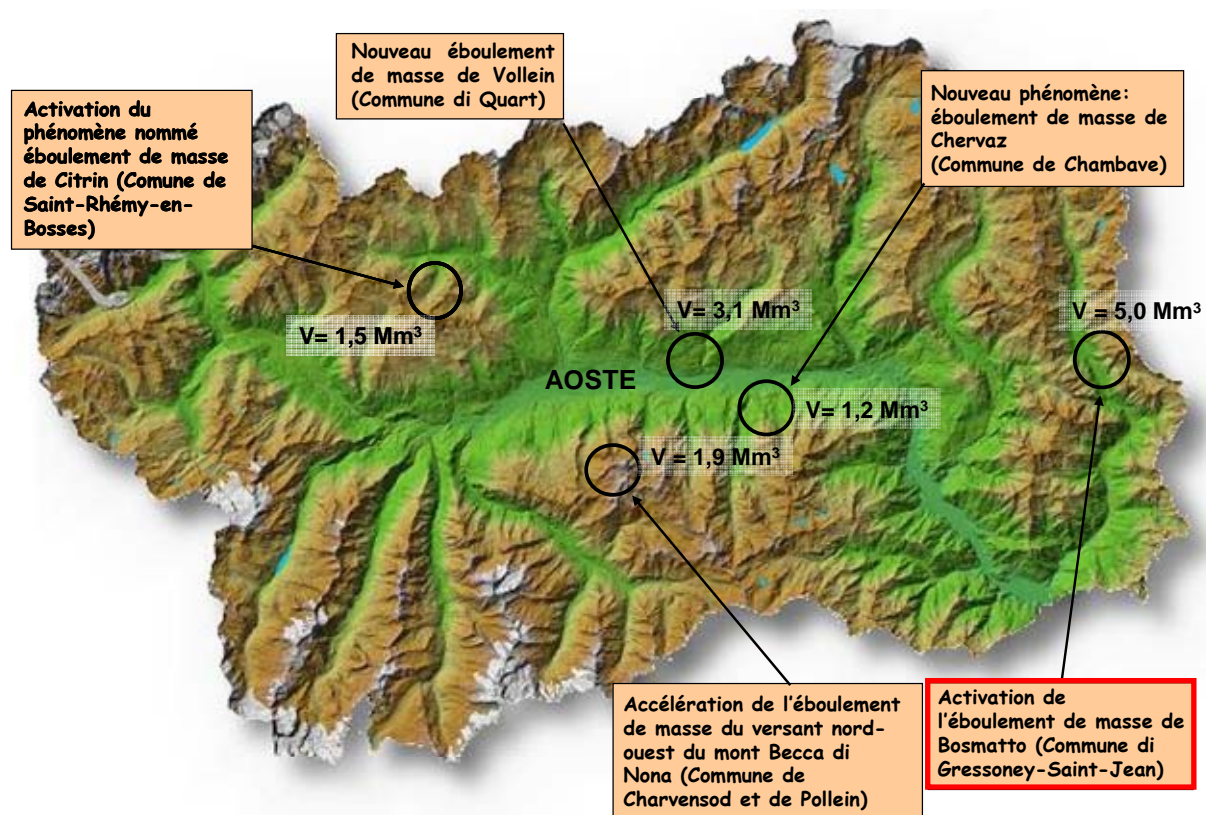
La visite de terrain du site de Bosmatto était précédée la veille d'une présentation en salle par Luca Pitet.

### 8.1 Présentation du site de la visite de terrain du 26/10/06

Luca PITET (RAVA)

#### L'événement du 15 octobre 2000

Sur le territoire de la Région Autonome de la Vallée d'Aoste, les pluies du mois d'octobre 2000 ont causé l'accélération de grands mouvements de masse et la formation de plusieurs nouveaux éboulements. En particulier :



Voir aussi le compte-rendu de l'*atelier 4* : « Surveillance et gestion du territoire en Vallée d'Aoste », ainsi que la présentation des grands mouvements de masse sur le territoire valdôtain : [A4P4](#)

Sur le site de Bosmatto (Vallée du Lys, figure ci-dessus), ces intempéries ont provoqué la réactivation d'un mouvement de terrain de grande ampleur dans le bassin versant du torrent Letze (surface : environ 1 km<sup>2</sup>). Dans la soirée du 15 octobre, l'éboulement a généré une lave torrentielle qui s'est propagée dans le chenal du torrent et s'est étalée sur son cône de déjection, avec un volume de 150 000 à 200 000 m<sup>3</sup>, causant de nombreux dégâts dans le village de Gressoney-Saint-Jean.

Un immeuble a été complètement détruit, un autre sérieusement endommagé (rez-de-chaussée complètement détruit) et les parties basses des remontées mécaniques ont été également atteintes sur le cône de déjection du torrent (photos page suivante).





Parcours de l'écoulement de débris sur le versant depuis le point de déclenchement jusqu'au lieu de dépôt le long du torrent Letzebach



Chenal creusé par l'écoulement

Dépôts torrentiels

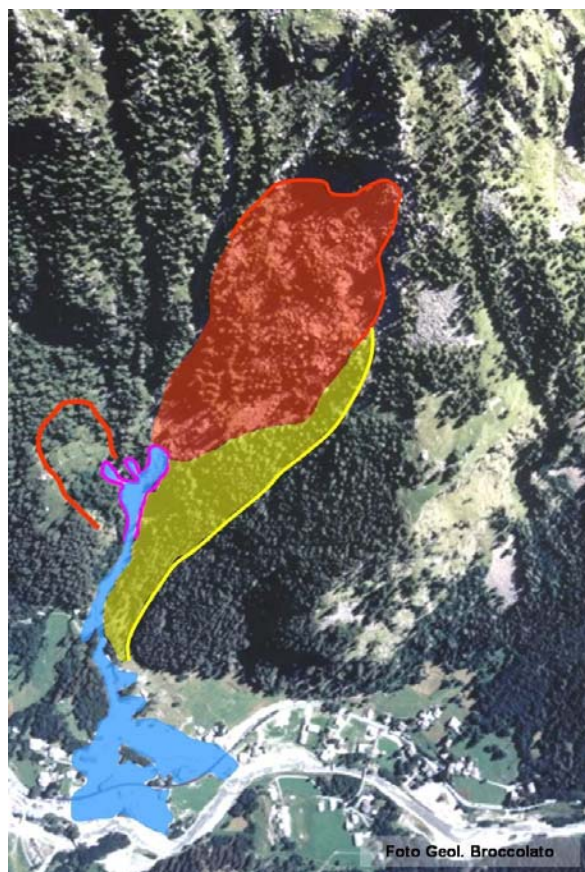


Engrèvement sur le cône de déjection

Suite à cet événement, l'administration régionale a confié l'étude de l'éboulement à une société privée et au CNR de Turin. L'analyse a permis de reconstituer assez précisément le déroulement des événements.



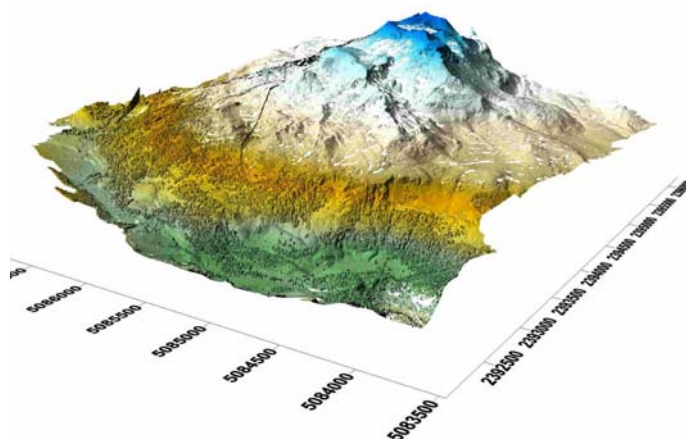
L'éboulement peut être divisé en 3 parties (photos ci-dessous) : une partie haute (en rouge) présentant une accumulation de gros bloc, d'un volume de l'ordre de 3 millions de  $m^3$  ; un secteur intermédiaire couvert de forêt (en jaune) dont le volume est d'environ 2 millions de  $m^3$  ; et une partie frontale constituée de dépôts d'origine glaciaire, d'un volume plus modeste. Au total, les volumes en jeu sont donc de l'ordre de  $5 \text{ Mm}^3$ .



Pendant 3 jours, le cumul de précipitation a été de l'ordre de 600 mm. Les pluies ont entraîné la saturation de la masse détritique qui s'est abaissée de 5-6m et la déstabilisation de sa partie frontale, qui s'est détachée soudainement, déclenchant la coulée de débris (ci-dessus, en bleu). Celle-ci a provoqué l'érosion du lit du torrent sur une dizaine de mètres d'épaisseur (photos page précédente) et le sapement basal des versants qui ont été déstabilisés sur les deux rives.

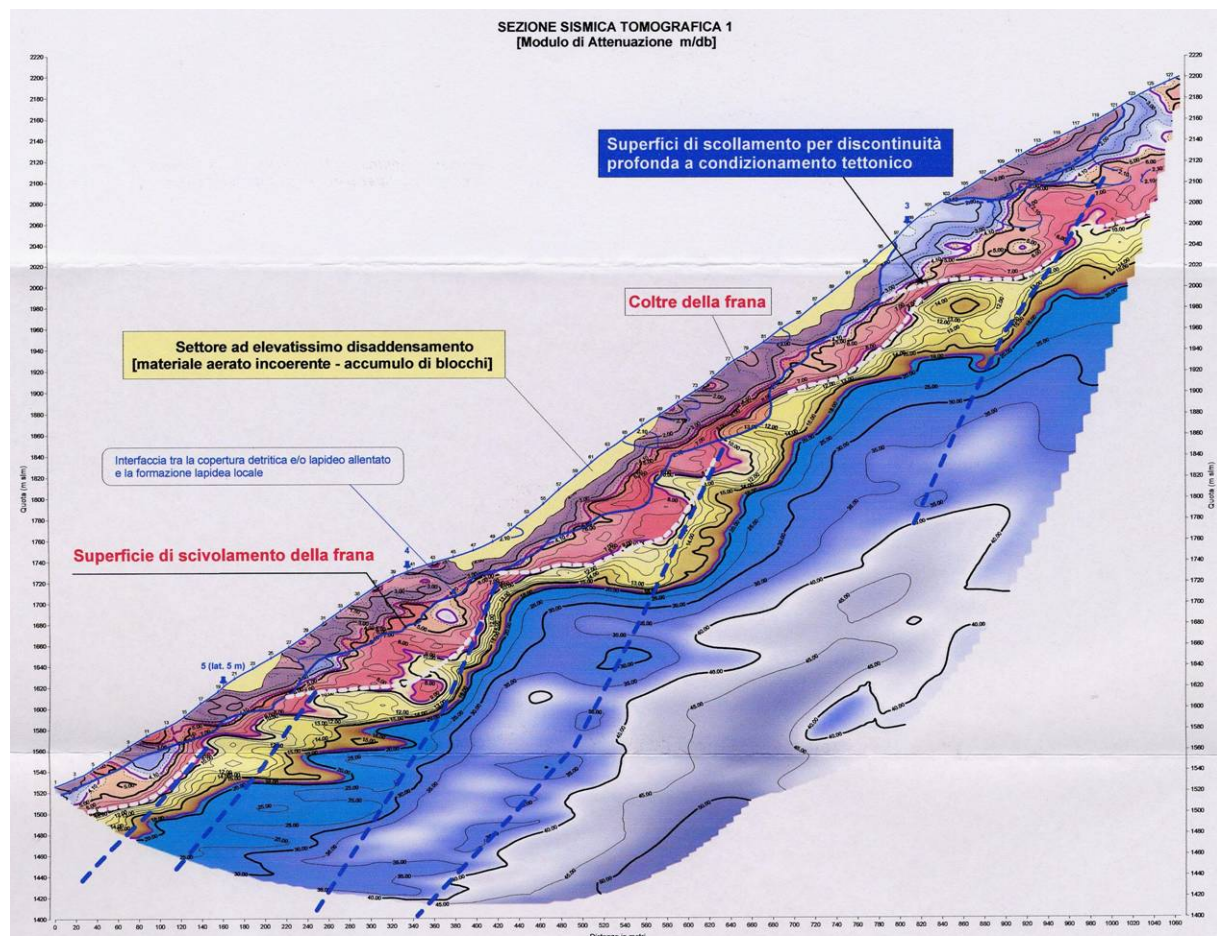
#### Acquisition de données géométriques et géophysiques sur le site

Un relevé Laser-scanner a été effectué par hélicoptère pour construire un Modèle Numérique de Terrain (MNT).





On a aussi procédé à une analyse par sismique-réfraction, qui a permis d'imager la structure du versant en profondeur (ci-dessous).



### Gestion du risque à moyen et long terme

Deux types de problèmes se sont posés : (1) comment protéger les constructions en aval ? ; (2) comment surveiller et contrôler le phénomène ? Il a été décidé de réaliser des ouvrages de protection (dont la conception a été confiée à l'ingénieur Bethaz), consistant à réaliser un bassin dont le dimensionnement est calé sur l'hypothèse qu'un événement similaire puisse se répéter avec un même volume.

On a procédé à la mise en place d'un système de télésurveillance (§ 8.2 p.228) associé à un plan de protection civile qui peut être activé sur la base des procédures de gestion mises en place (voir *infra*) et des ouvrages de protection ont été construits (§ 8.3 p.230).

L'instrumentation du site de Bosmatto a été réalisée dans le cadre de l'activité 2 du projet : voir *site pilote 3*.

La mise en place d'une stratégie de gestion du risque a suivi les étapes suivantes :

(1) *Définition des objectifs à réaliser :*

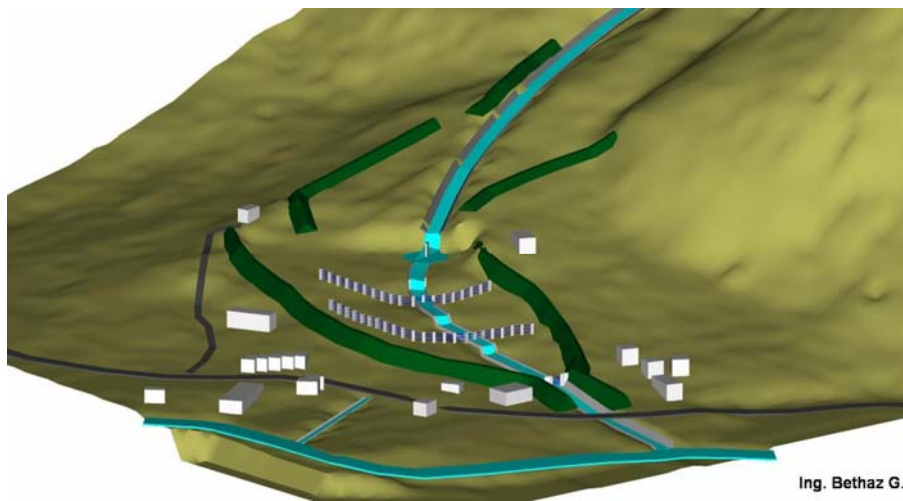
- Faire face à un écoulement de débris de 200 000 m<sup>3</sup> (phénomène semblable à celui survenu en octobre 2000).

(2) *Analyse conditions actuelles :*

- Impossibilité actuelle de réaliser des interventions efficaces sur l'éboulement de Mussolier ;
- Possibilité de réaliser une plage de dépôt ;
- Risque élevé d'introduire de grandes quantités de matériau dans le torrent Lys.

(3) *Définition des stratégies principales de l'intervention :*

- Réalisation d'une plage de dépôt à même de stocker 150 000 - 200 000 m<sup>3</sup> de matériaux (figure ci-dessous) ;
- Réalisation d'ouvrages de dissipation de l'énergie de l'écoulement ;
- Réalisation d'interventions pour assurer l'afflux du matériau dans la plage de dépôt.



Ing. Bethaz G.

Rendu virtuel des ouvrages de protection lors du projet



(1) Phases de réalisation des levées de terre renforcées dans la partie frontale de la plage de dépôt



Les travaux de construction des ouvrages de protection se sont déroulés en plusieurs phases, illustrées par les photos ci-dessus et ci-dessous.



- (2) Secteur final de la plage de dépôt avec les levées de terre protégées avec enrochement  
 (3) Partie extérieure du secteur final de la plage de dépôt avec les levées de terre en construction  
 (4) Partie extérieure du secteur final de la plage de dépôt avec les levées de terre partiellement engazonnées  
 (5) Vue panoramique pendant la réalisation de la plage de dépôt

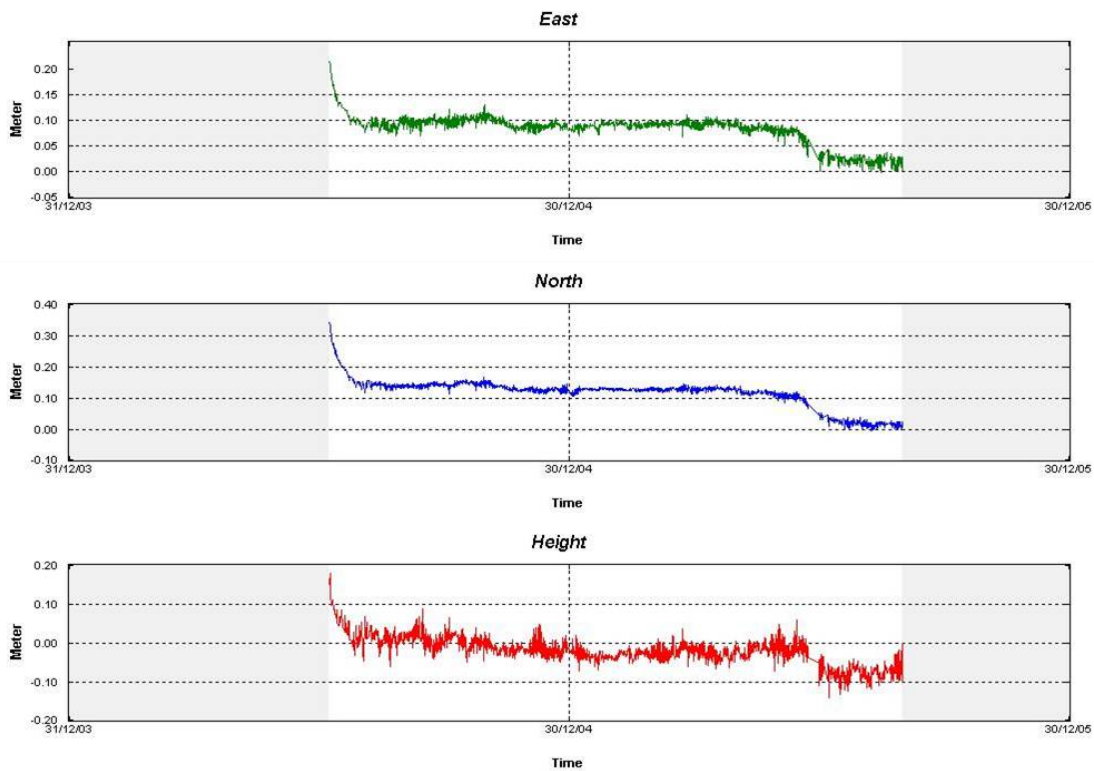
Voir aussi la présentation de ces travaux de protection à l'atelier d'Aoste : [A4P12](#)

## 8.2 Visite des systèmes de surveillance du site de Bossmatto – Torrent du Letze

Le système de télésurveillance (figure ci-dessous) est constitué d'une station météo alimentée par panneaux solaires située à 2300m d'altitude et de deux stations GPS : l'une dans la partie haute de l'éboulement, l'autre dans le secteur central. Les données sont acquises de façon automatique et sont envoyées au centre de collecte de la Protection Civile avec le système Eydenet, développé en RAVA après les événements de 2000 (voir [A4P8](#)).



Disposition des instruments automatiques de surveillance



Station automatique GPS 7 - Période juin 2004 – août 2005



En 2003, une fissure s'est formée sur le versant déstabilisé en rive droite, qui a subi une forte accélération. Depuis, ce secteur fait aussi l'objet d'un monitoring avec une station GPS automatique qui fonctionne comme les deux autres, complétée par un réseau de repères GPS dont la lecture est effectuée manuellement deux fois par an. La précision des mesures est de 1,5-2 cm, mais du fait du mouvement du versant dans son ensemble, il s'agit de mesures 'absolues' dans un système relatif. Un inclinomètre sert à contrôler si une dérive de l'instrument se produit. Ce contrôle est effectué 2 ou 3 fois par ans, ou bien à chaque fois qu'une donnée semble aberrante. De 2003 jusqu'à octobre 2006, le déplacement maximal enregistré en surface est de 1,5m, mais il se peut qu'il diffère du déplacement réel en profondeur.



Niche d'arrachement formée en 2003 sur le versant de rive droite

La topographie de ce secteur présente une série de gradins en marches d'escalier. En amont, une sorte de bassin s'est formé à une altitude d'environ 2400m, où l'eau s'accumule. Les matériaux superficiels d'une épaisseur évaluée à 1,6m reposent sur un substrat rocheux fortement compacté et fracturé. La compréhension de la dynamique de ce secteur est encore en phase d'interprétation.

Sur le versant de rive gauche, l'éboulement en masse s'inscrit également dans un substrat rocheux très fracturé, parcouru par des écoulements souterrains alimentés par une nappe suspendue en amont. La fracture principale présente une profondeur variable, de l'ordre de 80-90m. Le débit varie de façon sensible selon les saisons et l'écoulement est parfois tari. A la base de l'éboulement, une nappe plus profonde est alimentée par un torrent situé en amont, sans continuité morphologique avec la précédente. Cette nappe est probablement sous contrôle structural et dépend vraisemblablement de la présence d'une grande faille.

Le dispositif de surveillance a été complété en 2006 par l'installation de 4 extensomètres. La transmission radio des données est en cours de calibration.

### Le Plan de protection civile

Le Plan de protection civile mis en place par l'administration communale est basé sur des procédures d'interprétation des données du monitoring de l'éboulement et des données météo. Ces procédures reposent sur le risque potentiel de déclenchement d'une nouvelle lave torrentielle, en tenant compte de l'existence des ouvrages de protection. Les précipitations étant considérées comme le facteur déclenchant, les données pluviométriques horaires (voire au pas de ½ h) constituent les données de base, mais celles-ci sont enregistrées avec un retard de 1 h voire 2 h. Si la procédure de pré-alerte reposait uniquement sur les données pluviométriques, elle risquerait ainsi d'être déclenchée trop tard. La gestion du Plan de protection civile se fait donc aussi bien sur la base des données pluviométrique que sur la base des données GPS et extensométriques.

Le village en aval comporte une dizaine de bâtiments à risque et une quinzaine de personnes résidant de façon permanente sont concernées. Mais il faut prendre en compte les fluctuations de la population en période estivale et hivernale : 2000 personnes peuvent être intéressées par le risque pendant l'été. Heureusement, la saison où le risque est maximal est l'automne.

Des sirènes ont été mises en place, mais même si l'alerte est donnée 1 h à l'avance, cela ne laisse pas suffisamment de temps pour évacuer les touristes et pour vérifier si les habitants ont bien reçu le signal de pré-alerte et ont réagi (il faut passer dans les maisons et les immeubles comportent 30 appartements...). Jusqu'à présent, jamais l'ordre d'évacuation n'a été donné.

Trois scénarios d'évacuation ont été étudiés :

- scénario de type événement d'octobre 2000 : ne devrait pas comporter de problème grâce aux ouvrages de protection,
- scénario catastrophique 'modéré' : écroulement de 2-3 millions de m<sup>3</sup> avec obstruction du lit torrentiel et formation d'un bassin. Il faudrait alors évacuer toute la commune mais également les villages situés à l'aval ;
- scénario catastrophique 'extrême' : les 2 premiers scénarios ont été associés, associant le comblement de la plage de dépôt (type 2000) et une lave torrentielle de plus de 3 Mm<sup>3</sup>, auquel cas la commune pourrait ne pas être en mesure d'intervenir. La procédure d'alerte n'est pas différenciée sur la base d'un scénario ou d'un autre.

Question sur le terrain : « Est-ce que des seuils pluviométriques spécifiques ont été définis pour ce site ? ».

Réponse : « Nous avons procédé à une rétro-analyse de l'éboulement de la Becca di Nona d'octobre 2000 en vérifiant les données de la littérature et les mesures de déplacements instrumentales. Pour le site de Bosmatto, on ne disposait pas de données pour fixer des seuils et ceux-ci ont été établis par analogie. Pour les déplacements planimétriques, les seuils obtenus semblent assez cohérents. Pour les seuils pluviométriques, l'hypothèse de 14 mm/h retenue dans la littérature est peut-être un peu trop prudente mais il vaut mieux fixer des seuils assez bas par précaution. Il faudra approfondir sur la base de plusieurs années d'observation. Le problème est que les pluviomètres ne mesurent pas les mêmes quantités de pluie d'un versant à l'autre ».

Le coût du système de télésurveillance est difficile à indiquer, parce que plusieurs actions et dépenses sur le système de surveillance de Bosmatto ont été menées avec les autres sites pilotes en Vallée d'Aoste (ex : l'achat du système Eydenet, le relevé laserscanner par hélicoptère...).

Voir aussi la présentation à l'atelier d'Aoste de la caractérisation du phénomène et du système de télésurveillance : [A4P9](#)

### **8.3 Visite des ouvrages de protection**

Sur son cône de déjection, le torrent Letze a été canalisé entre des digues en terre dans un chenal d'une dizaine de mètres de profondeur, de manière à empêcher les tentatives de divagation du cours d'eau. La pente qui passe de 15° dans la partie amont du cône à 4° dans sa partie aval a été étudié pour favoriser le dépôt des matériaux et des seuils hydrauliques hauts de 1,5m ont été aménagés pour dissiper l'énergie des écoulements dans la partie supérieure du cône, afin de réduire le risque d'impact. Un canal complète le dispositif pour décharger l'eau en conditions normales.



La plage de dépôt (photo ci-dessous) a été dimensionnée de manière empirique sur la base du volume de la lave torrentielle d'octobre 2000. A l'intérieur, deux lignes de dissipateurs constitués de dents déflectrices reliées par des barres métalliques contribuent à stopper le flux de matériaux en favorisant l'étalement des débris. La plage de dépôt est fermée à l'aval mais une ouverture a été prévue pour laisser passer l'eau et une partie des matériaux.

Un tuyau de 1,5m de diamètre doit permettre de décharger l'eau en cas de comblement de la plage de dépôt.

La conception de ces ouvrages a nécessité de prendre en compte les nombreux paramètres qui décrivent l'hydraulique torrentielle, ce qui s'avère particulièrement difficile. Leur contrôle a été effectué à l'aide d'une modélisation basée sur des éléments cellulaires. Le calage des paramètres a été réalisé par rétro-analyse du phénomène d'octobre 2000 en intégrant les ouvrages de protection. Selon le modèle, ceux-ci sont censés fonctionner correctement. D'autres études réalisées en parallèle ont confirmé la validité de cette intervention malgré la variabilité des phénomènes.

Pendant l'événement de 2000, l'écoulement de la lave torrentielle s'est déroulé en plusieurs phases successives, par bouffées. Comme il s'est produit à 21 h, il faisait nuit et l'on ignore quels débits ont pu être atteints. Les débits maxima envisagés dans le calcul sont de  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  pour le débit liquide (ce qui correspond à un débit centennal) et de  $160 \text{ m}^3/\text{s}$  pour le débit solide, avec une vitesse de 6 m/s. La section transversale a été dimensionnée pour permettre le passage d'un débit solide de  $180 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Foto Ing. Bethaz G.

Vue panoramique de la plage de dépôt en construction avec les levées de terre partiellement engazonnées

Pendant les travaux, les habitants ont continué à résider sur le site. Pour la construction de la plage de dépôt (photo ci-dessus), du matériel en place a été récupéré. Les remblais ont été faits par couches et seule une partie a été bétonnée dans la partie aval.

Le coût total des ouvrages de protection s'élève à 3,5 M€



Panorama de la plage de dépôt

Voir aussi le diaporama : [photos de la visite de terrain au site de Bosmatto](#)

#### 8.4 Echanges en salle avec l'adjoint au Maire de Gressoney-St-Jean en présence d'Monsieur Alberto CERISE – Assesneur du Territoire, de l'Environnement et des Ouvrages Publics

**J.-M. Vengeon :** « Après 2000, on pensait que des phénomènes rapprochés pouvaient se produire, ce qui n'a pas été le cas pour le moment. Après une première lave, quel est le temps nécessaire pour curer la plage de dépôt et être opérationnel, vu le volume de matériaux mobilisables ? ».

**Adjoint au Maire :** « On a prévu une série d'interventions, en laissant une piste d'accès dans les parties haute et basse du cône, pour pouvoir intervenir rapidement. Si un phénomène comme celui de 2000 devait se produire et la plage de dépôt se remplir, des mesures de protection civile seraient nécessaires. Le temps nécessaire pour curer la plage de dépôt est assez long ; il est difficile à évaluer... ».

**L. Pitet :** « Lors de la conférence, un des participants a demandé quel a été l'engagement de la Région après l'événement de 2000 ».

**A. Cerise :** « Pour faire face à ce type de problème, il est nécessaire d'avoir des considérations de type technique, économique et politique, ainsi qu'une approche juridique. Il faut distinguer plusieurs phases. La 1<sup>ère</sup> phase juste après l'évènement a exigé 110 M€ pour mener l'intervention de mise en sécurité immédiate et les actions urgentes de remise en état. La 2<sup>ème</sup> phase, en cours d'achèvement a nécessité environ 400 M€ (1000 milliards de livres) pour la réalisation des ouvrages de protection et du système de télésurveillance. La 3<sup>ème</sup> phase se rattache à l'approche politique.

L'événement de 2000 a 'secoué' le territoire, qui n'est pas tout à fait 'guéri'. La population a subi un choc qui n'a pas encore été absorbé. Les documents réglementaires et les délibérations du gouvernement régional ont montré la nécessité d'une approche globale de l'aménagement du territoire, concentrée sur les activités qui vise à sa conservation en ce qui concerne les interventions de type structurel.

Une série d'études a été entreprise pour produire une couverture photographique intégrale des zones où des aléas sont présents. L'étude a porté sur 54 petits bassins versants principaux (une centaine au total) afin de dresser un panorama global et de quantifier au niveau économique les interventions nécessaires pour la gestion préventive du risque. Le volume d'investissement prévu est de 520 M€ environ.

En plus du torrent Letze, une intervention sur le lit de la rivière principale doit être entreprise. Des actions doivent aussi être menées sur le territoire avec des délocalisations. Des zones d'expansion doivent être libérées. Voilà pour le cadre général.

Nous avons essayé d'obtenir des financements par l'Etat Italien mais cela n'a pas été possible. On essaie d'établir une réglementation au niveau de la Région pour qu'elle devienne un point de repère fixe au niveau juridique. Les cartes de danger permettent de dresser une 'photographie' du territoire ; il n'y a plus d'alibi possible. La connaissance existe. Ces actions apportent la démonstration qu'on a fait quelque chose... mais on ne pourra pas réduire le risque. Il faut toujours démontrer pourquoi on a décidé d'intervenir dans un lieu plutôt que dans un autre, nous sommes confronté à un 'esprit de clocher' qui ne tient pas compte de la stratégie globale de réduction des risques... ».

**Domenico Pumo (Université de Palerme) :** « Quel est le temps de retour calculé pour l'événement de 2000 du point de vue hydrologique ? Quelles ont été les conditions météorologiques dans les jours précédents (3 jours) ? Est-ce que des signes particuliers existaient ? Cette zone était-elle considérée comme à risque ? ».

**Massimo Broccolato :** « La période de retour hydrologique a été estimée à 200 ans, mais cette fourchette risque de se réduire : déjà en 1994, la région avait été frappée par un événement calamiteux. Pour le mouvement de masse de Bosmatto, un événement similaire s'était déjà produit historiquement en 1846.

Concernant les signes précurseurs, le mois de septembre 2000 avait connu un événement hydrologique moins intense mais durant 4 jours, qui avait causé certains phénomènes sur le versant. Celui-ci était peut-être déjà proche de la saturation. En octobre 2000, presque tout le territoire a été affecté, sauf le haut de la vallée d'Aoste (Morgex, Courmayeur). Beaucoup de coulées de débris se sont déclenchées, parfois même au sein de forêts où personne n'aurait pu imaginer qu'elles se produisent. La mémoire se perd. Les 3/4 du territoire ont été en crise. On a relevé jusqu'à 100 ou 110 éboulements pour une commune. Le 16 octobre, un éboulement s'est produit dans la vallée de Cognes dans un lieu où l'on ne pensait pas qu'il puisse se produire. Maintenant, avec la cartographie de ces phénomènes, on dispose d'une meilleure connaissance des zones à risque ».

**L. Pitet :** « Des précipitations neigeuses ont eu lieu avant l'événement (septembre 2000). Ensuite (14-16 octobre 2000), la hausse des températures a fait fondre une partie du manteau neigeux et cela a considérablement augmenté le ruissellement et le débit des cours d'eau ».

**I. Voyat :** « Le zéro thermique se trouvait très haut en altitude dans toute la Vallée d'Aoste... ».

**Analissa Bethaz** (Direction de l'Aménagement du territoire, Assessorat du Territoire, de l'Environnement et des Ouvrages) : « Depuis 1978, la région disposait d'une loi qui prévoyait une cartographie des zones non constructibles, avec 3 catégories non constructibles concernant les aléas naturels et les contraintes environnementales. Mais cette loi n'était pas contraignante et très peu de communes ont procédé à cette cartographie. La loi de 1988 l'a ensuite rendue obligatoire.



Il faut souligner la spécificité des événements d'octobre 2000 : sur les quelques communes ayant réalisé cette cartographie des aléas, ceux-ci n'étaient pas prévus. Par exemple, la commune de Fenis a connu 49 éboulements mais on n'avait pas fait l'hypothèse d'une situation aussi catastrophique. L'événement de 2000 nous a donc appris beaucoup de choses.

La cartographie des aléas constitue une base pour l'aménagement des territoires de montagne. Toutes les communes sont en train de réviser leur plan d'urbanisme sur cette base. Il faut aussi penser aux procédures de délocalisation, qui coûtent moins cher que de construire d'immenses ouvrages... En 2001, une loi régionale a prévu une re-localisation. Elle prévoyait des procédures accélérées pour réinstaller les habitations qui avaient été atteintes ».

**J.-M. Vengeon :** « Pouvez-vous préciser si les maisons situées juste dans le virage à l'arrière de la digue de la plage de dépôt ont été réparées et s'il y a eu de nouvelles constructions depuis l'événement ? ».

**Adjoint au Maire :** « Les bâtiments affectés étaient au nombre de 4 ou 5, dont un complètement détruit. Les autres ont été réparés avec une procédure de remise en état extraordinaire. De plus, des prescriptions ont été données pour mieux sécuriser les structures. Soit l'on reconstruit complètement les bâtiments détruits, ailleurs, soit on les renforce... ».

**L. Pitet :** « En parallèle de ce projet Interreg RiskYdrogé, un autre colloque se tient demain sur les aménagements hydrauliques et forestiers et les participants sont ici présents : qu'avez-vous pensé de ce que vous avez vu sur le terrain ? ».

**Un Professeur de l'Université de Milan :** « Je voudrais faire deux remarques. (1) Concernant les précipitations, d'après mon expérience, il n'y a pas de problème technique qui entrave le fonctionnement du système d'alerte quasi en temps réel, il n'y a pas de problème particulier d'alimentation ou autre. Donc l'action de la Protection Civile est essentielle.

(2) La gestion des grands ouvrages et leur surveillance doivent fonctionner sur des temps de retour extrêmement longs. Or la construction de ces ouvrages absorbe toutes les ressources et l'on ne finance pratiquement jamais les actions suivantes (exemple en Lombardie...), alors que l'on finance beaucoup de plans d'urgence chaque année. Il faudrait en tenir compte...

Le cas du torrent Letze est très particulier, car le front est très rapproché. Dans d'autres cas on a souvent une marge de manœuvre plus importante. (...) Vous avez parlé d'une coulée de débris qui a creusé le chenal de 10m au pied d'un versant qui avait déjà des problèmes... On intervient avec des ouvrages gigantesques en oubliant ce qu'on peut faire de façon plus modeste... Dans bien des cas, ces ouvrages ne seront jamais amenés à fonctionner... Aujourd'hui, les habitants doivent être contents de se sentir protégés, mais dans 10-20 ans, quel sera le commentaire ?

Donc de façon générale, la question est la suivante : est-ce que ça vaut la peine d'investir tout ce que l'on a, alors que peut-être on pourrait avoir une approche différente dans l'utilisation des ressources... ».

**Philippe Raviol (DIREN Rhône-Alpes) :** « Face à ce type de risque, la question est aussi celle des dispositifs essentiellement financiers dont disposent la Vallée d'Aoste et éventuellement les autres régions. En France, on a à peu près la même analyse qu'en Italie pour ce qui est de l'événement, mais l'approche est différente concernant les dispositifs de protection. Nous disposons d'outils juridiques et financiers (tels que les délocalisations évoquées en RAVA) : en France, l'Etat finance à 100% les expropriations. Par contre, les travaux sont à la charge de la commune (au moins 20%), qui peut cependant être aidée par les collectivités territoriales. Comment ça se passe en Italie ? ».



**L. Pitet :** « Vous avez vu seulement une petite partie du territoire de la Vallée d’Aoste. Chez nous, les délocalisations concernent essentiellement des petites communes qui ont un territoire très difficile, où l’on ne peut pas re-localiser sur place. L’argent destiné aux délocalisations permettra de financer 80% pour les résidences principales et au maximum 40-50% pour les résidences secondaires.

Nous sommes confrontés à une réalité particulière : pendant la saison touristique, la population augmente jusqu’à tripler, alors qu’autrefois, les centres historiques se concentraient dans les lieux les plus sûrs, peut-être par tradition, et le reste du territoire était consacré à l’agriculture et l’élevage ».

## 9. Synthèse et conclusion de la conférence finale

Eric LEROI (*URBATER*)

### Objectifs du projet RiskYdrogé

L'objectif de ce projet était de réaliser un inventaire des méthodes d'investigation du sous-sol, des types de parades, des modes de surveillance des risques hydrogéologiques, et de procéder à une analyse comparative afin de proposer les solutions les plus pertinentes aux collectivités territoriales et plus largement aux gestionnaires des risques.

Les actions réalisées dans le cadre de ce projet se sont organisées autour de quatre ateliers transfrontaliers, de six sites pilotes et de la rédaction d'un guide pratique intitulé « Investigations, instrumentation et parades en matière de risques hydrogéologiques (RiskYdrogé) : état des connaissances dans l'Arc Alpin ».

### Objectifs du workshop

Les objectifs de la conférence internationale qui s'est tenue à Saint-Vincent (Italie – Vallée d'Aoste) les 24, 25 et 26 octobre 2006 étaient les suivants :

- Exposer les résultats du projet RiskYdrogé ;
- Prolonger les échanges des ateliers transfrontaliers sur chacune des thématiques « surveillance », « parades » et « technologies innovantes » ;
- Mettre en perspective les résultats obtenus au regard des expériences et pratiques internationales ;

Une visite du site de Bosmatto (Gressoney-Saint-Jean) a été organisée le 26 octobre, en liaison avec la conférence « Le sistemazioni idraulico-forestali per la difesa del territorio », afin de présenter le système de surveillance.

### Organisation du workshop

Le workshop était organisé en trois temps :

- Synthèse des ateliers transfrontaliers et intervention d'experts internationaux ;
- Présentation des résultats du projet, intervention d'experts extérieurs et débat sur chacune des thématiques :
  - o Télésurveillance des sites instables : structure des systèmes de télésurveillance et seuil d'alarme,
  - o Ouvrages de protection : perspectives d'innovation pour faire face à des contraintes d'emprise spatiale, de haute énergie et d'intégration environnementale,
  - o Utilisation de technologies innovantes.
- Visite du site de Bosmatto.

Introduit par Monsieur A. Cerise, Assesseur au Territoire, à l'Environnement et aux Ouvrages Publics, qui a rappelé l'importance de ces travaux et le lien étroit avec l'urbanisme et le développement, puis par Monsieur M. Pasqualotto, chef de file du projet, Directeur de la Protection du Territoire de la Région Autonome Vallée d'Aoste, qui a présenté les différents partenaires et actions du projet, la conférence internationale a réuni des techniciens du risques et des gestionnaires nationaux et locaux du risques.

Un effort particulier de structuration et de communication avait été fait par les différents intervenants, ce qui a permis un échange de qualité avec l'auditoire, et a conduit à des débats animés.

## **Analyse et synthèse des résultats**

### *Ateliers transfrontaliers*

La synthèse présentée sur les quatre ateliers organisés au cours du projet RiskYdrogé a souligné tout l'intérêt de ces réunions. Elles favorisent largement les débats et les discussions ainsi que les transferts d'expérience et les échanges entre les techniciens et les gestionnaires des risques.

De tels ateliers sont à favoriser dans les futurs programmes, en invitant les protagonistes à faire des efforts de communication, comme ce fut le cas au cours de la conférence de Saint-Vincent.

### *Télésurveillance des sites instables : structure des systèmes de télésurveillance et seuil d'alarme,*

Un travail très important d'analyse et de comparaison des systèmes de surveillance a été mené dans le cadre du programme RiskYdrogé, à partir des 3 systèmes Guardaval, Eydinet et GeSSRI

Le formalisme utilisé pour décrire les systèmes sur la base d'une symbologie structurée ouvre des perspectives intéressantes en termes d'analyse et de communication. L'élaboration de schémas de principe adaptés aux conditions spécifiques de site peut ainsi être aisément réalisée.

Les bases de données élaborées sur les différentes composantes des systèmes de surveillance (capteurs, centrales d'acquisition, moyens de transmission) viennent se rajouter aux nombreuses bases déjà élaborées. Au-delà du travail de collecte et d'organisation des informations, il convient de trouver une structure opérationnelle porteuse qui puisse actualiser les données afin de garantir la pérennité et l'intérêt de ces informations.

Que ce soit sur les outils (capteurs, centrales, transmission) ou sur les systèmes, il convient d'engager une réflexion plus avale pour réaliser de véritables outils d'aide à la décision, qu'il s'agisse de guides ou de systèmes informatisés.

Les décideurs et les gestionnaires des risques doivent pouvoir disposer de recommandations sur les mises en place des systèmes en fonction de la typologie des phénomènes, en intégrant plusieurs composantes telles que la dynamique du mouvement, le coût, les délais, les enjeux et les temps de transmission et d'interprétation.

Les partenaires du projet RiskYdrogé ont présenté des acquis majeurs et complémentaires sur l'ensemble du processus de télésurveillance, que ce soit sur les composantes des systèmes, leurs organisations, sur la gestion à distance, les seuils d'alerte et le suivi intégré de plusieurs systèmes simultanément. Leurs expériences ont également permis d'orienter les choix pour mettre en œuvre des systèmes fiabilisés. Si les mouvements de terrain à surveiller sont toujours spécifiques, l'expérience acquise permet de formuler nombre de recommandations pertinentes pour la surveillance de nouveaux sites.

De nombreuses questions méritent un approfondissement ou tout au moins un niveau d'intégration supplémentaire. Pour ne citer que quelques unes d'entre elles :

- comment installer un système de surveillance dans l'urgence, en cohérence avec les procédures légales, notamment celles du code des marchés publics ?
- comment définir une configuration pertinente d'un système de surveillance quand le mécanisme n'est pas connu ?
- Après combien de temps peut-on caler des seuils d'alerte fiables ?
- La notion de retour sur investissement est-elle pertinente pour la surveillance des phénomènes naturels ? Dans l'affirmative, sur quelle base ?
- Comment recoller et recalibrer des séries temporelles interrompues ?
- Comment intégrer la non stabilité des phénomènes (dérives naturelles, évolution ou modification des mécanismes) ?
- Comment disposer de modèles prédictifs fiables, notamment pour les phases finales ?
- Qu'en est-il de la maintenance des systèmes et de leur pérennité temporelle ?
- Quelle est la place des systèmes de surveillance dans la réduction des risques ? Ne risque-t-on pas de générer un sentiment de sécurité excessif au sein des populations exposées à des phénomènes mis sous surveillance ?
- ...

Les partenaires disposent en la matière d'une base solide pour étayer un argumentaire de réponse. La poursuite du travail et des collaborations engagés dans le cadre du projet RiskYrogéo devrait permettre de proposer des guides présentant un niveau d'intégration supplémentaire afin d'offrir une véritable aide à la décision. De tels guides n'existent pas à ce jour.

***Ouvrages de protection : perspectives d'innovation pour faire face à des contraintes d'emprise spatiale, de haute énergie et d'intégration environnementale***

La conférence internationale a traité de l'ensemble des techniques possibles de protection, qu'il s'agisse des filets, des merlons et des galeries. Les présentations ont présenté les évolutions les plus récentes dans chacun des trois domaines, avec des performances toujours accrues.

Les partenaires du projet disposent de la totalité des compétences et des savoir-faire en termes de modélisation, de dimensionnement et de mise en œuvre.

Des voies intéressantes d'évolution et de recherche peuvent être envisagées, à savoir :

- technologies mixtes : certaines des technologies présentées pourraient certainement être combinées pour des performances améliorées, et des coûts optimisés ; c'est le cas notamment avec les merlons et les galeries ;
- La communauté scientifique ainsi que les gestionnaires des risques disposent d'une information insuffisante sur le retour d'expérience de ces techniques de protection, notamment sur les questions de coûts, de maintenance, et de pérennité des performances. Un travail de synthèse en ce sens serait particulièrement utile.
- La problématique de la demande de protection, de la fiabilité et du risque résiduel est insuffisamment abordée. L'approche énergétique de dimensionnement qui est retenue cantonne les choix de protection à des choix techniques. Il convient d'ouvrir l'analyse



vers des choix plus sociétaux et politiques, en liaison avec une réflexion sur les notions d'acceptabilité du risque, pour offrir un panel de solutions plus large et plus souple qui intègre une certaine notion de rentabilité.

### *Utilisation de technologies innovantes.*

La conférence internationale a permis de faire une présentation exhaustive des technologies existantes.

Celles-ci sont caractérisées par des niveaux de performance remarquables tant sur le plan de la résolution que de la continuité spatiale. Il est possible de disposer de champ de déplacements ou de déformations où l'on ne disposait encore récemment que de données ponctuelles ou dans le meilleur des cas de profils.

Ces technologies ont connu des développements remarquables, et les limitations fortes d'utilisation tendent à s'estomper. Elles sont d'ailleurs largement utilisées dans la modélisation des phénomènes comme cela avait été présenté lors du workshop Rockslidetec.

Leur utilisation en termes de surveillance et d'alerte reste encore marginale même si des cas sont de plus en plus nombreux. Il existe manifestement un potentiel majeur d'analyse et de développement pour faire le lien entre la connaissance des phénomènes et la surveillance, l'une et l'autre ayant des interactions fortes, puisqu'on ne surveille correctement que des phénomènes dont la géométrie et le mécanisme sont correctement appréhendés.

Les remarques formulées à l'issue du workshop Rockslidetec sur la modélisation des phénomènes gardent leur pertinence pour la surveillance, avec des contraintes supplémentaires sur la continuité temporelle des données.

Par ailleurs, les informations fournies grâce à ces technologies restent surfaciques et ne donnent pas accès à la profondeur. Or les phénomènes qui sont suivis sont par essence tridimensionnels. En termes de surveillance, ces technologies s'inscrivent dans un système nécessairement global qui permette d'accéder aux informations qui ne leur sont pas accessibles, à savoir le 3D volumique et la circulation des fluides.

## Perspectives et propositions

Sur la base du travail important réalisé dans le cadre du projet RiskYdrogé et des résultats présentés lors de la conférence internationale des 24, 25 et 26 octobre 2006 à Saint-Vincent (Italie – Vallée d’Aoste), plusieurs éléments peuvent être rappelés pour commencer à structurer un programme Interreg qui permettra de valoriser les acquis :

- les investissements importants qui ont été consentis pour mettre en place une collaboration fructueuse sur un thème complexe et difficile, doivent être reconduits voire pérennisés ; il convient toutefois d’ouvrir cette collaboration, afin de l’enrichir, et de bénéficier d’expériences et de compétences avancées sur le sujet ;
- des axes de recherche et de développement complémentaires ont été identifiés. Pour ne rappeler que quelques uns d’entre eux :
  - o réalisation d’outils d’aide à la décision, pour la conception des systèmes de surveillance,
  - o mixité des technologies de protection,
  - o intégration des questions de surveillance et de protection dans une problématique élargie de gestion et de réduction des risques, sur la base de critères d’acceptabilité du risque et de demande sociale de protection.
- la valorisation des données, des informations et des résultats acquis dans le cadre du projet RiskYdrogé par :
  - o la pérennisation des bases de données élaborées, ce qui requiert une ou plusieurs structures porteuses,
  - o la réalisation de guides opérationnels et d’outils d’aide à la décision pour les gestionnaires des risques.
- Les ateliers ont montré tout leur intérêt ; lieu d’échange, de rencontre et de débat, ils devront être favorisés dans les prochains programmes.

---

**Edition : PGRN 2006**

Auteurs :

- Benjamin Einhorn (PGRN) : retranscription des présentations et discussions ; édition.
- Eric Leroi (URBATER) : synthèse de la conférence.
- Carine Peisser (PGRN) : retranscription des présentations et discussions.

*Les retranscriptions des présentations ont été validées par les intervenants.*

---