POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Aree vulnerabili per onde di piena dovute a rottura di sbarramenti - Zones vulnérables aux ondes de crue provoquées par la rupture des barrages

Original
Aree vulnerabili per onde di piena dovute a rottura di sbarramenti - Zones vulnérables aux ondes de crue provoquées par la rupture des barrages / Poggi, Davide; Cordero, Silvia; Simon, Dieudonné - In: Progetto RISBA Rischio degli sbarramenti artificiali - Projet RISBA Risque des barrages / Patrocco D., Bodrato G., Del Vesco R., Peyras L., Boutry M., Ropele P., Collà F. Verbavolant. - STAMPA. - TORINO : Verbavolant, 2015. - ISBN 9788894069501. - pp. 154-170

Availability:
This version is available at: 11583/2654104 since: 2016-10-24T12:58:30Z

Publisher:
Verbavolant

Published
DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

14 May 2026

Progetto transfrontaliero Italia-Francia ALCOTRA

Projet transfrontalier Italie-France ALCOTRA

alcotra

PROGETTO / *PROJET*

RISBA

RISCHIO DEGLI SBARRAMENTI ARTIFICIALI

RISQUES DES BARRAGES

verbavolant

Progetto transfrontaliero Italia-Francia ALCOTRA
Projet transfrontalier Italie-France ALCOTRA

PROGETTO *PROJET*

RISBA

RISCHIO DEGLI SBARRAMENTI ARTIFICIALI
RISQUES DES BARRAGES

verbavolant

© 2015 by Verba Volant, Torino
Tutti i diritti riservati

www.vv-verbavolant.it

ISBN 9788894069501

Copertina, progetto grafico e impaginazione: Verba Volant (Torino)
Traduzione: Verba Volant (Torino)
Redazione: Verba Volant (Torino), Regione Piemonte
Foto di copertina: Marika Boutry
Stampa: DFS +, 1140, rue Ampère - 3, allée des Ingénieurs - 13851 Aix-en-Provence cedex 3 - France

Tutti gli autori cedono a titolo gratuito contenuti e immagini alla Regione Piemonte, che potrà disporne secondo gli usi consentiti ai termini di legge.

Finito di stampare nel mese di marzo 2015

COORDINAMENTO EDITORIALE / COORDINATION ÉDITORIALE

Davide Patrocco, Giulia Bodrato, Roberto Del Vesco, Laurent Peyras,
Marika Boutry, Paolo Ropele, Franco Collé

PARTNER / PARTENARIATS

Regione Piemonte – Direzione Opere Pubbliche, Difesa del Suolo, Montagna, Foreste, Protezione Civile, Trasporti e Logistica (Capofila / Coordinateur)

Regione Autonoma Valle d'Aosta – Struttura Opere Idrauliche

Irstea – Institut national de Recherche en Sciences et Tecnologies pour l'Environnement et l'Agriculture

Questo lavoro è stato realizzato da personale tecnico e collaboratori delle Amministrazioni Pubbliche e Istituti di Ricerca italiani e francesi sotto indicati.
Cet ouvrage a été réalisé grâce au personnel technique et aux collaborateurs des administrations publiques et des instituts de recherche français et italiens indiqués ci-dessous.

REGIONE PIEMONTE / RÉGION PIÉMONT

Settore Pianificazione Difesa del Suolo, Difesa Assetto Idrogeologico e Dighe
Giulia Bodrato, Claudio Costa, Roberto Del Vesco, Davide Patrocco, Massimiliano Senesi

Settore Prevenzione Territoriale del Rischio Geologico
Area di Torino, Cuneo, Novara e Verbania
Carlo Troisi, Antonio Pagliero

IRSTEA

IRSTEA Aix-en-Provence, Grenoble, Antony
Marika Boutry, Laurent Peyras, Gisèle Bambara, Corinne Curt, Aurélie Delvallée, Simon Dieudonné, Dominique Laigle, Jules Leguern, Sébastien Mercklé, Patrice Mériaux, Xavier Perrin, Guillaume Piton, Daniel Poulain, Alain Recking, Ismail Rifaï, Guillaume Stoltz, Guillaume Veylon

REGIONE VALLE D'AOSTA / RÉGION VALLÉE D'AOSTE

Struttura Opere idrauliche
Paolo Ropele, Franco Collé

ARPA PIEMONTE

Dipartimento Tematico Geologia e Dissesto
Rocco Pispico, Alessio Colombo, Davide Damato

POLITECNICO DI TORINO

Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica (DISEG)
Bernardino Chiaia, Valerio De Biagi, Alessandro Fantilli, Sebastiano Foti, Barbara Frigo

Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI)
Davide Poggi, Silvia Cordero

Sommaire

Préface XI
Introduction XIII
Présentation des partenaires XIX
Remerciements XXIII

Activité 2
SÉCURITÉ DES BARRAGES

ACTION 2.1 *Enquête de retour d'expérience* 2
Boutry Marika, Mériaux Patrice, Peyras Laurent, Dieudonné Simon, Patrocco Davide, Colle Franco, Ropele Paolo

ACTION 2.2 *Évaluation des risques liés à l'environnement autour du barrage* 27
Carlo Troisi, Antonio Pagliero, Alessio Colombo, Davide Damato

ACTION 2.3 *Évaluation de la vulnérabilité des barrages vis-à-vis de l'aléa sismique* 47
Mercklé Sébastien, De Biagi Valerio, Veylon Guillaume, Delvallée Aurélie, Chiaia Bernardino, Fantilli Alessandro, Foti Sebastiano, Frigo Barbara

ACTION 2.4A *Durabilité des dispositifs d'étanchéité par géomembrane* 79
Stoltz Guillaume, Boutry Marika, Peyras Laurent, Poulain Daniel, Mériaux Patrice, Perrin Xavier

ACTION 2.4B *Surveillance des barrages par interférométrie satellitaire (InSAR)* 101
Ropele Paolo, Collé Franco, Tamburini Andrea, Bianchi Marco

ACTION 2.5 *Vulnérabilité des barrages vis-à-vis des aléas torrentiels* 112
Piton Guillaume, Recking Alain, Patrocco Davide, Ropele Paolo, Colle Franco, Leguern Jules, Rifaï Ismail

ACTION 2.6 *Barrages soumis à la présence d'une végétation arborescente et d'érosion interne* 133
Bambara Gisèle, Curt Corinne, Mériaux Patrice, Patrocco Davide, Senesi Massimiliano

Activité 3
« DAM-BREAK » – DÉFINITION DU RISQUE EN AVAL DU BARRAGE

ACTION 3.1 *Zones vulnérables aux ondes de crue provoquées par la rupture des barrages* 154
Poggi Davide, Cordero Silvia, Dieudonné Simon

ACTION 3.2 *L'onde de rupture d'un barrage : transport solide et potentielles laves torrentielles* 171
Laigle Dominique

ACTION 3.3A *Informatisation des données existantes* 188
Costa Claudio

ACTION 3.3B *Développement du système informatique* 193
Bodrato Giulia, Del Vesco Roberto, Patrocco Davide

ACTION 3.4 *Évaluation des risques dans les zones de rupture en aval de la digue* 198
Pispico Rocco

Conclusions et développements futurs 212

Sommario

Prefazione XI
Introduzione XIII
Presentazione dei partner XIX
Ringraziamenti XXIII

Attività 2
SICUREZZA DEGLI SBARRAMENTI

AZIONE 2.1 Indagine sugli sbarramenti collinari e in quota 2
Boutry Marika, Mériaux Patrice, Peyras Laurent, Dieudonné Simon, Patrocco Davide, Collé Franco, Ropele Paolo

AZIONE 2.2 Valutazione dei rischi legati all'ambiente nell'intorno della diga 27
Carlo Troisi, Antonio Pagliero, Alessio Colombo, Davide Damato

AZIONE 2.3 Valutazione della vulnerabilità degli sbarramenti al rischio sismico 47
Mercklé Sébastien, De Biagi Valerio, Veylon Guillaume, Delvallée Aurélie, Chiaia Bernardino, Fantilli Alessandro, Foti Sebastiano, Frigo Barbara

AZIONE 2.4A Durabilità dei dispositivi di impermeabilizzazione con geomembrane 79
Stoltz Guillaume, Boutry Marika, Peyras Laurent, Poulain Daniel, Mériaux Patrice, Perrin Xavier

AZIONE 2.4B Monitoraggio degli sbarramenti attraverso l'interferometria satellitare 101
Ropele Paolo, Collé Franco, Tamburini Andrea, Bianchi Marco

AZIONE 2.5 Vulnerabilità delle dighe rispetto al rischio dei fenomeni torrentizi 112
Piton Guillaume, Recking Alain, Patrocco Davide, Ropele Paolo, Colle Franco, Leguern Jules, Rifaï Ismail

AZIONE 2.6 Sbarramenti in presenza di vegetazione arborea ed erosione interna 133
Bambara Gisèle, Curt Corinne, Mériaux Patrice, Patrocco Davide, Senesi Massimiliano

Attività 3
«DAM-BREAK» – DEFINIZIONE DEL RISCHIO A VALLE DELLO SBARRAMENTO

AZIONE 3.1 Aree vulnerabili per onde di piena dovute a rottura di sbarramenti 154
Poggi Davide, Cordero Silvia, Dieudonné Simon

AZIONE 3.2 Onda di rottura della diga: trasporto solido e potenziali colate detritiche 171
Laigle Dominique

AZIONE 3.3A Informatizzazione dei dati esistenti 188
Costa Claudio

AZIONE 3.3B Sviluppo del sistema informativo 193
Bodrato Giulia, Del Vesco Roberto, Patrocco Davide

AZIONE 3.4A Valutazione del rischio nelle aree di dam-break a valle della diga 198
Pispico Rocco

Conclusioni e sviluppi futuri 212

Prefazione

I progetti di cooperazione territoriale transfrontaliera costituiscono un importante strumento per mettere in relazione esperienze tecnico-scientifiche dei diversi territori. Durante il progetto RISBA abbiamo via via infittito le occasioni di confronto, riuscendo ad allargare con enorme soddisfazione le collaborazioni su tutte le undici azioni progettuali previste. Con questo progetto è stata colta l'opportunità di un confronto tra tecnici ad alto livello sulle buone pratiche di gestione del territorio e sulla prevenzione del rischio rappresentato dagli invasi di accumulo idrico collinari o montani, oggetto del progetto.
Questa pubblicazione, nata dalla collaborazione di tutti i partner e collaboratori del progetto, rappresenta la sintesi delle azioni principali di RISBA e delle relative conclusioni e raccomandazioni tecnico-pratiche.

Il gruppo di coordinamento del progetto RISBA

Davide Patrocco • Roberto Del Vesco • Giulia Bodrato • Laurent Peyras • Marika Boutry • Paolo Ropele • Franco Collé

Préface

Les projets de coopération territoriale transfrontalière représentent un outil important pour faire le lien entre les expériences techniques et scientifiques des différents territoires. Le projet RISBA a été l'occasion de multiplier les rencontres, réussissant à étendre de façon tres satisfaisante des collaborations sur les 11 actions du projet. Il a permis aux techniciens de se confronter aux bonnes pratiques de gestion du territoire, ainsi qu'à la prévention des risques que représentent les retenues de stockage d'eau - collinaires ou d'altitude - sur lesquelles le projet est centré.
Cette publication, née de la collaboration entre les partenaires et collaborateurs du projet, présente la synthèse des principales actions de RISBA, leurs conclusions et leurs recommandations techniques et pratiques.

L'équipe de coordination du projet RISBA

Davide Patrocco • Roberto Del Vesco • Giulia Bodrato • Laurent Peyras • Marika Boutry • Paolo Ropele • Franco Collé

Introduzione

Il progetto RISBA (Rischio degli Sbarramenti artificiali) nasce dalla volontà di creare una cooperazione transfrontaliera tra Francia e Italia, attraverso i tre partners, che sono la Regione Piemonte, Irstea e la Regione Valle d'Aosta. I partners svolgono attività istituzionali, anche con potestà legislativa, per il controllo su dighe e sbarramenti per l'accumulo idrico.
Il progetto RISBA, che rientra nel programma Alcotra, si integra nel territorio alpino e prealpino. Egli esprime la necessità di approfondire la conoscenza dei rischi legati alla presenza di sbarramenti e di migliorare la prevenzione di eventi calamitosi e la gestione delle emergenze. Più in generale, mira a mantenere un'attività e una coesione della rete transfrontaliera in materia di rischi naturali, per poter produrre un'identità transfrontaliera attraverso la condivisione e l'ottimizzazione delle metodologie e delle pratiche, identificando il tema della messa in sicurezza degli sbarramenti come prioritario.
Le esperienze tecniche maturate in diversi anni dai partners e approfondite attraverso ricerche e studi mirati confluiscono nel progetto RISBA per ottenere la condivisione delle migliori pratiche di progettazione, costruzione, gestione e controllo degli sbarramenti, ma anche per migliorare la prevenzione dei rischi nei territori a valle degli stessi.

Introduction

Le projet RISBA (Risques des barrages) résulte de la volonté de créer une coopération transfrontalière entre l'Italie et la France, avec trois partenaires que sont la Région Piémont, Irstea et le territoire de la Vallée d'Aoste. Ces derniers partenaires accomplissent des activités institutionnelles et exercent une action régalienne pour le contrôle des barrages et retenues d'eau.
Le projet RISBA s'intègre dans le territoire alpin et préalpin. Il fait partie du programme Alcotra. Il est motivé par la volonté d'améliorer la connaissance des risques liés à la présence de barrages et d'améliorer la prévention des risques et la gestion des situations de crise. Plus largement, il vise le maintien d'une activité de cohésion du réseau transfrontalier en matière de risques naturels, afin de produire une identité transfrontalière à travers le partage et l'optimisation des méthodes et des pratiques, en identifiant le thème de la sécurité des barrages comme l'un des prioritaires.
Les expériences techniques respectivement développées par les partenaires et approfondies par plusieurs années de recherches et d'études ont convergé dans le projet RISBA pour proposer des méthodes et des outils d'aide à la décision pour améliorer les pratiques de conception, réalisation, gestion et surveillance des barrages, mais aussi améliorer la prévention des risques dans les territoires à risque situés en aval du barrage.

Queste opere, sfruttate per l'innevamento artificiale o a scopo irriguo o idroelettrico, determinano impatti economici e umani forti per i territori e le comunità del settore transfrontaliero. Malgrado le loro modeste dimensioni, tali opere presentano tuttavia dei rischi potenzialmente notevoli per le popolazioni e i beni presenti a valle, per la loro posizione sovrastante a strutture a forte frequentazione turistica e a zone residenziali, anche in funzione del possibile innesco di *debris flow* con un potere distruttivo molto forte.
Queste opere richiedono alte competenze tecniche per la loro ubicazione in territori alpini e prealpini, inducendo complesse problematiche geologiche e climatiche.
Partendo da un'indagine svolta sulle varie tipologie di sbarramento collinari e montane nell'area transfrontaliera e con l'obiettivo di ottenere il maggior scambio di esperienze, il progetto è costituito da differenti attività ed azioni per affrontare le problematiche correlate alla progettazione, realizzazione, utilizzo e manutenzione di queste opere.

I principali obiettivi del progetto RISBA sono:
- consolidare i rapporti tra i vari partners del progetto e rendere comuni gli scambi tecnici e le buone pratiche derivanti dall'esperienza di ciascun partner;
- sviluppare regole tecniche per la progettazione, realizzazione, utilizzo e manutenzione degli sbarramenti localizzati sul territorio transfrontaliero, a uso dei tecnici delle amministrazioni pubbliche per il monitoraggio degli sbarramenti, dei gestori degli invasi artificiali e dei tecnici professionisti;
- predisporre gli strumenti necessari alle comunità locali per la redazione di piani di emergenza, migliorando così la messa in sicurezza del territorio transfrontaliero.

Gli studi, le ricerche tecniche, la condivisione delle esperienze hanno effetti benefici im-

---

Ces ouvrages, utilisés pour la production de neige artificielle ou pour l'irrigation ou encore pour la production d'énergie hydro-électrique, sont associés à des enjeux économiques et humains très forts pour les territoires et les communautés de la zone transfrontalière. Malgré leur taille modeste, ces ouvrages induisent des risques potentiellement importants pour les personnes et les biens situés en aval, de par leur position dominante au-dessus d'installations à forte fréquentation touristique et de zones résidentielles, et de par la potentialité de formation de laves torrentielles ayant un pouvoir destructeur très fort.
Ces ouvrages requièrent des hautes compétences techniques du fait de leur position en situation alpine ou préalpine, induisant des problématiques géologiques et climatiques complexes.
A partir d'une enquête menée sur les barrages collinaires et d'altitude du parc Franco-Italien frontalier, et avec l'objectif de recueillir le maximum d'informations de retour d'expérience, le projet a visé à constituer un support d'aide aux différentes activités et actions du projet, afin d'apprécier les problématiques de ces ouvrages en conception, réalisation, exploitation et en réhabilitation.

Les principaux objectifs du projet RISBA ont été les suivants :
- *renforcer les relations entre les différents partenaires du projet et mettre en commun les techniques et les bonnes pratiques résultants des expériences de chaque partenaire ;*
- *développer des règles techniques pour la conception, la réalisation, l'exploitation et la réhabilitation des barrages situés sur le territoire frontalier, à destination des services publics de contrôle des barrages, des gestionnaires d'ouvrages et des bureaux d'études et sociétés d'exploitation ;*
- *développer et mettre à disposition des outils à destination des collectivités locales,*

portanti sulle attività dei vari partners. I nuovi strumenti e metodi sviluppati all'interno del progetto permettono sin d'ora di aumentare significativamente la prevenzione di eventi calamitosi e la gestione delle emergenze a essi collegati.
I principali risultati previsti sono i seguenti:

- una migliore conoscenza del rischio sui territori transfrontalieri per le amministrazioni pubbliche, i tecnici professionisti e le popolazioni;
- lo sviluppo di metodologie e di strumenti di valutazione degli sbarramenti artificiali a uso delle amministrazioni pubbliche incaricate del loro controllo e dei gestori incaricati della loro vigilanza;
- una migliore conoscenza tecnica degli sbarramenti artificiali in alta quota o collinari per migliorare la loro progettazione e durabilità;
- una migliore presa di coscienza del rischio per la sicurezza pubblica indotto da questi sbarramenti artificiali.

Le tematiche sviluppate dal progetto hanno fornito risposte ai vari interrogativi comuni ai tre partners, trattati finora con mezzi diversi. Le diverse esperienze raccolte sugli sbarramenti artificiali riguardanti il controllo, la vigilanza e la prevenzione dei rischi per le popolazioni permetteranno una migliore comprensione delle problematiche. Il progetto proporrà delle metodologie di trattamento. per aumentare l'efficacia dell'azione dei partners.

Il progetto è stato concepito in modo da permettere alla Francia e all'Italia di compiere progressi simili ed equilibrati. I benefici del progetto in Francia e in Italia sono attesi a vari livelli territoriali:

---

pour la construction de plans de sauvegarde et de gestion des risques, en visant in fine l'augmentation de la sécurité du territoire transfrontalier.

Les études, les recherches techniques, la mise en commun des expériences ont des effets bénéfiques importants sur les activités des différents partenaires. Les nouveaux outils et méthodes développés dans le projet permettent d'ores et déjà d'accroitre significativement la prévention des risques et la gestion des situations des crises.

Les principaux résultats attendus sont les suivants :

- *une meilleure connaissance des risques sur les territoires transfrontaliers, pour les administrations, les bureaux d'études et la population ;*
- *le développement de méthodologies et d'outils d'évaluation des barrages, pour les administrations publiques en charge de leur contrôle et pour les gestionnaires en charge de leur surveillance ;*
- *une meilleure connaissance technique sur les barrages collinaires et d'altitude, permettant d'améliorer leur conception et leur durabilité ;*
- *une meilleure prise de conscience des risques pour la sécurité publique induits par ces barrages.*

Les thématiques développées dans le projet ont apporté des réponses aux différents questionnements communs aux trois partenaires, traités jusqu'à présent avec des moyens différents. Les différentes expériences recueillies sur les barrages relatives au contrôle, à la surveillance et à la prévention des risques pour les populations, vont permettre une meilleure compréhension des problématiques. Des méthodologies de

- pubbliche amministrazioni (servizi di controllo dello Stato, Regioni, Comuni, Enti pubblici di controllo): i dipartimenti delle amministrazioni dispongono di metodi di lavoro comuni per poter migliorare l'efficacia delle azioni tecnico-amministrative;
- servizi tecnici (tecnici professionisti, società di gestione): questo progetto ha sviluppato metodi e strumenti operativi per la progettazione, la durabilità e la gestione delle opere. I convegni e le pubblicazioni finali previsti, anche dopo la chiusura del progetto, hanno permesso la pubblicizzazione dei risultati;
- popolazioni: attraverso le azioni di pubblicizzazione dei risultati del progetto, le popolazioni interessate prendono via via coscienza del rischio legato a queste opere sui territori alpini e prealpini. Inoltre, i risultati del progetto includono strumenti per la prevenzione del rischio sui territori a valle degli sbarramenti artificiali, nonché per la protezione civile.

I partners del progetto esercitano potere legislativo o potere regolamentare diretto o indiretto. La Francia e l'Italia potranno così applicare le azioni progettuali ad altre aree geografiche del loro territorio, localizzate in collina o in alta quota, che presenteranno caratteristiche simili.

La collaborazione tra i tre partners riguardante gli sbarramenti artificiali non ha la stessa origine. Per quanto riguarda i due partners italiani, la messa in comune delle regole e delle pratiche esiste da tempo, mentre la cooperazione tra la Francia e l'Italia sul tema del rischio legato agli sbarramenti artificiali è stata avviata con questo progetto, mettendo così in comunicazione servizi ed enti pubblici che esercitano le stesse attività di controllo

traitement sont proposées. De cette façon, le projet permettra d'accroitre l'efficacité de l'action des partenaires.

Le projet a été construit de manière à permettre des avancées équilibrés et similaires en France et en Italie. Les bénéfices du projet en France et en Italie sont attendus à différents niveaux des territoires :

- *au niveau administratif (services de contrôle de l'Etat, Régions, Communes, Etablissements publics de contrôle en appui aux administrations) : les services des administrations disposent de méthodes de travail communes et peuvent ainsi améliorer l'efficacité de l'action technique administrative ;*
- *au niveau technique (les bureaux d'études, les sociétés d'exploitation) : ce projet a développé des méthodes et des outils opérationnels pour la conception, la durabilité et la gestion des ouvrages ; les congrès et les publications techniques qui ont été menés (et qui continueront à être menés après l'achèvement du projet) ont permis la diffusion des résultats ;*
- *au niveau de la population : à travers les actions de diffusion des résultats du projet, la population concernée prend progressivement conscience des risques liés à ces ouvrages sur les territoires alpins ou préalpins. Par ailleurs, les résultats du projet incluent des outils pour la prévention du risque sur les territoires en aval des barrages et l'aide à la protection civile.*

Les partenaires du projet exercent un pouvoir législatif ou régalien direct ou indirect. Ainsi, la France et l'Italie auront la possibilité d'appliquer les actions de développement produites à travers ce projet à d'autres secteurs géographiques de leur territoire, situés en zone collinaire ou de montagne et présentant des caractéristiques similaires.

e di gestione delle opere sui territori transfrontalieri, nonché attività di ricerca e di sviluppo. Questa stretta collaborazione è stata applicata a tutte le azioni progettuali, i cui risultati sono stati ottenuti grazie al contributo dei vari partecipanti per ciascun partner. Questo è stato l'obiettivo primario del gruppo di coordinamento del progetto RISBA.

L'organizzazione del progetto è stata attuata tramite le seguenti azioni:

AZIONE 2.1
Raccolta di dati tramite sopralluoghi sugli sbarramenti artificiali ed invasi in alta quota e collinari.

AZIONE 2.2
Valutazione dei rischi legati all'ambiente nell'intorno della diga.

AZIONE 2.3
Valutazione della vulnerabilità delle dighe al rischio sismico.

AZIONE 2.4A
Durabilità dei materiali e dighe impermeabilizzate con geomembrane.

AZIONE 2.4B
Sviluppo dei sistemi di monitoraggio.

AZIONE 2.5
Valutazione della vulnerabilità delle dighe nei confronti del rischio da fenomeni torrentizi.

La coopération entre les trois partenaires dans le domaine des barrages n'a pas le même historique. Entre les deux partenaires italiens, la mise en commun des règles et pratiques dans ce domaine est ancienne. En revanche, la coopération entre la France et l'Italie sur le thème des risques liés aux barrages a été engagé à travers ce projet, qui a permis de mettre en relation étroite des services et des établissements publics qui exercent les mêmes activités de contrôle et de gestion d'ouvrages sur les territoires frontaliers et des activités de recherche et développement. Cette coopération étroite a été mise en œuvre dans toutes les actions du projet dont les livrables ont été obtenus par la contribution des différentes équipes des partenaires. Cela fut un véritable objectif de l'équipe de coordination du projet RISBA.

L'organisation du projet s'est faite selon les actions suivantes :

ACTION 2.1
Recueil de données par une enquête de retour d'expérience sur les barrages et retenues d'altitude et de piémont.

ACTION 2.2
Evaluation des risques liés à l'environnement autour de l'ouvrage.

ACTION 2.3
Evaluation de la vulnérabilité des ouvrages vis-à-vis de l'aléa sismique.

ACTION 2.4A
Durabilité des barrages étanchés par géomembrane.

AZIONE 2.6
Valutazione della vulnerabilità delle dighe in presenza di vegetazione arborea nei confronti dei meccanismi di erosione interna.

AZIONE 3.1
Valutazione dell'onda di dam-break a valle della diga.

AZIONE 3.2
Studio dell'onda di dam-break con trasporto solido e potenziale formazione di *debris flow*.

AZIONE 3.3
Valutazione della vulnerabilità a valle della diga: informatizzazione dei dati esistenti.

AZIONE 3.4
Valutazione del rischio nelle aree di dam-break a valle della diga.

La pubblicazione comune finale sintetizza i principali risultati tecnico-scientifici del progetto RISBA.

ACTION 2.4B
Développement de systèmes de surveillance.

ACTION 2.5
Évaluation de la vulnérabilité des ouvrages vis-à-vis des aléas torrentiels.

ACTION 2.6
Évaluation de la vulnérabilité des ouvrages soumis à la présence d'une végétation arborescente vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne.

ACTION 3.1
Évaluation de l'onde de rupture en aval de l'ouvrage.

ACTION 3.2
Étude de l'onde de rupture d'un ouvrage incluant le transport solide et la potentialité de formation de laves torrentielles.

ACTION 3.3
Évaluation de la vulnérabilité des enjeux en aval de l'ouvrage : informatisation des données existantes.

ACTION 3.4
Évaluation des risques de dam-break en aval de l'ouvrage.

La publication commune finale synthétise les principales avancées techniques et scientifiques du projet RISBA.

Presentazione dei partner

ITALIA
REGIONE PIEMONTE

La Regione Piemonte, attraverso il Settore Pianificazione Difesa del Suolo, Difesa Assetto Idrologico Dighe (Direzione Opere Pubbliche, Difesa del Suolo, Montagna, Foreste, Protezione Civile, Trasporti e Logistica), gestisce le competenze regionali assegnate con la Legge 183/1989 di controllo e vigilanza sulla gestione degli sbarramenti artificiali per l'accumulo idrico. La Regione Piemonte dal 1989 ha affrontato questi argomenti in diversi momenti attraverso le seguenti leggi: L.R. 23/1991, L.R. 58/1995, L.R. 49/1996, L.R. 25/2003.

Nel corso degli anni sono stati effettuati dei censimenti per individuare le strutture di sbarramento presenti sul territorio piemontese fino a esaminare circa 900 impianti di accumulo a uso prevalentemente irriguo. Il Settore si occupa di autorizzare all'esercizio le opere esistenti e i progetti per le nuove costruzioni, varianti e manutenzioni, ed effettua sopralluoghi presso gli impianti e la sorveglianza sui lavori; predispone piani di laminazione e di piani di emergenza. Il Settore è competente per l'approvazione dei progetti di gestione del materiale sedimentato negli invasi.

Il Settore si è inoltre occupato della redazione di due manuali tecnici di riferimento per

Présentation des partenaires

ITALIE
RÉGION PIÉMONT

Suite à la Loi 183/1989, le Département de l'Aménagement et Protection du Sol – Digues (Direction Travaux publics, Protection du Sol, Economie de la Montagne et des Forêts) de la Région Piémont gère les compétences régionales relatives au contrôle et à la surveillance des barrages artificiels pour le stockage d'eau. A partir de 1989, la Région Piémont a abordé ces questions à des moments différents par le biais des lois régionales suivantes : L.R. 23/1991, L.R. 58/1995, L.R. 49/1996, L.R. 25/2003.

Au fil des ans, plusieurs recensements ont été effectués afin d'identifier les barrages présents sur le territoire piémontais : on a ainsi recensé environ 900 barrages, la plupart dédiés à l'irrigation. Le Département autorise le fonctionnement des ouvrages existants, la conception de nouveaux ouvrages, leur modification et leur entretien. Il effectue aussi les visites techniques sur place et la surveillance des travaux.

Le secteur a pour objet la prédisposition des plans de laminage et des plans d'urgence ; il est compétent pour l'approbation des projets de gestion du matériel sédimenté dans les retenues.

gli operatori e dell'organizzazione di convegni tecnico-amministrativi sugli sbarramenti artificiali a livello nazionale.
Negli anni 2010 - 2015 la Regione Piemonte riveste il ruolo di capofila delle regioni italiane sulle tematiche "ambiente" e "difesa del suolo" per i rapporti con lo Stato italiano.

REGIONE AUTONOMA VALLE D'AOSTA

La Regione autonoma Valle d'Aosta, attraverso il Servizio delle Opere Idrauliche:

1. garantisce la gestione dei processi autorizzativi, di controllo e di vigilanza relativamente alla gestione e/o costruzione di dighe e sbarramenti;
2. garantisce tutte le attività strutturali relative alla protezione del territorio regionale dalle piene dei corsi d´acqua principali regionali, in relazione al grado di rischio compatibile, tra le quali:
   - definizione del fabbisogno di nuovi sistemi di difesa dalle piene dei corsi d´acqua e individuazione delle esigenze di manutenzione, completamento e integrazione dei sistemi di difesa esistenti;
   - svolgimento delle attività tecniche e amministrative connesse con la progettazione, l'esecuzione, la direzione e l'assistenza dei lavori e il collaudo degli interventi di protezione dai fenomeni di piena dei corsi d'acqua, nonché degli interventi di tutela, salvaguardia e riqualificazione degli stessi, delle loro pertinenze e delle loro fasce fluviali;
3. collabora nelle attività inerenti la difesa del suolo, nella verifica delle perimetrazioni delle aree a rischio idraulico proposte dai Comuni e in generale di tutti i procedimenti che richiedono valutazioni idrauliche;

Le Département a également rédigé deux manuels techniques de référence pour les professionnels du secteur et a organisé au niveau national des congrès techniques et administratifs focalisés sur les barrages artificiels.
Pour la période 2010-2015, la Région Piémont est chef de file des régions italiennes pour les questions «environnement» et «protection du sol» dans les rapports avec le gouvernement central.

RÉGION AUTONOME VALLÉE D'AOSTE

La Région autonome Vallée d'Aoste, par le biais du Département Ouvrages Hydrauliques :

1. *gère les processus relatifs aux délivrances d'autorisations, au contrôle et à la surveillance de la gestion et de la construction de digues et de barrages ;*
2. *gère toutes les actions structurelles relatives à la protection du territoire régional contre les crues des principaux cours d'eau, compte tenu du niveau de risque acceptable, et procède notamment aux opérations suivantes :*
   - *définition des besoins en termes de nouveaux systèmes de protection contre les crues des principaux cours d'eau et détermination des interventions à réaliser pour l'entretien, l'achèvement et l'intégration des systèmes de protection existants ;*
   - *gestion des activités techniques et administratives relatives à la conception, à l'exécution, à la direction, à l'assistance et au contrôle des travaux de réalisation d'ouvrages de protection contre les crues des principaux cours d'eau, ainsi que des travaux visant la protection, la sauvegarde et la requalification desdits cours d'eau, de leurs annexes et de leurs bandes fluviales ;*

4. provvede all'attività di raccolta e gestione dati di competenza nell'ambito del Sistema informativo territoriale regionale.

FRANCIA
IRSTEA

Irstea è un organismo di ricerca che da più di 30 anni opera sulle maggiori problematiche di agricoltura responsabile e pianificazione territoriale, gestione dell'acqua e rischi associati, siccità, piene, inondazioni, studi degli ecosistemi complessi e biodiversità, nelle loro interrelazioni con le attività umane.

Irstea lavora sulla messa a punto di metodologie, modelli e strumenti per il monitoraggio, la valutazione della sicurezza e l'analisi dei rischi legati alle opere e alle arginature. Il mal funzionamento delle opere, lo studio dei loro processi di danneggiamento (in particolare per erosione) e i metodi per la prevenzione di tali processi sono l'obiettivo dei lavori di ricerca. Tali attività multidisciplinari vengono sviluppate da un gruppo di esperti e da tre assi di ricerca (analisi dei rischi, geomeccanica e supporto alle decisioni), che coinvolgono ingegneri, ricercatori e tecnici dell'unità.

Irstea possiede forti legami con il Ministero dell'Ambiente attraverso la condivisione di esperienze e metodologie condotte per conto di questa Amministrazione. Inoltre da tempo esiste una convenzione tra il Ministero dell'Ambiente e Irstea inerente il supporto tecnico ai servizi di controllo della sicurezza delle opere idrauliche. Nel quadro di questa convenzione, Irstea svolge azioni di supporto ai servizi regionali (DREAL – Directions

3. *collabore aux activités inhérentes à la protection du sol, à la vérification des délimitations des zones présentant des risques hydrauliques proposées par les communes et en général de tous les processus nécessitant l'évaluation de risques hydrauliques ;*
4. *procède à la collecte et à la gestion des données de son ressort dans le cadre du Système régional d'information territoriale.*

FRANCE
IRSTEA

Irstea est un organisme de recherche qui, depuis plus de 30 ans, travaille sur les enjeux majeurs d'une agriculture responsable et de l'aménagement durable des territoires, la gestion de l'eau et les risques associés, sécheresse, crues, inondations, l'étude des écosystèmes complexes et de la biodiversité dans leurs interrelations avec les activités humaines.

Irstea travaille sur la mise au point de méthodologies, de modèles et d'outils pour le diagnostic, l'évaluation de la sécurité et l'analyse de risques liés aux barrages, aux digues et aux risques naturels en montagne. La pathologie des ouvrages, l'étude de leurs processus de ruine, l'étude des aléas naturels de montagne et les moyens de prévention sont au coeur des travaux de recherche. Ces activités, du fait de leur large étendue disciplinaire, sont structurées autour de cinq axes de recherche - génie civil, aléa, géosynthétiques, géomécanique et aide à la décision - qui mobilisent chacun des ingénieurs, chercheurs et techniciens.

Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) e interventi con il servizio centrale del Ministero dell'Ambiente.

Le principali azioni condotte sono le seguenti:
- competenze tecniche per conto dei servizi regionali (DREAL) sulle dighe e sulle arginature;
- supporto metodologico e di ricerca e sviluppo per conto dei DREAL e del Ministero dell'Ambiente : raccomandazioni tecniche, banche dati, ecc.;
- azioni per la formazione per il personale DREAL;
- supporto alla definizione delle politiche dello Stato per conto del Ministero dell'Ambiente;
- gestione e manutenzione di sistemi informativi sulle valanghe.

Irstea possède des forts liens historiques avec le Ministère chargé de l'Environnement à travers ses actions d'expertise et méthodologiques conduites pour le compte de ce même Ministère. Ainsi une convention entre le Ministère chargé de l'Environnement et Irstea existe depuis longtemps et traite de l'appui technique aux services de contrôle de la sécurité des ouvrages hydrauliques et de la gestion et la maintenance des systèmes d'information sur les avalanches.
Dans le cadre de cette convention, Irstea met en place des actions d'appui aux services régionaux de l'Etat : les DREAL (Directions Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) et des actions auprès des services centraux du Ministère.

Les principales actions menées sont les suivantes :
- *des expertises techniques pour le compte des DREAL sur les barrages et les digues ;*
- *des appuis méthodologiques, de recherche et de développement pour le compte des DREAL et du Ministère chargé de l'Environnement : recommandations techniques, bases de données, etc. ;*
- *des actions de formation pour les personnels des DREAL ;*
- *des aides aux définitions des politiques publiques de l'État pour le compte du Ministère chargé de l'Environnement ;*
- *la gestion et la maintenance des systèmes d'information sur les avalanches.*

Ringraziamenti

Nell'ambito del progetto RISBA si desiderano ringraziare: i Proprietari e Gestori degli invasi italiani e francesi oggetto dei numerosi sopralluoghi alla base dell'attività di ricerca del progetto RISBA; i gestori degli impianti di innevamento in Italia (Val di Susa) e in Francia, per la visita agli impianti di innevamento artificiale; le Amministrazioni Comunali interessate dai sopralluoghi e i Professionisti del settore (progettisti e/o direttori lavori), che ci hanno accompagnato nelle visite sul terreno; il personale amministrativo dei diversi Partners, che ha collaborato efficacemente con gli autori della presente pubblicazione, per finalizzare il progetto RISBA in tempo utile; il CSI Piemonte, in particolare Filiberto Morrone, per il suo efficace e continuativo lavoro sul Catasto Sbarramenti della Regione Piemonte; il Geom. Alberto Dotta del Consorzio Forestale Alta Valle di Susa per il suo tempo a noi dedicato e il sevizio RTM (Restautarion des Terrains en Montagne) dell'ONF (Office National de Forets); la Società TRE S.r.l. che ha fornito il supporto tecnico alle analisi dei dati di telerilevamento satellitare.

Remerciements

Dans le cadre du projet, nous désirons remercier : les propriétaires et exploitants des retenues françaises et italiennes ayant fait l'objet des nombreuses enquêtes de retour d'expérience à la base de l'activité de recherche du projet RISBA ; les gestionnaires des intallations pour la fabrication de neige artificielle en Italie – Val di Susa – et France ; les administrations communales où ont été effectués les retours d'expérience et tous les professionnels du secteur (gestionnaires de projet et/ou directeurs des travaux) qui nous ont accompagnés lors des visites sur place ; le personnel administratif des différents partenaires du projet qui a collaboré efficacement avec les auteurs de cette publication afin de finaliser le projet RISBA en temps utile ; le CSI-Piemonte, en particulier Filiberto Morrone, pour son travail efficace et continu sur le Cadastre des barrages (Région Piémont) ; M. Alberto Dotta, géomètre, du Consorzio Forestale Alta Valle di Susa pour le temps qu'il nous a consacré et le service RTM (Restauration des Terrains en Montagne) de l'ONF (Office National des Forêts) ; la Societé TRE S.r.l. qui a fourni le support technique aux analyses des données de la télédétection par satellite.

ATTIVITÀ 2 / *ACTIVITÉ 2*

SICUREZZA DEGLI SBARRAMENTI

SÉCURITÉ DES BARRAGES

Indagine sugli sbarramenti collinari e in quota

Introduzione

Le opere di accumulo di acqua presenti in ambito transfrontaliero italo-francese possono essere di tipologie diverse. Le opere più diffuse risultano essere gli invasi collinari e gli invasi in quota[1]. I primi assicurano principalmente l'irrigazione delle coltivazioni durante l'estate, mentre i secondi alimentano i cannoni sparaneve delle stazioni sciistiche. Malgrado il volume generalmente modesto, gli invasi meritano tuttavia un'attenzione particolare sia perché molto diffusi sul territorio, sia per la loro posizione spesso sovrastante rispetto alle zone residenziali.
Il progetto RISBA è stato sviluppato per completare la conoscenza dei rischi legati a questi invasi. Per alimentare le azioni di progetto e al fine di fornire informazioni relative alle opere e all'ambiente circostante, all'inizio del progetto è stata prevista una prima fase di indagine documentale e sopralluoghi tecnici. La presente relazione costituisce pertanto la sintesi dei dati ottenuti su un insieme di 36 opere distribuite tra la Francia e l'Italia.

1 Optiamo per l'uso di questo termine rispetto al termine "diga" nel contesto specifico.

Enquête de retour d'expérience

Introduction

Les ouvrages de stockage d'eau rencontrés en zone transfrontalière franco-italienne peuvent être de différents types. Parmi les plus répandus, on trouve les retenues[1] collinaires et les retenues d'altitude. Les premières assurent principalement l'irrigation des cultures en été, tandis que les secondes alimentent les canons à neige des stations de sport d'hiver. Si leur volume reste le plus souvent modeste, elles méritent toutefois une attention particulière du fait de leur nombre important sur le territoire et du fait de leur position fréquemment dominante vis-à-vis des zones urbanisées.
C'est pour compléter la connaissance des risques liés à ces ouvrages que le projet RISBA a été engagé. Pour alimenter l'ensemble des actions du projet en données et informations relatives aux ouvrages et à leur environnement, une enquête documentaire et de terrain a été réalisée au démarrage du projet. Ce rapport constitue ainsi la synthèse des données obtenues sur un parc de 36 ouvrages, réparti entre la France et l'Italie.

1 *Nous retiendrons ce terme plutôt que celui de « barrage » pour l'application qui nous intéresse.*

Indagine e banca dati

Realizzazione dell'indagine

L'attuazione di un'indagine è motivata dalla necessità di alimentare le differenti azioni del progetto, fornendo i dati in ingresso utili allo sviluppo delle attività. Pertanto Irstea, ha predisposto una scheda di indagine, validata dagli altri due partner del progetto, che sintetizza tutte le tematiche affrontate da RISBA.

I sopralluoghi tecnici sono stati svolti con un accurato esame dell'opera, di durata compresa tra una e tre ore, in presenza degli addetti responsabili della gestione dell'invaso (solitamente caposervizio delle piste o direttore operativo). Molto spesso, tali visite sono state occasione di incontro tra i tre partner del progetto.
Le indagini documentali sono incentrate sull'analisi della documentazione disponibile per le singole opere.

Creazione di una banca dati

L'esigenza di raggruppare le informazioni raccolte tramite uno strumento di facile utilizzo e accessibile a tutti ha portato alla realizzazione di una banca dati (BDD) online con Google Forms. La struttura, identica alla scheda di indagine cartacea, si articola in tre sezioni:

a. "Aspetti generali", che riassume le caratteristiche principali dell'opera; può essere considerata alla stregua della carta d'identità dell'invaso (Figura 1);

Enquête et base de données

Réalisation de l'enquête

La réalisation d'une enquête est justifiée par la nécessité d'alimenter les différentes actions du projet en y apportant les données d'entrée nécessaires au travail. Ainsi, une fiche d'enquête réunissant l'ensemble des thématiques abordées par RISBA a été établie par Irstea et validée par les deux autres partenaires du projet.
Les enquêtes de terrain consistent en une visite détaillée de l'ouvrage, de 1 à 3 heures, en présence du personnel chargé de la gestion de la retenue (chef du service des pistes ou directeur d'exploitation le plus couramment). Elles ont très souvent été l'occasion de rencontres entre les trois partenaires du projet.
Les enquêtes documentaires correspondent pour leur part à l'analyse des dossiers disponibles pour chacun des ouvrages.

Mise en place d'une base de données

La nécessité de rassembler les informations collectées, à l'aide d'un outil d'utilisation simple et accessible à tous, a conduit à l'établissement d'une base de données (BDD) en ligne sous Google Forms. De structure identique à la fiche d'enquête papier, elle s'organise en trois sections :

a. *« Généralités », qui synthétise les principales caractéristiques de l'ouvrage : il s'agit en quelque sorte de la carte d'identité de la retenue (Figure 1) ;*

b. "Bibliografia", che raggruppa i dati presenti nella documentazione delle opere, quando essa è disponibile;
c. "Terreno", che raccoglie le osservazioni fatte in occasione delle visite *in situ*.

Tutti i campi della banca dati sono bilingue.

Tre sono gli account creati per la banca dati:

1. RISBA.ADMIN per gli interventi da amministratore: l'account consente ai responsabili designati tra i partner del progetto, inserendo ID e password, di modificare la struttura della scheda di indagine al fine di limitare gli errori di manipolazione del database;
2. RISBA.EDIT per gli interventi di modifica: l'account consente ai soli interlocutori detentori delle credenziali di accesso di implementare dati nel sistema;
3. RISBA.VIEW a uso consultivo: l'account, accessibile a tutti i partecipanti del progetto, consente unicamente la visualizzazione del database.

È possibile quindi estrarre sotto forma di file tutti i dati caricati con l'utilizzo un foglio di calcolo. Il presente documento propone pertanto l'analisi particolareggiata di una parte dei dati raccolti nell'ambito dell'azione di ritorno di esperienza.

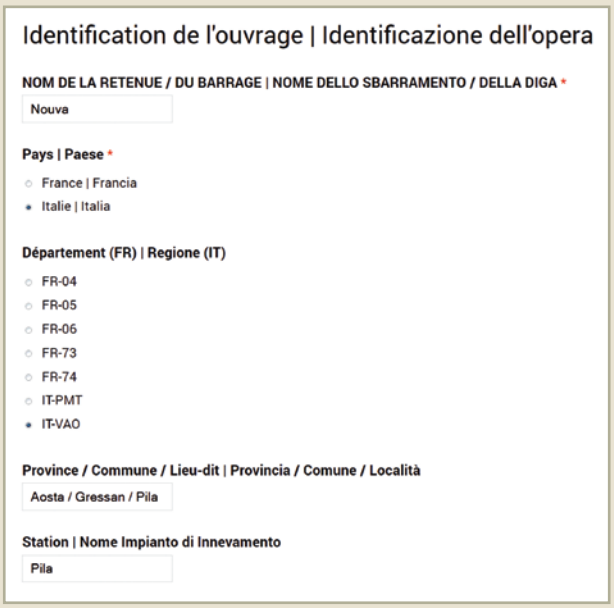


FIGURA 1
Esempio di schermata della sezione "Aspetti generali" della BDD.

FIGURE 1
Capture d'écran d'un extrait de la section « Généralités » de la BDD.

b. *« Bibliographie » qui rassemble les données présentes dans les dossiers des ouvrages lorsque ceux-ci sont disponibles ;*
c. *« Terrain », qui collecte les observations faites à l'occasion des visites sur site.*

L'ensemble des champs qui la compose sont bilingues.

Trois comptes d'accès à la base ont été créés :

1. *RISBA.ADMIN pour les actions administrateur : ce compte permet aux titulaires désignés parmi les partenaires du projet (avec un identifiant et un mot de passe) de modifier la structure de la fiche d'enquête, et ce afin de limiter les erreurs de manipulation de la base ;*
2. *RISBA.EDIT pour les actions d'édition : ce compte permet à plusieurs interlocuteurs clairement identifiés parmi les partenaires du projet d'implémenter des données dans la base de données ;*
3. *RISBA.VIEW pour les actions de consultation : ce compte, accessible à l'ensemble de l'équipe projet, ne permet qu'une visualisation de la base.*

L'ensemble des données saisies peuvent alors être extraites sous forme de fichiers exploitables dans un tableur. Le présent document détaille ainsi l'analyse d'une partie des données recueillies dans le cadre de cette action de retour d'expérience.

Aspetti generali delle opere esaminate

Localizzazione

Il progetto RISBA interessa l'insieme della catena Alpina francese e italiana. A tal riguardo, le visite in situ hanno coinvolto diversi dipartimenti francesi e regioni italiane. La Tabella 1 illustra la distribuzione geografica degli invasi esaminati:

Impermeabilizzazione del rilevato e utilizzo dell'opera

L'insieme delle opere oggetto di analisi è in rilevato. La tipologia di impermeabilizzazione e le modalità di sfruttamento delle risorse idriche permettono una loro classificazione in due categorie:

a. 22 invasi in quota, di recente costruzione (risalente al 2005 per i più datati), isolati con geomembrana e sfruttati per l'innevamento artificiale;
b. 14 invasi collinari, meno recenti (a partire dagli inizi del XX secolo), a scopo irriguo idroelettrico (piccole centrali idroelettriche), o per l'approvvigionamento di acqua potabile. Possono essere realizzati in terra omogenea o impermeabilizzati con l'ausilio di una barriera a monte (argillosa o di cemento), o presentare un nucleo centrale impermeabile nel rilevato.

PAESE / *PAYS*	Regione / Dipartimento / *Région / Département*	Invasi / *Effectif*
ITALIA / *ITALIE*	Piemonte - Provincia di Torino (TO) / *Piémont - Province de Turin (TO)*	7
	Piemonte - Provincia di Cuneo (CN) / *Piémont - Province de Cuneo (CN)*	9
	Valle d'Aosta (AO) / *Vallée d'Aoste (AO)*	4
FRANCIA / *FRANCE*	Hautes-Alpes (05) / *Hautes-Alpes (05)*	7
	Savoie (73)	4
	Haute-Savoie (74)	5

TABELLA 1
Ripartizione geografica degli invasi.

TABLEAU 1
Répartition géographique des retenues.

Généralités sur les ouvrages visités

Localisation

Le projet RISBA porte sur l'ensemble de la chaîne Alpine française et italienne. À ce titre, plusieurs département français et régions italiennes ont été parcourus au cours des visites de terrain. Le Tableau 1 donne la répartition géographique des retenues.

Étanchéité du remblai et usage de l'ouvrage

L'ensemble des ouvrages examinés est en remblai. Leur type d'étanchéité et la manière dont leurs ressources en eau sont utilisées permet de les classer en deux catégories :

a. *22 retenues d'altitude, de construction récente (2005 pour les plus anciennes), étanchées par géomembrane et destinées à la production de neige de culture ;*
b. *14 retenues collinaires, plus anciennes (jusqu'au début du XX^{e}) et dédiées à l'irrigation, à la production d'énergie hydroélectrique (petite hydro) ou à l'alimentation en eau potable. Elles peuvent être étanchés dans la masse, imperméabilisées à l'aide d'un masque amont (argileux ou en béton) ou présenter un noyau central.*

Altitudine

È riconosciuto che le opere site a una quota superiore a 1800 m sono soggette a condizioni meteorologiche rigide nei periodi invernali ([1], p.150). In Italia, la maggioranza degli 11 invasi in quota oggetto di analisi rientra in un contesto di alta quota: le opere sono collocate tra 1900 m e 2100 m, un'opera è ubicata a 3000 m e una sola è posizionata sotto i 1700 m. Quanto agli invasi collinari, la maggior parte di essi non supera la quota dei 480 m. In Francia, la ripartizione degli invasi in quota è più estesa, da 940 m a 2500 m: il 55% di essi è al di sotto di 1800 m. Gli invasi collinari, invece, sono posizionati a una quota media di 1200 m (Figura 2).

Capacità di accumulo

Si possono evidenziare due popolazioni di invasi in quota. In Francia, il 65% circa di essi presenta una capacità pari o superiore a 50.000 m³. Analogamente, tre dei quattro invasi valdostani in quota superano 70.000 m³. Sono pertanto tali opere a determinare i valori elevati nella ripartizione statistica (Figura 3). Gli invasi in quota della Regione Piemonte hanno un volume più modesto che non supera 41.500 m³ (per un volume di accumulo medio di circa 28.000 m³); sono questi ultimi a determinare i valori bassi dell'analisi.

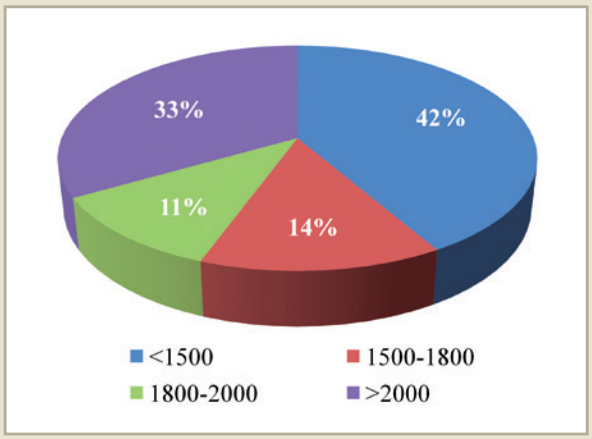


FIGURA 2
Ripartizione degli invasi in base alla quota.

FIGURE 2
Répartition des retenues selon leur altitude.

Altitude

On admet que les ouvrages situés à une altitude supérieure à 1800 m sont soumis à des conditions météorologiques sévères en période hivernale ([1], p.150). L'Italie voit la majorité des 11 retenues d'altitude enquêtées être en contexte de haute altitude : les ouvrages se répartissent entre 1900 m et 2100 m, un ouvrage se situe à 3000 m et un seul est en dessous de 1700 m. Les retenues collinaires, pour leur part, n'excèdent pas 480 m d'altitude dans la majorité des cas.
En France, la répartition des retenues d'altitude est plus étalée, de 940 m à 2500 m : 55% d'entre elles sont au-dessous de 1800 m. Quant aux retenues collinaires, elles se situent à une altitude moyenne de 1200 m (Figura 2).

Capacité de stockage

Deux populations de retenues d'altitude peuvent être mises en évidence. En France, près de 65% d'entre elles sont de capacité supérieure ou égale à 50.000 m³. De même, trois des quatre retenues d'altitude valdotaines dépassent 70.000 m³. Ce sont donc ces ouvrages qui constituent les valeurs hautes de la distribution statistique (Figure 3). En Région Piémont, les retenues d'altitude sont de volume plus modeste et n'excédent pas 41.500

Gli invasi collinari sono distribuiti in modo più esteso. Gli invasi italiani a scopo irriguo presentano un volume medio pari a 30.000 m³; quelli destinati alla produzione di energia idroelettrica hanno una capacità ben più elevata, fino a 185.000 m³. In Francia, il valore minimo è pari a 42.000 m³ e quello massimo a 750.000 m³, per una media approssimativa di 220.000 m³.

Altezza del rilevato

In Italia, l'altezza di un'opera risulta dal dislivello tra la quota del piano di coronamento e il punto più basso dei paramenti (a monte o a valle).
Pertanto, le opere valdostane sono tutte comprese tra 10 m e 15 m. Le opere piemontesi presentano dimensioni più contenute e una ripartizione eterogenea: gli invasi in quota, a esempio, sono principalmente costruiti in scavo, con una conseguente altezza molto limitata.
In Francia, l'altezza di un rilevato è la risultante della differenza tra il coronamento e il terreno naturale, teoricamente misurata sull'asse del coronamento. Le opere di nostro interesse presentano un'altezza compresa tra 4 m e 19,95 m.
Tuttavia, per la maggior parte delle opere (il 38% - Figura 4) l'altezza è compresa tra 5 m e 10 m.

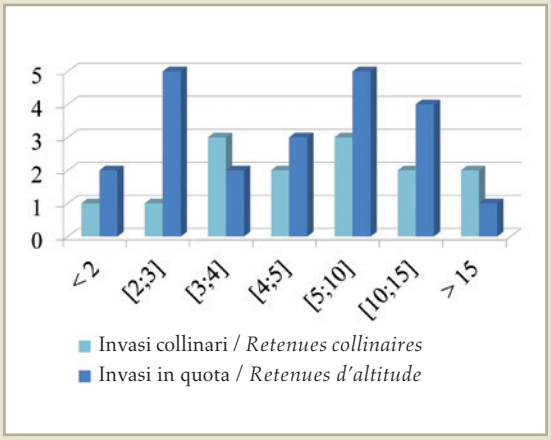


FIGURA 3
Numero di invasi per classe di capacità di accumulo (in 10^4 m³).

FIGURE 3
Nombre de retenues par classe de capacité de stockage (en 10^4 m³).

m³ (pour un volume de stockage moyen d'environ 28.000 m³) ; ce sont ces dernières qui composent les valeurs basses de l'analyse.
La distribution des retenues collinaires est quant à elle plus étalée. Les retenues italiennes dédiées à l'irrigation ont un volume moyen de 30.000 m³ ; celles destinées à la production hydroélectrique sont de capacité bien supérieure, jusqu'à 185.000 m³. En France la valeur basse est de 42.000 m³ et la valeur haute de 750.000 m³, pour une moyenne de 220.000 m³ environ.

Hauteur du remblai

En Italie, la hauteur d'un ouvrage est évaluée comme la différence entre la côte du couronnement et le point le plus bas des parements (amont ou aval). Ainsi, les ouvrages valdotains sont tous compris entre 10 m et 15 m. Les ouvrages piémontais sont de taille plus modeste et de distribution hétérogène : les retenues d'altitude sont par exemple essentiellement construites en déblai. Leur hauteur est par conséquent très faible.
En France, la hauteur d'un remblai correspond à la différence entre le couronnement et le terrain naturel, idéalement mesurée dans l'axe de la crête. Pour les ouvrages qui nous concernent, les hauteurs se répartissent de 4 m à 19,95 m. La majorité des ouvrages (38% - Figure 4) ont cependant une hauteur comprise entre 5 m et 10 m.

Classificazione delle opere

Dati i differenti sistemi di classificazione utilizzati per le opere piemontesi, valdostane e francesi, non vi è possibilità di eseguire un'analisi comparativa delle opere.
In Francia, il decreto dell'11 dicembre 2007 suddivide le dighe in quattro classi in base all'altezza H, al volume idrico V e al criterio $H^2/V^{0.5}$ dell'opera (Tabella 2). Si distinguono tuttavia una classificazione iniziale stabilita dalle caratteristiche geometriche dell'opera e un passaggio ad altra classe, di natura amministrativa, sancito con decisione prefettizia, se supportato da specifici elementi in termini di sicurezza.
Le opere analizzate appartengono quindi alle categorie D o C in virtù delle specifiche geometriche. Nondimeno, un potenziale impatto in caso di rottura ha consentito un passaggio amministrativo di classe di sei degli undici invasi: due in B e quattro in C. È a quest'ultima categoria che appartiene la maggioranza delle opere esaminate (9 Invasi – Figura 5).
Anche nella Regione Piemonte la classificazione delle opere poggia su criteri geometrici (Tabella 3): in questo caso sono gli invasi di classe B e C a prevalere (Figura 6).
Nella Regione Valle d'Aosta, la definizione della classe dell'opera dipende dalla valutazione degli interessi umani ed economici situati a valle dell'opera (Tabella 4). I quattro invasi valdostani rientrano nella categoria A.

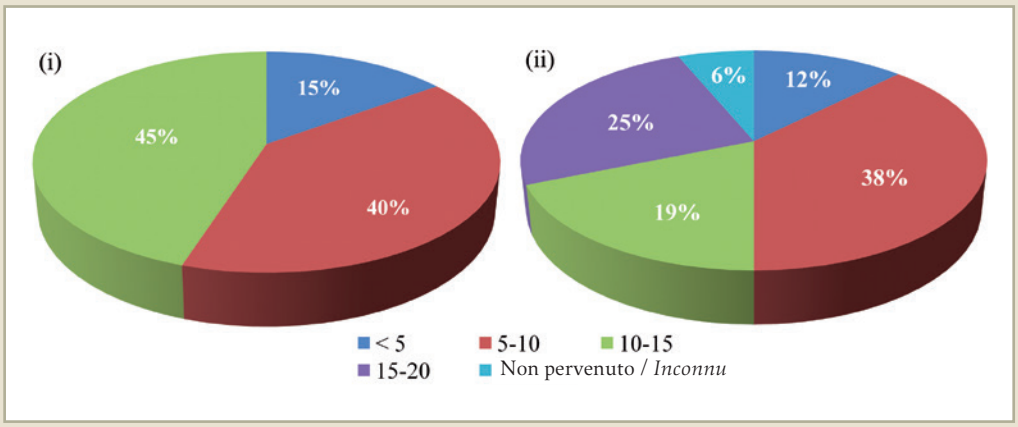


FIGURA 4
Ripartizione degli invasi in base all'altezza del rilevato (i) in Italia e (ii) in Francia.

FIGURE 4
Répartition des retenues selon leur hauteur de remblai (i) en Italie et (ii) en France.

Classe des ouvrages

Les systèmes de classification des ouvrages piémontais, valdotains et français étant différents, une analyse commune ne peut être menée.
En France, le décret du 11 décembre 2007 répartit les barrages en quatre classes en fonction de la hauteur H, du volume d'eau V et du critère $H^2/V^{0.5}$ de l'ouvrage (Tableau 2). On distingue toutefois le classement initial, établit en fonction des caractéristiques géométriques de l'ouvrage, et le surclassement administratif, ajusté par décision préfectorale si des enjeux particuliers en termes de sécurité le justifient.
Ainsi, les ouvrages examinés relèvent des catégories D ou C compte tenu de leurs caractéristiques géométriques Toutefois, en raison de leur impact potentiel en cas de rupture, six des onze retenues ont été surclassée administrativement : deux en B et quatre en C. Cette dernière catégorie regroupe ainsi la majorité des ouvrages analysés (effectif de 9 – Figure 5).
En Région Piémont, le classement des ouvrages se fait également sur la base de critères géométriques (Tableau 3) : ce sont les retenues de classe B et C qui dominent ici (Figure 6).
En Région Vallée d'Aoste, la détermination de la classe de l'ouvrage se base sur l'évaluation des enjeux humains et économiques situés à l'aval de l'ouvrage (Tableau 4). Les quatre retenues valdotaines relèvent de la catégorie A.

Classe dell'opera / *Classe de l'ouvrage*	Criteri / *Critère(s)*
A	H ≥ 20 m
B	H ≥ 10 m et $H^2/V^{1/2} \geq 200$
C	H ≥ 5 m et $H^2/V^{1/2} \geq 20$
D	H ≥ 2 m
Non classificata ai sensi del decreto *Non classé au sens du décret*	H < 2 m

TABELLA 2
Classificazione degli invasi francesi.

TABLEAU 2
Classes des ouvrages français.

Classe dell'opera / *Classe de l'ouvrage*	Criteri / *Critère(s)*
A1	V
A2	H ≤ 10 m e V ≤ 30 000 m³
B	H ≤ 10 m e 30 000 m³ < V ≤ 100 000 m³
C	10 m < H ≤ 15 m o 10^5 m³ < V ≤ 10^6 m³
Gestita dallo Stato *Géré par l'État*	H > 15 m o V > 10^6 m³

TABELLA 3
Classificazione delle opere piemontesi.

TABLEAU 3
Classes des ouvrages piémontais.

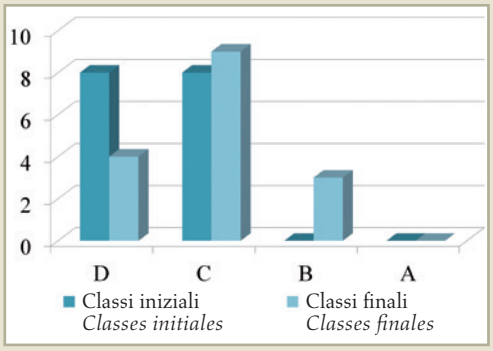


FIGURA 5
Classificazioni iniziali e finali degli invasi francesi.

FIGURE 5
Classes initiales et finales des retenues françaises.

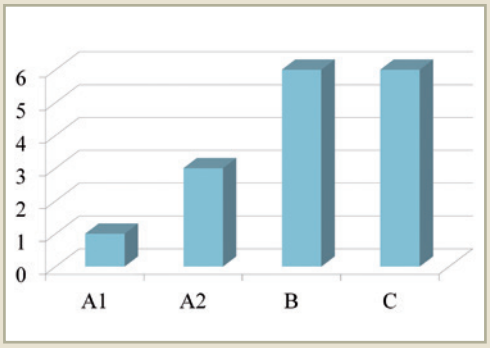


FIGURA 6
Classificazione degli invasi piemontesi.

FIGURE 6
Classes des retenues piémontaises.

Classe dell'opera / *Classe de l'ouvrage*	Criteri	*Critère(s)*
A	Rischio ELEVATO perdite umane e danni economici importanti	*Risque ELEVÉ* *pertes humaines et dommages économiques importants*
B	Rischio MODERATO conseguenze ambientali gravi o perdite economiche ingenti (danni a strutture commerciali o industriali, servizi pubblici, …)	*Risque MODERÉ* *conséquences environnementales graves ou pertes économiques conséquentes (dommages sur structures commerciales ou industrielles, services publics, …)*
C	Rischio DEBOLE perdite economiche e ambientali trascurabili	*Risque FAIBLE* *pertes économiques et environnementales négligeables*
Gestita dallo Stato *Géré par l'État*	H > 15 m o V > 10^6 m³	*H > 15 m o V > 10^6 m³*

TABELLA 4
Classificazione delle opere valdostane.

TABLEAU 4
Classes des ouvrages valdotains.

Indagine sui rilevati e relativi dispositivi d'impermeabilizzazione con geomembrana (DEG)

I dati sulle indagini sulla struttura DEG sono parte integrante nell'*Azione 2.4a* del progetto RISBA. A titolo integrativo, sono illustrate qui di seguito le anomalie che interessano i rilevati e il relativo DEG osservate sui 22 invasi in quota analizzati.

Lacerazioni della geomembrana

Questo fenomeno è spesso associato alla formazione di ghiaccio nelle opere dotate di struttura di rivestimento parziale che poggia su berma: allorquando il livello dell'invaso si abbassa per alimentare i cannoni sparaneve, il ghiaccio tende a avanzare sui paramenti o a distaccarsi violentemente dalla struttura su cui era fissato. Tali episodi possono anche essere accompagnati da uno smantellamento della struttura di contenimento, i cui blocchi, inglobati nel ghiaccio, possono cadere nell'invaso, con conseguenti lacerazioni di vaste dimensioni, fino a diversi metri (Figura 7). Ammaloramenti di questo tipo, sono rilevabili quando, per esempio, interventi di ripristino dell'impermeabilizzazione dell'ope-

FIGURA 7
Esempio di lacerazione.

FIGURE 7
Exemple de déchirure.

Retour d'expérience sur les remblais et leurs dispositifs d'étanchéité par géomembrane (DEG)

*Les données de retour d'expérience sur la structure du DEG ont été intégrées à l'*Action 2.4a*. Sont présentés en complément ci-dessous les désordres affectant les remblais et leur DEG ayant pu être mis en évidence sur les 22 retenues d'altitude visitées.*

Déchirures de la géomembrane

Ce phénomène est souvent associé à la formation de glace dans les ouvrages pourvus d'une structure de recouvrement partielle, reposant sur une risberme : lorsque le niveau de la retenue s'abaisse pour alimenter les canons à neige, la glace tend à ramper sur les parements ou à se décrocher brutalement du rip-rap sur lequel elle s'était fixée. Ces épisodes peuvent également s'accompagner d'une déstructuration du confinement, dont les blocs, pris dans la glace, peuvent chuter dans la retenue. S'ensuivent des déchirures de grande ampleur, métriques pour les plus importantes (Figure 7). Les anciens désordres de ce type sont également décelables lorsque la remise en état de l'étanchéité de l'ouvrage

ra richiedono rattoppi di dimensioni importanti. Tre degli invasi esaminati presentavano o potrebbero aver presentato in passato tale tipologia di lesione.

Lacerazioni del DEG

La peculiarità degli invasi valdostani è data dalla presenza di una o più rampe di accesso al fondo degli stessi per agevolarne l'entrata per la pulizia o il ripristino della geomembrana. Sono stati riscontrati tre tipi di rampa:

a. lastre di cemento che poggiano su di un cuscino geotessile riempito con materiali sottili e tenute insieme da cavi ancorati al coronamento (Figura 8a);
b. lastre di cemento che poggiano su di un manto in PVC riciclato e tenute assieme da cavi ancorati al coronamento (Figura 8b);
c. porzioni di roccia tenute insieme da una matrice di cemento (Figura 8c).

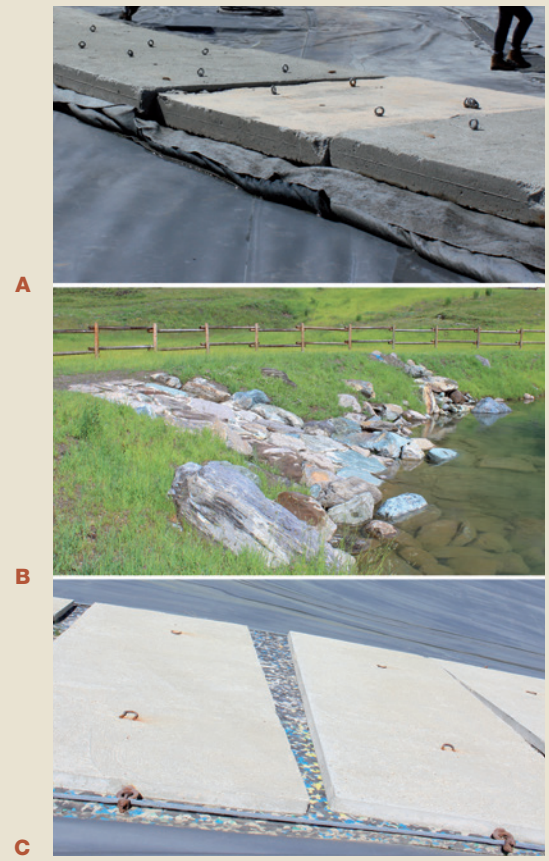


FIGURA 8
Dettaglio delle rampe di accesso.

FIGURE 8
Détail des rampes d'accès.

a nécessité l'utilisation de rustines de grande taille. Trois des retenues visitées ont été identifiées comme présentant ou ayant pu présenter par le passé ce type de blessure.

Arrachements du DEG

Les retenues valdotaines présentent la particularité de posséder une ou plusieurs rampe(s) d'accès au fond de la retenue afin d'en faciliter l'accès pour le nettoyage ou la réhabilitation de la géomembrane. Trois types de rampe ont été rencontrés :

a. *des dalles de béton reposant sur un coussin de géotextile rempli de matériaux fins, et maintenues entre elles par des câbles ancrés en crête (Figure 8a) ;*
b. *des dalles de béton reposant sur des tapis de PVC recyclé et maintenues entre elles par des câbles ancrés en crête (Figure 8b) ;*
c. *des enrochements maintenus dans une matrice de béton (Figure 8c).*

Due opere, rispettivamente dotate del primo e del secondo tipo di rampa, presentano ammaloramenti.
D'inverno, tali opere subiscono la formazione di uno spesso strato di ghiaccio che provoca un sovrappeso sulla rampa con anomalie della struttura sul fondo dell'invaso. Ne risulta una messa in tensione della geomembrana quando i cavi resistono (Figura 9), o uno strappo del DEG, se vi è rottura dei cavi. Si segnala che la sistematicità del problema ha portato alla soppressione della rampa in un invaso.
L'ultima configurazione sembra non accusare anomalie: il sito dell'opera rimane tuttavia meno esposto ai cumuli di neve.

Stabilità dei paramenti

Sono state osservate due tipologie di dissesto su due diversi invasi:
a. lo smottamento di un paramento a monte nella sua parte in rilevato;
b. lo smottamento di un paramento a monte nella sua parte in scavo.
Sono stati evidenziati diversi indizi specifici: geomembrana cedevole (Figura 10a); crepe longitudinali sul coronamento (rottura dell'ancoraggio - Figura 10b); sporgenza della

FIGURA 9
Frana di una rampa.

FIGURE 9
Glissement d'une rampe.

Deux ouvrages, équipés respectivement du premier et du second type de rampe, présentent des désordres. Ceux-ci se trouvent confrontées à la formation d'une épaisse couche de glace en hiver provoquant un surpoids sur la rampe et conduisant au glissement de la structure en fond de retenue. En découle la mise en tension de la géomembrane lorsque les câbles résistent (Figure 9), ou l'arrachement du DEG s'ils rompent. À noter que la récurrence de ce problème a conduit à la suppression de la rampe d'une retenue.
La dernière configuration semble quant à elle exempte de désordres : le site d'implantation de l'ouvrage qui en est pourvu reste toutefois moins sujet aux congères.

Stabilité des parements

Deux types d'instabilités ont été observés sur deux retenues différentes :
a. *le glissement d'un parement amont dans sa partie en remblai ;*
b. *le glissement d'un parement amont dans sa partie en déblai ;*
Plusieurs indices caractéristiques ont pu être notés : géomembrane lâche (Figure 10a) ; fissure longitudinale en crête (rupture de la clé d'ancrage - Figure 10b) ; surplomb de

berma dovuta allo spostamento di materiali sottostanti sul fondo dell'invaso; rigonfiamento ai piedi del paramento dovuto allo scivolamento di materiale da monte.
Le opere con pendenze eccessivamente ripide dei paramenti sono spesso predisposte a tale tipologia di ammaloramento. Tuttavia è il sovrappeso generato dalla formazione di ghiaccio durante l'inverno a rappresentare il più delle volte l'elemento scatenante. La realizzazione di una struttura di rivestimento parziale su berma potrebbe anch'essa favorire il fenomeno, dando origine a un sovraccarico che facilita lo smottamento.

Punzonatura e perforazione

Punzonatura e perforazione della struttura impermeabilizzante rappresentano le problematiche più ricorrenti (almeno per 6 degli 11 invasi italiani). Tali fenomeni, sebbene soggetti a ulteriore aggravamento dovuto a condizioni meteorologiche estreme in inver-

A

B

FIGURA 10
Smottamento con paramento a monte.

FIGURE 10
Glissement en parement amont.

la risberme en raison de la migration des matériaux sous-jacents en fond de retenue ; bourrelet en pied de parement suite à l'arrivée des matériaux amont.
Les ouvrages dont les pentes des parements sont trop raides, sont souvent prédisposés à ce type de sinistre. Toutefois, le surpoids provoqué par la formation de glace en hiver constitue dans la plupart des cas l'élément déclencheur. La mise en place d'une structure de recouvrement partielle sur risberme est également susceptible de favoriser ce phénomène en créant une surcharge en tête de glissement.

Poinçonnement et perforation

Les problématiques de poinçonnement et de perforation de la structure d'étanchéité figurent parmi les plus récurrents (au moins 6 des 11 retenues italiennes). Ces phénomènes, bien que pouvant être aggravés par des conditions météorologiques extrêmes en hiver,

no, sono prevalentemente ascrivibili alla presenza di un supporto aggressivo (Figura 11). Appare opportuno segnalare che il rilevamento di anomalie è reso più agevole in caso di geomembrana nuda o parzialmente protetta: il rivestimento totale, spesso privilegiato sulle opere francesi, non ha permesso di individuare lesioni di tale natura.

Presenza di acqua

In caso di rivestimento totale della geomembrana, il riscontro di tracce di infiltrazione non intercettate dalla rete di drenaggio può rivelare la presenza di una perdita del manto impermeabile, un difetto nel raccordo del DEG alle opere annesse o un'anomalia durante la realizzazione delle stesse. Solo in rari casi le opere oggetto dello studio hanno evidenziato tale disfunzione e non sono state riscontrate perdite dirette sul rilevato a valle. L'unico caso registrato è illustrato di seguito: nonostante la pioggia caduta nei giorni precedenti la visita, i depositi di calcite tipici delle fessure trasversali che percorrono la superficie di cemento dello sfioratore superficiale sono indice di perdite regolari (Figura 12).

Scelta dei materiali di rivestimento

È stato possibile censire il caso di un'opera essenzialmente rivestita con materiale sciolto a base argillosa. Oltre alle conseguenze estetiche che ne derivano (acqua torbida in caso di moto ondoso o bullage), non è da escludere il riempimento con materiale fine dei geosintetici che assolvono una funzione drenante o degli stessi dreni (Figura 13).

sont le plus souvent attribués à la présence d'un support agressif (Figure 11). À noter que la détection de ces désordres est facilitée en cas de géomembrane nue ou partiellement protégée : le recouvrement total, souvent privilégié sur les ouvrages français, n'a pas permis d'observer ce type de blessures.

Circulations d'eau

Dans le cas d'un recouvrement total de la géomembrane, la présence de traces d'infiltration non interceptée par le réseau de drainage peut révéler une défaillance de l'étanchéité, un défaut dans le raccordement du DEG aux ouvrages annexes ou une anomalie lors de la réalisation de ces derniers. Les ouvrages parcourus n'ont que très rarement révélés ce type de désordre et nous n'avons pas observé de fuites directes sur le remblai aval. Seul le cas présenté ci-dessous est à recenser : bien que les jours précédent la visite aient été pluvieux, les dépôts de calcite accompagnant les fissures transversales qui parcourent la surface bétonnée de l'évacuateur de crues attestent de circulations régulières (Figure 12).

Choix des matériaux de recouvrement

Le cas d'un ouvrage au recouvrement essentiellement constitué de fines (matériaux pour partie argileux) a pu être rapporté. En plus des conséquences esthétiques que cela engendre (eau trouble si batillage ou bullage), le colmatage des géosynthétiques assurant la fonction de drainage ou des drains eux-mêmes n'est pas à exclure (Figure 13).

Situazioni a rischio

Alcune configurazioni possono ritenersi a rischio anche in assenza di danni. Presentiamo un elenco non esauriente delle anomalie da monitorare poiché passibili di arrecare danni alla tenuta dell'invaso:

a. utilizzo di gabbioni metallici per la struttura di rivestimento (Figura 14a): in caso di rottura dei cavi, esiste un rischio di graffio nei geosintetici sottostanti;

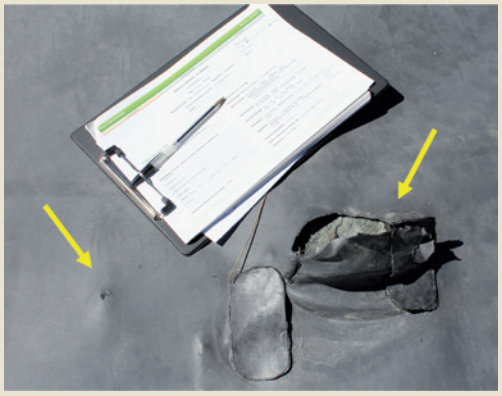


FIGURA 11
Punzonatura (a sinistra) e perforazione (a destra) di una geomembrana.

FIGURE 11
Poinçonnement (à gauche) et perforation (à droite) d'une géomembrane.

FIGURA 12
Tracce di ricircolo d'acqua sullo sfioratore superficiale.

FIGURE 12
Traces de circulation d'eau sur l'évacuateur de crues.

FIGURA 13
Acqua torbida dovuta a un'elevata proporzione di materiali sottili.

FIGURE 13
Eau trouble en raison d'une forte proportion de fines.

Situations à risque

Certaines configurations peuvent être jugées à risque, bien qu'aucun dommage n'ait été noté. Nous dressons ici une liste non exhaustive de détails à surveiller pouvant conduire à un endommagement de l'étanchéité de la retenue :

a. *utilisation de gabions pour la structure de recouvrement (Figure 14a) : lorsque le tressage des fils de fer est défaillant, il existe un risque de griffure des géosynthétiques sous-jacents ;*

b. utilizzo di masselli autobloccanti per la struttura di rivestimento: in presenza di un geotessile in cattivo stato, può sopraggiungere una lesione della geomembrana sulla berma. Analogamente, esiste un rischio di punzonatura o di lacerazione in caso di caduta sul fondo dell'invaso (Figura 14b);
c. sacco zavorra lacerato: la lesione della geomembrana può essere determinata dalla natura e dalla granulometria dei materiali (Figura 14c).

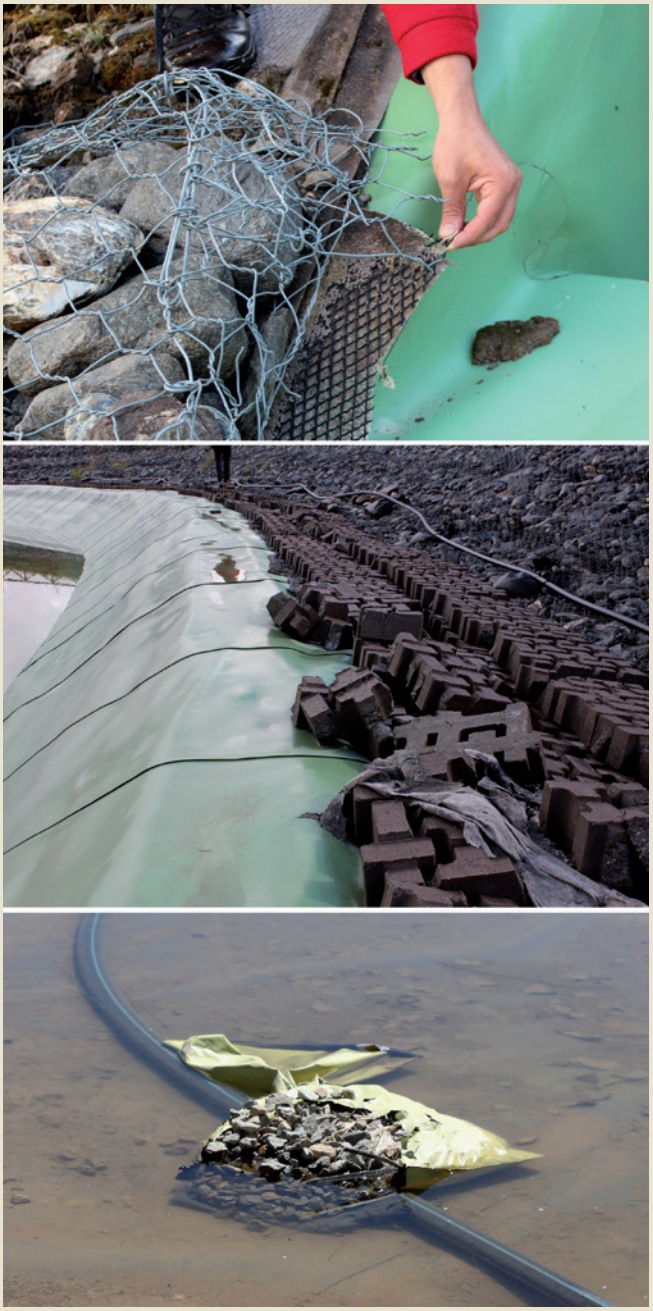


FIGURA 14
Situazioni a rischio.

FIGURE 14
Situations à risque.

b. *utilisation de pavés autobloquants pour la structure de recouvrement : en association avec un géotextile en mauvais état, la blessure de la géomembrane sur la risberme est probable. De même, un risque de poinçonnements ou de déchirures existe en cas de basculement en fond de retenue (Figure 14b) ;*
c. *sac de lestage éventré : selon la nature, la granulométrie des matériaux, la blessure de la géomembrane est possible (Figure 14c).*

Elementi geologici e geotecnici

Questa sezione presenta un'analisi sintetica di alcuni dati geologici e geotecnici raccolti nella documentazione degli 11 invasi francesi in quota analizzati.

Documentazione disponibile

Oggetto degli studi sono stati prevalentemente la documentazione preliminare e i documenti sulla derivazione d'acqua. Per una sola opera è stato possibile consultare la documentazione delle opere eseguite, la relazione di invaso sperimentale e i documenti di collaudo. Per diversi invasi è stato possibile esaminare le relazioni di presentazione al consiglio di dipartimento per l'igiene, le sentenze prefettizie e le relazioni di natura tecnica DREAL redatte da Irstea.

Prove *in situ* e in laboratorio

Per ogni opera sono stati realizzati mediamente tra 7 e 10 pozzetti di ispezione con escavatori durante la fase preliminare. Fa eccezione un invaso con 66 campionamenti. Il più delle volte tali rilievi sono eseguiti con campionamenti distruttivi, penetrometrici o con carotaggi atti a costituire esperimenti pressiometrici.
In conclusione, i rilievi geofisici sono stati applicati a 8 opere con profili di sismica a rifrazione (da 3 a 8 profili) o profili elettrici (3 profili in media).
Gli esperimenti eseguiti in laboratorio sono invece più differenziati e solitamente valutati dal capo progetto: se gli esperimenti identificativi sono sistematici, solo alcuni degli invasi presentano risultati di esperimenti Proctor, di punzonatura o triassiali.

Éléments géologiques et géotechniques

Cette partie présente une analyse succincte de quelques données géologiques et géotechniques recueillies dans les dossiers des 11 retenues d'altitude françaises.

Documents disponibles

Ce sont les contenus des dossiers d'avant-projet et des dossiers loi sur l'eau qui ont été majoritairement examinés. Le dossier des ouvrages exécutés, le rapport de 1ère mise en eau et le dossier de récolement n'ont pu être consultés que pour un seul ouvrage. Les rapports de présentation au conseil départemental d'hygiène, les arrêtés préfectoraux, ainsi que les rapports de l'appui technique au service de contrôle de la DREAL, rédigés par Irstea, ont pu être parcourus pour plusieurs retenues.

Essais in situ *et de laboratoire*

En moyenne, 7 à 10 tranchées à la pelle mécanique ont été réalisées en phase d'avant-projet pour chaque ouvrage. Une retenue fait figure d'exception avec 66 sondages. Ces reconnaissances sont complétées pour la majorité des cas par des sondages destructifs, pénétrométriques ou carottés, donnant lieu à la réalisation d'essais pressiométriques. Enfin, les reconnaissances géophysiques sont appliquées à 8 ouvrages : il s'agit soit de profils de sismique réfraction (de 3 à 8 profils), soit de profils au panneau électrique (3 profils en moyenne).
Les essais de laboratoire sont pour leur part plus variés et davantage laissés à l'appréciation du maître d'œuvre : si les essais d'identification sont systématiques, seules quelques retenues présentent des résultats d'essais Proctor, de cisaillement ou triaxiaux.

Geologia dei siti di costruzione e rischi

Le opere sono prevalentemente ubicate in formazioni moreniche, sopra un substrato di scisti cristallini o formazioni calcaree a livelli scistosi.
La presenza di terreni sensibili alla dissoluzione e allo sviluppo di carsismo interessa 4 invasi:

a. è quanto appurato per due di essi, poiché i sondaggi geotecnici hanno messo a nudo masse di gessi e/o carniole;
b. lo si presume per gli altri due, poiché è stata notata la presenza di doline in prossimità dell'opera.

Inoltre, non sono stati osservati smottamenti di versante (diversamente dai 3 invasi italiani interessati da movimenti di grande ampiezza anche se con un'attività assai limitata o nulla da diversi anni): sono riscontrabili solo propensioni d'instabilità superficiale nelle aree in scavo a forte pendenza per 3 invasi.

Analisi di pericolosità

Gli invasi in quota sono esposti a diversi pericoli più o meno specifici dei territori di montagna. La presente sezione intende descrivere le opere in esame suscettibili di subire o aver subito rischi di valanghe, torrentizi o sismici.
È bene precisare che le nostre analisi poggiano su osservazioni fatte sul campo: non rappresentano pertanto una valutazione della pericolosità completa ed esauriente.

Géologie des sites d'implantation et risques

La majorité des ouvrages trouvent leur assise dans des formations morainiques, surmontant un substratum de schistes cristallins ou de formations calcaires à niveaux schisteux.
La présence de terrains sensibles à la dissolution et au développement de karst concerne 4 retenues :

a. *deux de manière avérée, où les sondages géotechniques ont mis à nu des masses gypseuses et/ou cargneules ;*
b. *deux de façon supposée, où la présence de dolines a pu être observée aux abords de l'ouvrage.*

Par ailleurs, aucun glissement de versant n'a pu être noté (à l'inverse de 3 retenues italiennes concernées par des mouvements de grande ampleur, toutefois peu ou pas actif depuis de nombreuses années) : seules des instabilités superficielles sont possibles sur les zones en déblai à forte pente de 3 ouvrages.

Analyse des aléas

Les retenues d'altitude sont soumises à de nombreux aléas, spécifiques ou non aux territoires montagneux. Cette partie vise à décrire si les ouvrages visités ont subit ou sont susceptibles de subir des risques d'avalanche, torrentiels ou sismiques. Notons que nos remarques se basent sur des observations de terrain : elles ne constituent donc pas une analyse d'aléa complète et exhaustive.

Valanghe

In Francia, lo studio della vulnerabilità di un sito a rischio valanghe fa principalmente riferimento alla Mappa di Localizzazione dei Fenomeni di Valanga (CLPA = Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanche). Si tratta di un documento descrittivo degli eventi osservati o storici, teso a informare e sensibilizzare la popolazione riguardo all'esistenza di aree in cui si sono prodotti tali fenomeni.
Nessuno degli invasi francesi oggetto del nostro studio è esposto a un rischio valanghe, siano esse appurate o presunte, cartografate in base a testimonianze, fotointerpretazioni o analisi del terreno. Nondimeno, tre invasi si trovano nelle immediate vicinanze delle aree di estensione massima di alcuni eventi, spesso a meno di un centinaio di metri. È pertanto assolutamente plausibile immaginare che possano subirne l'impatto in anni con precipitazioni nevose consistenti. Inoltre, l'esame delle mappe è correlato alle osservazioni del terreno in cui versanti scoscesi sovrastano le opere.
È stata individuata in Italia un'opera valdostana esposta a rischio valanghe: per porvi rimedio, è stato posizionato ai piedi del versante un banco paravalanghe alto 2,50 m (Figura 15). D'altro canto, un sistema di innesco artificiale delle valanghe presente sul crinale del versante consente di orientare il deflusso della neve lungo un corridoio senza impatto per l'invaso.
Nella Regione Piemonte, i siti d'insediamento degli invasi sono stati confrontati con le mappe geografiche valanga SIVa (Sistema Informativo Valanghe) disponibili sul geoportale dell'ARPA Piemonte (GeoPortale ARPA Piemonte). Analogamente al principio delle CLPA francesi, tali documenti rilevano su supporto cartografico l'influsso degli eventi

Avalanches

En France, l'analyse de la vulnérabilité d'un site à l'aléa avalanche repose le plus souvent sur l'étude de la CLPA, Carte de Localisation des Phénomènes d'Avalanche. Il s'agit d'un document descriptif des événements observés ou historiques, ayant pour vocation d'informer et de sensibiliser la population sur l'existence de zones où de tels épisodes se sont produits.
Aucune des retenues françaises investiguées ne se trouve dans l'emprise d'une avalanche, quelle soit avérée ou supposée, cartographiée sur la base de témoignages, de photo-interprétations ou d'analyses de terrain. Néanmoins, trois retenues sont très proches des zones d'extension maximale de certains événements, souvent à moins d'une centaine de mètres. On peut donc tout à fait imaginer qu'elles puissent être impactées les années d'importantes précipitations neigeuses. Par ailleurs, l'analyse des cartes est corrélée aux observations de terrain, où des versants abrupts dominent les ouvrages.
En Italie, un ouvrage valdotain est identifié comme menacé par les avalanches : pour pallier ce risque, un merlon paravalanche de 2,50 m de hauteur a été placé au pied du versant (Figure 15). D'autre part, un système de déclenchement artificiel présent en crête du versant permet d'orienter l'écoulement de neige dans un couloir n'impactant pas la retenue.
En Région Piémont, les sites d'implantation des retenues ont été confrontés aux cartes d'information géographique avalanche SIVa (Sistema Informativo Valanghe), disponibles sur le géoportail de l'ARPA Piémont (GeoPortale ARPA Piemonte). Sur le même principe que les CLPA françaises, ces documents cartographient l'emprise d'événements passés, qu'ils soient délimités sur la base de travaux de terrain, ou sur la

passati, siano essi circoscritti in base a indagini in sito o in base alle fotointerpretazioni e agli archivi. Si è così giunti a individuare un invaso ritenuto sensibile al pericolo valanga grazie a un controllo incrociato delle due tipologie cartografiche (Figura 16).

Rischio torrentizio

In Italia, un invaso in quota è ubicato a destra di un corso d'acqua con deflusso non costante. Canali di gronda scavati lungo il perimetro dell'invaso consentono ai deflussi idrici l'aggiramento dell'opera. Tuttavia, il corso d'acqua mobilita un volume importante di materiali solidi che può ostruire i canali periferici predisposti per l'evacuazione: in questi casi è opportuno garantire una manutenzione costante.
Alcune opere realizzate a scopo irriguo possono anch'esse essere esposte ai rischi torrentizi. Benché gli invasi non risultino in linea sul corso d'acqua, sono in compenso alimentati da deflussi provenienti dai versanti superiori. Eppure, diversamente rispetto all'invaso in quota citato in precedenza, gli apporti sedimentari rimangono modesti in questo caso (sedimenti sottili, raramente blocchi, versanti vegetalizzati).
Infine osserviamo il passaggio di importanti corsi d'acqua in quattro invasi o nelle loro

FIGURA 15
Banco paravalanghe.

FIGURE 15
Merlon paravalanche.

base de photo-interprétations et d'archives. Une retenue a ainsi été identifiée comme sensible à l'aléa avalanche, son implantation recoupant ces deux types de cartographie (Figure 16).

Aléa torrentiel

En Italie, une retenue d'altitude se situe au droit d'un ruisseau d'écoulement temporaire. Un dispositif de tranchées creusées sur le pourtour de la retenue permet ainsi aux écoulements de contourner l'ouvrage. Toutefois, le ruisseau mobilisant une quantité importante de matériaux solides, ceux-ci comblent les chenaux périphériques d'évacuation mis en place : si les dépôts ne semblent pas parvenir jusqu'à la retenue, un curage régulier reste malgré tout nécessaire pour s'en assurer.
Certains ouvrages dédiés à l'irrigation peuvent eux aussi être sensibles aux aléas torrentiels. Si aucune des retenues ne barre directement un cours d'eau, elles sont en revanche alimentées par les ruissellements en provenance des versants supérieurs susceptibles de les remplir. Néanmoins, à l'inverse de la retenue d'altitude précédemment citée, les apports sédimentaires restent ici faibles (sédiments fins, rares blocs, versants végétalisés).

vicinanze; di questi, tre sono destinati alla produzione di energia idroelettrica.
In Francia, 4 invasi in quota sono ritenuti sensibili al rischio torrentizio. Tutti intercettano bacini imbriferi di importanti dimensioni, da 28 a 112 ha. Inoltre, due invasi collinari sbarrano in modo diretto un corso d'acqua: possono pertanto essere vulnerabili in caso di piena.

Rischio sismico

In Francia, l'area transfrontaliera franco-italiana risulta essere fra i settori maggiormente sismici del territorio. A seguito del decreto del 22 ottobre 2010, la nuova cartografia del rischio sismico in Francia identifica il territorio nel quale si inserisce il progetto RISBA quale area a rischio sismico da "moderato" a "medio": 6 invasi rientrano nella prima categoria, (accelerazione da 1.1 a 1.6 m/s² - area 3) e 10 nella seconda (accelerazione da 1.6 a 3.0 m/s² - area 4). Otto invasi francesi sono stati oggetto di uno studio di stabilità sotto sollecitazione sismica.
Diversamente, in Italia l'arco alpino è situato nei settori sismici tra i più deboli del territorio italiano (da 0,050 g a 0,150 g – g = accelerazione massima del suolo).
A oggi, nessun invaso ha subito danni causati da una scossa sismica in Francia o in Italia.

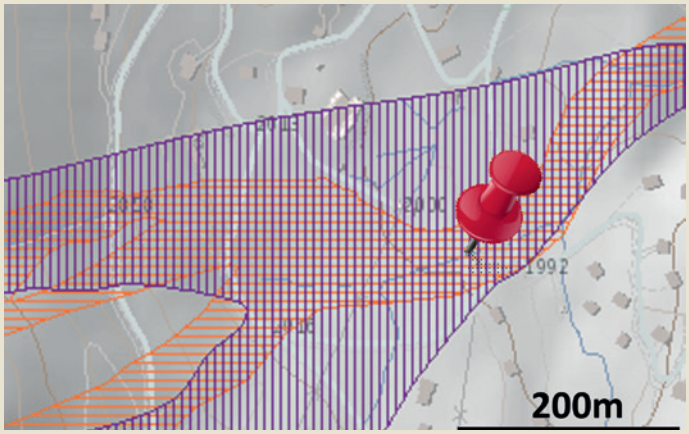


FIGURA 16
Esempio di una mappa SIVa: in viola le aree cartografate in base ai lavori sul terreno; in arancio le aree cartografate in base a fotointerpretazione e archivi.

FIGURE 16
Extrait d'une carte SIVa : en violet les zones cartographiées sur la base de travaux de terrain ; en orange les zones cartographiées sur la base de photo-interprétation et d'archives.

Enfin, notons le passage de cours d'eau importants dans ou à proximité de quatre retenues, dédiées pour 3 d'entre elles à la production d'énergie hydroélectrique.
En France, 4 retenues d'altitude sont identifiées comme sensibles à l'aléa torrentiel. Toutes interceptent des bassins versants de taille importante, de 28 à 112 ha. Par ailleurs, deux retenues collinaires barrent directement un cours d'eau : elles peuvent donc être vulnérables en cas de crue.

Aléa sismique

En France, la zone frontalière franco-italienne figure parmi les secteurs les plus sismiques du territoire métropolitain français. Suite au décret du 22 octobre 2010, la nouvelle cartographie de l'aléa sismique en France classe le territoire dans lequel s'insère le projet RISBA en zone d'aléa sismique « modéré » à « moyen » : 6 retenues se trouvent dans la première catégorie (accélération de 1.1 à 1.6 m/s² - zone 3) et 10 dans la seconde (accélération de 1.6 à 3.0 m/s² - zone 4). 8 retenues françaises ont fait l'objet d'une étude de stabilité sous sollicitation sismique.
À l'inverse, en Italie, l'arc alpin se situe dans les secteurs sismiques les plus faibles du territoire italien (de 0,050 g à 0,150 g – g étant l'accélération maximale du sol).
Aucune retenue en France ou en Italie n'a à ce jour subit de dommage en raison d'une secousse sismique.

Auscultazione delle opere

I dispositivi di auscultazione installati sugli invasi esaminati consentono, in modo parziale o totale, le seguenti misurazioni:

a. livello idrico;
b. portata di drenaggio;
c. livello piezometrico nel rilevato;
d. monitoraggio topografico del rilevato;
e. monitoraggio inclinometrico per il rilevamento di movimenti in superficie o in profondità.

Livello idrico

25 dei 36 invasi dispongono di un sistema di misurazione del livello idrico con scala limnimetrica e di una o due sonde di pressione. È stata talvolta osservata la presenza aggiuntiva di un manometro.

Portata di drenaggio

È accertata la presenza di uno o più dispositivi di monitoraggio della portata di drenaggio per 21 dei 36 invasi. A tal riguardo vanno tuttavia evidenziate differenze tra Francia e Italia. In Italia 6 opere risultano sprovviste di dispositivi per il monitoraggio della portata di eventuali perdite. Al contrario, almeno 4 invasi presentano un drenaggio con compartimentazione. Per il resto, tutte le acque sono raccolte nello stesso condotto, che è anche

---

Auscultation des ouvrages

Sur les retenues visitées, les dispositifs d'auscultation mis en place permettent tout ou partie des mesures suivantes :

a. *côte du plan d'eau ;*
b. *débit des drains ;*
c. *niveau piézométrique dans le remblai ;*
d. *suivi topographique du remblai ;*
e. *suivi inclinométrique pour la détection de mouvements superficiels ou profonds.*

Côte du plan d'eau

25 des 36 retenues disposent d'un système de mesure de la côte du plan d'eau au moyen d'une échelle limnimétrique, d'une sonde de pression, ou des deux. La présence d'un manomètre en complément a parfois été notée.

Débit de drainage

Un ou plusieurs dispositifs de suivi des débits de drainage équipent 21 des 36 retenues de manière certaine. On note toutefois des différences entre la France et l'Italie sur ce point. En Italie, 6 ouvrages sont dépourvus de dispositif de suivi des débits de fuite. À l'inverse, 4 retenues minimum voient leur drainage être compartimenté. Pour le reste, l'ensemble des eaux est collecté dans une seule et même conduite. Des difficultés d'accès rendant parfois compliquée la mesure des débits ont également été notées : si les ouvrages récents voient

unico. Talvolta, difficoltà di accesso rendono problematica la misurazione delle portate: se per le opere recenti gli sbocchi sono installati in un locale tecnico adiacente all'opera, per le più datate, invece, l'imboccatura può trovarsi in un'area interrata, angusta, immersa e di difficile accesso in inverno in presenza di un manto nevoso abbondante (Figura 17).
In Francia, i 5 invasi a scopo irriguo sono prevalentemente dotati di un unico condotto di raccolta delle acque (generalmente tappeto o camino drenante); essendo ubicato in un'area poco visibile e interrata, anche in questo caso l'accesso risulta quasi sempre difficile.
La realizzazione di un geosintetico drenante negli invasi in quota è frutto di una progettazione diffusa e interessa almeno 8 delle 11 opere prese in esame. A eccezione di una, tutte dispongono di almeno due aree di drenaggio distinte (Figura 18): possono essere articolate in settori o disposte secondo il livello idrico.

FIGURA 17
Difficoltà di accesso alla portata di drenaggio sull'invaso.

FIGURE 17
Difficulté d'accès au débit de drainage sur la retenue.

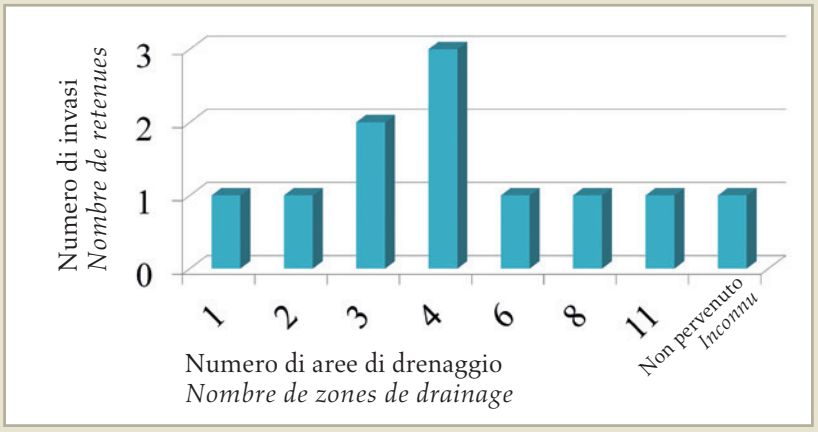


FIGURA 18
Ripartizione delle opere francesi secondo il numero di aree di drenaggio.

FIGURE 18
Répartition des ouvrages français selon le nombre de zone(s) de drainage.

leur(s) exutoire(s) être installé(s) dans un local technique au proche de l'ouvrage, pour les plus anciens en revanche, l'embouchure peut se situer dans un regard enterré, étroit, immergé et inaccessible l'hiver en présence d'une importante couverture neigeuse (Figure 17). En France, les 5 retenues dédiées à l'irrigation sont pour la majorité équipées d'une seule conduite de collecte des eaux (tapis drainant ou drain cheminée le plus souvent) ; située dans un regard enterré, l'accès y est également difficile dans la plupart des cas.
La mise en place d'un géosynthétique drainant dans les retenues d'altitude constitue la conception courante et concerne au moins 8 ouvrages sur les 11 visités. Toutes, à l'exception d'une, possèdent à minima deux zones de drainage distinctes (Figure 18) : elles peuvent être organisées en secteurs (cuvette, remblai nord, déblai ouest etc.) ou disposées selon la côte du plan d'eau.

In tali situazioni, tutti gli sbocchi delle tubazioni sfociano nei locali tecnici ubicati in prossimità dell'invaso (locali con impianto di innevamento artificiale) e sono facilmente accessibili sia d'inverno che d'estate. Si segnala inoltre la presenza di 5 celle per la misurazione della pressione interstiziale su un'opera francese.
In Italia come in Francia non è mai stato possibile verificare la presenza di dreni sotto il rilevato per via degli accessi generalmente difficili.
Infine, le misurazioni di portata vanno eseguite o con operazioni di riempimento / svuotamento o con l'ausilio di una lastra di deflusso a forma di V; sono talvolta presenti interruttori galleggianti che, al raggiungimento di una soglia predefinita, innescano un allarme automatico trasmesso su GSM.

Livello piezometrico

23 dei 36 invasi sono muniti di piezometri ubicati nel rilevato, nello scavo o ai piedi del paramento a valle. Le opere più recenti dispongono di strumenti automatici di misurazione. In caso di rilievi manuali però, alcuni piezometri risultano ostruiti o raramente misurati dopo diversi anni di funzionamento.

Monitoraggio topografico

20 invasi dispongono di segnali di misurazione topografica. Questi sono solitamente ubicati sul coronamento, sui paramenti a valle o al piede del rilevato; i punti di riferimento fisso sono invece ubicati in prossimità dell'opera, sul terreno naturale o ancorati alla roccia madre, talvolta messa a nudo in occasione di lavori di sgombero cantiere.

Dans ces cas, l'ensemble des exutoires débouchent dans les locaux techniques proches de la retenue (usine à neige), et sont faciles d'accès été comme hiver.
Par ailleurs, la mise en place de 5 cellules de pressions interstitielles est à souligner sur un ouvrage français.
En Italie comme en France, la présence du (ou des) exutoire(s) du drainage sous le remblai n'a pas pu être vérifiée au cours de toutes les visites car fréquemment peu accessibles.
Enfin, les mesures de débit se font soit par empotement, soit à l'aide d'une plaque déversante en V ; elles sont parfois accompagnées d'une poire de niveau qui, lors de l'atteinte d'un seuil prédéfini, déclenche une alerte automatique transmise sur GSM.

Niveau piézométrique

23 des 36 retenues sont équipées de piézomètres : ceux-ci se trouvent dans le remblai, dans le déblai ou en pied de parement aval. On note l'automatisation des mesures sur les ouvrages les plus récents. Lorsque les relevés sont manuels en revanche, certains piézomètres se révèlent bouchés ou rarement mesurés après plusieurs années d'exploitation.

Suivi topographique

20 retenues possèdent des bornes de mesures topographiques. Ces dernières se situent généralement en crête, sur les parements aval ou sur l'évacuateur de crues ; les points de référence fixe se retrouvent quant à eux aux abords de l'ouvrage, sur le terrain naturel ou fixés dans la roche mère parfois mise à nu lors des travaux de déblaiement.

Monitoraggio inclinometrico

8 invasi italiani sono dotati di inclinometri (fino a 3 dispositivi). In Francia, gli invasi ne sono privi.

Rispetto delle raccomandazioni e frequenza delle misurazioni

Le frequenze di misurazione raccomandate nei documenti variano a seconda dei dispositivi di auscultazione:

a. da giornaliere a mensili per le portate di drenaggio;
b. da mensili a bimensili per i rilevamenti piezometrici;
c. da semestrali a quinquennali per i rilevamenti topografici (le misurazioni sono effettuate costantemente nel tempo);
d. nessuna indicazione data in merito alla frequenza dei rilevamenti inclinometrici.

Di fatto, malgrado sia rispettato il numero di dispositivi raccomandati dalla documentazione delle opere, è stato possibile verificare solo occasionalmente le frequenze di misurazione.
Una riduzione dello stato di allerta e di controllo *in situ* sembra essere indotta dall'acquisizione automatica di alcuni dati. In rari casi alcuni amministratori hanno invece dato prova di grande sensibilità rispetto al rischio che può rappresentare l'opera, dimostrando una vigilanza assidua. Il monitoraggio rimane tuttavia più difficoltoso d'inverno (in particolare quello piezometrico) in presenza di un fitto manto nevoso.

Suivi inclinométrique

La mise en place d'inclinomètres a pu être constatée sur 8 retenues italiennes ; les ouvrages comptent 1 à 3 dispositif(s). En France, aucune n'en est équipée.

Respect des préconisations et fréquence de mesure

Les fréquences de mesure préconisées dans les dossiers des ouvrages divergent selon les dispositifs d'auscultation :

a. *quotidienne à mensuelle pour les débits de drainage ;*
b. *mensuelle à bimensuelle pour les relevés piézométriques ;*
c. *semestrielle à quinquennale pour les relevés topographiques (les mesures s'espacent graduellement dans le temps) ;*
d. *aucune précision n'est donnée quant à la fréquence des relevés inclinométriques.*

Dans les faits, si le nombre de dispositifs recommandés dans les dossiers des ouvrages est respecté, les fréquences de mesures ont quant à elles rarement pu être vérifiées. Une baisse de vigilance et de vérification in situ *semble être induite par l'acquisition automatique de certaines données. Dans de rares cas, certains gestionnaires se sont à l'inverse révélés très sensibles au risque que peut représenter leur ouvrage et en surveillent par conséquent le comportement de manière assidue. L'auscultation reste cependant perturbée en hiver (piézométrie notamment) lorsque la couverture neigeuse est trop importante.*

Conclusioni

Sebbene le nostre analisi evidenzino anomalie di varia tipologia, la manutenzione degli invasi presi in esame può ritenersi nel suo complesso adeguata. Si nota inoltre che gli interventi di sensibilizzazione da parte delle amministrazioni portano i loro frutti: i proprietari danno prova di una maggiore attenzione rispetto ai pericoli che possono presentare le loro opere. La presente indagine incentiva quindi la prosecuzione degli studi volti a ridurre i rischi correlati agli invasi in quota e collinari.

Ringraziamenti

Ringraziamo le società di consulenza, i servizi amministrativi francesi e italiani, i proprietari e gli operatori degli invasi per il loro contributo alla realizzazione di questa indagine nell'offrirci la loro disponibilità, nel rispondere alle nostre domande e nel mettere a nostra disposizione la documentazione.

Riferimenti bibliografici / *Références*

1. Peyras L., Meriaux P. *Retenues d'altitude. Guide de recommandations*, ed. Quae, 2009, 352 p.

Conclusions

Si nos analyses font état de divers types de désordres, les retenues visitées restent dans l'ensemble bien entretenues. On constate par ailleurs que les actions de sensibilisation des services de l'État portent leurs fruits : les propriétaires montrent une sensibilité accrue aux dangers que leur ouvrage peut représenter. Cette enquête de retour d'expérience encourage ainsi à poursuivre les études de réduction des risques liés aux retenues d'altitude et collinaires.

Remerciements

Nous remercions les bureaux d'études, les services administratifs en France et en Italie, les propriétaires et les exploitants des retenues qui ont contribué à la réalisation de cette enquête de retour d'expérience par leur disponibilité, leurs réponses à nos questions, et la documentation mise à disposition.

Valutazione dei rischi legati all'ambiente nell'intorno della diga

Impiego dell'interferometria satellitare per la valutazione dei rischi naturali

I satelliti radar ad apertura sintetica (SAR), in questi ultimi anni, hanno permesso di aumentare le potenzialità di utilizzo del telerilevamento a una vasta gamma di applicazioni in campo geologico.
Fra queste, quella che ai nostri scopi è la più interessante, consiste nel misurare gli spostamenti di porzioni della scena in esame. La tecnica radar interferometrica si basa sul confronto quantitativo di due o più immagini della stessa scena riprese da posizioni e in istanti di tempo che possono o meno coincidere, a seconda della particolare applicazione.
L'interferometria differenziale SAR consente, attraverso il confronto tra le fasi del segnale di due acquisizioni separate temporalmente, ma acquisite dalla stessa posizione e con gli stessi parametri di misura, di ricavare lo spostamento dei vari pixel che formano lo scenario osservato lungo la direzione della linea di vista (LOS) del sistema avvenuto durante l'intervallo trascorso.
La famiglia di tecniche genericamente denominata dei *persistent scatterers* risulta par-

Évaluation des risques liés à l'environnement autour du barrage

Utilisation de l'interférométrie satellitaire pour l'évaluation des risques naturels

Au cours de ces dernières années, les satellites radars à synthèse d'ouverture (SAR), ont permis d'augmenter l'usage potentiel de la télédétection pour une large gamme d'applications en géologie.
Parmi celles-ci, celle qui est la plus intéressante pour répondre à nos besoins, consiste à mesurer les déplacements de certaines parties de la scène en question. La technique de radar interférométrique est basée sur la comparaison de deux ou plusieurs images de la même scène, prises à partir de lieux et d'instants temporels qui peuvent coïncider ou pas, en fonction de l'application particulière. L'interférométrie différentielle SAR permet, grâce à la comparaison des phases du signal de deux acquisitions séparées dans le temps, mais acquises au même endroit et avec les mêmes paramètres de mesure, de calculer le

ticolarmente idonea e innovativa all'identificazione e alla definizione delle deformazioni su superfici e strutture soggette a una deformazione lenta e offre quindi un importante mezzo di analisi nello studio di tali fenomeni. La tecnica si basa sull'osservazione, su più immagini radar della stessa area, acquisite in tempi successivi da satellite, di un insieme di bersagli, i cosiddetti diffusori permanenti (PS). I PS sono tipicamente parti di edifici, strutture metalliche, rocce esposte, in generale elementi già presenti al suolo, le cui caratteristiche elettromagnetiche non variano sensibilmente di acquisizione in acquisizione. Questa tecnica, che non risente delle condizioni atmosferiche o del grado di insolazione del territorio (riprese anche in notturna) permette di:

- valutare le deformazioni della superficie terrestre lungo la congiungente satellite-bersaglio con precisioni dell'ordine del millimetro;
- caratterizzare il trend evolutivo della deformazione grazie al dataset completo di immagini storiche che, per i satelliti RADARSAT, va dal 2002 a oggi, con una cadenza media di circa 6-7 immagini all'anno per qualsiasi area di studio;
- analizzare le deformazioni su aree relativamente ampie (diversi chilometri), mettendo in luce settori di deformazione caratterizzati da movimenti locali differenziali, non altrimenti percepibili, se non con una fitta rete di monitoraggio tradizionale.

In Piemonte è disponibile un'indagine a scala regionale utilizzando dati radar delle piattaforme europee ERS 1 e 2, attive tra il 1992 e il 2001 ed ENVISAT per il periodo 2002 e 2010. La possibilità di utilizzare anche le nuove tecnologie legate al satellite RADARSAT (missione satellitare SAR della Agenzia Spaziale Canadese) ha aperto un nuovo scenario di utilizzo del dato satellitare nel campo della comprensione dei fenomeni naturali. Le modalità di acquisizione sono molteplici, mentre le orbite garantiscono la copertura dell'in-

déplacement des différents pixels constituant le scénario observé sur la direction de la ligne de vue (LOS) du système produit au cours de l'intervalle écoulé.
La gamme des techniques généralement appelée les « persistent scatterers *» est particulièrement innovante et adaptée à l'identification et à la définition des déformations sur les surfaces et les structures soumises à une déformation lente, et offre donc un outil important d'analyses dans l'étude de tels phénomènes. La technique est basée sur l'observation de plusieurs images radar de la même zone, acquises par le satellite à des moments différents, d'un ensemble de cibles, ce qu'on appelle les diffuseurs permanents (PS). Les PS font généralement partie de bâtiments, de structures métalliques, de roches exposées, en général des éléments déjà présents sur le terrain, dont les caractéristiques électromagnétiques ne varient pas de manière significative d'acquisition en acquisition. Cette technique, qui n'est pas affectée par les conditions météorologiques ou par le degré d'ensoleillement du territoire (filmant même la nuit) permet de :*

- *évaluer les déformations de la surface de la Terre le long de la ligne reliant le satellite cible avec une précision de l'ordre du millimètre ;*
- *caractériser la tendance évolutive de la déformation grâce à l'ensemble des données d'images qui, pour les satellites RADARSAT, de 2002 jusqu'à aujourd'hui, ont une vitesse moyenne d'environ 6 à 7 images par an pour n'importe quelle zone d'étude ;*
- *analyser les déformations sur des zones relativement vastes (plusieurs kilomètres), en mettant en évidence des zones de déformation caractérisées par des mouvements différentiels locaux, par ailleurs imperceptibles, si ce n'est avec un réseau dense de surveillance classique.*

Au Piémont, une enquête au niveau régional est disponible, utilisant les données radar des plates-formes européennes ERS 1 et 2, actives entre 1992 et 2001, et ENVISAT pour

tera superficie sia secondo geometrie discendenti (orbita del satellite da nord a sud), sia ascendenti (orbita del satellite da sud a nord).
Le analisi tramite *persistent scatterers* condotte con l'utilizzo di dati RADARSAT hanno sempre evidenziato una maggiore copertura di punti di misura rispetto ai satelliti precedenti.

In particolare i dati RADARSAT permettono:
- la raccolta di dati di movimento per fenomeni con evoluzione lenta;
- la possibilità di "zonizzare" aree in deformazione, distinguendo le zone a diverso comportamento cinematico;
- una caratterizzazione dello stato di attività delle varie zone;
- un supporto a eventuali modellazioni evolutive;
- un supporto per le valutazioni degli scenari evolutivi e per l'analisi di pericolosità e rischio legati agli ambienti circostanti gli sbarramenti artificiali.

Attualmente sono a disposizione circa 7.500.000 PS in Piemonte, che rendono possibile, nell'ambito del progetto RISBA, una attenta e dettagliata analisi di settori di versante prospicienti ai bacini studiati, del settore di imposta dello sbarramento, in qualche caso del corpo diga stesso e delle aree "inondabili" a valle. Questo al fine di contribuire a una caratterizzazione geologica dei siti, evidenziando eventuali situazioni di dissesto.
I dati PS sono stati utilizzati principalmente per la definizione dei cinematismi di versante; l'utilizzo di *tools* appositamente creati in ambiente GIS permette infatti di definire e visualizzare sia la direzione effettiva del movimento, che l'andamento dello stesso nel tempo (*time series*).

la période 2002 et 2010. La possibilité d'utiliser aussi les nouvelles technologies liées au satellite RADARSAT (mission satellitaire SAR de l'Agence spatiale canadienne) a ouvert un nouveau scénario d'utilisation des données satellitaires dans le domaine de la compréhension des phénomènes naturels. Les modes d'acquisition sont variés, alors que les orbites assurent la couverture de la totalité de la surface, soit selon des géométries descendantes (orbite du satellite du nord au sud), soit ascendantes (orbite du satellite du sud au nord).
Les analyses effectuées par des diffuseurs persistants, en utilisant des données RADARSAT, ont toujours abouti à une plus grande couverture de points de mesure par rapport aux satellites précédents.

En particulier, les données RADARSAT permettent :
- *d'obtenir des données de mouvement pour des phénomènes avec une évolution lente ;*
- *la possibilité de " subdiviser en zones " les déformations, en distinguant les zones de comportement cinématique différent ;*
- *une caractérisation des activités des différentes zones ;*
- *un support pour d'éventuelles modélisations évolutives ;*
- *un support pour l'évaluation des scénarios évolutifs et pour l'analyse des dangers et des risques liés à l'environnement autour des barrages artificiels.*

Environ 7.500.000 PS sont actuellement disponibles dans le Piémont, permettant dans le cadre du projet RISBA une analyse minutieuse et détaillée des zones de pente surplombant les bassins étudiés, la taxe de secteur du barrage, et dans certains cas, le corps de l'ouvrage même et les zones " inondables " en aval. Ceci afin de contribuer à une caractérisation géologique des sites, mettant en évidence d'éventuelles situations

Il progetto RISBA, relativo allo studio di invasi artificiali, identifica un ottimo *case study*, dove poter utilizzare la tecnica interferometrica, e analizzare i risultati ottenuti.
L'attività del Dipartimento di geologia e dissesto di Arpa Piemonte all'interno del progetto RISBA ha riguardato l'analisi di 174 invasi distribuiti nelle province di Torino e Cuneo, la cui distribuzione ricade in 57 riquadri, scelti in base alla distribuzione dei PS e alla conformazione morfologica dell'area di studio (Figura 1).

Metodologia di analisi dei dati PS

Una volta identificato l'oggetto (dighe) e l'intorno di studio (riquadri) si è volta l'attenzione alla tipologia e alla distribuzione spaziale del dato interferometrico, che, prima di essere analizzato, ha subito passaggi di pre-filtraggio per un'analisi più agile e speditiva del seminato PS.
In prima battuta i numerosi *dataset* che costituiscono il prodotto di acquisizione dei satelliti a disposizione sono stati uniti e connessi a un'unica base dati geografica (geodatabase Posgis).

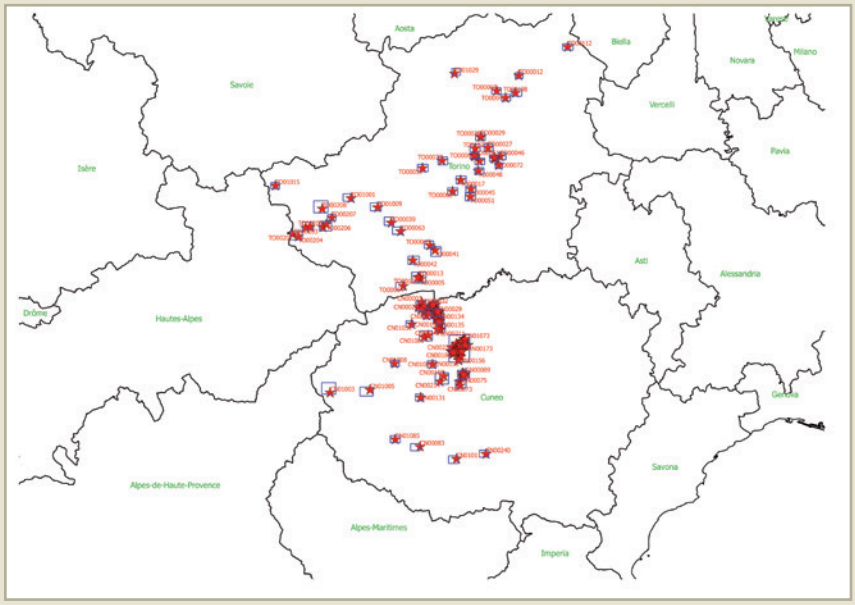


FIGURA 1
Distribuzione invasi all'interno del territorio piemontese (TO, CN).

FIGURE 1
Répartition des bassins dans le Piémont (Turin, Cuneo).

d'instabilité. Les données PS ont été principalement utilisées pour la définition de la cinématique de la pente; l'utilisation d'outils spécialement créés avec la technologie SIG permettent en effet de définir et de visualiser, à la fois la direction réelle du mouvement, ainsi que son évolution au fil du temps ("time series").
Le projet RISBA sur l'étude des bassins artificiels, identifie une excellente étude de cas, où l'on peut utiliser la technique interférométrique, et analyser les résultats obtenus.
L'activité du Département de géologie et d'instabilité de l'Arpa Piémont dans le projet RISBA, concerne l'analyse de 174 bassins répartis dans les provinces de Turin et de Cuneo, dont la répartition est divisée en 57 zones choisies en fonction de la distribution des PS et de la conformation morphologique de la zone d'étude (Figure 1).

Méthodologie de l'analyse des données PS

Une fois l'objet identifié (barrages) ainsi que les environs de l'étude (zones encadrées), l'attention se tourne sur la typologie et la répartition spatiale des données interférométriques, qui avant d'être analysées, ont fait l'objet de mesures de pré-filtrage pour une analyse plus souple et rapide du PS. Dans un premier temps, les nombreux

Il dato interferometrico così ottenuto è stato interpretato con il supporto di ulteriori livelli di informazione geografica, quali serie storiche di immagini ottiche orto rettificate, banche dati di riferimento come quella delle frane (SiFraP) e dei processi e degli effetti di eventi pregressi, nonché ai livelli derivati dal modello digitale del terreno (pendenze, esposizioni, ecc.), al fine di discriminare in maniera qualitativa la natura del PS e del suo cinematismo: antropico, ad esempio cedimenti differenziali, e/o naturale, ad esempio dinamica di versante (DGPV) attraverso un'analisi storica, critica e tecnica del movimento registrato.
Nell'esempio sopra citato si nota che, confrontando i due livelli di orto immagini (Figura 2), si osserva come il territorio nel 2006 sia stato colonizzato da strutture turistico-sportive (Olimpiadi Torino 2006), mentre precedentemente (ortofoto 2000) vi fossero prati e/o pascoli. L'utilizzo multitemporale delle orto immagini ci porta in questo esempio ad affermare come i riflettori che registrano movimento nell'area siano per la maggior parte PS antropici; in generale ci permette di discriminare quale tipologia di riflettore stiamo osservando e soprattutto quale sia l'evoluzione storica e i processi morfologici sui quali basare l'interpretazione cinematica.

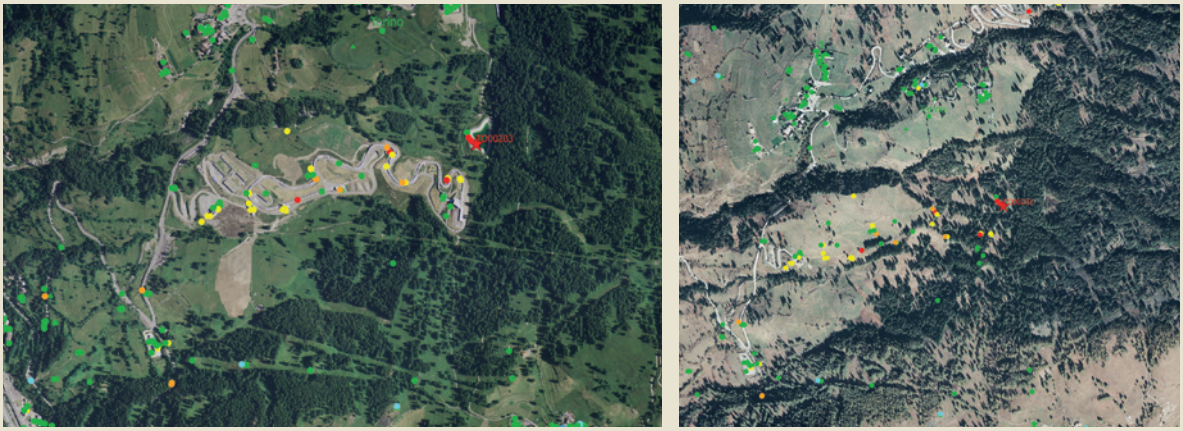


FIGURA 2
Esempio di confronto dello stesso seminato interferometrico con Ortofoto 2006 e Ortofoto 2000.

FIGURE 2
Exemple comparatif du même semis interférométrique avec Orthophoto 2006 et Orthophoto 2000.

jeux de données qui composent le produit d'acquisition des signaux satellites disponibles ont été réunis et connectés à une base de données géographique unique (base de données spatiales PostGIS).
Les données interférométriques ainsi obtenues ont été interprétées à l'aide d'autres informations géographiques, telles que les séries d'images optiques corrigées, les bases de données de référence comme celles des glissements de terrain (SiFraP) et les effets des évènements passés, ainsi qu'à l'aide de modèle numérique du relief (pentes, expositions, etc.) afin de distinguer de façon qualitative la nature du PS et de sa cinématique: anthropique par exemple les dépressions différentielles et/ou naturelles, par ex. la dynamique des versants (DGPV déformation gravitaire de versant) par une analyse historique, critique et technique du mouvement enregistré.
Dans l'exemple ci-dessus, on constate qu'en comparant les deux niveaux d'ortho-images (Figure 2) on observe que le territoire de 2006 a été colonisé par des installations touristiques et sportives (Jeux Olympiques Torino 2006), alors que précédemment (orthophotos 2000) il y avait des prairies et/ou des pâturages. Dans cet exemple, l'utilisation multitemporelle de l'ortho-imagerie nous amène à affirmer que les réflecteurs qui enregistrent le mouvement dans la zone sont pour la plupart des PS

Una volta identificata la natura, sono stati selezionati quei PS che ricadevano in prossimità dell'invaso e quelli la cui velocità media annua superava la soglia di velocità di +/–2 mm/yr in accordo con la letteratura (Colombo et alii, 2006) in cui con un PS "*in movimento*", si indica un riflettore che al netto della precisione strumentale e dell'incertezza dell'errore intrinseco della tecnica si possa ritenere soggetto a delle deformazioni nel periodo di lettura e analisi del dato strumentale.
L'azione descritta è materializzata dalla seguente formula in ambiente GIS sul campo relativo all'indicazione di velocità media annua presente nella tabella alfanumerica collegata al punto geografico:

'vel' >2 or 'vel'< –2

L'analisi della direzione reale di spostamento materializzato da un valore di velocità media annua registrata dal singolo PS deve essere valutata inizialmente dall'analisi morfologica che è possibile ottenere dal modello digitale del terreno (passo 5 m), che consente di individuare sia le fasce altimetriche, sia le fasce di esposizione all'interno delle quali ricadono i dati analizzati.
Una volta discriminati all'interno di ogni singolo riquadro i caratteri morfologici presenti (versante, fondovalle) e l'orientazione dei singoli versanti, è stato possibile effettuare un'analisi critica del cinematismo descritto dai singoli PS.
I dataset utilizzati per lo studio descritto sono stati riportati in Tabella 1.
Una volta raggiunto il primo obiettivo di discriminare e valorizzare i riflettori in un'ottica di individuazione di deformazioni legate all'invaso, si è analizzato il loro comportamento per ogni singolo invaso. La riduzione delle geometrie d'analisi ha permesso di entrare nel dettaglio nella valutazione delle deformazioni in atto. Lo studio svolto invaso per invaso del seminato PS riconducibile ai satelliti ERS RADARSAT ed ENVISAT con

anthropiques; en général elle nous permet de distinguer quel type de réflecteur nous observons, et surtout l'évolution historique et les processus morphologiques sur lesquels fonder l'interprétation cinématique.
*Une fois la nature identifiée, les PS sont sélectionnés et entrent dans le champ du bassin de rétention, et ceux dont la vitesse moyenne annuelle a dépassé le seuil de +/- 2 mm/an en accord avec les archives (Colombo et alii, 2006) et qui ont un PS "*en mouvement*", on indique un réflecteur qui, après des précisions instrumentales de l'incertitude inhérente à l'erreur technique, pouvant être envisagée sous réserve de déformations lors de la lecture et de l'analyse des données instrumentales.*
L'action décrite est matérialisée par la formule suivante dans l'environnement SIG sur le champ relatif à l'indication de la vitesse moyenne annuelle dans le tableau alphanumérique relié au repère géographique:

'vel' >2 or 'vel'< -2

L'analyse de la direction réelle du mouvement matérialisé par une vitesse moyenne annuelle enregistrée par un unique PS doit être d'abord évaluée par l'analyse morphologique, qui peut être obtenue à partir du modèle numérique du reliel (distance 5 m), qui permet de localiser, soit les bandes altimétriques, soit l'exposition au sein de laquelle les données analysées ont été relevées.
Lorsque les caractères morphologiques présents (versant, fond de vallée) et l'orientation de chaque versant ont été distingués à l'intérieur de chaque cadre, il est possible d'effectuer une analyse critique de la cinématique décrite par le PS.
La base de données utilisée pour l'étude décrite est reportée dans le Tableau 1.
Une fois le premier objectif atteint, c'est-à-dire distinguer et améliorer les réflecteurs en vue d'identifier les déformations liées à la rétention de crues, nous avons analysé

acquisizione ascendente e discendente ha permesso di identificare e raggruppare la casistica di analisi secondo situazioni al contorno riconducibili a tre categorie, attribuite per ogni invaso e per ogni dataset di acquisizione attraverso le seguenti diciture:

1. All'interno dell'area di analisi il dato PS non è presente in un intorno significativo rispetto alle possibili DIRETTE interferenze con l'invaso.
2. All'interno dell'area di analisi il dato PS è presente, ma da un primo esame selettivo non si rilevano movimenti deformativi di significativa importanza che possano interferire DIRETTAMENTE con l'invaso.
3. All'interno dell'area di analisi il dato PS è presente e nella fattispecie si evidenziano dei punti di misura della deformazione (identificazione dei singoli punti) che indicano movimenti che potrebbero INTERFERIRE con l'invaso stesso.

Nei casi 1 e 2, dove l'invaso risulta esente da movimenti deformativi di significativa importanza che possano interferire DIRETTAMENTE con l'invaso, lo studio sul coronamento e sul corpo diga si materializza con la produzione di un layout che graficamente riassume quanto espresso e il processo di analisi atto a interpretare il dato.

DATASET / *BASE DE DONNÉES*	N. DATI / *N.*	PS ANALIZZATI / *PS ANALYSÉS*	% PS UTILIZZATI / *% PS UTILISÉS*
ERS PST ASCENDENTE / *ERS PST ASCENDANT*	450948	9619	2,3
ERS PST DISCENDENTE / *ERS PST DESCENDANT*	788595	20932	2,6
RADARSAT SUD ASCENDENTE / *RADARSAT SUD ASCENDANT*	969632	42231	4,35
RADARSAT SUD DISCENDENTE / *RADARSAT SUD DESCENDANT*	926943	40781	4,39
RADARSAT NORD ASCENDENTE / *RADARSAT NORD ASCENDANT*	469453	1184	0,25
RADARSAT NORD DISCENDENTE / *RADARSAT NORD DESCENDANT*	386519	1136	0,29
ENVISAT PST ASCENDENTE / *ENVISAT PST ASCENDANT*	586789	3637	0,61
ENVISAT PST DISCENDENTE / *ENVISAT PST DESCENDANT*	519902	13879	2,6
TOTALE / *TOTAL*	5.098.781	133.399	

TABELLA 1
Distribuzione del dato PS diviso per satellite di acquisizione e geometria di ripresa.

TABLEAU 1
Répartition des données PS divisées par satellite avec géométrie d'acquisition.

leur comportement pour chacune d'entre elles. La réduction des géométries d'analyse a permis d'entrer dans les détails pour évaluer les déformations en cours. L'étude de chaque rétention par le PS se rattachant aux satellites ERS RADARSAT et ENVISAT avec acquisition ascendante et descendante, a permis d'identifier et de regrouper la série d'analyses selon les situations, se divisant en trois catégories, attribuées pour chaque rétention et série de données d'acquisition par l'intermédiaire des phrases suivantes :

1. *A l'intérieur de la zone d'analyse, les données PS ne sont pas présentes dans un périmètre significatif par rapport aux éventuelles interférences DIRECTES avec la rétention.*
2. *A l'intérieur de la zone d'analyse, les données PS sont présentes, mais après un premier examen de sélection, il n'y a pas de mouvement de déformation de grande importance qui pourrait interférer DIRECTEMENT avec la rétention.*
3. *A l'intérieur de la zone d'analyse, les données PS sont présentes, et dans ce cas, nous mettons en évidence des points de mesure de la déformation (identification des différents points) qui indiquent des mouvements qui pourraient INTERFÉRER avec la rétention elle-même.*

Nel caso 3, quando cioè sull'invaso risultano presenti punti di misura della deformazione che indicano movimenti che potrebbero INTERFERIRE con l'invaso stesso, è stato effettuato uno studio di dettaglio di tali punti mediante un'analisi approfondita e rivolta all'interpretazione delle serie storiche di deformazione (Figura 3). Il dato delle serie storiche si materializza come l'andamento degli spostamenti del riflettore calcolato per ogni immagine interferometrica utilizzata nel processo di elaborazione, che sta alla base della tecnica dell'interferometria differenziale multitemporale.
L'utilizzo delle banche dati di Arpa Piemonte e dei rapporti progettuali e di controllo collegati agli invasi stessi ha contribuito enormemente alla comprensione e all'interpretazione del dato, cercando di attribuire per ogni *time series* o gruppi di *time series* un significato al cinematismo descritto.
Nell'esempio di Figura 4 si può osservare come la stessa *time series* venga scomposta e analizzata in periodi diversi, per cercare di attribuire un significato geologico-geotecnico all'andamento della dinamica registrata.
L'utilizzo delle banche dati di Arpa Piemonte e la memoria storica del gruppo di lavoro, nel caso di PS con movimento superiore alla soglia fissata, ha permesso di risalire al periodo di costruzione dell'opera e quindi spingersi nel discriminare un movimento pre e post inizio dell'esercizio del manufatto e quindi di attribuire componenti e significati diversi alla dinamica registrata dai PS (es. TO00203 invaso olimpico, 2006).

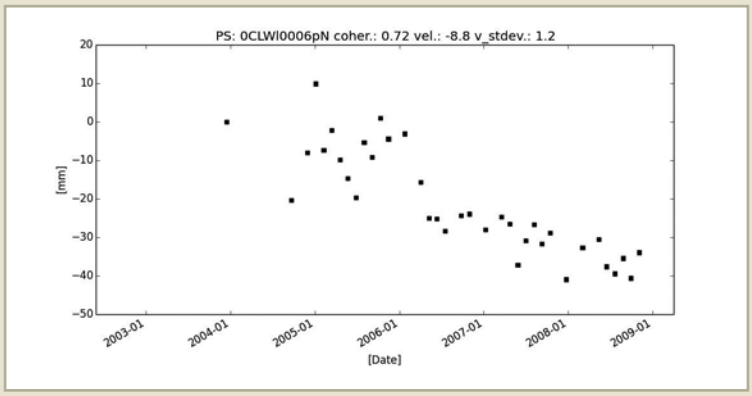


FIGURA 3
Time Series del PS presente nel dataset pst_envisat_t294_f2691_cl002_bardonecchia.

FIGURE 3
Séries temporelles du PS présent dans le dataset (ensemble de données) pst_envisat_t294_f2691_cl002_bardonecchia.

Dans les cas 1 et 2, où la rétention est exempte de tout mouvement de déformation important, pouvant interférer DIRECTEMENT auprès du réservoir, l'étude sur l'adaptation et le corps de l'ouvrage se matérialise avec la production d'un schéma, qui récapitule graphiquement ce qui est exprimé, ainsi que le processus d'analyse conçu pour interpréter les données.
Dans le cas 3, lorsque sur la rétention, il reste des points de mesure de la déformation, indiquant des mouvements qui pourraient INTERFERER avec la rétention elle-même, une étude détaillée de ces points a été faite avec une analyse approfondie destinée à l'interprétation de l'historique des déformations (Figure 3). Les données de l'historique des séries se matérialisent avec les déplacements du réflecteur, calculées pour chacune des images interférométriques utilisées dans le procédé de traitement qui est à la base de la technique de l'interférométrie différentielle multi-temporelle.
L'utilisation des bases de données de l'Arpa Piémont et des rapports de projets et de contrôles liés aux rétentions mêmes, a énormément contribué à la compréhension et à l'interprétation des données, en essayant d'attribuer à chaque série temporelle ou groupe de séries temporelles un sens à la cinématique décrite.
Dans l'exemple de la Figure 4, on peut voir que la même série temporelle est décomposée et analysée à différents moments, pour essayer de donner une signification géologique et géotechnique au cours de la dynamique enregistrée.
L'utilisation des bases de données de l'Arpa Piémont et la mémoire historique du groupe de

Un'analisi più approfondita supportata dal SiFraP (Sistema Informativo Frane Piemontesi), ha permesso di interpretare il movimento registrato pre-2006 (linea blu) come dinamica di versante, in particolare collegata a un'enorme deformazione gravitativa profonda di versante (DGPV) che insiste sull'area; l'accentuarsi delle misure successivamente alla costruzione dell'invaso ci porta a supporre che l'intera area sia sottoposta a dinamica di versante e che la struttura dell'invaso ne risenta sia in termini generali, ma anche in qualche maniera puntuali, collegati intrinsecamente all'oggetto riflettente.
In questo particolare caso un'analisi più di dettaglio per cercare di scomporre le due variabili (dinamica antropica e naturale) potrebbe essere effettuata con l'installazione di strumentazione atta a misurare il movimento a cadenza regolare (mensile, semestrale) o istantanea, sia sul corpo della diga che in profondità.
La correlazione di vari strumenti di monitoraggio può portare a un'identificazione univoca delle componenti del movimento, benché tale approfondimento non sia stato effettuato all'interno di questo progetto.
Il prodotto finale, riassunto delle attività descritte finora, è stato un layout dove viene illustrata la distribuzione e le statistiche di base relative all'intorno dell'invaso (Figura 5). Per ogni invaso, sono stati prodotti 3 layout distinti, uno per ogni satellite di acquisizione RADARSAT-ENVISAT-ERS. Nella Figura 5 si osserva come vi siano due "*spazi mappa*" dove in maniera distinta vengono evidenziate le geometrie di acquisizione ascendenti e discendenti.

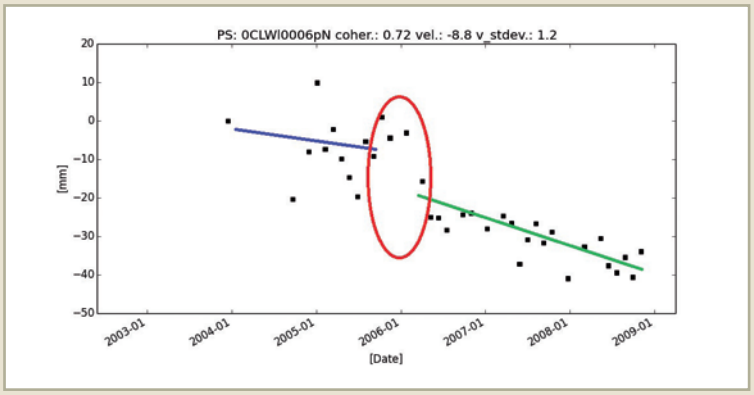


FIGURA 4
Variazione nell'andamento del movimento pre e post 2006, Invaso:TO00203.

FIGURE 4
Variation au cours du mouvement avant et après 2006, Rétention:TO00203.

travail, dans le cas de PS avec mouvement supérieur à un seuil défini, a permis de revenir à la période de construction de l'ouvrage, et ensuite de distinguer un mouvement avant et après le début de l'utilisation de l'édifice, puis d'attribuer des composants et des significations différentes à la dynamique enregistrée par les PS (ex. TO00203 rétention olympique, 2006).
Une analyse plus approfondie soutenue par le SiFraP (Système d'Information sur les glissements de terrain dans le Piémont), a permis d'interpréter le mouvement enregistré avant 2006 (ligne bleue) comme dynamique de versant, en particulier liée à une énorme déformation profonde de versant (DGPV) qui insiste sur la zone; l'augmentation des mesures à la suite de la construction de la rétention nous amène à supposer que l'ensemble de la zone est soumis à une dynamique de versant, et que la structure de la retenue en soit affectée, à la fois en termes généraux, mais aussi d'une certaine manière liée intrinsèquement à l'objet réfléchissant.
Dans ce cas particulier, une analyse plus détaillée pour tenter de décomposer les deux variables (dynamique anthropique et naturelle) pourrait être effectuée en installant des instruments adaptés pour mesurer le mouvement à intervalles réguliers (mensuel ou semestriel) ou instantanés, à la fois sur le corps du barrage et en profondeur.
La corrélation entre les différents outils de surveillance peut conduire à une identification unique des composantes du mouvement, cette étape n'ayant pas été effectuée dans ce projet.

Nella parte superiore del layout vi sono le informazioni geografiche-descrittive di ogni singolo invaso, mentre nella parte bassa vi è una descrizione univoca per geometria di acquisizione, dove si illustra la presenza-assenza di movimenti significativi, che possono interferire con il corpo diga o l'area di raccolta acque, invaso a monte. Nel caso il movimento segnalato possa interferire con l'invaso, a corredo dei 3 layout, è stata inserita una tabella con le *time series* studiate e un commento alle stesse.

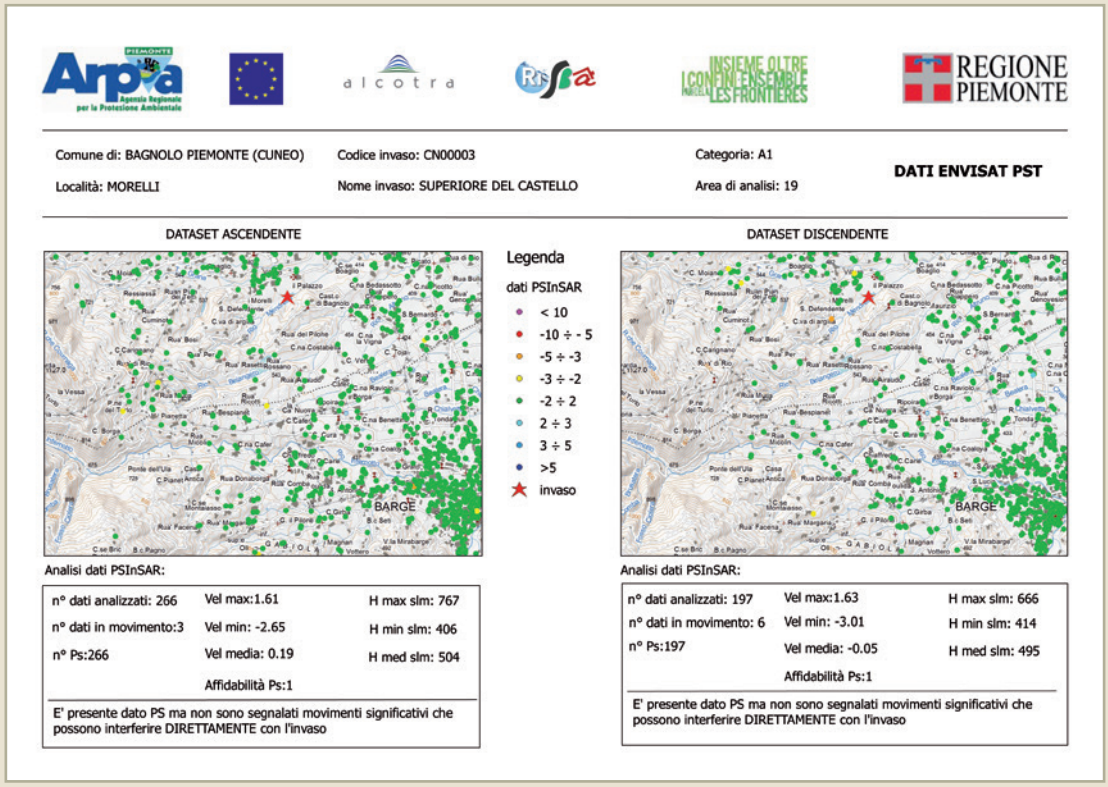


FIGURA 5
Layout per un invaso-tipo, copertura ENVISAT.

FIGURE 5
Schéma rétention-type, couverture ENVISAT.

Le produit final, synthèse des activités décrites jusqu'à présent, est un schéma qui représente la distribution et les statistiques de base autour de la retenue (Figure 5).
*Pour chaque rétention, 3 schémas différents ont été produits, un pour chaque satellite d'acquisition RADARSAT-ENVISAT-ERS. Dans la Figure 5, il semble qu'il y ait deux "*cartes de l'espace*" où de manière distincte, sont mises en évidence les géométries d'acquisition ascendantes et descendantes.*
Dans la partie supérieure du schéma, se trouvent les informations géographiques-descriptives de chaque rétention, alors que dans la partie inférieure, il y a une description unique par géométrie d'acquisition, qui montre la présence-absence de mouvements importants pouvant interférer avec le corps du barrage ou avec la zone de collecte des eaux, rétention en amont. Si le mouvement signalé est susceptible de gêner la rétention, les 3 schémas seront accompagnés d'un tableau avec les séries temporelles étudiées et un commentaire ajouté.

Valutazione del rischio: elementi da strumenti di pianificazione territoriale

Nell'ambito delle analisi relative a 169 invasi-campione in territorio piemontese finalizzate allo sviluppo dell'*Azione* 2.2 del progetto RISBA, vengono descritte nel seguito alcune attività legate al recupero di un inventario degli invasi realizzato negli anni '80 e ad alcune valutazioni relative ai Piani regolatori Comunali, ai Piani di Protezione Civile e agli aspetti sismici.

Recupero dell'inventario dei piccoli invasi

A metà degli anni '80, il Ministero dei Lavori Pubblici, d'intesa con il Ministero per il Coordinamento della Protezione Civile, commissionò all'Associazione temporanea di Imprese Aquater S.p.A., Ismes S.p.A. e Telespazio S.p.A. un "Censimento dei piccoli invasi artificiali sul territorio nazionale mediante telerilevamento e ricognizione sul terreno". Per la Regione Piemonte tale inventario comprende complessivamente 547 invasi. Al fine di permettere un insieme di confronti con la situazione attuale, utile per una molteplicità di scopi, si è proceduto al recupero di tutta la documentazione disponibile in formato cartaceo e alla creazione di una copertura vettoriale. Il lavoro è stato svolto secondo le seguenti fasi: elaborazione dei testi tramite sistema di conversione ottico (OCR); organizzazione dei materiali; conversione delle coordinate; elaborazioni in ambito QGIS/Grass per ottenere una copertura vettoriale dell'ubicazione di tutti gli invasi (Figura 6).

Évaluation du risque : éléments tirés des instruments d'aménagement territorial

*Dans le cadre des analyses concernant 169 barrages échantillonnés sur le territoire piémontais visant au développement de l'*Action 2.2 *du projet RISBA, dans les paragraphes suivants on décrira certaines activités liées à la récupération d'un inventaire des barrages réalisé dans les années 80 et à des évaluations relatives aux plans d'aménagement communaux, aux plans de protection civile et aux aspects sismiques.*

Récupération de l'inventaire des petits barrages

Au milieu des années 80 en Italie le Ministère des Travaux publics, en accord avec le Ministère pour la Coordination de la protection civile, fit exécuter par l'Association temporaire des Entreprises Aquater S.p.A., Ismes S.p.A. et Telespazio S.p.A. un « recensement des petits barrages artificiels sur le territoire national à travers la télédétection et les visites techniques sur le terrain ». Pour le Piémont, cet inventaire inclut au total 547 barrages. Afin de permettre une comparaise avec la situation actuelle, utile à plus d'une raison, on a récupéré toute la documentation disponible en format papier et on a créé une couverture vectorielle. Le travail a été effectué selon les phases suivantes : élaboration des textes à travers un système de conversion optique (ROC) ; organisation des matériaux ; conversion des coordonnées ; élaborations en milieu Qgis/Grass afin d'obtenir une couverture vectorielle de la localisation de tous les barrages (Figure 6).

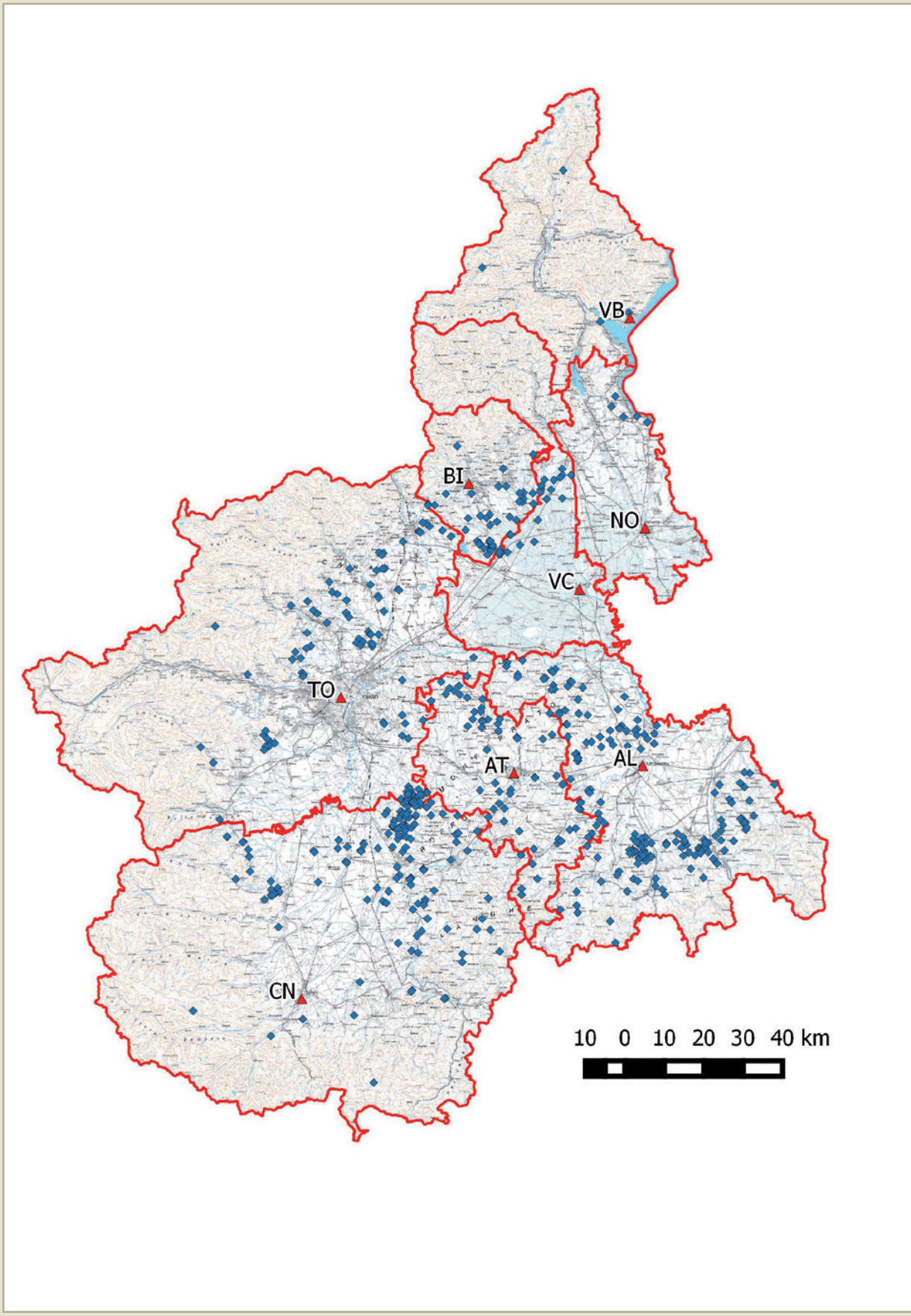


FIGURA 6
Ubicazione degli invasi esaminati in Regione Piemonte ed esempio di scheda monografica originale.

FIGURE 6
Localisation des barrages et exemple de carte monographique originale.

CODICE INVASO : 7144

1. LOCALIZZAZIONE
a Regione : PIEMONTE
b Provincia : CUNEO
c Comune : BRONDELLO
d Codice ISTAT : 10403200
e Tavoletta IGM : 79INE
f Coordinate UTM : 32TLQ74544071
g Sezione CTR : /
h Riferimento TCI: N50B1

2. CATEGORIA SISMICA : non sismica

3. DATO DA TELERILEVAMENTO
a Superficie stimata [m2] : 10817
b Data del telerilevamento : 04/08/1985

4. ACCESSIBILITA' DELL'OPERA
a Tratto di accesso pedonale :
DIRETTO (SINO AL CORONAMENTO)
b Tipo strada di avvicinamento :
ROTABILE IN GENERE

5. RIFERIMENTI IDROGRAFICI
a Collocazione dello sbarramento :
IN SPONDA, FORMAZIONE A POGGIO
b Tipo di corso d'acqua sbarrato :
ASSENTE
c Denominazione del corso d'acqua : /
d Copertura del suolo per il bacino imbrifero diretto :
SEMINATIVO E PASCOLO
e Area bacino imbrifero diretto [km2] : /
f Area bacino allacciato mediante derivazioni [km2] : /

EVENTUALE PRESENZA DI BACINI IN SERIE
g Codice dell'invaso superiore : /
h Codice dell'invaso inferiore : /

6. TIPOLOGIA INVASO
BACINO CON SBARRAM. IN MURATURA, CALCESTR. O MATER. SCIOLTO

7. GESTIONE INVASO
a Gestore : SOCIETA'PESCATORI SALUZZO
b Proprietario terreno : /
c Destinazione d'uso : PESCA

8. SBARRAMENTO
a Materiale : PIETRAME IN GENERE
b Protezione paramento di monte : ASSENTE
c Protezione paramento di valle : PRESENZA DI ARBUSTI O CESPUGLI
d Impermeabilizzazione invaso : ASSENTE

9. ORGANI DI SCARICO : PRESENTI
a Scarico di superficie : SFIORATORE A SOGLIA LIBERA
b Paratoie : /
c Scarico di fondo : /

10. TIPO DERIVAZIONE
ASSENTE

11. MISURE SULLO SBARRAMENTO
a Quota coronamento [m s.l.m.] : 407.00
b Sviluppo coronamento [m] : 477.00
c Larghezza media coronamento [m] : 3.50
d Altezza massima [m] : 11.00
e Modalita' calcolo altezza : DA MISURA

12. VALUTAZIONE DELL'INVASO
a Superficie [m2] : 14700
b Forma : A SEMIELLISSE
c Volume [m3] : 80850

13. INSEDIAMENTI E INFRASTRUTTURE

	ZONA Prossima	Meno prossima
13.1 UNITA' ABITATIVE :	SCARSE (DA 4 A 15)	MOLTE OLTRE 30

13.2 INFRASTRUTTURE TURISTICHE :
a Alberghi

b Campeggi e villaggi turistici

13.3 INFRASTRUTTURE SPORTIVE
a Centri sportivi

	ZONA Prossima T	L	Meno prossima T	L
13.4 INFRASTRUTTURE DI TRASPORTO E CONDUTTURE				
STRADA	x	x	x	x
PONTE STRADALE	x		x	
LINEA FERROVIARIA				
PONTE FERROVIARIO				
PONTE CANALE O PONTE TUBO				
ELETTRODOTTO	x	x	x	x
LINEE DI TELECOMUNICAZIONE	x	x	x	x
ACQUEDOTTO				
GASDOTTO O OLEODOTTO				

	ZONA Prossima	Meno prossima
13.5 INFRASTRUTTURE INDUSTRIALI		
CENTRALE ELETTRICA		
INDUSTRIA CHIMICA		
INDUSTRIA ESTRATTIVA		
ALTRA INDUSTRIA	x	x
DEPOSITO IN GENERE		
DEPOSITO MATERIALI PERICOLOSI		
SERBATOI		

Aspetti di caratterizzazione dei bacini campione in territorio piemontese

Nell'ambito delle analisi relative agli invasi-campione in territorio piemontese, nei paragrafi che seguono vengono descritte alcune valutazioni effettuate relativamente ai tre aspetti seguenti:

1. considerazioni relative ai PRGC (Piani Regolatori Generali Comunali) vigenti;
2. situazione relativamente ai Piani di Protezione Civile vigenti;
3. elenco dei parametri sismici relativi ai vari invasi.

1) Considerazioni relative ai PRGC

Per tutti i comuni interessati, per i quali fosse disponibile il PRGC con adeguamento al PAI, sono stati estratti gli stralci per le parti di interesse. Per ogni comune interessato è stata redatta una scheda che riporta gli stralci delle carte di pericolosità geomorfologica e di sintesi e una nota di commento; sono stati trattati nel complesso 56 comuni e redatte nel complesso 48 schede. Un esempio di tali schede è riportato in Figura 7.

2) Piani di Protezione Civile

Attraverso ricerche approfondite presso il Settore Regionale Protezione Civile della Regione Piemonte, si sono estratti tutti i piani disponibili (in numero di circa 50) per i comuni di interesse. I piani sono stati esaminati per verificare eventuali riferimenti agli invasi artificiali di competenza regionale. Con queste premesse, si prende atto che mai i Piani di Protezione Civile hanno finora preso in considerazione gli invasi di competenza regionale.

Aspects de caractérisation des retenues échantillonnés sur le territoire piémontais

Dans le cadre des analyses concernant les barrages échantillonnés sur le territoire piémontais, dans les paragraphes suivants sont décrites certaines évaluations effectuées par rapport aux trois aspects :

1. *considérations relatives aux PRGC (Plans d'aménagement généraux communaux) en vigueur ;*
2. *situation concernant les plans de protection civile en vigueur ;*
3. *liste des paramètres sismiques relatifs aux différents barrages.*

1) Considérations relatives aux PRGC

Pour toutes les communes intéressées, pour lesquelles le PRGC serait disponible après adaptation au PAI, les extraits des parties d'intérêt ont été relevés. Pour chaque commune intéressée, une carte reportant les extraits des cartes à risque géomorphologique et de synthèse, ainsi qu'une note de commentaire, a été rédigée. On a pris en considération 56 communes au total et rédigé 48 cartes. Un exemple de ces cartes est reporté dans la Figure 7.

2) Plans de protection civile

A travers une recherche auprès du Secteur régional de la protection civile de la Région Piémont, on a extrait tous les plans disponibles (environ 50) pour les communes d'intérêt. Les plans ont été examinés afin de vérifier d'éventuelles références aux barrages

3) Parametri sismici

Per ciascuno dei 169 invasi campione sono stati estratti, i corrispondenti parametri sismici, così come indicato dalle Norme Tecniche per le costruzioni NTC 2008 e dalla corrispondente Circolare Ministeriale n. 617 del 2 Febbraio 2009. La Figura 8 riporta una stralcio della tabella che riassume tutti i parametri. Il calcolo è stato realizzato utilizzando il software GeoStru disponibile online: http://www.geostru.com/geoapp/parametri-sismici.aspx. Tale software utilizza i parametri messi a disposizione dall'INGV nazionale. Nello specifico i parametri inseriti sono: 1) Classe di utilizzo II: corrisponde a un valore di $C_u = 1$ corrispondente a un edificio con affollamento normale; 2) Vita nominale della struttura $V_n = 50$; 3) Periodo di Riferimento dell'azione sismica

$$P_{V_R} = C_u \times V_n = 1 \times 50 = 50.$$

Il software restituisce i valori sismici a_g, F_o e T_c riferiti sia agli Stati Limite di Esercizio – *Stato Limite di operatività (SLO)* e *Stato limite di danno (SLD)* – che agli Stati Limite Ultimi – *Stato limite di salvaguardia della vita (SLV)* e *Stato limite di prevenzione del collasso (SLC)* – a loro volta relazionati al corrispondente Tempo di ritorno T_R come indicato nella Tabella 2.

TABELLA 2

TABLEAU 2

T_R (anni) / T_R *(années)* $V_R = V_N \times C_U$		cl. II 50 x 1		
Frequente / *Fréquent*	$P_{V_R} = 81\%$	30	*SLO 30 ans*	SLE: Stato limite di servizio / *SLE : État limite de service*
Occasionale / *Occasionnel*	$P_{V_R} = 63\%$	50	*SLD 50 ans*	
Raro / Rare	$P_{V_R} = 10\%$	475	*SLV 475 ans*	SLU: Stato limite ultimo / *SLU: État limite ultime*
Molto raro / *Très rare*	$P_{V_R} = 5\%$	975	*SLC 975 ans*	

artificiels de compétence régionale. Ceci dit, on prend acte que les plans de protection civile ne prennent jamais en considération les barrages de compétence régionale.

3) Paramètres sismiques

Pour chacun des 169 barrages échantillonnés, on a extrait les paramètres sismiques correspondants, comme indiqué dans les Normes Techniques pour les constructions NTC 2008 et de la correspondante Circulaire ministérielle n. 617 du 2 février 2009. La Figure 8 reporte un extrait du tableau résumant tous les paramètres. Le calcul a été réalisé en utilisant le logiciel GeoStru online : http://www.geostru.com/geoapp/parametri-sismici.aspx. Ce logiciel utilise les paramètres mis à disposition par l'INGV national. Dans ce cas précis, les paramètres saisis sont : 1) Classe d'utilisation II : elle correspond à une valeur $C_u = 1$ correspondant à une construction avec occupation normale ; 2) Vie théorique de la structure Vn = 50 ; 3) Période de référence de l'action sismique

$$P_{V_R} = C_u \times V_n = 1 \times 50 = 50.$$

Le logiciel restitue les valeurs sismiques a_g, F_o e T_c se rapportant aux états limite de service État Limite de fonctionnement (SLO)et État limite de dommages (SLD) et aux états limites ultimes État limite de sauvegarde de la vie humaine (SLV) et État limite de prévention de l'écroulement (SLC), à leur tour se rapportant au Temps de retour T_R comme indiqué dans le Tableau 2.

FIGURA 7
Esempio di scheda monografica con stralci dal PRGC (Piano Regolatore Generale Comunale).

FIGURE 7
Exemple de carte monographique avec extraits du PRGC.

REGIONE PIEMONTE

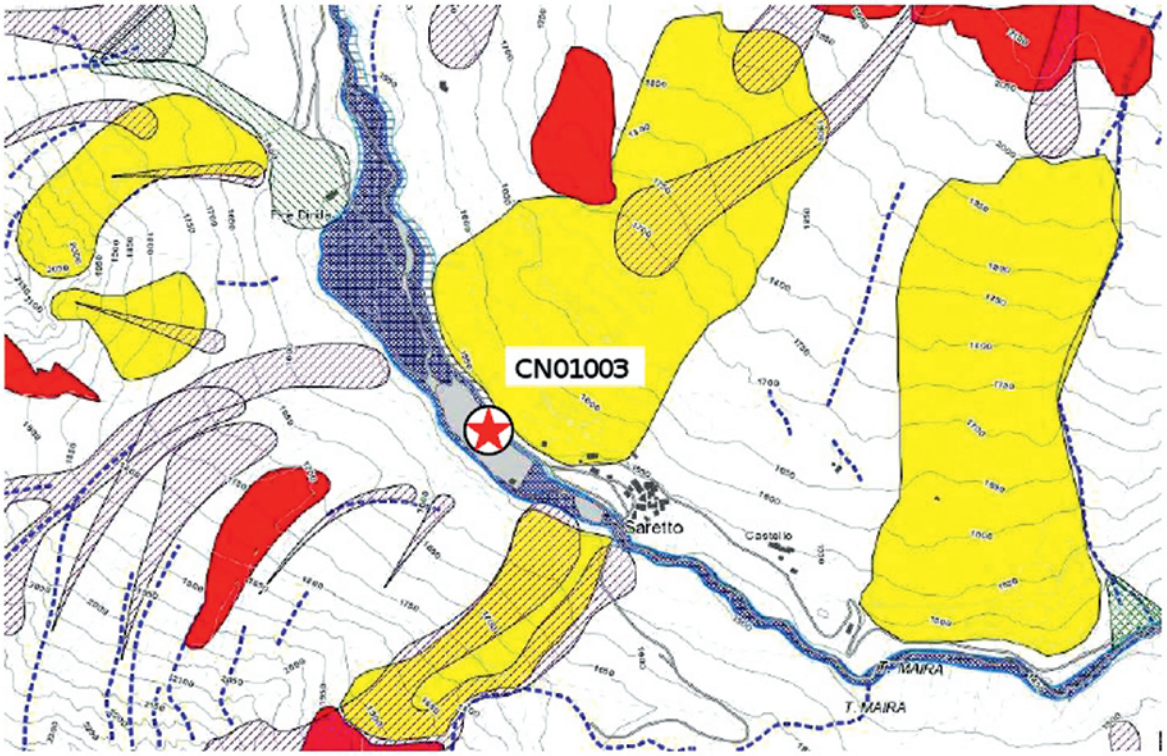
irstea

Vallée d'Aoste

alcotra

Alcotra 2007 - 2013

UBICAZ
RIPORTATA S



Stralcio della Carta Geologica, Geomorfologica e dei Dissesti con relativa legenda (P.R.G.C. Comune di Acceglio). Non in scala

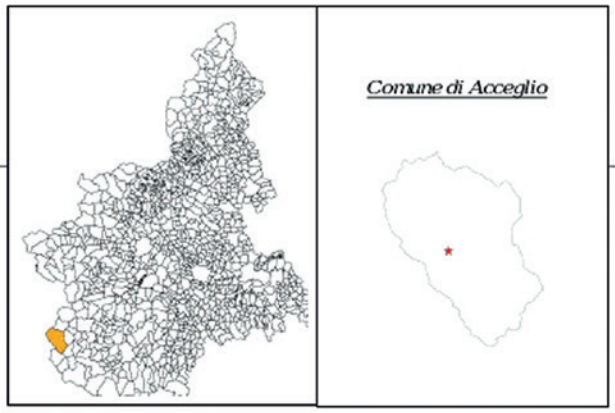
- Settori interessati da frane attive e principali accumuli di detrito di falda non stabilizzati
- Settori interessati da frane quiescenti
- Canaloni e versanti percorsi da valanghe di elevata pericolosità
- Settori inondabili con pericolosità molto elevata, Ee
- Settori inondabili con pericolosità elevata, Eb
- Conoidi stabilizzati, Cn

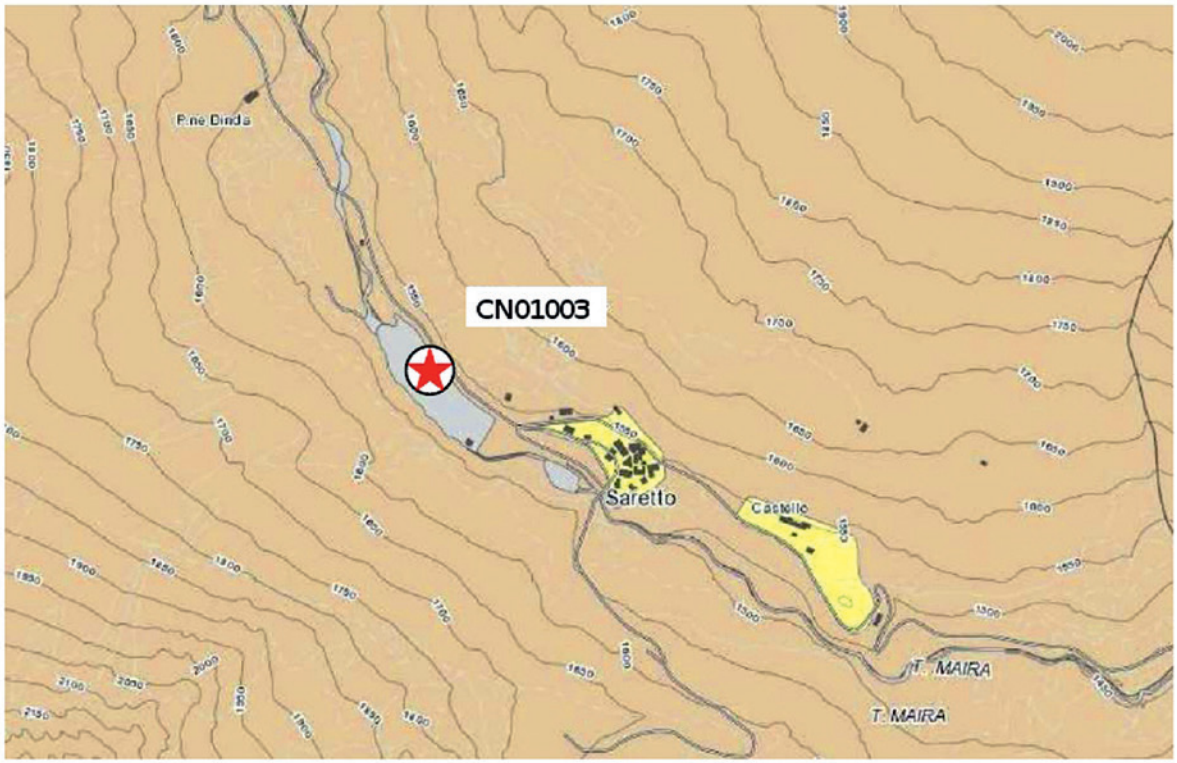
NOTA: l'invaso è situato sul fondovalle principale del Torrente Maira, pertanto in settori inondabili con perio
quiescenti, una in sinistra orografica, di maggiori dimensioni, e l'altra in destra orografica, ma a valle dell'ope
esame. Per quanto riguarda i numerosi canaloni da valanga presenti sui versanti, solo due risultano poter ragg
risulta pertanto inserita in classe III-A, che tiene conto delle numerose tipologie dissestive presenti, anche se

A - RISCHI DEGLI SBARRAMENTI ARTIFICIALI

ZIONE DEGLI INVASI
SU ELABORATI GEOLOGICI

Ubicazione dell'invaso





Stralcio della Carta di Sintesi della pericolosità geomorfologica e dell'idoneità all'utilizzazione urbanistica con relativa legenda (P.R.G.C. Comune di Acceglio). Non in scala

Classe II: aree pianeggianti o a bassa acclività, valutate con analisi geomorfologia di dettaglio, ove sono consentiti gli interventi previsti dal piano regolatore generale a condizione che siano rispettati gli accorgimenti tecnici esplicitati a livello di Norme Tecniche di Attuazione e realizzabili a livello di progetto esecutivo, esclusivamente nell'ambito del singolo lotto edificatorio o dell'intorno significativo

Classe III-A: porzioni di territorio inedificate, ma con possibile presenza di edifici sparsi, che presentano caratteri geomorfologici e/o idrogeologici tali da renderle inidonee a nuovi insediamenti e ampliamenti dell'esistente

colosità molto elevata (Ee) ed elevata (Eb). Sui versanti prospicienti il bacino sono indicate due frane
era. Tali dissesti comunque, allo stato attuale, non risultano interferire in modo significativo con l'opera in
iungere il Torrente Maira, ma a valle dello sbarramento. L'area su cui si trova l'invaso nella carta di sintesi
queste non compromettono la presenza del bacino in esame.

COD_INVASO	CAT	PROV	COMUNE	UBICAZIONE	XCOORD
CN01003	C	CN	ACCEGLIO	SARETTO	335611,
TO00017	A1	TO	ALMESE	CASTELLETTO_TAMPA LUNGA	377575,
TO00006	A1	TO	AVIGLIANA	LE FRONDE	374889,
TO01015	A2	TO	BARDONECCHIA	IMPIANTO IDROELETTRICO DI MELEZET_VASCA DI CARICO PARADISO	318020,
CN00026	A2	CN	BARGE	CASCINA BARLA	370384,
CN00027	A1	CN	BARGE	BRICCO S. QUIRICO	370799,
CN00031	A1	CN	BARGE	ASSARTI_ASSARTI2 (GEUNA)	368669,
CN00028	A1	CN	BARGE	RIPOIRA	363928,
CN00029	A2	CN	BARGE	TORRIANA_TORRIANA (MAGNANO B.)	370075,
CN00034	A1	CN	BARGE	RUA' ORDI	367209,
CN00032	A1	CN	BARGE	ASSARTI_ASSARTI3 (MINETTO)	369601,
CN00033	A1	CN	BARGE	ASSARTI_ASSARTI4 (ROLFO)	367655,
CN00040	A1	CN	BARGE	TORRIANA_TORRIANA (ROLANDO)	369245,
CN00039	A1	CN	BARGE	TORRIANA_TORRIANA (CRESPO)	369941,
CN00038	A1	CN	BARGE	ASSARTI_ASSARTI6 (CARLE)	367688,
CN00015	A2	CN	BARGE	TORRIANA_TORRIANA (COERO BORGA)	369462,
CN00016	A2	CN	BARGE	BORGATA MERLO	366461,
CN00035	A1	CN	BARGE	ASSARTI_ASSARTI5 (RASETTO)	368172,
CN00023	A2	CN	BARGE	TORRIANA_TORRIANA (TRECCO)	369439,
CN00024	A2	CN	BARGE	TORRIANA_TORRIANA (1MAGNANO P.)	369315,
CN00036	A1	CN	BARGE	TORRIANA_TORRIANA (VOTTERO A.)	369525,
CN00030	A1	CN	BARGE	ASSARTI_ASSARTI1 (GEUNA)	368454,
CN00045	A1	CN	BARGE	GABIOLA_GABIOLA2 (CARLE M.)	365770,
CN00046	A1	CN	BARGE	TORRIANA_TORRIANA (BELTRAMO F.)	369204,
CN00012	A1	CN	BARGE	TORRIANA_TORRIANA (1VOTTERO C.)	370214,
CN00013	A2	CN	BARGE	TORRIANA_TORRIANA (2VOTTERO C.)	370084,
CN00042	A1	CN	BARGE	TORRIANA_TORRIANA (ORALDI)	369210,
CN00043	A1	CN	BARGE	TORRIANA_TORRIANA (FRAIRE)	369367,
CN00044	A2	CN	BARGE	BASSE TORRIANA	369634,
CN00017	A1	CN	BARGE	RIPOIRA	365784,
CN00233	A1	CN	BARGE	ASSARTI_REGIS	368763,
CN00041	A2	CN	BARGE	TORRIANA_TORRIANA (2MAGNANO P.)	369160,
CN00025	A2	CN	BARGE	GABIOLA_GABIOLA (CARLE C.)	364848,
CN00037	A1	CN	BARGE	TORRIANA_TORRIANA (BELTRAMO GIAC.)	369984,
CN00047	A2	CN	BARGE	CAPOLOIRA	367390,
CN01032	A1	CN	BARGE	0	369549,
CN01033	A2	CN	BARGE	CASCINA VOTTERO_	369938,
CN01034	A1	CN	BARGE	0	370154,
CN01036	A1	CN	BARGE	CASCINA VOTASSA_COTTURA	370104,
CN01037	A	CN	BARGE	CASCINA BARLA_CRESPO	370325,
CN00014	C	CN	BARGE	TORRIANA_ZONA SALVAI	369519,
TO00012	B	TO	BORGIALLO	S. ANNA DEI BOSCHI_BASSO PIOVA	396282,
CN00240	A	CN	BOVES	RIVOIRA_LAGO DEI MIGNOT	385759,
TO00005	A1	TO	BRICHERASIO	CASCINA TURINA_TURINA	364643,
TO00013	A2	TO	BRICHERASIO	RIVA'	364248,
TO00197	A2	TO	BRICHERASIO	CASCINA BADARIOTTI	363865,
CN00185	C	CN	BRONDELLO	LAGO DI PAGNO_COMUNE SALUZZO	374530,
CN01009	A2	CN	BROSSASCO	BROSSASCO - COSTABELLA_BROSSASCO	368550,
CN00070	A2	CN	BUSCA	FRAZIONE SAN MARTINO_MOMBERTA	378452,
CN00072	A2	CN	BUSCA	MADONNA DEL CAMPANILE_ISAIA	377127,
CN00073	A1	CN	BUSCA	FRAZIONE SANTO STEFANO_SANTO STEFANO	377420,
CN00074	A1	CN	BUSCA	FRAZIONE SAN MARTINO_BARALE	378489,
CN00075	A2	CN	BUSCA	FRAZIONE S. MARTINO_SGAIRA	378193,
CN01067	A1	CN	BUSCA	0	378610,
CN00069	A2	CN	CASTELLAR	LA MORRA	376207,
TO00201	B	TO	CESANA TORINESE	SERRA GRANET-COLLE BERCIA_LA COCHE	323556,
TO00203	B	TO	CESANA TORINESE	ITALSIDER_ITALSIDER-SANSICARIO	327795,
TO00204	A1	TO	CESANA TORINESE	AREA SAGNALONGA_SAGNALONGA	325448,
TO00205	A2	TO	CESANA TORINESE	ROUGIES_ROUGIES-SANSICARIO	329215,
TO00059	A1	TO	CONDOVE	MOCCHIE	365325,
CN00087	A2	CN	COSTIGLIOLE SALUZZO	CERETTO_SPERTINO	378497,
CN00089	B	CN	COSTIGLIOLE SALUZZO	CERETTO_AZIENDA AGRICOLA PASERI	379240,

FIGURA 8
Stralcio della tabella contenente i parametri sismici presso gli invasi-campione.

FIGURE 8
Extrait du tableau contenant les paramètres sismiques auprès des retenues échantillonés.

				TR30 (SLO)			TR50 (SLD)			TR475 (SLV)			TR975 (SLC)					
	YCOORD	Lat	Long	ag	fo	tc	ag	fo	tc	ag	fo	tc	ag	fo	tc	Cu	Vn	NOTE
13	4927202,50	44.47941	6.932892	0,034	2,436	0,199	0,044	2,458	0,215	0,119	2,423	0,279	0,157	2,424	0,291	I	50	16 Invasi
14	4995532,15	45.10265	7.443905	0,031	2,478	0,198	0,038	2,539	0,214	0,091	2,57	0,265	0,115	2,566	0,274	I	50	
70	4991880,80	45.06932	7.410696	0,032	2,476	0,199	0,04	2,53	0,215	0,099	2,523	0,263	0,127	2,527	0,272	I	50	
65	4993770,63	45.07397	6.688087	0,03	2,44	0,197	0,038	2,513	0,211	0,103	2,459	0,268	0,136	2,451	0,277	I	50	
46	4953185,90	44.72032	7.363397	0,039	2,455	0,206	0,052	2,43	0,227	0,133	2,47	0,267	0,167	2,497	0,276	I	50	
31	4952142,39	44.71101	7.368897	0,039	2,459	0,205	0,051	2,433	0,227	0,13	2,468	0,267	0,165	2,495	0,275	I	50	
48	4955109,42	44.73732	7.341256	0,04	2,454	0,206	0,052	2,43	0,227	0,133	2,47	0,266	0,167	2,496	0,275	I	50	
80	4954745,42	44.73316	7.281504	0,041	2,447	0,207	0,054	2,43	0,227	0,135	2,476	0,267	0,169	2,501	0,277	I	50	
16	4952950,90	44.71815	7.359553	0,039	2,454	0,206	0,052	2,43	0,227	0,133	2,47	0,267	0,167	2,497	0,276	I	50	
48	4952931,39	44.71745	7.323391	0,04	2,451	0,206	0,053	2,43	0,227	0,134	2,474	0,267	0,168	2,5	0,276	I	50	
69	4955500,96	44.74101	7.352926	0,039	2,455	0,206	0,052	2,43	0,227	0,133	2,469	0,266	0,167	2,496	0,275	I	50	
40	4954956,90	44.73576	7.328493	0,04	2,453	0,206	0,053	2,43	0,227	0,133	2,47	0,266	0,168	2,497	0,275	I	50	
48	4953551,82	44.72341	7.348927	0,04	2,454	0,206	0,053	2,43	0,227	0,133	2,471	0,267	0,168	2,498	0,276	I	50	
83	4952340,39	44.71263	7.358025	0,04	2,453	0,206	0,053	2,43	0,227	0,133	2,471	0,267	0,168	2,498	0,276	I	50	
73	4954367,91	44.73046	7.329067	0,04	2,453	0,206	0,053	2,43	0,227	0,133	2,471	0,266	0,168	2,497	0,275	I	50	
16	4952412,89	44.7132	7.351953	0,04	2,453	0,206	0,053	2,43	0,227	0,133	2,472	0,267	0,168	2,498	0,276	I	50	
30	4951989,88	44.70884	7.314194	0,04	2,45	0,206	0,053	2,43	0,227	0,134	2,474	0,267	0,168	2,5	0,277	I	50	
37	4954726,00	44.73378	7.33508	0,04	2,454	0,206	0,053	2,43	0,227	0,133	2,47	0,266	0,168	2,497	0,275	I	50	
92	4953686,90	44.72466	7.351347	0,04	2,454	0,206	0,052	2,43	0,227	0,133	2,471	0,267	0,167	2,497	0,276	I	50	
84	4952880,40	44.71738	7.349987	0,04	2,453	0,206	0,053	2,43	0,227	0,133	2,471	0,267	0,168	2,498	0,276	I	50	
15	4952623,89	44.71511	7.352694	0,04	2,453	0,206	0,053	2,43	0,227	0,133	2,471	0,267	0,168	2,498	0,276	I	50	
64	4955224,92	44.73832	7.338514	0,04	2,454	0,206	0,052	2,43	0,227	0,133	2,47	0,266	0,168	2,496	0,275	I	50	
69	4954372,39	44.73015	7.304854	0,04	2,451	0,206	0,053	2,43	0,227	0,134	2,473	0,267	0,168	2,499	0,276	I	50	
75	4952867,40	44.71724	7.348589	0,04	2,453	0,206	0,053	2,43	0,227	0,133	2,471	0,267	0,168	2,498	0,276	I	50	
07	4952721,90	44.71612	7.361364	0,04	2,454	0,206	0,052	2,43	0,227	0,133	2,471	0,267	0,167	2,497	0,276	I	50	
45	4952499,89	44.71409	7.359785	0,04	2,454	0,206	0,052	2,43	0,227	0,133	2,471	0,267	0,167	2,498	0,276	I	50	
67	4953472,61	44.72269	7.348508	0,04	2,453	0,206	0,053	2,43	0,227	0,133	2,471	0,267	0,168	2,498	0,276	I	50	
72	4952610,89	44.71496	7.350711	0,04	2,453	0,206	0,053	2,43	0,227	0,133	2,471	0,267	0,168	2,498	0,276	I	50	
38	4953588,90	44.72381	7.353827	0,039	2,454	0,206	0,052	2,43	0,227	0,133	2,47	0,267	0,167	2,497	0,276	I	50	
56	4954993,40	44.73574	7.304865	0,04	2,452	0,206	0,053	2,43	0,227	0,134	2,472	0,267	0,168	2,498	0,276	I	50	
69	4955465,50	44.74054	7.342354	0,04	2,454	0,206	0,052	2,43	0,227	0,133	2,469	0,266	0,167	2,496	0,275	I	50	
28	4952661,89	44.71538	7.34808	0,04	2,453	0,206	0,053	2,43	0,227	0,133	2,472	0,267	0,168	2,498	0,276	I	50	
66	4953853,38	44.7253	7.293352	0,041	2,448	0,206	0,054	2,43	0,227	0,135	2,476	0,267	0,169	2,501	0,277	I	50	
42	4952744,40	44.71628	7.35846	0,04	2,454	0,206	0,052	2,43	0,227	0,133	2,471	0,267	0,167	2,497	0,276	I	50	
95	4952783,89	44.71616	7.325719	0,04	2,451	0,206	0,053	2,43	0,227	0,134	2,473	0,267	0,168	2,499	0,276	I	50	
44	4953189,05	44.7202	7.352857	0,04	2,454	0,206	0,052	2,43	0,227	0,133	2,471	0,267	0,167	2,497	0,276	I	50	
89	4952636,29	44.71529	7.357913	0,04	2,454	0,206	0,052	2,43	0,227	0,133	2,471	0,267	0,167	2,498	0,276	I	50	
84	4952813,60	44.71693	7.360593	0,04	2,454	0,206	0,052	2,43	0,227	0,133	2,47	0,267	0,167	2,497	0,276	I	50	
45	4953559,94	44.72364	7.359767	0,039	2,455	0,206	0,052	2,43	0,227	0,133	2,469	0,267	0,167	2,496	0,275	I	50	
79	4953250,37	44.72089	7.36264	0,039	2,455	0,206	0,052	2,43	0,227	0,133	2,47	0,267	0,167	2,497	0,276	I	50	
59	4952310,89	44.71229	7.352704	0,04	2,453	0,206	0,053	2,43	0,227	0,133	2,472	0,267	0,168	2,498	0,276	I	50	16 Invasi
96	5029194,35	45.40858	7.674594	0,021	2,595	0,172	0,026	2,602	0,194	0,049	2,714	0,278	0,058	2,774	0,296	I	50	
61	4907532,36	44.31207	7.567571	0,036	2,479	0,199	0,049	2,439	0,227	0,131	2,468	0,285	0,166	2,506	0,298	I	50	
34	4963767,00	44.81447	7.288127	0,04	2,456	0,206	0,053	2,428	0,226	0,133	2,468	0,265	0,168	2,495	0,274	I	50	
23	4964444,01	44.82049	7.282951	0,04	2,454	0,206	0,053	2,428	0,226	0,134	2,469	0,265	0,169	2,496	0,274	I	50	
27	4964263,01	44.81879	7.278158	0,04	2,453	0,206	0,053	2,428	0,226	0,134	2,47	0,265	0,169	2,497	0,274	I	50	
77	4940446,32	44.60642	7.41885	0,039	2,455	0,205	0,051	2,43	0,227	0,131	2,475	0,27	0,165	2,501	0,279	I	50	16 Invasi
72	4936342,00	44.56841	7.34457	0,041	2,438	0,206	0,054	2,421	0,227	0,136	2,482	0,272	0,17	2,509	0,282	I	50	
06	4932701,30	44.53739	7.470077	0,038	2,456	0,203	0,05	2,435	0,226	0,127	2,482	0,273	0,16	2,506	0,281	I	50	
16	4930662,80	44.51882	7.453892	0,039	2,448	0,205	0,052	2,421	0,228	0,132	2,48	0,273	0,167	2,507	0,283	I	50	
89	4929545,79	44.50882	7.457852	0,039	2,446	0,205	0,052	2,42	0,228	0,133	2,48	0,274	0,167	2,508	0,283	I	50	
30	4933293,80	44.54273	7.470406	0,037	2,457	0,203	0,049	2,437	0,226	0,126	2,483	0,273	0,16	2,506	0,281	I	50	
07	4932390,30	44.53455	7.466892	0,038	2,455	0,204	0,05	2,433	0,226	0,128	2,482	0,273	0,161	2,506	0,281	I	50	
60	4933069,38	44.54073	7.471985	0,041	2,438	0,206	0,054	2,42	0,227	0,136	2,481	0,273	0,17	2,509	0,283	I	50	
97	4942980,34	44.62951	7.439367	0,038	2,459	0,204	0,05	2,434	0,227	0,129	2,472	0,269	0,163	2,499	0,278	I	50	
91	4978162,00	44.93498	6.763838	0,032	2,453	0,198	0,041	2,509	0,214	0,106	2,474	0,27	0,106	2,474	0,27	I	50	16 Invasi
19	4980211,00	44.95445	6.816814	0,034	2,454	0,2	0,044	2,479	0,215	0,112	2,482	0,27	0,144	2,489	0,279	I	50	16 Invasi
47	4977400,50	44.92859	6.788056	0,034	2,457	0,199	0,043	2,492	0,215	0,11	2,481	0,27	0,141	2,483	0,28	I	50	16 Invasi
38	4980515,68	44.95753	6.834703	0,035	2,454	0,2	0,044	2,472	0,216	0,113	2,483	0,27	0,145	2,491	0,278	I	50	16 Invasi
40	4999400,05	45.13522	7.287229	0,036	2,459	0,203	0,047	2,443	0,221	0,124	2,455	0,261	0,157	2,483	0,269	I	50	
36	4933371,30	44.54343	7.470489	0,037	2,457	0,203	0,049	2,437	0,226	0,126	2,483	0,273	0,16	2,506	0,281	I	50	
26	4933392,29	44.54374	7.479833	0,037	2,458	0,203	0,049	2,44	0,226	0,125	2,484	0,273	0,158	2,507	0,281	I	50	

Riferimenti bibliografici / *Références*

Colombo, A., Mallen, L., Pispico, R., Giannico C., Bianchi M. & Savio G. (2006). *Mappatura regionale delle aree monitorabili mediante l'uso della tecnica* PS In: Proceedings of 10° National Conference ASITA, 14 - 17 November 2006, Bolzano

Ferretti A., Fumagalli A., Novali F., Prati C., Rocca F., Rucci A. (2010) *A new algorithm for processing interferometric data-stacks*: SqueeSAR. IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, September 2011

Ferretti A., Prati C., Rocca F. (2000) *Nonlinear Subsidence Rate Estimation Using Permanent Scatterers* in Differential SAR Interferometry. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38, NO. 5, September 2000, pp. 2202 – 2212

Meisina C., Zucca F., Notti D., Colombo A., Cucchi A., Savio G., Giannico C. and Bianchi M. (2008). *Geological interpretation of PSInSAR data at regional scale*. Sensors 8, 7469-7492; DOI: 10.3390/ sensor

Notti. D., Meisina C., Zucca F & Colombo A. (2011). *Models to predict persistent scatterers data distribution and their capacity to register movement along the slope* In: Proceedings of Fringe 2011 ESA Workshop, Frascati 19 -23 September 2011

Notti D., Meisina C., Zucca F. Crosetto M. and Montserrat O. (2011) *Factors that have an influence on time series* Proceedings Fringe 2011, 17-23 September 2011 ESRIN, Frascati

Valutazione della vulnerabilità degli sbarramenti al rischio sismico

Il rischio sismico nelle verifiche di stabilità dell'opera

Approccio normativo in Francia

Dal primo maggio 2011 è in vigore in Francia una nuova mappatura sismica che sostituisce la precedente, risalente al 1991, che fornisce una migliore valutazione del rischio sismico sul territorio nazionale (in particolare grazie al prolungarsi del periodo di registrazione dei terremoti, alla nuova interpretazione delle testimonianze storiche, alle migliori conoscenze delle faglie attive in Francia...).
L'approccio probabilistico seguito ha permesso di fornire delle carte di iso-accelerazioni corrispondenti ad una probabilità del 10% del superamento del movimento atteso su un

Évaluation de la vulnérabilité des barrages vis-à-vis de l'aléa sismique

Aléa sismique pris en compte dans la justification de la stabilité des ouvrages

Approche réglementaire en France

Depuis le premier mai 2011, un nouveau zonage sismique est en vigueur en France. Il remplace le précédent zonage réglementaire datant de 1991, en fournissant une meilleure appréciation de l'aléa sismique sur le territoire national (notamment grâce à l'allongement de la période d'enregistrement des séismes, à la réinterprétation des témoignages historiques, à l'amélioration des connaissances sur les failles actives en France…).
La méthode probabiliste suivie a permis de fournir des cartes d'iso-accélérations correspondant à une probabilité de 10% de dépassement du mouvement attendu sur une période de 50 ans. Les communes du territoire français sont réparties en cinq zones de

periodo di 50 anni. I comuni del territorio francese sono suddivisi in cinque zone sismiche[1]: 1-debolissima, 2-debole, 3-moderata, 4-media, 5-forte. Si evince dalle Figure 1a e 1b che la zona transfrontaliera italo-francese è tra le zone più sismiche del territorio metropolitano francese (essenzialmente zona di sismicità 4-media).
Le evoluzioni in corso del complesso di testi normativi[2] relativi alla sicurezza delle opere idrauliche includono una definizione del rischio sismico da prendere in considerazione nell'ambito della verifica della stabilità di un invaso sotto l'azione sismica.

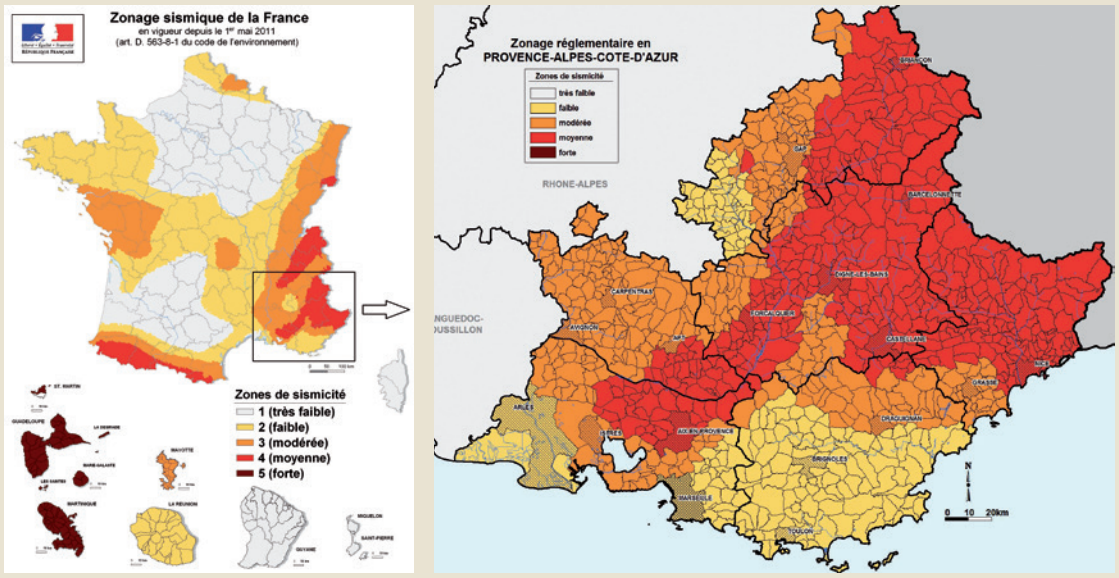
Tipo di evento

In base all'importanza (o alla classe) dell'opera di ritenuta e alla zona di sismicità in cui si trova, la verifica della sicurezza delle opere deve essere garantita per tre tipi di evento:

1 Cf. Codice dell'ambiente, Articolo D563-8-1 : http://legifrance.gouv.fr/
2 (i) Decreto che fissa delle prescrizioni tecniche relative alla sicurezza degli invasi e (ii) Guida di raccomandazioni relative al rischio sismico e alla sicurezza delle opere idrauliche, redatta sotto l'egida del Ministero dell'ecologia.

FIGURA 1
Zonazione sismica del territorio francese e della regione Provence Alpes Côte d'Azur.

FIGURE 1
Zonage sismique de la France et de la Région Provence Alpes Côte d'Azur.



A B

sismicité[1]: 1-très faible, 2-faible, 3-modérée, 4-moyenne, 5-forte. On constate sur les Figures 1a et 1b que la zone frontalière franco-italienne figure parmi les zones les plus sismiques du territoire métropolitain français (essentiellement zone de sismicité 4-moyenne).
Les évolutions en cours du corps de textes réglementaires[2] relatifs à la sécurité des ouvrages hydrauliques comprennent une définition de l'aléa sismique à prendre en compte dans le cadre de la vérification de la stabilité d'un barrage sous sollicitation sismique.

Type d'événement

Selon l'importance (ou la classe) de l'ouvrage et la zone de sismicité dans laquelle il se trouve, la vérification de la sécurité des ouvrages doit être assurée pour trois types d'événements :

1 Cf. Code de l'environnement, Article D563-8-1 : http://legifrance.gouv.fr/
2 (i) Arrêté fixant des prescriptions techniques relatives à la sécurité des barrages et (ii) Guide de recommandations relatif au risque sismique et à la sécurité des ouvrages hydrauliques, rédigé sous l'égide du ministère de l'écologie.

- sisma di valutazione di sicurezza (SES);
- sisma base di funzionamento (OBE) ;
- replica del SES (RSES).

NB: nell'ambito di questo progetto, ci interesseremo solamente ai sismi di tipo SES.

Le sollecitazioni sismiche possono essere valutate secondo due grandi famiglie d'approccio:

- l'approccio "forfettario" basato sulla suddivisione in zone sismiche a livello nazionale;
- gli approcci specifici, deterministi o probabilistici.

Descrizione dell'azione sismica secondo l'approccio forfettario

L'azione sismica, orizzontale o verticale, è definita:

- da un'accelerazione massima su sito roccioso che dipende dalla zona sismica (da 1 a 5) e dalla classe[3] delle opere di ritenuta (4 classi da A a D in ordine decrescente d'importanza, essendo quest'ultima valutata a partire dall'altezza della diga e dal volume della ritenuta). La Tabella 1 presenta i valori d'accelerazione massima su suolo roccioso

3 Cf. Codice dell'ambiente, Articolo R.214-112.

	Accelerazione orizzontale per il SES (m/s²) / *Accélération horizontale pour le SES (m/s²)*				Accelerazione verticale per il SES (m/s²) / *Accélération verticale pour le SES (m/s²)*			
Zona di sismicità / *Zone de sismicité*	*Classe D*	*Classe C*	*Classe B*	*Classe A*	*Classe D*	*Classe C*	*Classe B*	*Classe A*
1	*0,4*	*0,5*	*0,7*	*0,9*	*0,4*	*0,5*	*0,6*	*0,8*
2	*0,7*	*0,9*	*1,2*	*1,5*	*0,6*	*0,8*	*1,1*	*1,4*
3	*1,1*	*1,4*	*1,9*	*2,4*	*1,0*	*1,3*	*1,7*	*2,2*
4	*1,6*	*2,0*	*2,8*	*3,5*	*1,4*	*1,8*	*2,5*	*2,8*
5	*3,0*	*3,5*	*4,3*	*6,6*	*2,4*	*2,8*	*3,5*	*5,3*

TABELLA 1
Accelerazione massima «a_g» su suolo roccioso per la valutazione del SES (m/s²).

TABLEAU 1
Accélération maximale « a_g » au rocher pour l'évaluation du SES (m/s²).

- *le séisme d'évaluation de sécurité (SES) ;*
- *le séisme de base d'exploitation (SBE) ;*
- *la réplique du SES (RSES).*

NB : dans le cadre du présent projet, nous ne nous intéresserons qu'aux séismes de type SES.

Les sollicitations sismiques peuvent être évaluées selon deux grandes familles d'approche :

- *l'approche « forfaitaire » fondée sur le zonage sismique national ;*
- *les approches spécifiques, qu'elles soient déterministes ou probabilistes.*

Description de l'action sismique selon l'approche forfaitaire

L'action sismique, horizontale ou verticale, est définie :

- *par une accélération maximale sur site rocheux, qui dépend de la zone de sismicité (1 à 5) et du classement[3] des ouvrages (4 classes A à D par ordre décroissant d'importance, celle-ci étant évaluée à partir de la hauteur du remblai et du volume de la retenue). Le Tableau 1 présente les valeurs d'accélération maximale au rocher « a_g » ; Schéma-*

3 *Cf. Code de l'environnement, Article R.214-112.*

"a_g". Schematicamente, si può considerare che questi valori d'accelerazione corrispondono all'uso dei coefficienti associati ai tempi di ritorno qui di seguito:

Classe opera di ritenuta	A	B	C	D
Tempo di ritorno (anni)	5 000	2 500	1 000	500

- da una forma spettrale che dipende, in sostanza, dal sedime di fondazione (classi di suolo da A a E e forma spettrale definita dall'Eurocodice 8 [norma NF EN 1998-1]). I parametri di definizione degli spettri di risposta elastici ad uno smorzamento critico pari al 5% sono riportati nelle tabelle seguenti per ciò che riguarda le componenti orizzontali e verticali (Tabelle 2 e 3).

Questo può essere visualizzato nei diagrammi seguenti (componente orizzontale), Figura 2a e Figura 2b.

Per la componente verticale, i parametri di definizione dello spettro sono validi qualunque sia la natura del terreno di fondazione (Tabella 3).

Categoria di suolo / *Classe de sol*	$a_g < 3{,}0$ m/s²				$3{,}0 \le a_g \le 6{,}6$ m/s²				Lungo periodo / *Longues périodes*	
	S	T_B	T_C	T_D	S	T_B	T_C	T_D	T_E	T_F
A	1,0	0,03	0,2	2,5	1,0	0,15	0,4	2,0	4,5	10,0
B	1,35	0,05	0,25	2,5	1,2	0,15	0,5	2,0	5,0	10,0
C	1,5	0,06	0,4	2,0	1,15	0,2	0,6	2,0	6,0	10,0
D	1,6	0,1	0,6	1,5	1,35	0,2	0,8	2,0	6,0	10,0
E	1,8	0,08	0,45	1,25	1,4	0,15	0,5	2,0	6,0	10,0

TABELLA 2
Definizione delle caratteristiche dello spettro elastico orizzontale in funzione della natura del sottosuolo rispetto alla sollecitazione orizzontale. S è un coefficiente adimensionale; T_a T_c T_d T_E T_F sono espressi in secondi; T_E e T_F sono applicati soprattutto agli spettri in spostamento.

TABLEAU 2
Définition des caractéristiques du spectre élastique horizontal en fonction de la nature du sol de fondation pour la sollicitation horizontale. S est un coefficient adimensionnel ; T_B, T_C, T_D, T_E et T_F sont exprimés en secondes. T_E et T_F sont surtout appliqués aux spectres en déplacements.

tiquement, on peut retenir que ces valeurs d'accélération correspondent à l'emploi de coefficients d'importance associés aux périodes de retour ci-dessous :

Classe d'ouvrage	A	B	C	D
Période de retour (années)	5 000	2 500	1 000	500

- *par une forme spectrale dépendant essentiellement du sol de fondation (classes de sol A à E et forme spectrale définies par l'eurocode 8 [norme NF EN 1998-1]). Les paramètres de définition des spectres de réponse élastique à 5% d'amortissement critique sont définis dans les tableaux suivants pour les composantes horizontale et verticale (Tableaux 2 et 3).*

Ce qui peut être visualisé par les schémas suivants (composante horizontale) Figure 2a et Figure 2b.

Pour la composante verticale les paramètres de définition du spectre sont valables quelle que soit la nature du sol de fondation (Tableau 3).

Rappresentazione alternativa dell'azione sismica

I modelli di calcoli dinamici temporali necessitano la definizione dell'azione sismica sotto forma di accelerogrammi naturali o artificiali. Devono essere rispettati diversi principi nel definire questi accelerogrammi. Ci limiteremo qui a ricordare in modo non esaustivo che:

- l'analisi viene condotta con almeno tre accelerogrammi per i calcoli lineari e cinque accelerogrammi per i calcoli non lineari;
- gli accelerogrammi sintetici devono essere stabiliti in modo da corrispondere agli spettri di risposta elastica dati (precedentemente definiti). Allo stesso modo, gli accelerogrammi naturali devono presentare un buon adattamento allo spettro target o, se necessario, essere corretti di conseguenza.

Le indicazioni normative in Italia

Dal 1908, anno del devastante terremoto di Messina e Reggio Calabria, fino al 1974, in Italia i comuni sono stati classificati come sismici e sottoposti a norme restrittive per le costruzioni solo dopo essere stati fortemente danneggiati dai terremoti. Nel 1981 il CNR propone una prima classificazione sistematica del territorio: precise regole antisismiche devono essere adottate sul 45% del territorio nazionale, la rimanente parte risulta "non classificata". Dopo i terremoti del 2002 in Puglia e Molise, si assiste a una nuova serie di

$a_g < 3{,}0$ m/s²			$3{,}0 \le a_g \le 6{,}6$ m/s²			Lungo periodo / *Longues périodes*	
T_B	T_C	T_D	T_B	T_B	T_C	T_E	T_F
0,03	0,2	2,5	0,15	0,4	2,0	4,5	10,0

TABELLA 3
Definizione delle caratteristiche dello spettro elastico per l'azione verticale.

TABLEAU 3
Définition des caractéristiques du spectre élastique pour la sollicitation verticale.

Représentation alternative de l'action sismique

Les modèles de calculs dynamiques temporels nécessitent de définir l'action sismique sous la forme d'accélérogrammes naturels ou artificiels. Plusieurs principes doivent être respectés dans la démarche de définition de ces accélérogrammes. Nous nous bornerons à rappeler ici de façon non exhaustive que :

- *l'analyse est faite au minimum avec trois accélérogrammes pour les calculs linéaires et cinq accélérogrammes pour les calculs non linéaires ;*
- *les accélérogrammes synthétiques doivent être établis de manière à correspondre aux spectres de réponse élastique donnés (définis précédemment). De même, les accélérogrammes naturels doivent présenter un bon ajustement au spectre cible ou, le cas échéant, être corrigés en conséquence.*

Les approches réglementaires en Italie

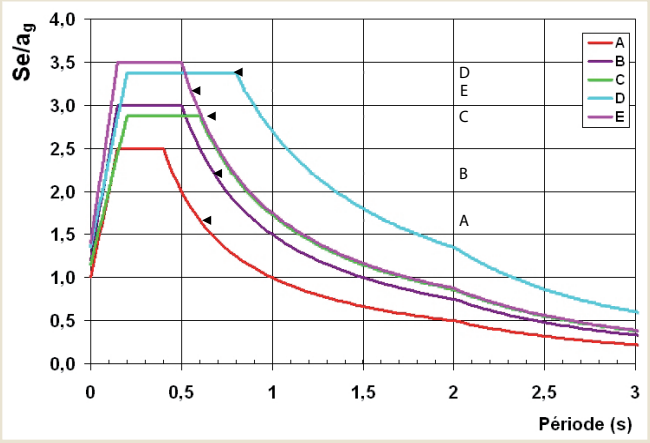
De 1908, année du terrible tremblement de terre de Messina et de Reggio Calabria, à 1974, sostituire frase cancellata : seules les communes italiennes ayant été fortement endommagées par des tremblements de terre ont été classées sismiques et soumises aux réglementations relatives aux constructions. En 1981, le CNR propose une première classification systématique du territoire : des règles parasismiques précises doivent être appliqués sur 45% du territoire national, et la partie restante est «non classée».

input normativi (l'attuale decreto ministeriale) con la creazione di 4 categorie di opere nel quadro dell'analisi sismica: al momento nessuna area dell'Italia può non ritenersi non interessata dal problema sismico.
A tale proposito, il normatore fornisce al progettista l'andamento dei parametri spettrali per diversi tempi di ritorno fino a 2500 anni. Il normatore ha altresì predisposto una carta delle iso-accelerazioni corrispondenti alla probabilità di superamento del 10% in 50 anni.

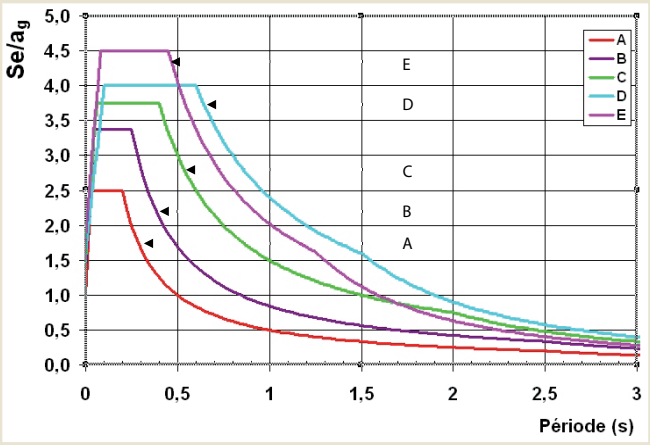
Stati limite per le azioni sismiche

Sotto l'effetto delle azioni sismiche deve essere garantito il rispetto dei seguenti stati limite di esercizio:

- Stato Limite di Operatività (SLO): uscita dalla condizione di normale funzionamento;



A



B

FIGURA 2
a) Forma spettrale per $a_g \leq 3{,}0$ m/s²; b) forma spettrale per $3{,}0 < a_g \leq 6{,}6$ m/s².

FIGURE 2
a) Forme spectrale pour $a_g \leq 3{,}0$ m/s²; b) Forme spectrale pour $3{,}0 < a_g \leq 6{,}6$ m/s².

Après les tremblements de terre de 2002 dans les Pouilles et dans le Molise, on assiste à une nouvelle série de prescriptions réglementaires (l'actuel arrêté ministériel) avec la création de 4 catégories d'ouvrages dans le cadre d'analyses sismiques : à présent aucune zone d'Italie ne peut se considérer non concernée par la problématique sismique. Ainsi, le législateur fournit au responsable du projet la valeur des paramètres spectraux pour différentes période de retour jusqu'à 2500 ans. Le législateur a également fourni une carte des iso-accélérations correspondant à la probabilité de dépassement de 10% en 50 ans.

États limite pour les actions sismiques

Sous l'effet des actions sismiques, le respect des états limite de service suivants doit être garanti :

- *état limite de fonctionnement (SLO) : sortie de la condition de fonctionnement normal ;*

- Stato Limite di Danno (SLD): formazione di danni senza, però il rilascio incontrollato di acqua,

e dei seguenti stati limite ultimi:

- Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV): formazione di danni che conducono al rilascio incontrollato di acqua senza però tradursi in una perdita di vite umane;
- Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC): corrispondente alla rottura della diga.

L'approccio progettuale è basato esclusivamente sull'impiego di uno spettro di risposta variabile in funzione del tempo di ritorno del sisma da considerarsi nella progettazione (Figura 3a e Figura 3b).

Spettro di risposta dell'accelerazione sismica

Come riporta la normativa attualmente in vigore sul territorio nazionale, la pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale, nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione a essa corrispondente S_e

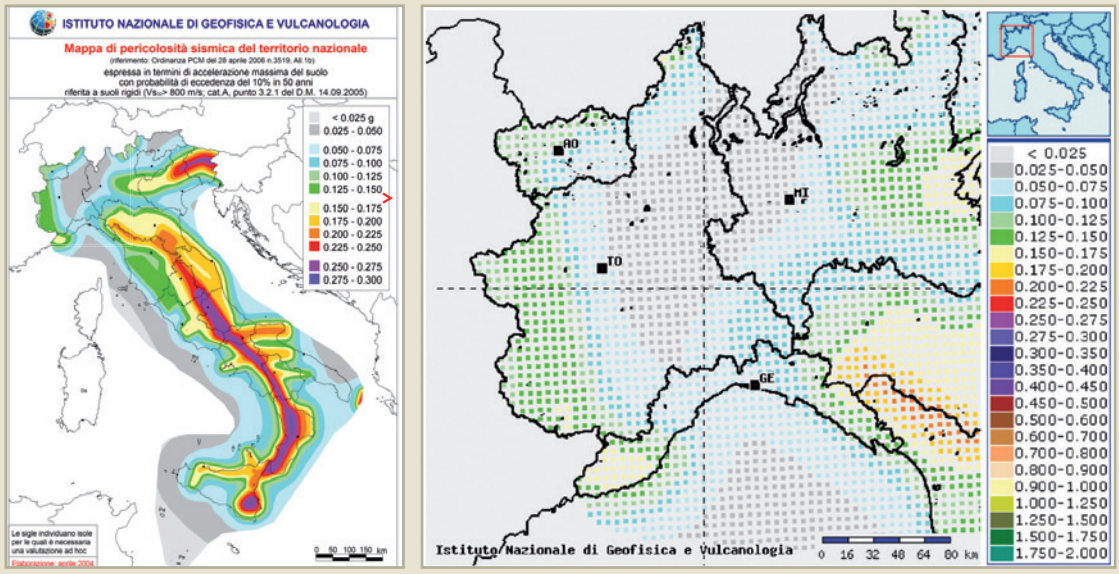


FIGURA 3
a) Carta delle iso-accelerazioni con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni.
b) Carta delle iso-accelerazioni con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni : dettaglio del Nord-Ovest.

FIGURE 3
a) Carte d'iso-accélération avec une probabilité de dépassement de 10% en 50 ans.
b) Carte d'iso-accélération avec une probabilité de dépassement de 10% en 50 ans : Zoom sur le Nord-Ouest de l'Italie.

- *état limite de dommages (SLD) : formation de dommages sans toutefois un déversement incontrôlé d'eau ;*

et les états limites ultimes suivants :

- *état limite de sauvegarde de la vie humaine (SLV) : formation de dommages qui condvisent au relâchement incontrôlé d'eau sans toutefois se traduire par la perte de vies humaines ;*
- *état limite de prévention de l'écroulement (SLC) : il correspond à la rupture du barrage.*

Pour un projet donné, l'approche se base sur l'utilisation d'un spectre de réponse variable en fonction de la période de retour du séisme à prendre en compte lors de la conception (Figure 3a et Figure 3b).

Spectre de réponse de l'accélération sismique

D'après la réglementation en vigueur sur le territoire national, la sismicité est définie en termes d'accélération horizontale maximale attendue a_g en champ libre au rocher avec surface topographique horizontale, ainsi que de spectre de réponse élastique en

(T) , con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza P_{VR} nel periodo di riferimento V_R[4]. Le probabilità di eccedenza, P_{VR} dipendono dallo stato limite considerato, come riportato nella sottostante Tabella 4.
Il periodo di riferimento, V_R, per l'azione sismica è definito in funzione della vita nominale, V_N, e del coefficiente d'uso, C_U.
Per quanto riguarda le opere di ritenuta, il recente DM 26/06/2014, considera quattro classi di impianti riportati in ordine decrescente di importanza:

1. Dighe di importanza strategica, i manufatti la cui funzionalità durante e a seguito di eventi sismici assume rilievo fondamentale per le finalità di protezione civile (serbatoi a prevalente utilizzazione idroelettrica o potabile);
2. Dighe rilevanti per le conseguenze di un eventuale collasso: grandi dighe (altezza superiore a 15 m o volume invasato maggiore di 1 milione di m^3);
3. Dighe rilevanti per le conseguenze di un eventuale collasso: dighe di dimensioni contenute (altezza inferiore a 15 m o volume invasato minore di 1 milione di m^3);
4. Altre dighe di importanza normale: tutte le rimanenti dighe.

Si hanno, dunque, i valori di vita nominale e periodo di riferimento riportati in Tabella 5.
In funzione delle probabilità di eccedenza precedentemente riportate si determinano i

4 I parametri dello spettro sono disponibili online al seguente indirizzo http://esse1.mi.ingv.it.

TABELLA 4
Probabilità di eccedenza, PVR dipendono dallo stato limite considerato.

Stato limite / État limite consideré	P_{VR} in V_R
SLO	81%
SLD	63%
SLV	10%
SLC	5%

TABLEAU 4
Probabilités d'excédent PVR dépendantes de l'état.

accélération correspondante S_e (T), à partir des probabilités de dépassement P_{VR} définies pour la période de référence V_R.
Les probabilités de dépassement P_{VR} dépendent de l'état limite considéré, comme il est indiqué dans le Tableau 4 ci-dessous.
La période de référence, V_R[4], est définie pour l'action sismique en fonction de la durée de vie normale de l'ouvrage, V_N, et d'un coefficient d'usage, C_U. En ce qui concerne les barrages, le récent arrêté ministériel du 26/06/2014 considère quatre classes d'installations :

1. *Les barrages d'importance stratégique : ouvrages devant rester opérationnels pendant et après le séisme au regard de leur importance fondamentale vis-à-vis de la protection civile (réservoir à usage principal de production hydroélectrique ou d'eau potable) ;*
2. *Barrages dont la rupture éventuelle aurait de graves conséquences - grands barrages (hauteur > 15 m ou volume stocké >1 million de m^3) ;*
3. *Barrages dont la rupture éventuelle aurait de graves conséquences - barrages moyens (hauteur < 15 m et volume stocké < 1 million de m^3) ;*
4. *Barrages d'importance normale : tous les autres barrages.*

On a donc les valeurs de durée de vie normale (VN) et de durée de référence (VR) mentionnées dans le Tableau 5.

4 *Les paramètres du spectre de repouse sont disponibles en ligne à l'addresse http://esse1.mi.ingv.it.*

tempi di ritorno corrispondente a ciascuno stato limite. In funzione della tipologia di diga e dello stato limite considerato si hanno i T_R riportati, in anni, nella seguente tabella (Tabella 6).

In funzione di T_R, sono dati i parametri di sito attraverso i quali è possibile tracciare lo spettro di risposta[5]. Questi sono:

- a_g, accelerazione orizzontale massima al sito;
- F, valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- T^*, periodo d'inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

5 La procedura dettagliata per il calcolo dello dello spettro di risposta è riportata sul D.M. 14 gennaio 2008 "Nuove norme tecniche per le costruzioni" disponibile al sito internet: http://www.cslp.it/cslp/index.php?option=com_content&task=view&id=66&Itemid=20.

Tipologia diga / Type de barrage	V_N (anni)	C_U	V_R (anni)
Strategiche	>100	2.0	200
Rilevanti	>100	1.5	150
Dimensioni contenute	>50	1.5	75
Importanza normale	>50	1.0	50

TABELLA 5
Valori di vita nominale e periodo di riferimento.

TABLEAU 5
Valeurs de la durée nominale et période de réference.

Tipologia diga / Type de barrage	SLO	SLD	SLV	SLC
Strategiche	120	200	1900	2475
Rilevanti	90	150	1425	2475
Dimensioni contenute	45	75	710	1460
Importanza normale	30	50	475	975

TABELLA 6
T_R, in anni, in funzione della tipologia di diga e dello SL considerato.

TABLEAU 6
T_R en années en fonction du type de barrage et du SL consideré.

À partir des probabilités au dépassement précédemment indiquées, on détermine les périodes de retour correspondant à chaque état limite. En fonction de la classe du barrage et de l'état limite considéré, on obtient donc les périodes de retour TR, en années, présentées dans le Tableau 6.

En fonction de la période de retour, T_R, sont définis les paramètres à partir desquels il est possible de tracer le spectre de réponse[5] élastique au rocher. Il s'agit de :

- *a_g, accélération horizontale maximale au rocher ;*
- *F, valeur maximale du facteur d'amplification du spectre en accélération horizontale ;*
- *T*, période de début de la portion à vitesse constante du spectre en accélération horizontale.*

5 *La procédure detaillée pour calcoler le spectre de repause est reportée dans le D.M. 14 gennaio 2008 "Nuove norme tecniche per le costruzioni" disponible sur Internet à l'addresse: http://www.cslp.it/cslp/index.php?option=com_content&task=view&id=66&Itemid=20.*

Confronto dell'azione sismica nella normativa francese e italiana

Tempo di ritorno dell'evento sismico nella normativa

Le quattro classi di opere determinate nella normativa italiana e francese sono paragonabili. Si osserva in Tabella 7 che il tempo di ritorno considerato nella valutazione di sicurezza delle opere è:

- Per le opere più importanti più elevato in Francia che in Italia (prima classe in ordine decrescente di importanza);
- Per le opere della seconda classe simile in Italia e in Francia;
- Per le opere di minore importanza più elevato in Italia che in Francia (terza e quarta classe).

Osservazione complessiva - scala regionale

Consideriamo l'evento sismico con tempo di ritorno T_R = 2475 anni, che corrisponde a quello considerato per le opere rilevanti di seconda categoria di importanza, lato italiano e lato francese. Si osserva sulla carta italiana che, nella zona transfrontaliera italo-francese, l'accelerazione orizzontale massima varia nell'intervallo [0,19 g ; 0,30 g].
Sul lato francese, il tempo di ritorno del SES preso in considerazione per gli invasi di

TABELLA 7
Tempo di ritorno T_R del rischio sismico preso in considerazione per la valutazione della sicurezza delle dighe, in funzione della loro tipologia.

TABLEAU 7
Période de retour T_R de l'aléa sismique pris en compte pour l'évaluation de la sécurité des barrages en fonction de leur classe d'importance.

Francia / *France*		Italia / *Italie*		
Tipologia diga / *Classe de barrage*	TR (*années*)	Tipologia diga	*Classe de barrage*	TR (*années*)
A	5000	Strategiche	*Stratégique*	2475
B	2500	Rilevanti – grandi dighe	*Graves conséquences – grands barrages*	2475
C	1000	Rilevanti - dighe di dimensioni contenute	*Graves conséquences – barrages moyens*	1460
D	500	Importanza normale	*Importance normale*	975

Comparaison de l'aléa sismique réglementaire français et italien

Période de retour de l'aléa sismique réglementaire

Considérons que les quatre classes d'ouvrage instaurées respectivement par les réglementations françaises et italiennes sont comparables. On observe dans le Tableau 7 ci-dessous que la période de retour prise en compte pour l'évaluation de la sécurité des ouvrages est :

- *Plus élevée en France qu'en Italie pour les ouvrages les plus importants (première classe par ordre d'importance décroissant) ;*
- *Similaire en France et en Italie pour les ouvrages de la deuxième classe ;*
- *Plus élevée en Italie qu'en France pour les ouvrages de moindre importance (troisième et quatrième classe).*

Observation d'ensemble – échelle régionale

Considérons l'aléa de période de retour T_R = 2 475 ans, qui correspond à celui pris en compte pour les ouvrage relevants de la deuxième catégorie d'importance, côté italien et côté français. On observe sur la carte italienne que, dans la zone frontalière franco-italienne, l'accélération horizontale maximale au rocher varie dans l'intervalle [0,19 g ; 0,30 g]. Côté français, selon que l'on considère des communes en zone 3 (région Rhône-Alpes,

classe B è di circa 2500 anni. A seconda che si consideri i comuni in zona 3 (Rhône-Alpes, dipartimento della Savoia per esempio) o in zona 4 (Provence Alpes Côte d'Azur per esempio), i valori di accelerazione massima saranno rispettivamente di 1,9 m/s² [0,19 g] o di 2,8 m/s² [0,28 g]. A tempo di ritorno equivalente, la definizione dell'accelerazione orizzontale massima al sito lato francese e lato italiano sembra quindi analoga in maniera globale (su scala regionale).

Osservazioni dettagliate - scala comunale

Proseguiamo, sempre per T_r = 2475 anni, il confronto di coppie di comuni vicini:

1. (i) il comune di Clavière si trova nella provincia di Torino, sulle Alpi Cozie, lungo il confine italo-francese. È vicino al comune di Montgenèvre in Francia, dipartimento Hautes Alpes;
2. (ii) il comune di Limone Piemonte si trova nella provincia di Cuneo. È vicino al comune francese di Tende nelle Alpi Marittime (Tabella 8).

Si osserva nella Figura 4 che ad un tempo di ritorno equivalente (T = 2475 anni):

- nel settore delle Alpi marittime (spettri 1 e 2 Figura 4), i valori del PGA e della soglia spettrale sono abbastanza vicini, con tuttavia, per i periodi inferiori a 0,22 s, un'accelerazione spettrale più forte per lo spettro francese, e per i periodi superiori a 0,22 s un'accelerazione spettrale più forte per lo spettro italiano;

Comparazione / *Comparaison*	Italia / Italie	*Francia / France*
(i)	CLAVIÈRE : ag = 1,88 m/s² Spectre réponse (3)	*MONTGENÈVRE : ag = 2,8 m/s²* *Spectre réponse (1)*
(ii)	LIMONE PIEMONTE : ag = 2,51 m/s² Spectre réponse (2)	TENDE : ag = 2,8 m/s² Spectre réponse (1)

TABELLA 8
Confronto delle caratteristiche delle azioni sismiche per due comuni a cavallo della frontiera italo-francese.

TABLEAU 8
Comparaisons des caractéristiques des actions sismiques pour deux communes voisines de la frontière franco-italienne.

département de la Savoie par exemple) ou en zone 4 (région Provence Alpes Côte d'Azur par exemple), les valeurs d'accélération maximale au rocher seront respectivement de 1,9 m/s² [0,19 g] ou 2,8 m/s² [0,28 g]. À période de retour équivalente, la définition de l'accélération horizontale maximale au rocher côté français et côté italien paraissent donc bien analogue de manière globale (à l'échelle régionale).

Observations détaillées – échelle communale

Poursuivons toujours pour T = 2475 ans la comparaison à l'échelle de deux binômes de communes voisines :

1. *(i) la commune de Clavière se situe dans la province de Turin dans les Alpes cotiennes le long de la frontière franco-italienne. Elle est voisine de la commune de Montgenèvre en France, département des Hautes Alpes ;*
2. *(ii) la commune de Limone Piemonte se situe dans la province de Cuneo. Elle est proche de la commune française de Tende dans les Alpes maritimes (Tableau 8).*

On observe sur la Figure 4 qu'à période de retour équivalente (T = 2475 ans) :

- *dans le secteur des Alpes Maritimes (spectres 1 et 2 Figure 4), les valeurs de PGA et de plateau spectral sont assez proches, avec toutefois, pour les périodes inférieures à 0,22 s, une accélération spectrale plus forte pour le spectre français, et pour les périodes supérieures à 0,22 s une accélération spectrale plus forte pour le spectre italien ;*

- nel settore Clavière / Montgenèvre (spettri 1 e 3 Figura 4), uno spettro regolamentare francese che, per i periodi inferiori a 0,3 s, supera di gran lunga lo spettro italiano. Oltre 0,3 s, i due spettri sono simili.

Qui si vede che localmente (in particolare nel settore del Briançonnais) ci possono essere disparità piuttosto consistenti.

Vengono spiegate in parte da una certa mancanza di progressività nella suddivisione in zone lato francese all'interno della quale si avrà, tra due comuni vicini classificati in zona 3 o 4, lo stesso contrasto piuttosto alto. Peraltro, questa differenza si riduce se si considera, sul lato francese, il comune di Modane, soltanto a 20 Km a Nord di Monginevro, che si trova nella zona 3 (cfr. spettro [4]).

Esperienza acquisita

Le pubblicazioni della CIGB ([2], [3] per esempio) sono importanti fonti d'informazione, e un intero capitolo di [1] viene dedicato alla vulnerabilità delle opere idrauliche ai sismi.

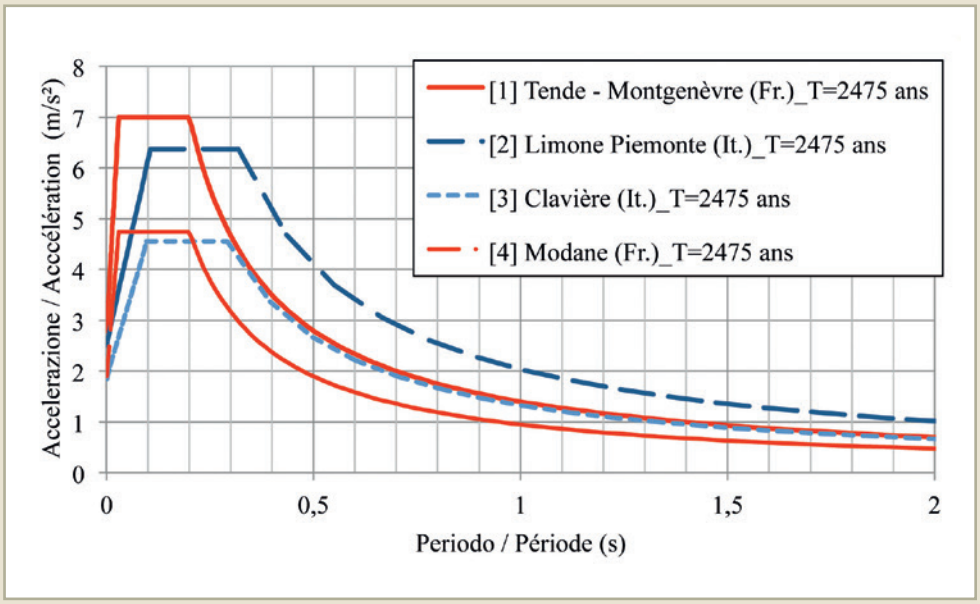


FIGURA 4
Confronto tra gli spettri di risposta per le coppie di comuni situate a cavallo della frontiera italo-francese.

FIGURE 4
Comparaison entre les spectres de réponse réglementaires pour des communes situées sur la frontière franco-italienne.

- *dans le secteur Clavière / Montgenèvre (spectres 1 et 3 Figure 4), un spectre réglementaire français qui, pour les périodes inférieures à 0,3 s, majore largement le spectre italien. Au-delà de 0,3 s, les deux spectres sont similaires.*

On voit ici que localement (notamment dans le secteur du Briançonnais), des disparités assez fortes peuvent exister. Elles s'expliquent, pour partie, par un certain manque de progressivité dans le zonage français au sein duquel on aura, entre deux communes voisines classées en zone 3 ou en zone 4, le même contraste assez élevé. D'ailleurs, cette différence est sensiblement réduite si pour la comparaison on considère côté français la commune de Modane qui est située à une vingtaine de kilomètres seulement au Nord de Montgenèvre et se trouve en zone 3 (voir spectre [4]).

Retour d'expérience

Les publications de la CIGB ([2], [3] par exemple) sont des sources d'informations importantes, et un chapitre complet de [1] est consacré à la vulnérabilité des ouvrages hydrauliques aux séismes.

In modo sintetico, se ne possono trarre i seguenti insegnamenti:

1. gli incidenti su invasi dovuti ai sismi sono rari;
2. gli incidenti più gravi riguardano le dighe di materiali sciolti. Sono stati osservati danni notevoli, addirittura rotture, principalmente causati:
   - da un rilevato in materiale sciolto;
   - dalla liquefazione dei materiali sabbiosi che costituiscono il rilevato o la fondazione.

Nel caso dei materiali sciolti di moderna concezione, ben compattati, le degradazioni vengono limitate a spostamenti irreversibili limitati, causati da sollecitazioni sismiche intense che portano, per un periodo molto breve, al superamento della resistenza al taglio del rilevato e/o della sua fondazione.

Nessun invaso di calcestruzzo o in muratura è stato distrutto (eccetto lo sbarramento di Shih-Kang [Taiwan] situato su una faglia il cui rigetto [7,7 m] ha provocato la rovina dell'opera).

Le degradazioni osservate si traducono generalmente con l'apparizione di fessure o con spostamenti di giunti. All'interno della zona italo-francese studiata più dettagliatamente nell'ambito di questo progetto, non si è venuti a conoscenza di qualche patologia particolare legata a un evento sismico.

Conviene inoltre evidenziare che:

- non ci sono stati gravi sismi nella zona negli ultimi decenni;
- il parco di opere idrauliche cresce progressivamente;
- la questione della determinazione della buona performance di queste opere sottoposte a sollecitazioni sismiche deve quindi essere affrontata, nell'insieme delle situazioni di progetto analizzate, per giustificare l'adeguato livello di sicurezza di queste strutture.

De manière synthétique, on peut en retirer les enseignements suivants :

1. *les accidents de barrages liés à des séismes sont rares ;*
2. *les accidents les plus importants concernent les ouvrages en remblai. Des dégâts importants, voire même des ruptures, ont été observés, principalement causés :*
   - *par un remblai en matériau lâche ;*
   - *par la liquéfaction des matériaux sableux constitutifs du remblai ou de la fondation.*

Dans le cas des remblais de conception moderne, bien compactés, les dégradations se limitent à des déplacements irréversibles limités, causés par des sollicitations sismiques intenses conduisant, pendant une durée très brève, au dépassement de la résistance au cisaillement du remblai et/ou de sa fondation.

Aucun barrage en béton ou en maçonnerie n'a subi de destruction (à l'exception du barrage de Shih-Kang [Taiwan] positionné sur une faille dont le rejet [7,7 m] a entrainé la ruine de l'ouvrage).

Les dégradations observées se traduisent généralement par l'apparition de fissures ou de décalages au droit des joints de plot. Au sein de la zone Franco-Italienne étudiée plus particulièrement dans le cadre de ce projet, nous n'avons pas eu connaissance de pathologie particulière liée à l'occurrence d'un séisme.

Il convient de noter également :

- *qu'il n'y a en fait pas eu de séisme majeur dans la zone sur les dernières décennies ;*
- *que la population du parc d'ouvrages hydrauliques croît progressivement ;*
- *et que la question de la justification du bon comportement de ces ouvrages sous sollicitation sismique doit donc être abordée, parmi l'ensemble des situations de projet analysées pour justifier du niveau de sécurité adéquat de ces structures.*

Approccio "semplificato"

Una delle azioni del progetto RISBA è mirata alla valutazione speditiva del grado di vulnerabilità sismica di uno sbarramento (sia questo in terra o in calcestruzzo armato). A tale proposito, è stata ideata una scheda di rilievo che, in maniera automatica, restituisce una stima della propensione al danneggiamento del manufatto (e quindi alla perdita incontrollata del liquido invasato) a seguito del sisma. Tale scheda, la cui impostazione ricalca i documenti predisposti dalla Protezione Civile italiana per il rilievo speditivo dei manufatti (pre e post sisma), fornisce alla Pubblica Amministrazione (o all'organo demandato al controllo dello sbarramento) una descrizione sufficientemente estesa (ma non eccessivamente dettagliata) delle problematiche che possono sussistere nel caso in cui un sisma interessi l'invaso.
Le informazioni contenute nella scheda sono costituite dai dati geotecnici, geomorfologici e strutturali esistenti (es. zona sismica del sito, caratteristiche statiche e dinamiche del terreno, tipologia e dimensioni dello sbarramento, dimensioni e altezza dell'invaso, quota, presenza di cicli di gelo / disgelo, ecc.). La presenza o meno di segnali indicatori (visivi) quali, a esempio, l'inadeguata inclinazione dei paramenti, un'evidenza di sifonamento in atto, la mancanza di inerbimento dei paramenti, può rappresentare un aspetto prodromo alla rottura parziale / crollo del manufatto. Inoltre, lo stato di conservazione generale del manufatto, delle imposte e delle sponde, o la presenza di eventuale degrado sulla struttura, rappresentano degli aspetti utili per la valutazione della risposta del manufatto all'azione sismica.
La procedura di calcolo della vulnerabilità combina i dati contenuti della scheda. Nel caso di parametri mancanti, quali la resistenza a compressione del calcestruzzo costituente

---

Approche « simplifiée »

Une des actions du projet RISBA vise à l'évaluation rapide du degré de vulnérabilité sismique d'un barrage (qu'il soit en terre ou en béton armé). A ce propos, on a conçu une fiche de relevé qui, automatiquement, restitue une estimation de la propension à l'endommagement de l'ouvrage (et donc à la perte incontrôlée du liquide de retenue) suite au séisme. Cette fiche, dont l'approche est calquée sur les documents élaborés par la protection civile italienne pour le levé expéditif des ouvrages (avant et après le séisme), fournit à l'administration publique (ou à l'organisme préposé au contrôle du barrage) une description suffisamment élargie (mais pas excessivement détaillée) des problématiques pouvant se vérifier au cas où un séisme intéresserait le barrage.
Les informations contenues dans la fiche sont composées des données géotechniques, géomorphologiques et structurelles existantes (ex. zone sismique du site, caractéristiques statiques et dynamiques du terrain, typologie et dimensions du barrage, dimensions et hauteur du barrage, côte, présence de cycles de gel / dégel, etc.). La présence ou non d'indicateurs (visuels) comme par exemple l'inclinaison inadaptée des parements, l'évidence d'un renard en cours, le manque de reverdissement des parements peut représenter un signe avant-coureur de la rupture partielle / écroulement de l'ouvrage. En outre, l'état de conservation générale de l'ouvrage, des volets et des berges, ou la présence d'une éventuelle dégradation sur la structure, représentent des aspects utiles à l'évaluation de la réponse de l'ouvrage à l'action sismique.
La procédure de calcul de la vulnérabilité combine les données contenues dans la fiche. Dans le cas de paramètres manquants, comme la résistance à la compression du béton qui en compose l'ouvrage, on effectue une extrapolation d'une base de données

il manufatto, si esegue un'estrapolazione da un database storico di dati. Relativamente ai manufatti in calcestruzzo, la procedura di calcolo ricalca le verifiche di resistenza e di stabilità sulla base della normativa europea. Si valuta altresì la capacità della struttura di resistere parzialmente a trazioni (di debole entità) e localizzate nel volume del corpo della diga. L'azione orizzontale dovuta all'incremento di spinta idraulica causato dall'azione del sisma sul liquido contenuto nell'invaso è ugualmente presa in considerazione. Per quanto attiene ai manufatti in materiali granulari (terra), la valutazione della vulnerabilità è fatta a partire da alcuni parametri (identificanti le principali modalità di rottura del manufatto).
Questi riguardano, essenzialmente, la sensibilità alla liquefazione, lo scivolamento del corpo della diga, il cedimento a livello del piano di fondazione e le deformazioni in testa al paramento.

Questo approccio semplificato è presentato nel dettaglio nella referenza [7]. Esso permette, in un insieme di opere di cui si cerca di analizzare la sicurezza sotto sollecitazione sismica, di proporre una gerarchia in modo da applicare, sulle opere che ne hanno la precedenza, gli approcci via via più complessi (e più costosi) che non potrebbero essere messi in atto di primo acchito sull'insieme delle opere. Le opere indicate da questo approccio semplificato come le più sensibili devono quindi essere oggetto di un approccio più preciso. È questo l'oggetto dei metodi impiegati e presentati nella parte 3 qui di seguito, validi per le opere in materiali sciolti come gli invasi di montagna.
L'approccio detto "semplificato" e l'approccio "preciso" sono dunque complementari per portare a termine l'analisi di un insieme di opere nel contesto di una sismicità da media a moderata nella regione alpina italo-francese.

---

historiques. En ce qui concerne les ouvrages en béton, la procédure de calcul est similaire aux vérifications de résistance et de stabilité sur la base de la réglementation européenne. On évalue également la capacité de la structure à résister partiellement aux tractions (de faible niveau) située dans le volume du corps de la digue. L'action horizontale due à l'augmentation de la poussée hydraulique causée par l'action sismique sur le liquide contenu dans le barrage est également prise en considération. En ce qui concerne les ouvrages en matériau granulaire (terre), l'évaluation de la vulnérabilité est effectuée à partir de certains paramètres (qui identifient les principales modalités de rupture de l'ouvrage). Ils concernent essentiellement la sensibilité à la liquéfaction, le glissement du corps de la digue, la rupture au niveau de la fondation et les déformations en haut du parement.

Cette approche simplifiée est présentée en détail dans la référence [7]. Elle permet, au sein d'un parc d'ouvrages dont on cherche à analyser la sécurité sous sollicitation sismique, de proposer une hiérarchie de manière à déployer, sur les ouvrages qui le méritent en priorité, les approches progressivement plus complexes (et plus coûteuses) qui ne peuvent raisonnablement être appliquées d'emblée sur l'ensemble du parc. Les ouvrages désignés comme étant les plus sensibles par cette approche simplifiée doivent alors faire l'objet d'une approche plus fine. C'est l'objet des méthodes déployées et présentées dans la partie 3 suivante, valables pour les ouvrages en remblai comme les retenues d'altitude.
L'approche dite « simplifiée », et l'approche « affinée » sont donc complémentaires, pour mener à bien l'analyse d'un parc d'ouvrages dans le contexte de sismicité moyenne à modérée de la région des Alpes franco-italiennes.

Approccio "preciso" - Caso degli invasi di montagna

Preambolo: approccio specifico relativo agli invasi di montagna

In Francia, l'analisi delle verifiche sismiche presenti nei progetti di invasi di montagna di modeste dimensioni dimostra che la progettazione di queste opere è comunemente, se non esclusivamente, effettuata per approccio pseudo-statico. Inoltre, viene constatato che, in funzione dei progettisti, l'approccio pseudo-statico viene condotto con margini di sicurezza variabili in base alle ipotesi ritenute nelle varie fasi del calcolo: livello del rischio di riferimento preso in considerazione, effetto del sito, valore del coefficiente sismico adimensionale utilizzato, caratteristiche di resistenza al taglio dei materiali, valore minimo del fattore di sicurezza allo stato limite di scivolamento... Ebbene, nel caso di molti progetti recenti (rilevati in forte pendenza, rischio sismico di zona 4) e tra le varie situazioni di calcolo ipotizzate, la situazione sismica si è rivelata determinante.
Il miglioramento ipotizzato passa dall'utilizzo di metodi dinamici semplificati che consistono in un'analisi semplificata degli spostamenti irreversibili, e non più esclusivamente da un fattore di sicurezza. Questi spostamenti devono quindi essere paragonati a ciò che l'opera può subire senza portare alla sua rovina: si parla di "criteri di prestazione". A titolo d'esempio, criteri di prestazione vengono proposti in [1] e nel caso di una superficie di scivolamento da monte a valle, la soglia proposta corrisponde al minimo tra: (i) 3% dell'altezza del rilevato e (ii) 1/3 della larghezza del filtro.

Approche « affinée » – Cas des retenues d'altitudes

Préambule : approche spécifique portant sur les retenues d'altitude

En France, l'analyse des justifications au séisme produites sur des projets de création de retenues d'altitudes de dimensions modestes montre que la justification de ces ouvrages est couramment – voire exclusivement – faite par approche pseudo-statique. En outre, on constate, en fonction des concepteurs, que l'approche pseudo-statique est menée avec des marges de sécurité variables selon les hypothèses retenues aux divers stades du calcul : niveau de l'aléa de référence pris en compte, effet de site, valeur du coefficient sismique adimensionnel utilisé, caractéristiques de résistance au cisaillement des matériaux, valeur minimale du facteur de sécurité à l'état limite de glissement… Or, dans le cas de plusieurs projets récents (remblais à forte pente, aléa sismique de zone 4) et parmi les différentes situations de calcul envisagées, la situation sismique s'est révélée dimensionnante.
La voie d'amélioration envisagée passe par l'utilisation de méthodes dynamiques simplifiées qui consistent en une analyse simplifiée des déplacements irréversibles, et non plus exclusivement d'un facteur de sécurité. Ces déplacements sont alors à comparer avec ce que l'ouvrage peut subir sans entrainer sa ruine : on parle de « critères de performance ». A titre d'exemple, des critères de performance sont proposés dans [1] et dans le cas d'une surface de glissement amont-aval, le seuil proposé correspond au minimum entre : (i) 3% de la hauteur du remblai et (ii) 1/3 de la largeur du filtre.

Questo approccio permette quindi di approfondire, pur conservando un rigore e una sicurezza sufficiente nella stima del rischio sismico e delle proprietà dei materiali, l'analisi del comportamento sotto sollecitazione sismica delle opere che ci interessano.
L'approccio seguito nell'*Azione 2.3* del progetto RISBA mira a confrontare i risultati ottenuti, con metodi sempre più complessi:
(i) pseudo-statico, (ii) dinamico semplificato [metodo di Seed e Makdisi] e (iii) calcolo dinamico temporale con modellizzazione lineare equivalente e trattamento col metodo Newmark per il calcolo degli spostamenti irreversibili.
Questo confronto è stato realizzato da una parte in uno studio parametrico che lavora su una serie di varie configurazioni rappresentative degli invasi di montagna (facendo variare la geometria del rilevato, le proprietà meccaniche dei materiali e le caratteristiche del segnale sismico in ingresso) e anche su un'opera reale per la quale avevamo a disposizione o abbiamo potuto reperire dati specifici necessari ai diversi calcoli effettuati.
I valori misurati e presi in considerazione per i vari parametri geometrici e geotecnici dell'opera reale sono inseriti nella gamma dei valori presi in considerazione nello studio parametrico.
Nell'ambito del presente capitolo, presentiamo:

- alcuni elementi caratteristici degli invasi di montagna. I valori menzionati per la geometria e le proprietà dei materiali sono quelli che sono stati visti nello studio parametrico;
- una descrizione dei principi di ciascuno dei metodi impiegati e la definizione della sollecitazione sismica, utilizzata per ciascuno dei metodi, per lo studio parametrico;
- una sintesi dei primi insegnamenti tratti da questi confronti.

Cette démarche permet donc avantageusement, en conservant une rigueur et une sécurité suffisante dans l'estimation de l'aléa sismique et des propriétés des matériaux, d'affiner l'analyse du comportement sous sollicitation sismique des ouvrages qui nous intéressent.
*La démarche suivie dans l'*Action 2.3 *du projet RISBA vise à comparer les résultats obtenus, par des méthodes de complexité croissante : (i) pseudo-statique, (ii) dynamique simplifiée [méthode de Seed et Makdisi] et (iii) calcul dynamique temporel avec modélisation linéaire équivalente et post-traitement par la méthode de Newmark pour le calcul des déplacements irréversibles.*
Cette comparaison a été realisée d'une part dans une étude paramétrique en travaillant sur une série de différentes configurations, représentatives de retenues d'altitude (en faisant varier la géométrie du remblai, les propriétés mécaniques des matériaux et les caractéristiques du signal sismique d'entrée) ainsi que sur un ouvrage réel pour lequel nous disposions ou avons pu acquérir des données spécifiques nécessaires aux différents calculs menés. Les valeurs mesurées et prises en compte pour les différents paramètres géométriques et géotechniques de l'ouvrage réel sont situées dans la plage des valeurs prises en compte dans l'étude paramétrique.
Dans le cadre du présent chapitre, nous présentons :

- *quelques éléments caractéristiques des retenues d'altitude. Les valeurs mentionnées pour la géométrie et les propriétés des matériaux sont celles qui ont été parcourues dans l'étude paramétrique ;*
- *une description des principes de chacune des méthodes déployées et la définition de la sollicitation sismique, pour chacune des méthodes, utilisée pour l'étude paramétrique ;*
- *une synthèse des premiers enseignements retirés de ces comparaisons.*

Invitiamo il lettore a fare riferimento alle pubblicazioni finali dell'*Azione 2.3* del progetto RISBA [8] per una descrizione dettagliata dei calcoli effettuati e dell'insieme degli insegnamenti che ne sono stati tratti.

Principi di progettazione e caratteristiche degli invasi di montagna

Principi di progettazione - generalità

Gli invasi di montagna sono opere idrauliche progettate per creare una riserva d'acqua destinata per lo più alla produzione di neve artificiale. La loro ubicazione in montagna, tra i 1200 e i 2800 m di altezza, porta ad alcune specificità tecniche:

- tenuto conto delle condizioni topografiche della montagna, vengono ubicate in zone piane, raramente in presa diretta nei *thalweg*, e vengono di solito progettati in sezione di mezza costa;
- tenuto conto delle condizioni geotecniche, vengono spesso impermeabilizzati artificialmente con geomembrane sulla totalità della gaveta e delle scarpate;
- una grande maggioranza di opere è basata su una fondazione resistente (morena o roccia);
- i materiali sciolti sono composti per lo più da morene e da scisti.

*Nous invitons le lecteur à se reporter aux publications finales de l'*Action 2.3. *du projet RISBA [8] pour une description détaillée des calculs menés et de l'ensemble des enseignements qui en sont tirés.*

Principes de conception et caractéristiques des retenues d'altitude

Principes de conception – généralités

Les retenues d'altitudes sont des ouvrages hydrauliques destinées à créer une réserve d'eau dédiée majoritairement à la production de neige de culture. Leur implantation en montagne, entre 1200 et 2800 m d'altitude, conduit à des spécificités techniques :

- *Compte tenu des conditions topographiques de la montagne, elles sont implantées sur des zones de replat, rarement en prise directe dans les* thalwegs, *et sont en général conçues en déblai remblai ;*
- *Compte tenu des conditions géotechniques, elles sont très souvent étanchées artificiellement par géomembrane sur l'ensemble de leur cuvette et de leurs talus ;*
- *Une large majorité d'ouvrages est fondée sur une fondation résistante (moraine ou rocher) ;*
- *Les matériaux des remblais sont constitués majoritairement de moraines et de schistes.*

Geometria

I volumi di accumulo così costituiti vanno da alcune decine di migliaia ad alcune centinaia di migliaia di m^3. L'altezza massima dei rilevati è di solito inferiore ai 20 m. Le pendenze attuate sono di solito incluse tra 1V/3H e 1V/2H (a volte anche più ripide).

Proprietà dei materiali

Nell'ambito della valutazione del comportamento di queste opere sotto sollecitazioni sismiche, le principali proprietà prese in considerazione nei calcoli per rappresentare i materiali sciolti sono:

IL PESO UNITARIO UMIDO Nei calcoli effettuati nel presente studio, abbiamo ritenuto gh = 20 kN/m^3.

LE CARATTERISTICHE DI RESISTENZA AL TAGLIO I materiali sciolti producono di solito abbastanza attrito e presentano talvolta una leggera coesione in funzione della frazione di elementi fini che contengono. Per i nostri calcoli, abbiamo considerato i seguenti valori: c'= {0 ; 5 kPa ; 10 kPa} e phi'= { 25° ; 30° ; 35°}.

IL MODULO DI TAGLIO IN PICCOLISSIME DEFORMAZIONI G_{MAX} Questo modulo (espresso in Pa) è legato alla velocità di propagazione delle onde di taglio V_S (m/s) secondo:

$$G_{MAX} = \rho \times V_S^2$$

con ρ la massa unitaria (kg/m^3).

Géométrie

Les volumes de stockage constitués sont de l'ordre de quelques dizaines de milliers à quelques centaines de milliers de m^3. La hauteur maximale des remblais est généralement inférieure à 20 m. Les pentes mises en œuvre sont généralement comprises entre 1V/3H et 1V/2H (voire parfois plus raides).

Propriétés des matériaux

Dans le cadre de l'évaluation du comportement de ces ouvrages sous sollicitation sismiques, les principales propriétés prises en compte dans les calculs pour représenter les matériaux des remblais sont :

LE POIDS VOLUMIQUE HUMIDE *Dans les calculs menés pour la présente étude, nous avons retenu gh = 20 kN/m^3.*

LES CARACTÉRISTIQUES DE RÉSISTANCE AU CISAILLEMENT *Les matériaux des remblais sont généralement assez frottants, et présentent parfois une légère cohésion en fonction de la fraction d'éléments fins qu'ils contiennent. Pour nos calculs, nous avons considéré les valeurs suivantes : c'= {0 ; 5 kPa ; 10 kPa} et phi'= { 25° ; 30° ; 35°}.*

LE MODULE DE CISAILLEMENT EN TRÈS PETITES DÉFORMATIONS G_{MAX} *Ce module (exprimé en Pa) est lié à la vitesse de propagation des ondes de cisaillement V_S (m/s) selon :*

$$G_{MAX} = \rho \times V_S^2$$

avec ρ la masse volumique (kg/m^3).

Per i nostri calcoli, abbiamo considerato i moduli G_{MAX} = {180 MPa ; 300 MPa ; 500 MPa}, ossia, con r = 2000 kg/m³, dei valori di V_S inclusi tra 300 m/s e 500 m/s.

LE CURVE DI EVOLUZIONE DEL MODULO DI TAGLIO IN FUNZIONE DELLA DISTORSIONE G(γ) E DELL'EVOLUZIONE DELLO SMORZAMENTO IN FUNZIONE DELLA DISTORSIONE D(γ) Le curve utilizzate nel nostro studio parametrico sono quelle proposte da Seed e Makdisi nella presentazione del loro metodo.

Nell'ambito dell'*Azione 2.3* del progetto RISBA, sono state effettuate indagini geotecniche specifiche e innovatrici su un invaso di montagna ubicato nelle Hautes Alpes, dato che il nostro obiettivo è quello di applicare a un'opera reale gli approcci impiegati nello studio parametrico. Sono stati effettuati:

- prove penetrometriche;

FIGURA 5
Prova penetrometrica in cresta dell'invaso investigato.

FIGURE 5
Essai pénétrométrique en crête de la retenue investiguée.

Pour nos calculs, nous avons considéré des modules G_{MAX} = {180 MPa ; 300 MPa ; 500 MPa} soit, avec r = 2000 kg/m³, des valeurs de V_S comprises entre 300 m/s et 500 m/s.

LES COURBES D'ÉVOLUTION DU MODULE DE CISAILLEMENT EN FONCTION DE LA DISTORSION G(γ) ET DE L'ÉVOLUTION DE L'AMORTISSEMENT EN FONCTION DE LA DISTORSION D(γ) *Les courbes utilisées dans notre étude paramétrique sont celles proposées par Seed et Makdisi dans la présentation de leur méthode.*

*Dans le cadre de l'*Action 2.3 *du projet RISBA, des investigations géotechniques spécifiques et innovantes ont été menées sur une retenue d'altitude située dans les Hautes Alpes, notre objectif étant d'appliquer à un ouvrage réel les approches déployées dans l'étude paramétrique. Ont été réalisés :*

- *des essais pénétrométriques ;*

- sondaggi con telecamera geoendoscopica: l'accoppiamento con le prove penetrometriche ha permesso di aver accesso all'osservazione dei materiali impiegati;
- ricognizioni con tecniche sismiche di superficie attive (metodo MASW, sismico refrazione) e passive (registrazione del rumore di fondo sismico con interpretazione tramite il metodo H/V). Si sono quindi potuti stabilire i profili di V_S e quindi di G_{MAX} da utilizzare nei calcoli (Figura 5).

Metodi di calcolo per la verifica della stabilità delle opere sotto sollecitazione sismica

Metodo pseudo statico

Accenno al principio del metodo

Il principio del metodo consiste, nell'ambito di un calcolo di equilibrio limite, nel simulare con una forza permanente orizzontale l'effetto delle forze d'inerzia generate dall'accelerazione sismica. Questa forza viene data dalla seguente formula

$$F = \frac{2}{3} * \frac{a_{max}}{g} * W$$

a_{max} è l'accelerazione sismica di picco: dipende dal livello della zona di sismicità dov'è ubicata l'opera di ritenuta, dalla classe di sicurezza dell'opera e dagli effetti del sito; g è

- *des sondages par caméra géoendoscopique : leur couplage avec les essais pénétrométrique a permis d'accéder à une observation des matériaux mis en œuvre ;*
- *des reconnaissances par techniques sismiques de surface actives (méthode MASW, sismique réfraction) et passive (enregistrement du bruit de fond sismique avec interprétation par la méthode H/V). Les profils de V_S et donc de G_{MAX}, à utiliser dans les calculs ont ainsi pu être établis (Figure 5).*

Méthodes de calcul pour la justification de la stabilité des ouvrages sous sollicitation sismique

Méthode pseudo-statique

Rappel du principe de la méthode

Le principe de la méthode consiste, dans le cadre d'un calcul d'équilibre limite, à simuler par une force permanente horizontale l'effet des forces d'inertie générées par l'accélération sismique. Cette force est donnée par la formule suivante :

$$F = \frac{2}{3} * \frac{a_{max}}{g} * W$$

a_{max} est l'accélération sismique de pic : elle dépend du niveau de la zone de sismicité où est situé l'ouvrage, de la classe de sécurité de l'ouvrage et des effets de site ; g est

l'accelerazione gravitazionale uguale a 9,81m/s² ; W è il peso del segmento di suolo considerato. Il coefficiente di 2/3 permette di passare da una sollecitazione sismica forte ma estremamente breve ad una sollecitazione permanente più debole.
La giustificazione sotto sollecitazione sismica consiste nel verificare che il fattore di sicurezza ottenuto tenendo conto della forza definita sopra rimanga superiore a 1 (con coefficienti parziali sulla coesione effettiva e sull'angolo di attrito interno effettivo = 1,0 e un coefficiente di modello = 1,1).

Definizione della sollecitazione sismica nei calcoli effettuati

Per lo studio parametrico:
- opera di classe A (studio della sezione di altezza maggiore uguale a 20 m, studio anche delle sezioni adiacenti di 15 m e di 10 m di altezza). Il tempo di ritorno del sisma preso in considerazione è di 5 000 anni;
- l'opera è ubicata in zona di sismicità 4 secondo la normativa francese;
- la fondazione dell'opera è rocciosa (suolo di classe A ai sensi della normativa NF EN 1998-1 con Vs 30 > 800 m/s) ;
- a_{max} = 3,4 m/s².

Dinamica semplificata - Seed e Makdisi

Accenno al principio del metodo

Il metodo proposto da Seed e Makdisi (1977) integra gli spostamenti irreversibili indotti dal taglio e all'origine dello scivolamento. Le deformazioni unitarie non vengono prese

l'accélération de la pesanteur égale à 9.81m/s² ; W est le poids de la tranche de sol considérée. Le coefficient de 2/3 permet de passer d'une sollicitation sismique forte mais extrêmement brève à une sollicitation permanente plus faible.
La justification sous sollicitation sismique consiste à vérifier que le facteur de sécurité obtenu en tenant compte de la force définie ci-dessus reste supérieur à 1 (avec des coefficients partiels sur la cohésion effective et sur l'angle de frottement interne effectif = 1,0 et un coefficient de modèle = 1,1).

Définition de la sollicitation sismique dans les calculs menés

Pour l'étude paramétrique :
- *Ouvrage de classe A (étude de la section de plus grande hauteur prise égale à 20 m, étude également des sections adjacentes de 15 m et 10 m de hauteur). La période de retour du séisme pris en compte est de 5 000 ans ;*
- *L'ouvrage est situé en zone de sismicité 4 au sens de la réglementation française ;*
- *La fondation de l'ouvrage est rocheuse (sol de classe A au sens de la norme NF EN 1998-1 avec $Vs_{30} > 800$ m/s) ;*
- *a_{max} = 3,4 m/s²*

Dynamique simplifiée – Seed et Makdisi

Rappel du principe de la méthode

La méthode proposée par Seed et Makdisi (1977) intègre les déplacements irréversibles induits par cisaillement et à l'origine de glissement. Les déformations volumiques ne

in considerazione. In quest'analisi viene considerata la risposta dinamica (di vibrazione) dello sbarramento. La rottura avviene seguendo una superficie di scivolamento predefinita. Il materiale ha un comportamento elastico al di sotto del livello di sforzo critico, dopo di che sviluppa un comportamento perfettamente plastico.
Il metodo è applicabile solo a spostamenti limitati, per suoli che non sviluppano un aumento di pressione interstiziale legata a un comportamento di compressione in un suolo saturo: viene quindi applicato ai suoli coerenti compattati o ai materiali senza coesione molto densi.
L'analisi comporta tre grandi tappe:

1. la determinazione dell'accelerazione critica, corrispondente a un fattore di sicurezza 1, sopra la quale si verificheranno spostamenti irreversibili per una superficie di scivolamento alla profondità y (Figura 6);
2. la valutazione del periodo proprio del rilevato e dell'accelerazione massimale, a partire dalla quale viene determinata l'accelerazione indotta dal sisma alla profondità y presa in considerazione;
3. il calcolo delle deformazioni permanenti provocate per la superficie di scivolamento definita in (1), quando l'accelerazione indotta è superiore all'accelerazione critica.

Il dettaglio dell'approccio, con gli abachi afferenti, viene presentato nelle referenze [5] e [6], così come nel rapporto completo finale del presente progetto.

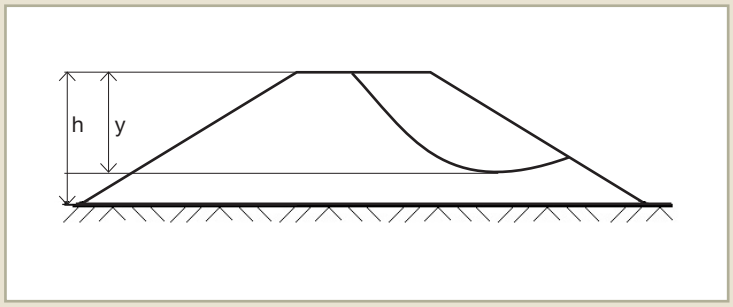


FIGURA 6
Schema di una superficie di scivolamento e profondità y in un invaso di altezza h.

FIGURE 6
Schéma d'une surface de glissement à la profondeur y dans un barrage de hauteur h.

sont pas prises en compte. Dans cette analyse, la réponse dynamique (vibratoire) du barrage est considérée. La rupture se produit suivant une surface de glissement prédéfinie. Le matériau a un comportement élastique en-dessous du niveau de contrainte critique, puis développe un comportement parfaitement plastique.
La méthode n'est applicable que pour des déplacements limités, pour des sols qui ne développent pas d'augmentation de pression interstitielle liée à un comportement contractant dans un sol saturé : elle s'applique donc aux sols cohérents compactés ou aux matériaux sans cohésion très denses.
L'analyse comporte trois grandes étapes :

1. *La détermination de l'accélération critique, correspondant à un facteur de sécurité de 1, au-delà de laquelle des déplacements irréversibles auront lieu pour une surface de glissement à la profondeur y (Figure 6) ;*
2. *L'évaluation de la période propre du remblai et de l'accélération maximale en crête, à partir de laquelle est déterminée l'accélération induite par le séisme à la profondeur y prise en compte ;*
3. *Le calcul des déformations permanentes provoquées pour la surface de glissement définie en (1), lorsque l'accélération induite est supérieure à l'accélération critique.*

Le détail de la démarche, avec les abaques afférentes, sont présentés dans les références [5] et [6], ainsi que dans le rapport complet final du présent projet.

Definizione della sollecitazione sismica nei calcoli effettuati

Per lo studio parametrico, lo spettro di risposta utilizzato è rappresentativo di un'opera di classe A (T_{SISMA} = 5 000 anni), ubicato in zona 4 di rischio sismico (medio), fondato su un suolo di classe A ai sensi della normativa NF EN 1998-1 (roccioso) (Figura 7).

Analisi preliminare: confronto del periodo fondamentale del rilevato con i periodi amplificati in considerazione degli spettri di risposta

Il periodo fondamentale T_0 (in secondi) di un rilevato può essere calcolato con la formula contenente:

- H l'altezza del rilevato (in m);
- Vs la velocità di propagazione delle onde di taglio nel rilevato (in m/s).

Nell'ambito dello studio parametrico, la soglia spettrale corrisponde ai periodi inclusi nell'intervallo [0,15 s; 0,4s]. La Tabella 9 sopra mostra che i rilevati:

- con un'altezza di 15 m e con VS dell'ordine di 300 m/s

oppure

- con un'altezza di 20 m e con VS dell'ordine di 300-400 m/s

avranno un periodo fondamentale incluso nella soglia spettrale, cioè l'amplificazione del movimento sismico sarà massima per queste opere.

Définition de la sollicitation sismique dans les calculs menés

Pour l'étude paramétrique, le spectre de réponse utilisé est représentatif d'un ouvrage de classe A (T_{SEISME} = 5 000 ans), situé en zone 4 d'aléa sismique (moyen), fondé sur un sol de classé A au sens de la norme NF EN 1998-1 (rocheux) (Figure 7).

Analyse préliminaire : comparaison de la période fondamentale du remblai avec les périodes amplifiées au regard des spectres de réponse

La période fondamentale T_0 (en secondes) d'un remblai peut être approchée par la formule avec :

- *H la hauteur du remblai (en m) ;*
- *V_S la vitesse de propagation des ondes de cisaillement dans le remblai (en m/s).*

Dans le cadre de l'étude paramétrique, le plateau spectral correspond aux périodes comprises dans l'intervalle [0,15 s ; 0,4s]. Le Tableau 9 ci-dessus montre que les remblais :

- *d'une hauteur de 15 m et avec V_S de l'ordre de 300 m/s*

ou

- *d'une hauteur de 20 m et avec V_S de l'ordre de 300 à 400 m/s*

auront une période fondamentale comprise dans le plateau spectral, c'est-à-dire que l'amplification du mouvement sismique sera maximale pour ces ouvrages.

Dinamica temporale con modello lineare equivalente

Accenno sintetico al principio del metodo

L'attuazione di questo metodo necessita dell'utilizzo di un software di calcolo a elementi finiti. In modo molto sintetico, la modellizzazione comporta le seguenti tappe:

1. valutazione del campo di pressione interstiziale iniziale (calcolo in regime permanente) e del campo di sollecitazioni iniziali statiche;
2. valutazione del campo di sollecitazioni dinamiche, a ogni passo di periodo dell'accelerogramma. Il principio del modello lineare equivalente è il seguente: viene presa in considerazione una legge visco-elastica (elasticità lineare) . Le proprietà del suolo (modulo di taglio G, smorzamento D) sono definite per ogni elemento della griglia

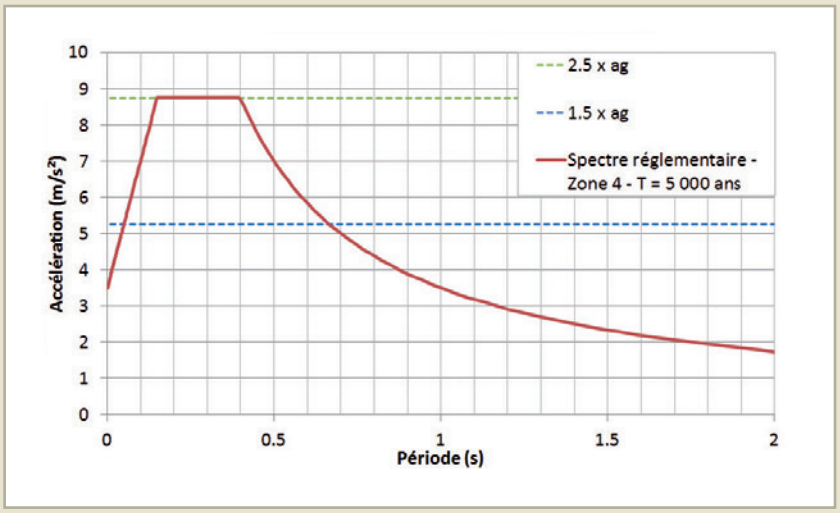


FIGURA 7
Spettro di risposta utilizzato per l'applicazione del metodo di Seed e Makdisi nello studio parametrico.

FIGURE 7
Spectre de réponse utilisé pour l'application de la méthode de Seed et Makdisi dans l'étude paramétrique.

H / Vs	300	400	500
5	0.04	0.03	0.03
10	0.09	0.07	0.05
15	0.13	0.10	0.08
20	0.17	0.13	0.10

TABELLA 9
Periodo fondamentale del rilevato per alcuni valori di H e Vs.

TABLEAU 9
Période fondamentale du remblai pour quelques valeurs de H et Vs.

Dynamique temporelle avec modèle linéaire équivalent

Rappel succinct du principe de la méthode

La mise en œuvre de cette méthode nécessite l'utilisation d'un logiciel de calcul aux éléments finis. De manière très synthétique, la modélisation comporte les étapes suivantes :

1. *évaluation du champ de pression interstitielle initial (calcul en régime permanent) et du champ de contraintes initiales statiques ;*
2. *évaluation du champ de contraintes dynamiques, à chaque pas de temps de l'accélérogramme. Le principe du modèle linéaire équivalent est le suivant : une loi visco-élastique (élasticité linéaire) est prise en compte. Les propriétés du sol (module de cisaillement G, amortissement D) sont définies pour chaque élément de maillage du modèle aux éléments finis, et maintenues constantes tout au long de l'accélérogramme. En fonction de la valeur du pic de distorsion (γ_{MAX}) calculé en chaque élément, la valeur de (G, D) est revue pour chaque élément (à partir de courbes*

del modello a elementi finiti, e vengono mantenute costanti per tutto l'accelerogramma. In funzione del valore del picco di distorsione (γ_{MAX}) calcolato in ogni elemento, il valore di (G, D) è rivisto per ogni elemento (a partire da curve G(γ) e D(γ) caratteristiche del materiale) e l'integralità dell'accelerogramma viene ripercorsa. Alcune iterazioni vengono realizzate per ottenere la convergenza verso il risultato finale;

3. valutazione degli spostamenti: post-trattamento con il metodo Newmark;
4. per una serie di cerchi di scivolamento predefiniti, il campo di sollecitazioni dinamiche viene convertito in un'accelerazione media del blocco di scivolamento che, quando supera l'accelerazione di rottura, viene integrata 2 volte rispetto al tempo di valutazione dello spostamento irreversibile.

Definizione della sollecitazione sismica nei calcoli effettuati

Per lo studio parametrico, sono stati definiti e utilizzati per ciascuna delle 33 configurazioni[6] studiate, 7 accelerogrammi con ciascuno uno spettro di risposta conforme allo spettro regolamentare per uno sbarramento di classe A (T_{SISMA} = 5 000 anni), per la zona di sismicità 4, su un suolo di classe A ai sensi della normativa NF EN 1998-1. In totale, sono stati realizzati per lo studio parametrico 231 calcoli dinamici temporali.

6 Una "configurazione" corrisponde a un'opera tipo caratterizzata da (i) la sua geometria [altezza e pendenza del rilevato], (ii) le proprietà di resistenza al taglio (c' ; φ'), (iii) il valore del modulo di taglio del rilevato in piccolissime deformazioni G_{MAX}.

G(γ) et D(γ) caractéristiques du matériau) et l'intégralité de l'accélérogramme est re-parcouru. Quelques itérations sont réalisées pour obtenir la convergence vers le résultat final.

3. *évaluation des déplacements : post-traitement par la méthode de Newmark.*
4. *pour une série de cercles de glissements pré-définis, le champ de contraintes dynamiques évalué à chaque pas de temps de l'accélérogramme est converti en une accélération moyenne du bloc de glissement, qui, lorsqu'elle dépasse l'accélération de rupture, est intégrée 2 fois par rapport au temps pour évaluer le déplacement irréversible.*

Définition de la sollicitation sismique dans les calculs menés

Pour l'étude paramétrique, 7 accélérogrammes ayant chacun un spectre de réponse conforme au spectre réglementaire pour un barrage de classe A (T_{SEISME} = 5 000 ans), pour la zone de sismicité 4, sur un sol de classe A au sens de la norme NF EN 1998-1 ont été définis et utilisés pour chacune des 33 configurations[6] étudiées. Au total, 231 calculs dynamiques temporels ont été réalisés pour l'étude paramétrique.

6 *Une « configuration » correspond à un ouvrage type caractérisé par (i) sa géométrie [hauteur et pente du remblai], (ii) les propriétés de résistance au cisaillement* (c' ; φ'), *(iii) la valeur du module de cisaillement du matériau du remblai en très petites déformations* G_{MAX}.

Principali insegnamenti

Risultati ottenuti: spostamenti irreversibili sotto sollecitazione sismica

La Figura 8 presenta un esempio di calcolo dello spostamento irreversibile per post-trattamento secondo il metodo di Newmark, con una modellizzazione dinamica temporale. Per uno stesso livello di sollecitazione sismica, gli spostamenti irreversibili ottenuti per il calcolo dinamico temporale con il metodo lineare equivalente presentano una variabilità notevole a seconda delle configurazioni di rilevato prese in considerazione. Questa variabilità è legata principalmente:

- alla geometria dell'opera: gli spostamenti aumentano con l'altezza e la pendenza del rilevato;
- alla resistenza al taglio dei materiali: gli spostamenti diminuiscono con l'aumento di c′ e φ′.

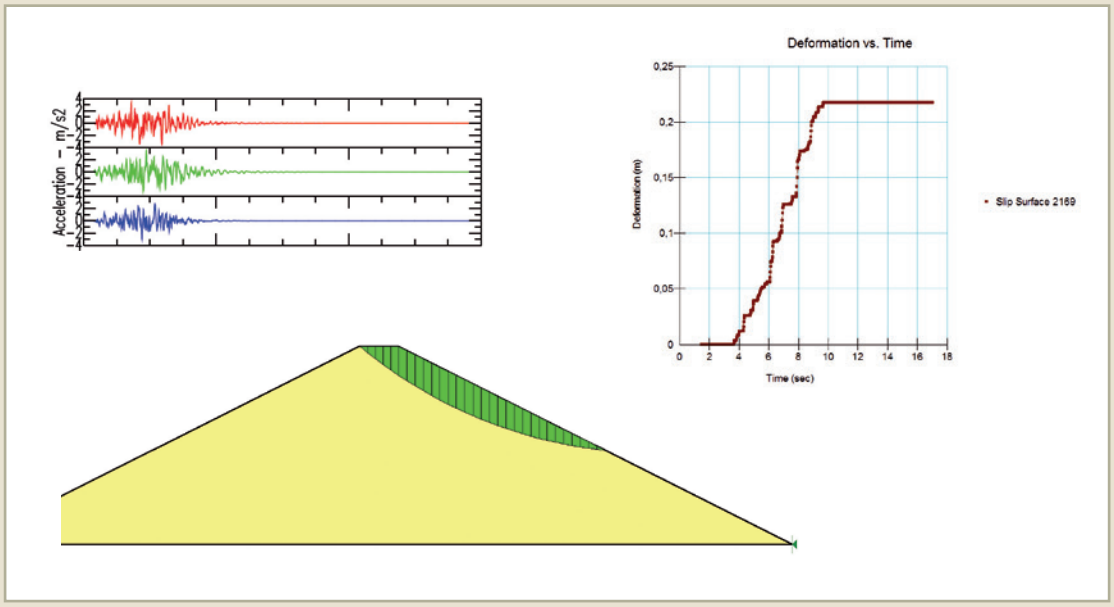


FIGURA 8
Esempio di calcolo dello spostamento irreversibile: post-trattamento con il metodo di Newmark di una modellizzazione dinamica temporale.

FIGURE 8
Exemple de calcul de déplacement irréversible : post-traitement par la méthode de Newmark d'une modélisation dynamique temporelle.

Principaux enseignements

Résultats obtenus : déplacements irréversibles sous sollicitation sismique

La Figure 8 présente un exemple de calcul de déplacement irréversible par post-traitement, suivant la méthode de Newmark, d'une modélisation dynamique temporelle. Pour un même niveau de sollicitation sismique, les déplacements irréversibles obtenus par le calcul dynamique temporel avec la méthode linéaire équivalente présentent une variabilité importante selon les configurations de remblai prise en compte. Elle est liée principalement :

- *à la géométrie de l'ouvrage : les déplacements croissent avec la hauteur et la pente du remblai ;*
- *à la résistance au cisaillement des matériaux : les déplacements diminuent avec l'augmentation de c′ et φ′.*

Questi due punti corrispondono esattamente all'evoluzione dei fattori di sicurezza in situazione permanente (senza sollecitazione sismica) e all'evoluzione del fattore di sicurezza ottenuto con il metodo pseudo-statico.
Una variabilità importante viene anche causata dal valore di G_{MAX} (o V_S), e gli spostamenti irreversibili sono tanto più importanti quanto più il periodo di oscillazione del rilevato è vicino (quando addirittura coincide) con la soglia di accelerazione spettrale: queste tendenze possono essere osservate solo con l'utilizzo di metodi di tipo "dinamici semplificati" o "dinamica temporale con metodo lineare equivalente". L'importanza dell'amplificazione sarà analizzata nel paragrafo successivo.
Infine, è interessante constatare che una variabilità viene anche legata al contenuto frequenziale dell'accelerogramma preso in considerazione (anche se tutti gli accelerogrammi testati corrispondono ad uno stesso spettro di risposta) e che questa variabilità è tanto più importante quanto gli spostamenti irreversibili (legati ai parametri precedentemente esaminati) sono importanti. I risultati ottenuti con il calcolo dinamico temporale sono coerenti con quelli ricavati dal metodo Seed e Makdisi, quando vengono analizzati in termini di spostamenti che l'opera può subire senza provocarne il suo crollo.

Amplificazione del movimento sismico - Periodo proprio del rilevato

Le caratteristiche del rilevato possono portare a un'amplificazione più o meno notevole del movimento sismico e quindi favorire gli effetti del sisma in termini di movimenti irreversibili generati. Per valutare, in prima analisi, l'importanza dell'amplificazione del movimento sismico su un rilevato, è interessante definire il periodo proprio del rilevato

Ces deux points correspondent bien à l'évolution des facteurs de sécurité en situation permanente (sans sollicitation sismique) et à l'évolution du facteur de sécurité obtenu avec la méthode pseudo-statique.
Une variabilité importante est également causée par la valeur de G_{MAX} (ou V_S), et les déplacements irréversibles sont d'autant plus importants que la période du remblai et proche (voire coïncide) avec le plateau de l'accélération spectrale : ces tendances ne peuvent être observées qu'en utilisant des méthodes de type « dynamiques simplifiées » ou « dynamique temporelle avec méthode linéaire équivalente ». L'importance de l'amplification en abordée au paragraphe suivant.
Enfin il est intéressant de constater qu'une variabilité est également rattachée à au contenu fréquentiel de l'accélérogramme pris en compte (bien que tous les accélérogrammes testés correspondent à un même spectre de réponse) et que cette variabilité est d'autant plus importante que les déplacements irréversibles (liés aux paramètres précédemment passés en revue) sont importants. Les résultats obtenus par le calcul dynamique temporel sont cohérents avec ceux issus de la méthode de Seed et Makdisi, lorsqu'on les analyse en termes de déplacements que l'ouvrage peut subir sans entrainer sa ruine.

Amplification du mouvement sismique – Période fondamentale du remblai

Les caractéristiques du remblai peuvent conduire à une amplification plus ou moins importante du mouvement sismique et donc favoriser les effets du séisme en termes de mouvements irréversibles engendrés. Pour évaluer, en première analyse, l'importance de l'amplification du mouvement sismique sur un remblai donné, il est intéressant

(che può essere calcolato con la formula T_0 = 2,61 H/VS) rispetto allo spettro di risposta del SES preso in considerazione (Tabella 10). In rapporto alla gamma di altezze del rilevato (fino a una ventina di metri), valori di V_S bassi (dell'ordine di 300 m/s) possono situare T_0 nella gamma dei periodi che portano ad un'amplificazione massimale, sfavorevole per il suo comportamento sotto sollecitazione sismica. Questo fenomeno viene evitato effettuando, durante il cantiere, una compattazione energica accurata che dovrebbe portare, per i materiali tipici delle ritenute di montagna (morena o scisti) a V_S superiori ai 300 m/s.
La valutazione delle V_S a priori (per esempio durante le fasi di progettazione dell'opera) non è facile. Una volta realizzata l'opera, una campagna geofisica sismica di superficie (MASW, sismica refrazione) rappresenta un'ottima verifica per confermare le ipotesi di calcolo.

Approccio globale dell'opera

I calcoli effettuati si basano sul meccanismo di scivolamento all'interno del rilevato: si tratta di assicurare che nessuno spostamento maggiore, che possa portare a una rottura istantanea e totale, sia in grado di incidere sull'opera (ad esempio, scivolamento che

	Amplificazione / Amplification		*Si periodo fondamentale T_0 compreso nella gamma / Si période fondamentale T_0 comprise dans la plage*
Zona di sismicità 4 / *Zone de sismicité 4* *T = 5000* anni / *ans* *Suolo / Fondation Classe A*	«Da media a forte», accelerazione spettrale / *« Moyenne à forte », i.e. accélération spectrale*	*> 1,5 x ag*	*[0,05 s ; 0,67 s]*
	«Massima », accelerazione spettrale / *« Maximale » i.e. accélération spectrale*	*= 2,5 x ag*	*[0,15 s ; 0,40 s]*
Zona di sismicità 4 / *Zone de sismicité 4* *T = 2 500* anni / *ans* *Suolo / Fondation Classe A*	«Da media a forte», accelerazione spettrale / *« Moyenne à forte » i.e. accélération spectrale*	*> 1,5 x ag*	*[0,01 s ; 0,33 s]*
	«Massima », accelerazione spettrale / *« Maximale » i.e. accélération spectrale*	*= 2,5 x ag*	*[0,03 s ; 0,20 s]*

TABELLA 10
Valore di periodo fondamentale del rilevato che conduce a una amplificazione media o massima del movimento sismico.

TABLEAU 10
Valeur de périodes fondamentales de remblais conduisant à une amplification moyenne ou maximale du mouvement sismique.

de situer la période fondamentale du remblai (qui peut être approchée par la formule T_0 = 2,61 H/V_S) par rapport au spectre de réponse du S.E.S. pris en compte (Tableau 10). Au regard de la gamme de hauteurs de remblai (jusqu'à une vingtaine de mètres), des valeurs de V_S un peu faibles (de l'ordre de 300 m/s) peuvent situer T_0 dans la gamme des périodes conduisant à une amplification maximale, défavorable pour le comportement sous sollicitation sismique. Ceci rejoint l'objectif habituel de réaliser lors du chantier un compactage énergique soigné qui devrait conduire, pour les matériaux typiques des retenues d'altitude (moraines ou schistes), à des V_S supérieures à 300 m/s.
L'évaluation des V_S a priori *(i.e. lors des phases de conception de l'ouvrage) n'est pas aisée. Une fois l'ouvrage réalisé, une campagne géophysique de sismique de surface (MASW, sismique réfraction) sera riche d'enseignements pour confirmer les hypothèses de calcul.*

Approche globale de l'ouvrage

Les calculs menés portent sur le mécanisme de grand glissement au sein du remblai : il s'agit de s'assurer qu'aucun déplacement majeur, pouvant conduire à une rupture instantanée et totale, n'est susceptible d'affecter l'ouvrage (par exemple, glissement

intercetti una parte importante del coronamento, annullando il franco e portando, per straripamento, a un'erosione maggiore e alla rottura del rilevato).
Oltre a questo tipo di scenario che incide notevolmente sul rilevato, altri scenari possono essere previsti. Rimane da analizzare la stabilità della struttura di protezione (quando c'è) e l'eventuale danno al DEG, che potrebbe essere dovuto a uno scivolamento della protezione stessa. Tuttavia, questo meccanismo sarebbe a priori meno critico di un marcato scivolamento (scartato precedentemente), poiché anche una degradazione importante del DEG :

1. non porterebbe automaticamente ad una rottura del rilevato: un'eventuale saturazione che possa portare ad un meccanismo di erosione interna o di scivolamento della scarpata a valle avverrebbe solo progressivamente;
2. questo ritardo permette di prendere in considerazione alcuni interventi:
   - svuotamento dell'invaso (relativamente facile su queste opere dove la portata all'entrata è quasi totalmente controllata) a condizione che i sistemi di manovra delle paratoie siano perfettamente operativi;
   - monitoraggio e osservazione rafforzati;
   - evacuazione preventiva a valle in caso di emergenza.

interceptant une part importante de la crête, annulant la revanche et conduisant, par surverse, à une érosion majeure et à la rupture du remblai).
Au-delà de ce type de scénario affectant de façon majeure le remblai, d'autres scénarios peuvent être envisagés. Ainsi, il reste à analyser la stabilité de la structure de protection (lorsqu'elle existe), et l'éventuel endommagement du DEG qui pourrait résulter d'un glissement de la protection. Toutefois, ce mécanisme serait a priori *moins critique qu'un grand glissement (écarté précédemment) car même une dégradation importante du DEG :*

1. *ne conduira pas instantanément à une rupture du remblai : une éventuelle saturation du remblai, pouvant conduire à un mécanisme d'érosion interne ou de glissement du talus aval, ne se ferait que de manière progressive ;*
2. *ce délai permet d'envisager des parades :*
   - *vidange de la retenue (relativement aisée sur ces ouvrages où le débit d'entrée est largement voire totalement maîtrisé) à condition que les systèmes de manœuvre des vannes restent bien opérationnels ;*
   - *suivi et auscultation renforcée ;*
   - *évacuation préventive à l'aval en cas d'observations préoccupantes.*

Conclusioni

Nell'ambito dell'*Azione 2.3* del progetto RISBA, è stato realizzato un confronto tra i rischi sismici desunti dai regolamenti e sono stati proposti elementi a spiegazione delle differenze riscontrate.
Prima di tutto, è stato sviluppato un metodo di analisi semplificata che permetta al Gestore di un importante parco di opere idrauliche di individuare quelle per cui bisogna compiere sforzi prioritari per verificare il loro buon comportamento sotto sollecitazione sismica. Infine, i metodi di analisi della stabilità degli sbarramenti in materiali sciolti (ritenuta di montagna) sono stati riesaminati con riguardo alle specificità dei rilevati esistenti e delle sollecitazioni per le quali il rischio di rottura deve poter essere scartato.

Conclusions

*Dans le cadre de l'*Action 2.3 *du projet RISBA, une comparaison des aléas sismiques réglementaires a été réalisée et des éléments d'explications des écarts observés ont été proposés.*
Tout d'abord, une méthode d'analyse simplifiée a été développée, permettant au gestionnaire d'un parc important d'ouvrages hydrauliques de cibler ceux pour lesquels des efforts méritent d'être engagés de façon prioritaire afin de justifier de leur bon comportement sous sollicitation sismique. Enfin, les méthodes d'analyse de la stabilité des barrages en remblai de type retenue d'altitude ont été réexaminées au regard des spécificités des remblais mis en œuvre et des sollicitations pour lesquelles le risque de rupture doit pouvoir être écarté.

Riferimenti bibliografici / Références

[1] *Risque sismique et sécurité des ouvrages hydrauliques*, Ministère de l'écologie, à paraitre

[2] Bulletin n°120, *Aspects de la conception parasismique des barrages*, CIGB, 2001

[3] *Rapport général et rapports de la question n°83 « Aspects sismiques relatifs aux barrages »*, Montréal 2003

[4] Peyras L., Mériaux P., coord., *Retenues d'altitudes*, éditions QUAE, 2009

[5] Makdisi F.I., Bolton Seed H., *A simplified procedure for estimating earthquake-induced deformations in dams and embankments*, Earthquake engineering research center, 1977

[6] Makdisi F.I., Bolton Seed H., *Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations*, Journal of the geotechnical engineering division, july 1978

[7] Progetto RISBA – Azione 2.3 : *Valutazione della vulnerabilità delle dighe al rischio sismico, DISEG* – Politecnico di Torino, à paraître

[8] Projet RISBA – Action 2.3. *Evaluation de la vulnérabilité des barrages vis-à-vis de l'aléa sismique*, Irstea, à paraître

[9] C. Deangeli, G.P. Giani, B. Chiaia, and A. Fantilli, *Dam failures*. In: "Dam Break. Problems, Solutions and Case Studies", (D. De Wrachien & S. Mambretti, Eds), pp. 1-50. WIT Press, Ashurst (Southampton, UK), 2009.

[10] ANCOLD 2003, *Guidelines on Risk Assessment*, Australian National Committee on Large Dams Incorporated, Australia.

[11] ASCE. *Report card for American's Infrastructure* (2013), 74 pagg.

[12] Seed, H.B. (1979). *Considerations in the earthquake-resistant design of earth and rockfill dams*, Geotechnique, 29 (3),215-263.

[13] D.M. 14 gennaio 2008 "*Norme tecniche per le costruzioni*", Gazzetta Ufficiale n.29 del 4 febbraio 2008.

[14] J. R. Swaisgood, P.E., C.P.G., *Embankment dam deformations caused by earthquakes*, 2003 Pacific Conference on Earthquake Engineering, Swaisgood Consulting, Conifer, Colorado.

[15] Newmark, N. 1965. *Effects of earthquakes on dams and embankments*. Geotechnique, Vol 15 (2) 139-160, London.

[16] Blake, T., Hollingsworth, R. and Stewart, J., (2002). *Recommended procedures for implementation of DMG* Special Publication 117 guidelines for analyzing and mitigating landslide hazards in California. ASCE Los Angeles Section Geotechnical Group. California Geological Survey.

[17] D.M. 26 giugno 2014 *"Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)"*, Gazzetta Ufficiale n.156 del 8 luglio 2014.

[18] Hilsdorf, H.K., Brameshuber, W. (1991). *"Code-type formulation of fracture mechanics concepts for concrete."* International Journal of Fracture, 51, 61-72.

[19] Giannini, R., Sguerri, L., Paolacci, F., Alessandri, S. (2014). *"Assessment of concrete strength combining direct and NDT measures via Bayesian inference."* Engineering Structures, 64, 68–77.

[20] Breysse, D. (2012). *"Nondestructive evaluation of concrete strength: An historical review and a new perspective by combining NDT methods."* Construction and Building Materials, 33, 139–163.

[21] Dolce, M., Masi, A., Ferrini, M. (2006a). *Estimation of the Actual In-Place Concrete Strength in Assessing Existing RC Structures.* Proceedings of the 2nd fib International Congress, June 5-8, 2006 – Naples, Italy.

[22] Fantilli, A.P., Frigo, B. and Chiaia, B. (2015). *A simplified approach for the evaluation of concrete strength. International Conference on Regeneration and Conservation of Concrete Structures* - RCCS, Nagasaki, Japan.

[23] Caterino, N. (2007) *Analisi decisionale multicriterio per l'adeguamento sismico di edifici in c.a.* . PhD Thesis, 157 pagg.

Durabilità dei dispositivi di impermeabilizzazione con geomembrane

Introduzione

Il dispositivo di impermeabilizzazione con geomembrana (DEG) è uno degli organi essenziali degli sbarramenti studiati nel progetto RISBA. La durabilità dei DEG deve essere garantita per tutta la durata di servizio degli invasi. L'*Azione 2.4a* del progetto RISBA mira a definire meglio la durabilità dei DEG. In quest'azione di progetto, l'approccio è stato prima di tutto, sulla base dei sopralluoghi (cfr. *Azione 2.1*), quello di osservare e di diagnosticare la patologia dei DEG degli invasi in Francia e in Italia. Durante quest'indagine sul campo, è stato effettuato il prelievo di una geomembrana su un invaso italiano, quello di Gran Testa, al fine di analizzarlo in laboratorio. Sulla base di queste indagini, l'*Azione 2.4a* ha sviluppato in seguito dei metodi di caratterizzazione della durabilità dei DEG. A tale scopo, nell'ambito del progetto RISBA è stata attuata una ricerca sperimentale riguardante la questione dello sfondamento delle geomembrane.

Durabilité des dispositifs d'étanchéité par géomembrane

Introduction

*Le dispositif d'étanchéité par géomembrane (DEG) est un des organes essentiels des barrages étudiés dans le projet RISBA. La durabilité des DEG doit être assurée durant toute la durée de service des barrages. L'*Action 2.4a *du projet RISBA vise à mieux caractériser la durabilité des DEG. Dans cette action du projet, la démarche mise en œuvre a tout d'abord consisté, sur la base de l'enquête de retour d'expérience (cf.* Action 2.1*), à observer et à diagnostiquer la pathologie des DEG des barrages en France et en Italie. Au cours de cette enquête de terrain, un prélèvement d'une géomembrane sur un barrage Italien, le barrage de Gran Testa, a été réalisé à des fins d'analyse en laboratoire. Sur la base de ces investigations, l'*Action 2.4a *a développé ensuite des méthodes de caractérisation de la durabilité des DEG. Pour cela, une recherche expérimentale portant sur la question du poinçonnement des géomembranes a été mise en œuvre dans le cadre du projet RISBA.*

Esperienza acquisita sul campo

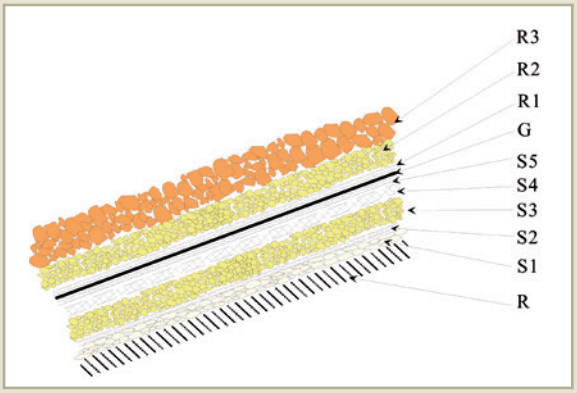
I DEG sono composti da tre strati distinti: la struttura di supporto, la struttura di impermeabilizzazione e la struttura di copertura (Figura 1). Se i primi due strati sono inscindibili, l'installazione del terzo rimane a discrezione del responsabile dei lavori. Ognuno ha un ruolo ben definito:

- la struttura di supporto può associare uno strato di fondazione e uno strato di base: il primo corrisponde ad uno strato di materiali fini destinato a lisciare le irregolarità del terreno naturale, mentre il secondo comporta di solito uno o più geosintetici permeabili che possono fungere da separazione, da filtro, da drenaggio, da rinforzo e da protezione della geomembrana;
- la struttura di impermeabilizzazione garantisce l'impermeabilità del bacino, ruolo ricoperto da una geomembrana;
- la struttura di copertura, detta anche di protezione, riunisce l'insieme degli strati geosintetici e granulari situati sulla geomembrana per proteggerla dalle sollecitazioni esterne.

I sopralluoghi effettuati nell'ambito del progetto (cfr. *Azione 2.1*) sono stati l'occasione per studiare ognuna di queste tre parti su 22 opere di ritenuta impermeabilizzate con

FIGURA 1
Struttura di un DEG (R: rilevato; S1-5: struttura di supporto; G: struttura di impermeabilizzazione; R1-3: struttura di copertura); secondo Peyras et Meriaux (2009).

FIGURE 1
Structure d'un DEG (R : remblai ; S1-5 : structure support ; G : structure d'étanchéité ; R1-3 : structure de recouvrement) ; selon Peyras et Meriaux (2009).



Retour d'expérience

Les DEG se composent de trois couches distinctes : la structure support, la structure d'étanchéité et la structure de recouvrement (Figure 1). Si les deux premières couches sont indissociables, la mise en place de la dernière reste en revanche à l'appréciation du maître d'œuvre. Chacune a un rôle bien défini :

- *la structure support peut associer une couche de forme et une couche support : la première correspond à une épaisseur des matériaux fins destinée à lisser les irrégularités du terrain naturel, tandis que la seconde comporte généralement un ou plusieurs géosynthétique(s) perméable(s) qui peuvent remplir les fonctions de séparation, de filtration, de drainage, de renforcement ou de protection de la géomembrane ;*
- *la structure d'étanchéité assure l'imperméabilité de la retenue. C'est une géomembrane qui joue ce rôle ;*
- *la géomembrane de recouvrement, dite aussi de protection, réunit quant à elle l'ensemble des couches géosynthétiques et granulaires placées au-dessus de la géomembrane pour la protéger des sollicitations extérieures.*

Le retour d'expérience effectué dans le cadre du projet (cf. Action 2.1*) a été l'occasion d'étudier chacune de ces trois parties sur 22 ouvrages étanchés par géomembrane (11 en*

geomembrana (11 in Francia e 11 in Italia). Analizzeremo nel seguito i dati che sono stati prelevati sul campo, nonché quelli provenienti dalle pratiche di queste opere di ritenuta.

Struttura di supporto

In Francia, solo alcune opere di ritenuta indicano l'esistenza di uno strato di fondazione: in questo caso, la documentazione riporta la posa di un materiale di tipo 0/31,5 mm, accompagnato da dreni longitudinali in prossimità delle venute d'acqua.
Lo strato di base presenta varie configurazioni: il più delle volte, la geomembrana poggia su un geocomposito drenante e protettivo (o anti-sfondamento) compreso tra 1000 e 1200 g/m², oppure da un geosintetico drenante accoppiato a un geotessile protettivo compreso tra 900 e 1200 g/m².
Più raramente, le opere di ritenuta sono provviste di un geotessile protettivo di 1200 g/m² senza geosintetico drenante, quando il terreno naturale sottostante è già in grado di garantire questa funzione.

Struttura impermeabilizzante

L'indagine sul campo effettuata con i partners italiani e i gestori delle opere di ritenuta evidenzia che le geomembrane in PVC rappresentano la soluzione più spesso adottata negli invasi valdostani e piemontesi. Vi è la stessa tendenza in Francia. L'indagine rivela un'ampia proporzione di geomembrane in PVC-P (Policloruro di Vinile Plastificato): queste ultime vengono impiegate per il 64% delle ritenute visitate, di cui il 70% è in PVC-P semplice e il 30% in PVC-P armato (Figura 2).

France et 11 en Italie). Nous analysons ici les données qui ont été relevées sur le terrain ainsi que dans les dossiers de ces ouvrages.

Structure support

En France, seuls quelques ouvrages indiquent l'existence d'une couche de forme : dans ce cas, les documents font état de la mise en place d'un matériau de type 0/31,5 mm, accompagné d'éperons ou de masques drainants placés au droit des venues d'eau.
La couche support présente pour sa part différentes configurations : le plus souvent, la géomembrane repose sur un géocomposite drainant et de protection (ou anti-poinçonnant) de 1000 à 1200 g/m², remplacé par l'association d'un géosynthétique de drainage et d'un géotextile de protection de 900 à 1200 g/m² dans certaines retenues. Plus rarement, les ouvrages sont équipés d'un géotextile de protection de 1200 g/m² sans géosynthétique dédié au drainage lorsque le terrain naturel sous-jacent est lui-même capable d'assurer cette fonction.

Structure d'étanchéité

L'enquête de terrain conduite avec les partenaires italiens et les gestionnaires d'ouvrage fait apparaître que les géomembranes en PVC sont la solution la plus souvent mise en œuvre dans les retenues valdotaines et piémontaises. En France, la même tendance se dégage. L'enquête révèle une large proportion de géomembranes en PVC-P (PolyChlorure de Vinyle Plastifié) : ces dernières équipent 64% des retenues visitées, dont 70% sont en PVC-P simple et 30% en PVC-P armé (Figure 2).

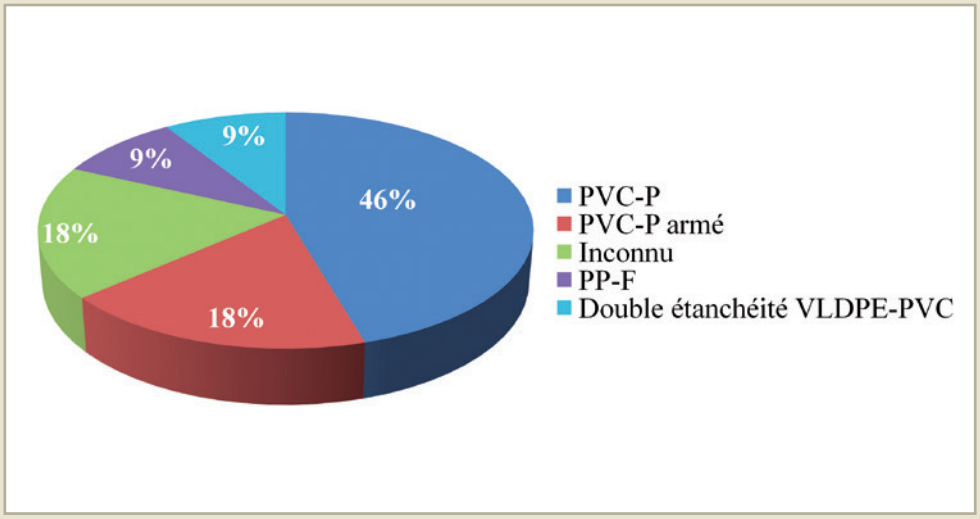
Il PP-F (PoliPropilene Flessibile) é stato riscontrato su una sola delle ritenute visitate. Infine, una ritenuta fa eccezione con la sua doppia impermeabilizzazione che unisce VLDPE (Very Low Density PolyEthylene) e PVC. Si può notare che gli spessori della struttura di impermeabilizzazione sono variabili tra 1,5 mm e 2 mm per il PVC-P armato, 2 mm per il PVC-P o ancora 1,2 mm per quella in VLDPE.

Struttura di copertura

Quattro tipi di struttura di copertura (o struttura protettiva) sono stati riscontrati: l'assenza di copertura, la copertura parziale su berma, la copertura su tutto il paramento a monte e la copertura totale dei paramenti e della gaveta (Figura 3).
Tuttavia l'Italia e la Francia si differenziano sulla scelta della copertura dei loro invasi di montagna.
La quasi totalità delle opere di ritenuta italiane (10 su 11) si colloca nella configurazione di una copertura parziale nella parte superiore del paramento a monte, che poggia su una berma di una larghezza minima di un metro (Figura 4a). Vi è un solo bacino di ritenuta tra quelli analizzati che non ha copertura né fascinata.

FIGURA 2
Ripartizione delle opere secondo la composizione della loro geomembrana in Francia.

FIGURE 2
Répartition des ouvrages selon la nature de leur géomembrane en France.



Le PP-F (PolyPropylène Flexible) a été rencontré sur un seul des barrages visités. Pour finir, une retenue fait figure d'exception avec sa double étanchéité réunissant VLDPE (Very Low Density PolyEthylene) et PVC. Il peut être noté que les épaisseurs de la structure d'étanchéité sont variables et comprises entre 1,5 mm à 2 mm pour le PVC-P armé, 2 mm pour le PVC-P ou encore 1,2 mm pour celle en VLDPE.

Structure de recouvrement

Quatre types de structure de recouvrement (ou structure de protection) ont été rencontrés : l'absence de recouvrement, le recouvrement partiel sur risberme, le recouvrement sur l'ensemble du parement amont, et le recouvrement total des parements et de la cuvette (Figure 3). L'Italie et la France se distinguent cependant quant au choix du recouvrement de leurs retenues d'altitude.
La presque totalité des ouvrages italiens (10 sur 11) se trouve dans la configuration d'un recouvrement partiel en partie supérieure du parement amont, reposant sur une risberme large au minimum d'un mètre (Figure 4a). Seule une retenue n'est pas recouverte et ne possède pas de risberme.

Nella Valle d'Aosta, la copertura è sistematicamente composta di pietrame di taglia metrica che poggia su una guaina geotessile riempita con materiali fini per non danneggiare la geomembrana sottostante (Figura 4b).
In Piemonte, l'evidenza della natura dello strato protettivo della geomembrana rispetto ai blocchi superiori si è rivelata difficoltosa, in quanto le visite tecniche sono state effettuate con invasi pieni. Sono stati riscontrati tre casi:

1. copertura con blocchi di alcune decine di centimetri al massimo (3 ritenute su 6);
2. parte superiore del paramento rinverdito, sostituita da rocce tra decimetriche e multidecimetriche sulla berma (2 ritenute su 6);
3. parte superiore del paramento rinverdito, sostituita da gabbioni nella parte mediana, e da autobloccanti sulla fascinata (1 ritenuta su 6).

In Francia, le configurazioni sono più diversificate. L'indagine evidenzia una prevalenza di copertura totale dei paramenti e della gaveta (55%) e di copertura parziale sulla parte superiore su fascinata (27%). Sono stati oggetto di indagine anche un bacino con copertura sulla totalità del paramento a monte (9%) e un bacino non ricoperto (9%) (Figura 4c).

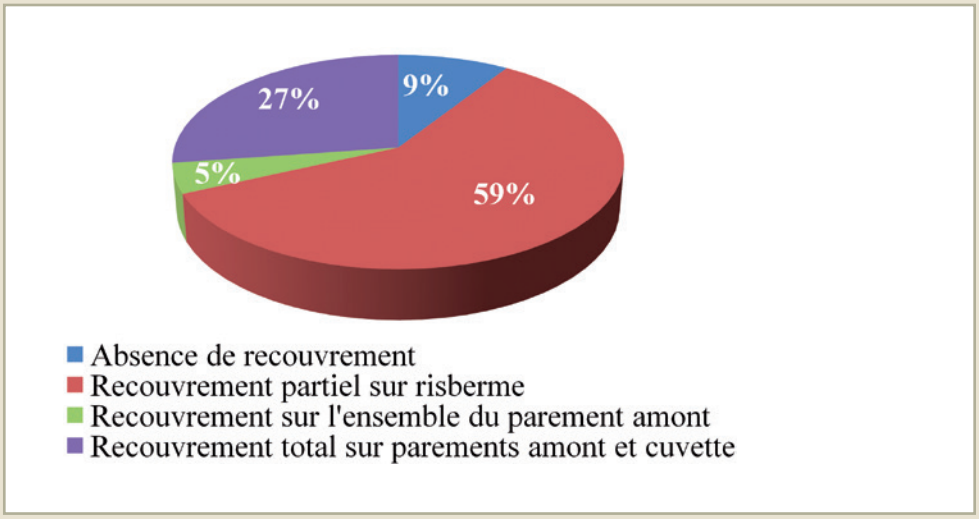


FIGURA 3
Ripartizione dei 22 invasi secondo la loro struttura di copertura.

FIGURE 3
Répartition des 22 retenues selon leur structure de recouvrement.

En Région Vallée d'Aoste, le recouvrement est systématiquement fait d'enrochements de taille métrique qui reposent sur une chaussette de géotextile remplie de matériaux fins afin de ne pas blesser la géomembrane sous-jacente (Figure 4b).
En Région Piémont, la mise en évidence de la nature de la couche de protection de la géomembrane vis-à-vis des blocs supérieurs s'est avérée plus difficile, puisque les visites se sont déroulées à retenues pleines. Trois cas ont été rencontrés :

1. *couverture avec des blocs au maximum pluri-décimétriques (3 retenues sur 6) ;*
2. *partie supérieure du parement végétalisé, relayée par des rochers décimétriques à pluri-décimétriques sur la risberme (2 retenues sur 6) ;*
3. *partie supérieure du parement végétalisé, relayée par des gabions en partie médiane, puis par des pavés autobloquant sur la risberme (1 retenues sur 6).*

En France, les configurations sont plus variées. L'enquête met en évidence la prédominance du recouvrement total des parements et de la cuvette (55%) et du recouvrement partiel en partie supérieure sur risberme (27%). Une retenue avec recouvrement sur l'ensemble du parement amont (9%) et une retenue non recouverte (9%) ont également été enquêtées (Figure 4c).

FIGURA 4
a) Copertura nella parte superiore su berma;
b) Guaina geotessile;
c) Assenza di copertura di protezione.

FIGURE 4
a) Recouvrement en partie supérieure sur risberme ; b) "Chaussette" de géotextile ; c) Absence de structure de protection.

La struttura tra la geomembrana e i materiali superiori è praticamente sempre la stessa: di solito è costituita da un geotessile protettivo compreso tra 700 e 1200 g/m², associato o meno a un sistema di aggancio al terreno. I materiali impiegati sono molto eterogenei, del tipo 300/500 mm per i blocchi più grossi e 0/50 mm per i più piccoli.

Anomalie riscontrate

Sono stati evidenziati sul campo diversi tipi di danni alla geomembrana. Le problematiche di punzonamenti e di perforazione della struttura di impermeabilizzazione sono tra le più frequenti (almeno 6 sulle 11 ritenute italiane). Questi fenomeni, anche se possono essere aggravati da condizioni meteorologiche estreme in inverno, sono per lo più da attribuirsi alla presenza di una base aggressiva.
Il rilevamento di queste anomalie è facilitato quando la geomembrana è nuda o parzialmente protetta: la copertura totale, spesso privilegiata sulle opere di ritenuta francesi, non ha messo in evidenza danni o rottura della geomembrana.

Analisi dei materiali sul sito

Inizialmente era previsto il prelievo di geomembrane da vari siti. Durante le indagini sul campo, è stata osservata una certa reticenza da parte dei gestori delle opere di ritenuta ad autorizzare un prelievo di geomembrana sana, anche se una riparazione era prevista. Inoltre, quest'operazione di prelievo è possibile solo se la geomembrana non è ricoperta. Alla fine, grazie alla collaborazione italo-francese e a un'operazione di restauro dell'in-

La structure entre la géomembrane et les matériaux supérieurs est pratiquement toujours la même : elle est généralement constituée d'un géotextile de protection de 700 à 1200 g/m², associé ou non à un système d'accroche des terres. Les matériaux mis en œuvre sont quant à eux très hétérogènes, de type 300/500 mm pour les blocs les plus gros à 0/50 mm pour les plus petits.

Désordres mis en évidence

Différents types d'endommagements de la géomembrane ont pu être constatés sur le terrain. Les problématiques de poinçonnement et de perforation de la structure d'étanchéité figurent parmi les plus récurrentes (au moins 6 des 11 retenues italiennes). Ces phénomènes, bien que pouvant être aggravés par des conditions météorologiques extrêmes en hiver, sont le plus souvent attribués à la présence d'un support agressif.
La détection de ces désordres est facilitée en cas de géomembrane nue ou partiellement protégée : le recouvrement total souvent privilégié sur les ouvrages français n'a pas permis d'observer d'endommagement ou de rupture de la géomembrane.

Analyse de matériaux de site

Il avait été envisagé des prélèvements de géomembranes sur plusieurs sites. Au cours de l'enquête de terrain, il a été observé une certaine réticence de la part des gestionnaires d'ouvrages à venir prélever de la géomembrane saine même si une réparation était envisagée. De plus, cette opération de prélèvement n'est pratiquement possible que si la

sieme del DEG della ritenuta di Gran Testa in Valle d'Aosta, si è potuto prelevare un campione di geomembrana. Sono state effettuate in laboratorio analisi fisiche (densità e spessore) e meccaniche (resistenza alla trazione). Per poter valutare la durabilità del prodotto dopo alcuni anni di servizio, è necessario il confronto di queste grandezze misurate con quelle del prodotto al momento della sua installazione sul sito. Nonostante gli sforzi fatti, non è stato possibile ottenere queste informazioni, il che non ci consente di ottenere conclusioni obiettive sulla durabilità di questa geomembrana dopo alcuni anni di servizio.

Caratterizzazione della durabilità dei DEG - Studio dello sfondamento per la progettazione dei DEG

Introduzione

Durante l'indagine sul campo (cfr. *Azione 2.1*), è stato osservato che il punzonamento, che corrisponde a un fenomeno fisico secondo il quale un corpo ne penetra un altro

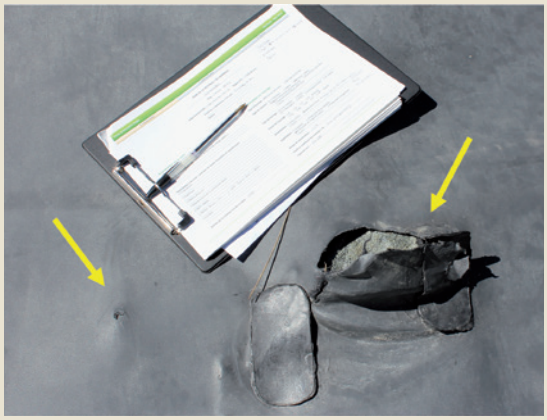


FIGURA 5
Punzonamento (a sinistra) e perforazione (a destra) di una geomembrana.

FIGURE 5
Poinçonnement (à gauche) et perforation (à droite) d'une géomembran.

géomembrane est non recouverte. En définitive, grâce à la collaboration franco-italienne et en profitant d'une opération de restauration de l'ensemble du DEG de la retenue de Gran Testa en Vallée d'Aoste, un échantillon de géomembrane a pu être prélevé. Des analyses physiques (masse surfacique et épaisseur) et mécanique (résistance à la traction) ont été réalisé en laboratoire. Pour juger de la durabilité du produit après plusieurs années de service, la comparaison de ces grandeurs mesurées avec celles du produit lors de son installation sur site est nécessaire. Malgré les efforts menés, il n'a pas été possible d'obtenir ces informations ce qui ne permet pas de conclure de manière objective sur la durabilité de cette géomembrane après plusieurs années de service.

Caractérisation de la durabilité des DEG - Étude du poinçonnement pour la conception des DEG

Introduction

Il a été observé lors de l'enquête de terrain (cf. Action 2.1*) que le poinçonnement, qui correspond à un phénomène physique par lequel un corps en pénètre un autre en le*

deformandolo, può portare alla perforazione della geomembrana e quindi alla rottura localizzata dell'impermeabilizzazione. Nel caso degli sbarramenti analizzati nel progetto RISBA, ci possono essere sollecitazioni di punzonamento della geomembrana, o sottostanti (provenienti dallo strato di forma granulare) oppure sovrastanti (provenienti dalla struttura protettiva). Nonostante l'analisi di questa problematica sia fondamentale nella concezione dei DEG, non esiste attualmente né metodo analitico né metodo empirico in grado di dimensionare una struttura protettiva della geomembrana nei confronti delle sollecitazioni di punzonamento. Nella guida «Retenues d'altitude» (Peyras & Meriaux, 2009), viene indicato che i geotessili protettivi "devono essere sufficientemente spessi (densità tra 500 e 1000 g/m² in generale)" ma questa raccomandazione non consente di dimensionare un prodotto per la funzione protettiva.
Esiste attualmente un esperimento, in base alla normativa XP P 84-523 (Afnor, 2008), che permette di definire la pressione idrostatica necessaria alla perforazione di un DEG poggiato su un supporto punzonante di tipo granulare. Questa prova a breve termine forisce una pressione idrostatica di rottura. Tuttavia, i geosintetici sono materiali a base di polimeri sintetici che quando sono sottoposti a sforzi meccanici presentano generalmente un comportamento in funzione del tempo (comportamento di tipo deformazione viscosa). Così il fenomeno del punzonamento può, nel tempo, mettere in pericolo la durabilità della geomembrana che garantisce da sola l'impermeabilizzazione del bacino. Inoltre, una volta superato il campo elastico, i geosintetici possono presentare un campo di deformazione plastica significativo: sotto sforzo costante, si possono osservare deformazioni significative prima di giungere alla rottura. L'esperimento in base alla normativa XP P 84-523 (Afnor, 2008), che determina solo una pressione finale di rottura della geomembrana, dunque non consente di giustificare in maniera esauriente la qualità della

déformant, pouvait conduire à la perforation de la géomembrane et donc à la rupture localisée de l'étanchéité. Dans le cas des barrages considérés dans le projet RISBA, des sollicitations de poinçonnement de la géomembrane peuvent être sous-jacentes (issues de la couche de forme granulaire) ou bien sus-jacentes (issues de la structure de protection). Bien que l'analyse de cette problématique soit essentielle dans la conception des DEG, il n'existe actuellement ni de méthode analytique ni de méthode empirique permettant de dimensionner une structure de protection de la géomembrane vis-à-vis des sollicitations de poinçonnement. Le guide « Retenues d'altitude » (Peyras et Meriaux, 2009) écrit que les géotextiles de protection « doivent être suffisamment épais (masse surfacique de 500 à 1000 g/m² en général) » mais cette recommandation ne permet pas de dimensionner un produit pour la fonction protection.
Il existe actuellement un essai, selon la norme XP P 84-523 (Afnor, 2008), qui permet de déterminer la pression hydrostatique nécessaire au percement d'un DEG posé sur un support poinçonnant de type granulat. Cet essai court terme donne une pression hydrostatique de rupture. Cependant, les géosynthétiques sont des matériaux à base de polymère synthétique et présentent généralement un comportement fonction du temps quand ils sont soumis à des efforts mécaniques (comportement de type fluage). Ainsi, le phénomène de poinçonnement peut, au cours du temps, mettre en péril la durabilité de la géomembrane qui assure à elle seule l'étanchéité de la retenue. De plus, une fois le domaine élastique dépassé, les géosynthétiques peuvent présenter un domaine d'écoulement plastique significatif, c'est-à-dire que, sous effort constant, des déformations significatives peuvent être observées avant que la rupture ne soit atteinte. En définitive, l'essai selon la norme XP P 84-523 (Afnor, 2008), qui ne détermine qu'une pression finale de rupture de la géomembrane, ne permet pas de justifier de manière exhaustive la qualité d'un géotextile

protezione. Infatti, la geomembrana può aver perso la sua elasticità ed essere così danneggiata in maniera non accettabile molto prima della rottura. In termini ben più pratici, per giustificare l'efficacia di un geotessile protettivo, bisogna assicurarsi che, anche se le condizioni di servizio (pressione idrostatica dovuta all'altezza dell'acqua) non inducono una rottura a breve termine, non possano provocare neppure a lungo termine delle deformazioni irreversibili pregiudicabili per la durabilità della geomembrana.
In questa parte dell'*Azione 2.4a* del progetto RISBA, è stato sviluppato un dispositivo sperimentale per simulare il comportamento dei prodotti geosintetici e naturali in condizioni di servizio. Basandosi su questo dispositivo, è stato sviluppato anche un protocollo per giudicare se il geotessile protettivo sia sufficiente oppure no (per la funzione protettiva della geomembrana). Infine, il dispositivo e il protocollo sperimentale sono stati utilizzati per confrontare diversi prodotti geotessili con una geomembrana e un supporto granulare. Da questo programma sperimentale vengono tratte alcune conclusioni pratiche, utili per la progettazione degli invasi collinari o di montagna.
Nel presente studio, non vengono analizzati i fenomeni fisico-chimici (temperatura, pH, ecc.) che possono anch'essi alterare le proprietà fisiche e meccaniche della geomembrana, pregiudicandone così la durabilità.

Protocollo sperimentale per la progettazione di un geotessile protettivo

Questo protocollo è stato sviluppato per progettare un geotessile protettivo della geomembrana nei confronti delle sollecitazioni meccaniche di tipo punzonamento provenienti dagli strati sottostanti, cioè lo strato di drenaggio o lo strato di fondazione in materiali granulari.

de protection. En effet, la géomembrane peut avoir perdu son élasticité et ainsi être endommagée de façon inacceptable bien avant la rupture. En des termes plus pratiques, pour justifier l'efficacité d'un géotextile de protection, il faut s'assurer que, même si les conditions de service (pression hydrostatique due à la hauteur d'eau) ne conduisent pas la rupture à court terme, elles n'induisent pas non plus à long terme des déformations irréversibles qui pourraient être préjudiciables pour la durabilité de la géomembrane.
*Dans cette partie de l'*Action 2.4a *du projet, un dispositif expérimental a été développé pour simuler le comportement des produits géosynthétiques et naturels dans des conditions de service. En se basant sur ce dispositif, il a également été développé un protocole pour justifier le géotextile de protection comme suffisant ou non (pour la fonction protection de la géomembrane). Enfin, le dispositif associé au protocole expérimental a été utilisé pour comparer différents produits géotextiles avec une géomembrane et un support granulaire. De ce programme expérimental, il ressort plusieurs conclusions pratiques utiles pour la conception des retenues collinaires ou d'altitudes.*
Dans la présente étude, il n'est pas investigué les phénomènes physico-chimiques (température, pH, etc.) qui peuvent également altérer les propriétés physiques et mécaniques de la géomembrane et ainsi affecter sa durabilité.

Protocole expérimental pour la justification d'un géotextile de protection

Ce protocole a été mis au point pour justifier un géotextile de protection de la géomembrane vis-à-vis des sollicitations mécaniques de type poinçonnement venant des couches sous-jacentes, c'est-à-dire la couche de drainage ou la couche de forme en

Esso non è quindi adatto per la progettazione di un geotessile protettivo sovrastante la geomembrana in presenza di strati granulari superiori.
Questo protocollo sperimentale è stato elaborato per riprodurre al meglio le condizioni *in situ*: richiede quindi l'impiego dei diversi materiali del sito (o di materiali equivalenti, a patto che l'equivalenza sia comprovata) e la conoscenza dell'altezza massimale dell'acqua dello sbarramento. Esso, inoltre, tiene conto del comportamento differito nel tempo (deformazione differita) dei prodotti geosintetici; tuttavia non coinvolge variazioni termiche o fisico-chimiche (per esempio il pH, la concentrazione di ossigeno, ecc.), nonostante queste ultime possano modificare il comportamento dei geosintetici.
Il principio è quello di sottoporre, in una cella, una pressione idraulica costante a un DEG che comprende una geomembrana che sovrasta un geotessile protettivo appoggiato su un supporto punzonante (esempi presentati nelle Figure 6, 7 e 8). La pressione viene applicata per un periodo preventivamente fissato. Alla fine di quest'ultimo, il DEG viene tolto dalla cella e i materiali vengono analizzati visivamente e meccanicamente a seconda delle descrizioni presentate qui di seguito. La cella utilizzata in quest'indagine è composta da due elementi distinti che possono essere accoppiati. Ogni elemento della cella ha una cavità il cui diametro utile è uguale a 300 mm (Figura 9).
L'impermeabilizzazione è garantita al livello della superficie del DEG. Per prendere in considerazione la variabilità sperimentale, viene raccomandato di ripetere questa procedura per cinque volte con campioni vergini di geomembrana e di geotessile e con uno stato di pietrisco diverso.
Durante lo smontaggio della cella, i prodotti geosintetici sono tolti e analizzati visivamente. Ogni campione di geomembrana viene minuziosamente analizzato per rilevare la presenza di una perforazione. Se viene scoperta una perforazione, il geotessile protettivo

matériaux granulaires. Il n'est donc pas adapté pour la justification d'un géotextile de protection sus-jacent à la géomembrane dans le cas de la présence de couches granulaires supérieures.
Ce protocole expérimental a été élaboré pour reproduire au mieux les conditions in situ. *Il requiert ainsi l'emploi des différents matériaux du site (ou des équivalents sous réserve que l'équivalence soit démontrée) et la connaissance de la hauteur d'eau maximale de la retenue. Il prend en compte le comportement différé dans le temps (fluage) des produits géosynthétiques. Cependant, il ne fait pas intervenir des variations thermiques ou physico-chimiques (par exemple le pH, la concentration en oxygène, etc.) bien que ces dernières peuvent modifier le comportement des géosynthétiques.*
Le principe est de soumettre dans une cellule une pression hydraulique constante sur un DEG comportant notamment une géomembrane surmontant un géotextile de protection reposant sur un support poinçonnant (exemples présentés aux Figure 6, Figure 7 et Figure 8). La pression est appliquée pendant une durée préalablement fixée. Au terme de cette dernière, le DEG est retiré de la cellule et les matériaux sont analysés visuellement et mécaniquement selon les descriptions présentées ci-après. La cellule utilisée dans cette étude est composée de deux éléments distincts pouvant être solidarisés. Chaque élément de la cellule comporte une cavité dont le diamètre utile est égal à 300 mm (Figure 9). L'étanchéité est assurée au niveau des surfaces de serrage du DEG. Pour prendre en considération la variabilité expérimentale, il est recommandé de répéter cinq fois cette procédure avec des éprouvettes vierges de géomembrane et géotextile et un état de surface du granulat différent.
Lors du démontage de la cellule, les produits géosynthétiques sont retirés puis analysés visuellement. Chaque éprouvette de géomembrane est minutieusement analysée

FIGURA 6
Esempio di strato granulare sottostante ai prodotti geosintetici del DEG.

FIGURE 6
Exemple de couche granulaire sous-jacente aux produits géosynthétiques du DEG.

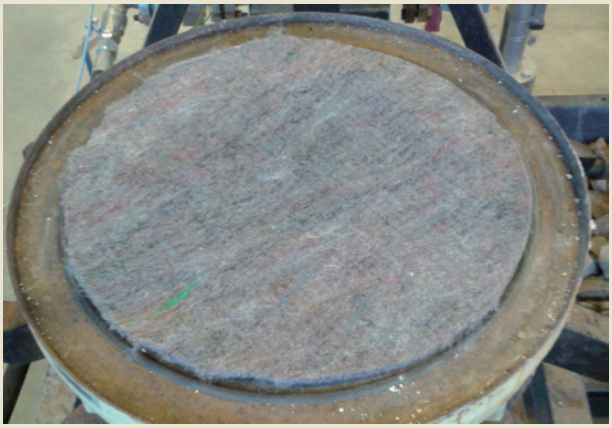


FIGURA 7
Esempio di geotessile di protezione (anti-punzonamento) collocato al di sopra di uno strato granulare (vedere Figura 6).

FIGURE 7
Exemple de géotextile de protection (anti-poinçonnant) mis en place au-dessus d'une couche granulaire (voir Figure 6).

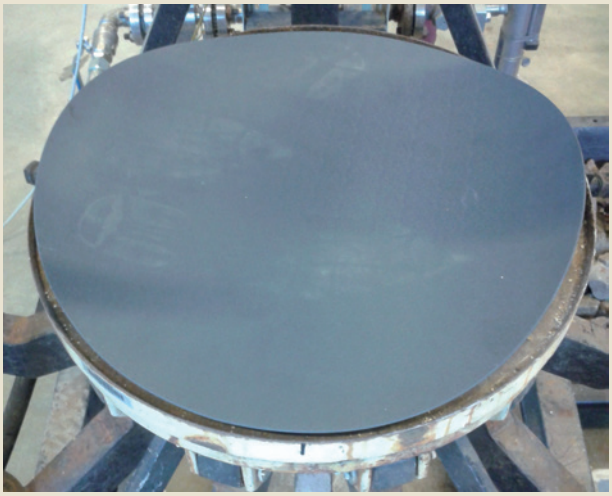
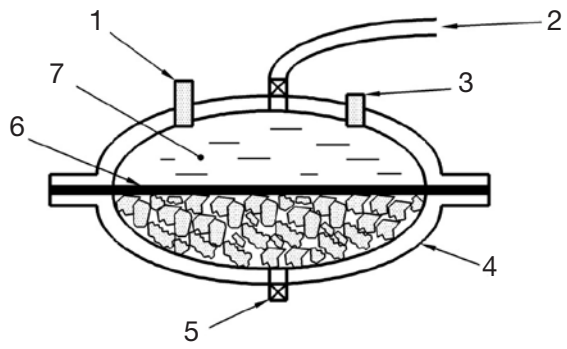


FIGURA 8
Esempio di geomembrana collocata al di sopra di un geotessile di protezione e di uno strato granulare (vedere Figure 6 e 7)

FIGURE 8
Exemple de géomembrane mise en place au-dessus d'un géotextile de protection et d'une couche granulaire (voir Figures 6 et 7).

è automaticamente considerato insufficiente. Vengono quindi fatte fotografie di tutti i materiali sottoposti a test (esempi presentati nelle Figure 10 e 11).
Le proprietà di resistenza interna di una geomembrana che ha subito sollecitazioni di punzonamento possono risultare alterate. Se è così, si può concludere che è stata danneggiata, cosa non accettabile. Immediatamente dopo il ritiro del campione di geomembrana dalla cella sotto pressione idrostatica, la resistenza della geomembrana viene definita in base alla prova di resistenza alla pressione (Figura 12) della normativa NF EN 14151 (Afnor, 2010). In base a questa normativa, cinque campioni devono essere sottoposti a prova. Così, i cinque campioni sollecitati nella cella sotto pressione idrostatica subiranno questa prova.
Questa definisce la sollecitazione massimale σ_{max} e la deformazione ε_{max} alla rottura. Questi valori vengono quindi confrontati con quelli ottenuti a partire dalla stessa geomembrana vergine corrispondente alle caratteristiche intrinseche del prodotto. Per tener conto dell'eterogeneità dei prodotti, il confronto va effettuato considerando il valore σ_{max} o ε_{max} del prodotto vergine dal quale è stato detratto lo scarto tipo moltiplicato per il coefficiente 1,4.



Légende

1 *Capteur de pression*
2 *Arrivée eau*
3 *Purge*
4 *Cuve*
5 *Détection des fuites*
6 *DEG*
7 *Eau*

FIGURA 9
Schema della cella sotto pressione idrostatica che permette di simulare le sollecitazioni di punzonamento di un supporto granulare sotto una geomembrana sintetica caricata da una pressione idrostatica suggiacente - schema estratto dalla norma XP P 84-523 (Afnor, 2008).

FIGURE 9
Schéma de la cellule sous pression hydrostatique permettant de simuler les sollicitations de poinçonnement d'un support granulaire sous une géomembrane chargée par une pression hydrostatique sus-jacente - schéma tiré de la norme XP P 84-523 (Afnor, 2008).

pour détecter la présence de percement. Si un percement est observé, le géotextile de protection est automatiquement considéré comme insuffisant. Des photos de chaque matériau testé sont prises (exemples présentés aux Figure 10 et Figure 11).
Une géomembrane qui a subi des sollicitations de poinçonnement peut voir ses propriétés de résistance interne altérées. Si c'est le cas, il peut être conclu qu'elle a été endommagée par les sollicitations de poinçonnement ce qui n'est pas acceptable. Immédiatement après l'enlèvement de l'éprouvette de géomembrane de la cellule sous pression hydrostatique, la résistance de la géomembrane est déterminée selon l'essai d'éclatement (Figure 12). Selon cette norme, cinq éprouvettes doivent être soumises à essai. Ainsi, les cinq éprouvettes sollicitées dans la cellule sous pression hydrostatique subiront cet essai d'éclatement.
Ce dernier détermine la contrainte maximale σ_{max} et la déformation ε_{max} à la rupture. Ces valeurs sont alors comparées à celles obtenues à partir de la même géomembrane vierge correspondant donc aux caractéristiques intrinsèques du produit. Pour tenir compte de l'hétérogénéité des produits, la comparaison se fait en considérant la valeur σ_{max} ou ε_{max} du produit vierge auquel l'écart-type multiplié par un coefficient 1,4 a été retranché. Si

Se il valore σ_{max} o ε_{max} della geomembrana sollecitata non è pari o superiore a quello descritto precedentemente, il geotessile protettivo è considerato insufficiente per garantire la sua funzione protettiva. In caso contrario, il geotessile viene considerato sufficiente e l'efficacia della protezione può essere qualitativamente definita come "accettabile" o "corretta" sulla base delle analisi visive sopra descritte.

Conclusione sul protocollo sperimentale per la determinazione di un geotessile protettivo

Il protocollo sperimentale sopra descritto consente, utilizzando i materiali reali, di determinare un geotessile protettivo sia sufficiente o meno a garantire la funzione protettiva della geomembrana sotto carico idrostatico nei confronti delle sollecitazioni di punzonamento provenienti da uno strato granulare sovrastante. Questo protocollo si svolge in tre fasi distinte: la prima riproduce in modo sperimentale le sollecitazioni di punzonamento che si verificano in condizioni di servizio. La seconda corrisponde a una analisi visiva dei prodotti sollecitati. L'ultima fase consente di giudicare quantitativamente la funzione protettiva del geotessile, confrontando le deformazioni massimali prima della rottura della geomembrana che è stata sollecitata con quella della stessa geomembrana che però

FIGURA 10
Esempio di un geotessile di protezione (vista del lato in contatto con i granulati) che ha subito sollecitazioni di sfondamento.

FIGURE 10
Exemple d'un géotextile de protection (vue de la face en contact avec les granulats) qui a subi des sollicitations de poinçonnement.

la valeur σ_{max} ou ε_{max} de la géomembrane sollicitée est inférieure strictement à celle décrite précédemment, le géotextile de protection est jugé insuffisant pour assurer la fonction protection. Dans le cas contraire, le géotextile est considéré comme suffisant et l'efficacité de la protection peut être appréciée qualitativement comme « acceptable » ou « correcte » en se basant sur les analyses visuelles décrites ci-dessus.

Conclusion sur le protocole expérimental pour la justification d'un géotextile de protection

Le protocole expérimental décrit ci-dessus permet, en utilisant les matériaux réels, de justifier un géotextile de protection comme suffisant ou non pour assurer la fonction protection de la géomembrane sous chargement hydrostatique vis-à-vis des sollicitations de poinçonnement issues d'une couche granulaire sus-jacente. Ce protocole se déroule en trois phases distinctes : la première est destinée à reproduire expérimentalement les sollicitations de poinçonnement qui ont lieu dans des conditions de service. La seconde correspond à une analyse visuelle des produits sollicités. La dernière phase permet de juger quantitativement la fonction protection du géotextile en comparant les déformations maximales avant rupture de la géomembrane qui a été sollicitée avec

non è stata sollecitata (proprietà intrinseche). Le deformazioni massimali prima della rottura vengono misurate con la prova di resistenza alla pressione della normativa NF EN 14151 (Afnor, 2010).

Applicazione del protocollo di prova a una campagna sperimentale

L'obiettivo di questa campagna sperimentale, oltre a dimostrare la pertinenza del protocollo sperimentale presentato sopra, è quello di definire delle raccomandazioni pratiche per la progettazione dei DEG in relazione alla problematica del punzonamento.
È stato scelto di rappresentare un DEG composto in maniera classica, come è stato osservato sugli sbarramenti trattati nel progetto RISBA, dall'alto in basso da:

- una geomembrana;
- un geotessile protettivo;
- uno strato di fondazione in materiale granulare.

In questo studio è stata presa in considerazione un'unica geomembrana. Si tratta di una geomembrana in PVC-P con uno spessore di 2 mm. Questo tipo di geomembrana viene

FIGURA 11
Esempio di una geomembrana (vista del lato in contatto con l'acqua) che ha subito delle sollecitazioni di punzonamento.

FIGURE 11
Exemple d'une géomembrane (vue de la face en contact avec l'eau) qui a subi des sollicitations de poinçonnement.

celle de la même géomembrane mais qui n'a pas été sollicitée (propriétés intrinsèques). Les déformations maximales avant rupture sont mesurées par l'essai d'éclatement de la norme NF EN 14151 (Afnor, 2010).

Application du protocole d'essai à une campagne expérimentale

L'objectif de cette campagne expérimentale, en plus de démontrer la pertinence du protocole expérimental présenté ci-dessus, est d'établir des recommandations pratiques pour la conception des DEG en rapport avec la problématique du poinçonnement.
Il a été choisi de représenter un DEG constitué classiquement, comme observé sur les barrages traités dans le projet RISBA, de haut en bas par :

- *une géomembrane ;*
- *un géotextile de protection ;*
- *une couche de forme en matériau granulaire.*

Une seule géomembrane a été considérée dans cette étude. Il s'agit d'une géomembrane de nature PVC-P d'épaisseur 2 mm. Ce type de géomembrane est classiquement

riscontrato nelle ritenute collinari e di montagna, come ha dimostrato l'indagine sul campo presentata nella prima parte di quest'*Azione 2.4a*. La prova di resistenza alla pressione secondo la normativa NF EN 14151 (Afnor, 2010) applicata a questa geomembrana ha permesso di definire la sollecitazione e la deformazione massimale, caratteristiche intrinseche del prodotto (Tabella 2).
In questo studio sono stati selezionati vari geotessili non-tessuto agugliati (Tabella 1)per garantire la funzione protettiva della geomembrana sopra descritta. Nonostante siano tutti non-tessuti agugliati, i geotessili differiscono per la natura delle fibre polipropilene, vergini o riciclate, e per densità, compresa tra 800 e 1000 g/m². Il geotessile A è illustrato nelle Figure 7 e 10, mentre un esempio di geotessile in fibre polipropilene vergini viene presentato nella Figura 13.
Il materiale granulare dello strato di fondazione presenta un fuso granulometrico compreso tra 0 e 31,5 mm (Figura 14). Quest'ultimo è stato scelto perché lo si ritrova in varie opere di ritenuta visitate nell'ambito di questo progetto di ricerca, anche se la guida « Retenues d'altitude » (Peyras et Mériaux, 2009) raccomanda un fuso granulometrico per lo strato di fondazione compreso tra 0 e 20 mm.

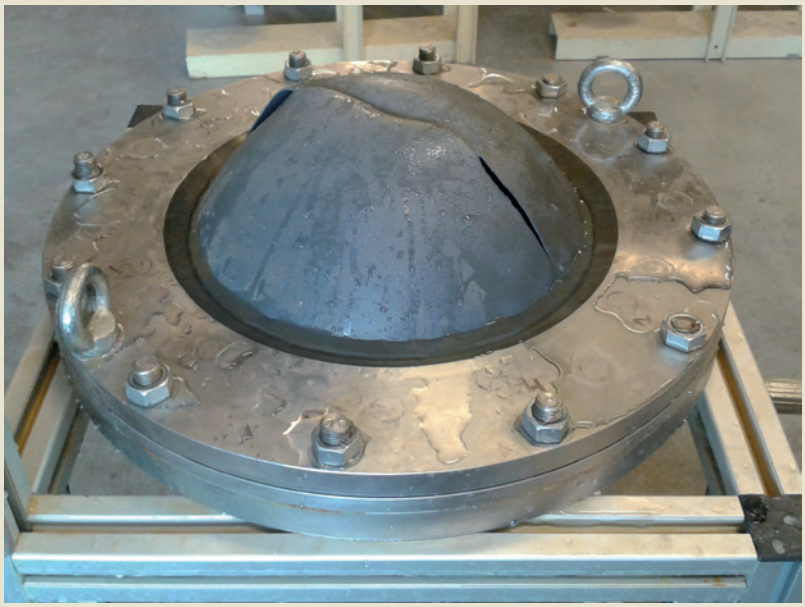


FIGURA 12
Esempio di un campione di geomembrana alla fine di una prova di sfondamento secondo la norma NF EN 14151 (Afnor, 2010).

FIGURE 12
Exemple d'une éprouvette de géomembrane à la fin d'un essai d'éclatement selon la norme NF EN 14151 (Afnor, 2010).

rencontré dans les retenues collinaires et d'altitude comme l'a montré l'enquête de retour d'expérience présentée en première partie de cette Action 2.4a. *L'essai d'éclatement selon la norme NF EN 14151 (Afnor, 2010) appliqué à cette géomembrane a permis de déterminer la contrainte et la déformation maximale, caractéristiques intrinsèques du produit (Tableau 2).*
Plusieurs géotextiles non-tissés aiguilletés (Tableau 1) ont été sélectionnés dans cette étude pour assurer la fonction protection de la géomembrane décrite ci-dessus. Bien qu'ils soient tous de nature non-tissés aiguilletés, ils diffèrent par la nature des fibres polypropylène, vierges ou recyclées, et par leur masse surfacique, allant de 800 à 1000 g/m². Le géotextile A est illustré aux Figure 7 et Figure 10 et un exemple d'un échantillon de géotextile en fibres polypropylène vierges est donné à la Figure 13.
Le matériau granulaire de la couche de forme présente une étendue granulométrique comprise entre 0 et 31,5 mm (Figure 14). Cette dernière a été choisie car elle se retrouve dans plusieurs ouvrages visités dans le cadre de ce projet de recherche, bien que le guide « Retenues d'altitude » (Peyras et Mériaux, 2009) préconise une étendue granulométrique pour la couche de forme comprise entre 0 et 20 mm.

Una fotografia dello stato di superficie del pietrisco messo nella cella di pressione idrostatica è presentata nella Figura 7. Durante la compattazione di questo materiale granulare nella cella, è stata osservata una migrazione delle particelle fini verso il basso, il che consente di concludere che, nonostante sia stato utilizzato un pietrisco di 0-31,5 mm, la granulometria dello stato di superficie ottenuto si avvicina a un pietrisco di 5-31,5 mm per la segregazione delle particelle fini.
Il protocollo sperimentale sopra descritto è stato applicato ai quattro DEG costituiti dalla geomembrana in PVC-P, dai geotessili A, B, C e D e dallo strato di fondazione con uno stato di superficie di portata granulometrica vicina ai 5-31,5 mm. Una pressione idrostatica uguale a 1,75 bar è stata applicata per quattro giorni e la temperatura della prova è stata mantenuta a 20°C costanti. La scelta della pressione idrostatica è stata fatta in modo da essere rappresentativa delle opere di ritenuta investigate.
Le deformazioni massimali ε_{max} delle geomembrane protette rispettivamente dai geotessili A, B, C et D sono presentate nella Tabella 2. Qualunque sia il geotessile protettivo, non è

Geotessile / *Géotextile*	Natura delle fibre / *Nature des fibres*	Massa superficiale (g/m²)* / *Masse surfacique (g/m²)**
A	riciclate / recyclées	777
B	nuove / vierges	736
C	nuove / vierges	869
D	nuove / vierges	1076

*misurata secondo la norme / *mesurée selon la norme NF EN ISO 9864 (AFNOR 2005)*

TABELLA 1
Geotessili non-tessuto agugliati, utilizzati nell'ambito di questo studio.

TABLEAU 1
Géotextiles non-tissés aiguilletés utilisés dans le cadre de cette étude.

Geomembrana / *Géomembrane*	Deformazione massimale alla rottura ε_{max} (%) / *Déformation maximale à la rupture* ε_{max} (%)	Scarto tipo / Ecart-type (%)
Vierge (moyenne sur 5 éprouvettes)	*68,6*	*2,5*
A (1 éprouvette)	*55,2*	*n/a*
B (1 éprouvette)	*62,8*	*n/a*
C (1 éprouvette)	*72,5*	*n/a*
D (1 éprouvette)	*71,4*	*n/a*

TABELLA 2
Valori delle deformazioni massimali ottenute per le geomembrane sollecitate mediante punzonamento e protette dai geotessili A,B, C e D (vedere Tabella 1).

TABLEAU 2
Valeurs des déformations maximales obtenues pour les géomembranes sollicitées par poinçonnement et protégées par les géotextiles A, B, C et D (voir Tableau 1).

Une photographie de l'état de surface du granulat mis en place dans la cellule de pression hydrostatique est représentée à la Figure 6. Lors du compactage de ce matériau granulaire dans la cellule, il a été observé une migration des fines vers le bas, ce qui permet de conclure que, bien qu'un granulat 0-31,5 mm a été utilisé, la granulométrie de l'état de surface obtenu se rapproche d'un granulat 5-31,5 mm du fait de la ségrégation des fines.
Le protocole expérimental décrit ci-dessus a été appliqué aux quatre DEG constitués par la géomembrane en PVC-P, par les géotextiles A, B, C et D et par la couche de forme ayant un état de surface d'étendue granulométrique proche de 5-31,5 mm. Une pression hydrostatique égale à 1,75 bar a été appliquée durant quatre jours et la température de l'essai a été maintenue constante à 20°C. Le choix de la pression hydrostatique a été fait pour être représentatif des ouvrages investigués.
Les déformations maximales ε_{max} des géomembranes protégées respectivement par les géotextiles A, B, C et D sont présentées dans le Tableau 2. Quel que soit le géotextile de protection, il n'a pas été observé de modification de la contrainte maximale d'éclatement

stata osservata nessuna modifica della sollecitazione massimale di scoppio σ_{max} rispetto a quella del prodotto vergine. Dai risultati ottenuti da questa campagna sperimentale, risulta che il geotessile A in fibre riciclate si è rivelato decisamente insufficiente per garantire la funzione protettiva della geomembrana (Figura 15), a differenza dei geotessili in fibre vergini, anche se il geotessile B ha una densità inferiore. Tuttavia, anche se è stato osservato che il geotessile B garantiva una protezione migliore rispetto al geotessile A (Tabella 2), rimane insufficiente a evitare qualsiasi danno fisico alla geomembrana sottoposta a esperimento. Per le geomembrane protette dai geotessili C e D, si osserva nella Tabella 2 che la deformazione massimale alla rottura non ha subito nessuna diminuzione. Così, nelle condizioni sottoposte a test, solo i geotessili C e D composti da fibre polipropilene vergini e la cui densità è superiore ai 1000 g/m² hanno permesso di garantire la funzione protettiva in modo sufficiente. Tuttavia, anche se la prova di resistenza alla pressione ha dimostrato che la resistenza meccanica della geomembrana non è stata alterata, su quest'ultima sono state osservate visivamente delle deformazioni (esempio presentato nella Figura 16).
Così viene chiaramente evidenziato che, da sola, la densità di un geotessile protettivo non può fungere da unico parametro dimensionante. Inoltre, viene anche dimostrato che la

FIGURA 13
Illustrazione di un geotessile non-tessuto trapuntato in fibre in polipropilene vergini per la funzione di protezione.

FIGURE 13
Illustration d'un géotextile non-tissé aiguilleté en fibres polypropylène vierges pour la fonction protection.

σ_{max} par rapport à celle du produit vierge. Des résultats obtenus de cette campagne expérimentale, il ressort que le géotextile A en fibres recyclés s'est avéré nettement insuffisant pour assurer la fonction protection de la géomembrane (Figure 15) à la différence des géotextiles en fibres vierges, même si le géotextile B a une masse surfacique inférieure. Cependant, bien qu'il ait été observé que le géotextile B assurait une meilleure protection que le géotextile A (Tableau 2), il reste insuffisant pour éviter tout endommagement physique de la géomembrane testée. Pour les géomembranes protégées par les géotextiles C et D, il est observé dans le Tableau 2 que la déformation maximale à la rupture n'a subi aucune baisse. Ainsi, dans les conditions testées, seuls les géotextiles C et D composés de fibres polypropylène vierges et dont la masse surfacique est supérieure à 1000 g/m² ont permis d'assurer la fonction protection de façon suffisante. Cependant, même si l'essai d'éclatement a montré que la résistance mécanique de la géomembrane n'a pas été altérée, il a été observé visuellement des déformations sur cette dernière (exemple donné à la Figure 16).
Ainsi, il est ici clairement mis en évidence que la masse surfacique seule d'un géotextile de protection ne peut pas servir comme seul paramètre dimensionnant. De plus, il

natura delle fibre, riciclate o vergini, può avere un impatto significativo sulla qualità della protezione di un geotessile.
In conclusione, il programma sperimentale effettuato ha dimostrato che il protocollo proposto per progettare un geotessile protettivo permette di discriminare i vari prodotti, scartando quelli insufficienti a garantire una funzione protettiva. Attualmente, in assenza di un metodo analitico che consenta di dimensionare un geotessile protettivo partendo dalle sue proprie caratteristiche e da quelle del DEG nel suo insieme, il protocollo sperimentale sviluppato nell'ambito di questo programma di ricerca rimane l'unico mezzo per giustificare l'efficacia della funzione protettiva del geotessile. Tuttavia, questo programma non poteva risultare esauriente per la diversità dei prodotti geosintetici, geomembrane e geotessili protettivi e per la natura dei materiali granulari utilizzati come strato di drenaggio o di fondazione della struttura di supporto.

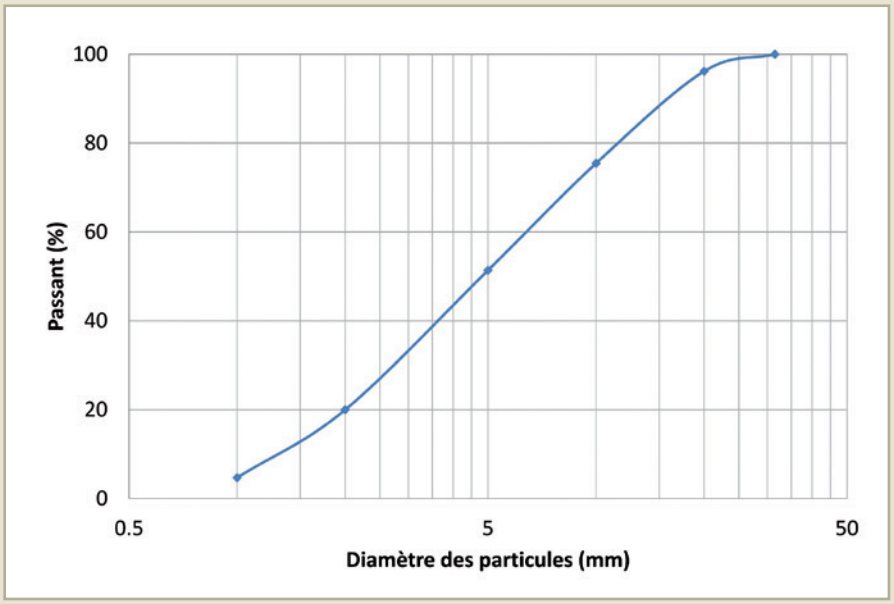


FIGURA 14
Curva granulometrica del granulato considerato.

FIGURE 14
Courbe granulométrique du granulat considéré.

est également montré la nature des fibres, recyclés ou vierges, peut avoir un impact significatif sur la qualité de la protection d'un géotextile.
En conclusion, le programme expérimental mené a montré que le protocole proposé pour justifier un géotextile de protection permet de discriminer les différents produits en écartant ceux insuffisants pour assurer la fonction protection. Actuellement, en l'absence de méthode analytique permettant de dimensionner un géotextile de protection à partir de ses caractéristiques propres et de celles de l'ensemble du DEG, le protocole expérimental développé dans le cadre de ce programme de recherche reste le seul moyen pour justifier l'efficacité de la fonction protection du géotextile. Cependant, ce programme ne pouvait pas être exhaustif de la diversité des produits géosynthétiques, géomembranes et géotextiles de protection et de la nature des matériaux granulaires utilisés en couche de drainage ou de forme de la structure support.

Conclusioni

L'obiettivo di quest'azione era quello di definire meglio la durabilità dei dispositivi di tenuta idraulica con geomembrane (DEG) degli invasi collinari e di montagna.
L'indagine dell'*Azione 2.1* ha evidenziato i concetti classici del DEG e quelli più specifici. Quest'indagine ha permesso inoltre di osservare *in situ* diversi tipi di danni alla geomembrana e di mostrare che alla fine le problematiche di punzonamento e di perforazione della struttura di impermeabilizzazione sono tra le più ricorrenti.
Durante l'indagine in campo e nell'ambito di una collaborazione italo-francese, un campione di geomembrana è stato prelevato sullo sbarramento di Gran Testa in Valle d'Aosta e sono state effettuate analisi fisiche e meccaniche nel centro di ricerca tecnologica sui geosintetici di Irstea Antony. Tuttavia, in assenza di campioni di geomembrana di riferimento, queste analisi non hanno permesso di portare a conclusioni sulla durabilità di questo prodotto. Viene quindi evidenziato che, quando non sono state previste analisi di durabilità sin dalla progettazione dell'opera, è difficilissimo tornarci dopo molti anni di servizio dell'opera di ritenuta, perché i punti di riferimento non sono stati definiti inizialmente.

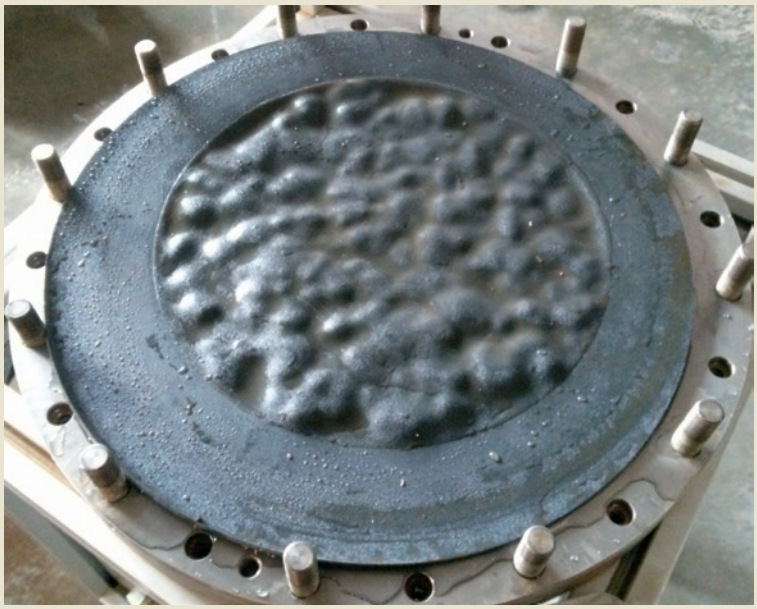


FIGURA 15
Deformazioni osservate sulla geomembrana protetta dal geotessile A nei confronti delle sollecitazioni di punzonamento.

FIGURE 15
Déformations observées sur la géomembrane protégée par le géotextile A vis-à-vis des sollicitations de poinçonnement.

Conclusions

Cette action avait pour objectif de mieux définir la durabilité des dispositifs d'étanchéité par géomembrane (DEG) des retenues collinaires et d'altitude.
L'enquête de retour d'expérience a mis en évidence les conceptions classiques de DEG et celles plus spécifiques. Cette enquête a également permis d'observer in situ *différents types d'endommagements de la géomembrane et finalement montrer que les problématiques de poinçonnement et de perforation de la structure d'étanchéité figurent parmi les plus récurrentes.*
Au cours de l'enquête de retour d'expérience et dans le cadre d'une collaboration franco-italienne, une éprouvette de géomembrane a été prélevée sur la retenue de Grantesta en Vallée d'Aoste et des analyses physiques et mécaniques ont été menées au plateau de recherche technologique géosynthétiques d'Irstea Antony. Cependant, en l'absence d'éprouvette de géomembrane de référence, ces analyses n'ont pas permis de conclure sur la durabilité de ce produit. Il est ainsi mis en évidence que, lorsque des analyses de durabilité n'ont pas été prévues dès la conception d'un projet, il est très difficile d'y

In seguito, l'*Azione 2.4a* si è concentrata sulla caratterizzazione sperimentale in laboratorio, destinata a valutare meglio la durabilità del DEG sin dalla progettazione dell'opera. Quest'indagine, che si è concentrata sulle sollecitazioni di punzonamento della geomembrana, è stata motivata da vari punti: (i) questo tipo di sollecitazioni può portare alla rottura dell'impermeabilizzazione che rappresenta la funzione primaria del DEG; (ii) sono le più frequenti cause di danni che sono state osservate sul campo durante l'indagine di terreno; (iii) le raccomandazioni attuali non sono sufficientemente dettagliate riguardo a questa problematica e non esiste attualmente né metodo analitico, né metodo empirico in grado di dimensionare una struttura di protezione della geomembrana nei confronti delle sollecitazioni di punzonamento.
È stato quindi proposto un approccio sperimentale completo in grado di giustificare l'efficacia della protezione di una geomembrana fornita da un geotessile nei confronti delle sollecitazioni di punzonamento.

FIGURA 16
Deformazioni osservate sulla geomembrana protetta dal geotessile C nei confronti delle sollecitazioni di punzonamento.

FIGURE 16
Déformations observées sur la géomembrane protégée par le géotextile C vis-à-vis des sollicitations de poinçonnement.

revenir après plusieurs années de service de l'ouvrage car les points de référence ne sont plus accessibles.
*L'*Action 2.4a *s'est ensuite concentrée sur la caractérisation expérimentale en laboratoire destinée à mieux prendre en compte de durabilité du DEG dès la conception de l'ouvrage. Cette investigation qui s'est focalisée sur les sollicitations de poinçonnement de la géomembrane a été motivée par plusieurs points : (i) ce type de sollicitations peut conduire à la rupture de l'étanchéité qui est la fonction première du DEG ; (ii) ce sont les causes de dommages les plus fréquentes qui ont été observées sur le terrain lors de l'enquête de retour d'expérience, (iii) les recommandations actuelles ne sont pas suffisamment détaillées sur cette problématique et il n'existe actuellement ni de méthode analytique ni de méthode empirique permettant de dimensionner une structure de protection de la géomembrane vis-à-vis des sollicitations de poinçonnement.*
Ainsi, il a été proposé une démarche expérimentale complète permettant de justifier l'efficacité de la protection d'une géomembrane apportée par un géotextile vis-à-vis des sollicitations de poinçonnement.

È stato quindi attuato un programma sperimentale, il che ha permesso di formulare varie raccomandazioni operative per i tecnici:

1. la densità di un geotessile non permette da sola di dimensionare un prodotto;
2. per due geotessili di densità praticamente uguale, le fibre in polipropilene vergini hanno un'efficacia migliore nella funzione protettiva rispetto alle fibre riciclate;
3. nelle condizioni di test, solo i geotessili composti da fibre in polipropilene vergini e la cui densità è superiore a 1000 g/m² hanno permesso di garantire una funzione protettiva sufficiente, il che è relativamente compatibile con i prodotti utilizzati nei recenti bacini di ritenuta studiati nell'*Azione 2.1*.
4. riguardo al supporto in pietrisco è stato utilizzato un supporto con uno stato superficiale con fuso granulometrico di 0-31,5 mm; questo supporto ha evidenziato un carattere particolarmente aggressivo per i DEG e pertanto non è raccomandato. È quindi importante ricordare che il fuso granulometrico di 0-20 mm è raccomandato poiché particelle di dimensioni minori riducono il rischio di perforazione della geomembrana per punzonamento.

Riferimenti bibliografici / *Références*

Afnor (2010) NF EN 14151 Géosynthétiques – *Détermination de la résistance à l'éclatement.*

Afnor (2008) XP P84-523 Géomembranes - *Dispositifs d'étanchéité par géomembranes (DEG) - Détermination de la résistance au poinçonnement sous charge hydrostatique.*

Afnor (2005) NF EN ISO 9864 Géosynthétiques - *Méthode d'essai pour la détermination de la masse surfacique des géotextiles et produits apparentés.*

Peyras L., Meriaux P. (2009) *Retenues d'altitude. Guide de recommandations*, ed. Quae, 352 pp.

Un programme expérimental a été appliqué selon cette démarche ce qui a permis d'aboutir à plusieurs recommandations opérationnelles pour l'ingénierie :

1. *la masse surfacique d'un géotextile ne permet pas à elle seule de dimensionner un produit ;*
2. *pour deux géotextiles de masse surfacique pratiquement égale, des fibres polypropylène vierges apportent une meilleure efficacité pour la fonction protection que des fibres recyclées ;*
3. *dans les conditions testées, seuls les géotextiles composés de fibres polypropylène vierges et dont la masse surfacique est supérieure à 1000 g/m² ont permis d'assurer la fonction protection de façon suffisante ce qui est relativement conforme avec les produits utilisés dans les ouvrages récents enquêtés dans l'*Action 2.1.
4. *concernant le support en matériaux granulaires, un support avec un état de surface d'étendue granulométrique 0-31,5 mm a été mis en œuvre pour le programme expérimental. Il a mis en évidence un caractère particulièrement agressif pour les DEG et ce type de couche support 0-31,5 mm n'est pas à recommander. Il est donc important de rappeler que l'étendue granulométrique 0-20 mm reste recommandée car des dimensions particulaires moindre réduisent les risques de perforation de la géomembrane par poinçonnement.*

Monitoraggio degli sbarramenti attraverso l'interferometria satellitare

Introduzione

In questo capitolo vengono illustrati i risultati aggiornati dell'analisi dei dati satellitari acquisiti nell'ambito del Progetto RISBA, che ha come scopo la misura, mediante impiego di riflettori artificiali, di eventuali spostamenti dei rilevati che delimitano quattro bacini idrici per l'innevamento utilizzando la tecnica interferometrica satellitare.
Sono stati elaborati i dati acquisiti dai satelliti della costellazione CosmoSkyMed acquisiti nell'ambito del programma "Map Italy", finalizzato a garantire la copertura dell'intero territorio nazionale con cadenza di acquisizione quindicinale.
L'analisi di ampiezza ha utilizzato tutti i dati disponibili sino alla fine di ottobre 2014, per un numero di immagini variabile da 8 a 19 per ciascuna geometria, in funzione della data di installazione dei riflettori e della track considerata. Il numero di immagini elaborate include 3 immagini per ciascuna frame e per ciascuna geometria acquisite prima dell'installazione dei riflettori, che sono state utilizzate per valutare la riflettività di fondo di ciascun sito e progettare correttamente la geometria di ciascuna rete di misura. La prima

Surveillance des barrages par interférométrie satellitaire (InSAR)

Introduction

La présente section présente les résultats de l'analyse des images satellites, acquises dans le cadre du projet RISBA, dans le but de mesurer, au moyen de réflecteurs artificiels, d'éventuels déplacements des remblais, sur quatre retenues d'altitude destinées à la production de neige de culture, à l'aide de l'interférométrie satellitaire.
Les analyses ont porté sur les données acquises tous les quinze jours par les satellites de la constellation COSMO-SkyMed, obtenues ayant pour cadre du programme « Map Italy », dans le but d'assurer la couverture de l'ensemble du territoire national.
Toutes les données disponibles jusqu'à la fin d'octobre 2014, pour un nombre d'images variables de 8 à 19 pour chaque géométrie, en fonction de la date d'installation des réflecteurs et de la track considérée. Le nombre d'images traitées comprend 3 photos pour chaque cadre et pour chaque géométrie acquise avant l'installation des réflecteurs, qui ont été utilisées pour évaluer la réflectivité de chaque site et calculer correctement la géométrie de chaque réseau de mesure.

elaborazione finalizzata alla misura degli spostamenti dei riflettori è stata eseguita dopo i primi sei mesi di acquisizione e ha utilizzato tutte le immagini disponibili su ciascun sito alla fine di luglio 2014.
La prossima elaborazione è prevista a un anno dall'inizio delle acquisizioni; i risultati saranno quindi disponibili alla metà di febbraio 2015.
I risultati della prima analisi hanno consentito di verificare che esiste la stabilità di fase necessaria a poter ottenere le misure di spostamento.

Analisi interferometrica di riflettori artificiali (CRInSAR)

L'utilizzo dei riflettori artificiali *(Corner Reflector)* ha come obiettivo la misura dello spostamento degli stessi relativamente a un riflettore scelto come punto di riferimento, elaborando tutte le immagini disponibili successive all'installazione dei dispositivi.
Nel progetto in analisi, su ogni sbarramento sono stati installati a tal proposito due riflettori più un terzo posto a distanza da utilizzare come punto di riferimento.
Nei seguenti paragrafi si darà illustrazione della metodologia utilizzata per l'analisi dei dati e la produzione dei risultati.

I dati SAR: co-registrazione

Ciascuna acquisizione satellitare è assimilabile a una matrice di pixel. Per ciascuna di essi è disponibile un valore complesso, che corrisponde all'eco del segnale trasmesso dal

Le premier traitement PSI destiné à mesurer les déplacements des réflecteurs a été effectué après les six premiers mois d'acquisition a utilisé toutes les images disponibles sur chaque site, jusqu'en juillet 2014.
Le prochain traitement est prévu un an après le début des acquisitions ; les résultats seront donc disponibles mi-février 2015.
Les résultats de la première analyse ont permis de vérifier la stabilité de la phase nécessaire pour obtenir les mesures de déplacement.

Analyse interférométrique à l'aide de réflecteurs artificiels (CRInSAR)

*L'utilisation des réflecteurs artificiels (*Corner Reflector*) a pour objectif la mesure de leurs propres déplacements, par rapport à un point de référence, en élaborant toutes les images disponibles successives à l'installation des dispositifs.*
Dans le projet en analyse, sur chaque barrage ont été installés à cette intention deux réflecteurs, puis un troisième placé à distance, à utiliser comme point de référence.
Dans les paragraphes suivants, on se consacrera à l'illustration de la méthodologie utilisée pour l'analyse des données et la production des résultats.

Les données SAR : coregistration

Chaque image satellitaire est assimilable à une matrice de pixels. Pour chacune d'elles, on dispose d'une valeur complexe, qui correspond à l'écho du signal transmis par le

satellite verso la Terra e che viene retrodiffuso verso il satellite. Il segnale complesso è quindi scomponibile nella sua componente di ampiezza, proporzionale alla riflettività degli oggetti colpiti dal segnale, e dalla sua componente di fase che verrà utilizzata per l'analisi interferometrica del moto.
Tutte le acquisizioni SAR disponibili devono essere innanzitutto co-registrate su una griglia comune, così da essere sicuri che, in ogni scena, il medesimo pixel corrisponda al punto a terra in analisi.
Fatta questa operazione è possibile estrarre, nella posizione in cui si trovano i pixel identificati come corrispondenti ai riflettori artificiali installati, il vettore dei valori di fase e il vettore dei valori di ampiezza.
I dati vengono rigorosamente analizzati in coordinate SAR, ovvero secondo il punto di vista del satellite, al fine di mantenere invariata la risoluzione del pixel. Nel caso in esame, i dati COSMO-SkyMed sono in modalità Strip Map e hanno una cella di risoluzione pari a 3x3 metri nella direzione di Azimuth (direzione di volo del satellite) e nella direzione di Range (direzione di vista del satellite).

Analisi delle ampiezze

I dati COSMO-SkyMed, acquisiti tramite il progetto ASI denominato "Map Italy", sono stati in primo luogo utilizzati per effettuare la verifica della visibilità dei riflettori confrontando il vettore dei valori di ampiezza (riflettività) precedenti all'installazione con quelli successivi all'installazione. Questa procedura consente di identificare i pixel corrispondenti ai riflettori artificiali su cui verrà focalizzata l'attenzione durante l'analisi interferometrica.

satellite vers la Terre, et qui est rétrodiffusé vers le satellite. Le signal complexe est donc décomposable dans son amplitude, proportionnelle à la réflectivité des objets touchés par le signal, et par sa composante de phase qui sera utilisée pour l'analyse interférométrique du mouvement.
Toutes les acquisitions SAR disponibles doivent être avant tout co-enregistrées sur une grille commune, de façon à être sûr que – dans chaque lieu – le même pixel correspond au point à terre dans l'analyse.
Une fois cette opération faite, il est possible d'extraire, à l'emplacement où se trouvent les pixels identifiés comme correspondants aux réflecteurs artificiels installés, le vecteur des valeurs de phase et le vecteur des valeurs d'amplitude.
Les données sont rigoureusement analysées en géométrie SAR, ou selon le point de vue du satellite, afin de maintenir la résolution du pixel inchangée. Dans le cas présent, les données COSMO-SkyMed sont en mode Strip Map et ont une résolution spatiale de 3 mètres dans la direction de l'azimuth (direction du vol du satellite) et dans la direction de la distance (axe de visée du satellite).

Analyse des amplitudes

Les données COSMO-SkyMed – acquises par l'intermédiaire du projet ASI dénommé « Map Italy » – ont surtout été utilisées pour vérifier la visibilité des réflecteurs, en comparant le vecteur des valeurs d'amplitude précédent l'installation avec celles qui suivent l'installation. Cette procédure permet d'identifier les pixels correspondants aux réflecteurs artificiels, sur lesquels l'attention sera concentrée pendant l'analyse interférométrique.

Analisi delle fasi

Al fine di calcolare lo spostamento medio degli AR rispetto al punto di riferimento, si utilizzano tutte le acquisizioni SAR ottenute sull'area di interesse, successivamente alla data di installazione.
Ciascun valore di fase, ovvero il valore del pixel i-esimo in corrispondenza dell'acquisizione n-esima, contiene diversi contributi, alcuni deterministici (che possono essere calcolati e rimossi), altri che sono fattori di rumore, e infine quelli che sono relativi alle incognite che vogliamo calcolare, ovvero lo spostamento e la quota.
Il principio base dell'interferometria consiste nel creare dei valori differenziali delle fasi rispetto a una data (riferimento temporale, solitamente indicato come immagine master) e rispetto a un punto (nel nostro caso è il riflettore artificiale #3 identificato come punto di riferimento).

$$\Delta\phi = \phi n - \phi m = \phi spostamento + \phi quota + \phi atmosfera + \phi noise$$

Il contributo di fase legato alla propagazione dell'onda elettromagnetica inviata dal satellite attraverso l'atmosfera deve essere rimosso, al fine di non inficiare in maniera rilevante l'analisi e il risultato ottenuto.
A questo fine risulta vantaggiosa l'approssimazione secondo cui il valore di fase legato al contributo atmosferico di un dato pixel sia in prima approssimazione uguale a quello dei pixel adiacenti: le perturbazioni atmosferiche hanno infatti un comportamento correlato nello spazio, tale per cui nel raggio di alcune centinaia di metri possono essere considerate costanti.
Grazie a questa assunzione possiamo dunque calcolare la differenza tra i valori $\Delta\phi$ calco-

Analyse des phases

Afin de calculer le déplacement moyen des AR, par rapport au réflecteur artificiel de référence, l'ensemble des acquisitions SAR obtenues depuis leur installation sur la zone intéressée, après la date d'installation.
Chaque valeur de phase, c'est-à-dire la valeur du i-ème pixel correspondant à la i-ème acquisition, contient un certain nombre d'éléments : parmi eux, certains sont déterministes (c'est-à-dire qu'ils peuvent être calculés puis supprimés), d'autres sont des facteurs de bruit, et certains sont liés aux inconnues que nous voulons calculer, à savoir le déplacement et l'altitude.
Le principe de base de l'interférométrie consiste à calculer des différences de phases par rapport à une date (référence dans le temps, généralement indiquée comme image maître) et à un point (dans notre cas, c'est le réflecteur artificiel #3 identifié comme point de référence).

$$\Delta\phi = \phi n - \phi m = \phi déplacement + \phi altitude + \phi atmosphère + \phi bruit$$

La contribution de phase liée à la propagation de l'onde électromagnétique, envoyée par le satellite à travers l'atmosphère, doit être supprimée afin de ne pas affecter l'analyse et le résultat obtenu.
Dans ce but, l'approximation est avantageuse, selon laquelle la valeur de phase liée à la contribution atmosphérique d'une donnée pixel, est égale à celle des pixels adjacents : les perturbations atmosphériques ont en effet un comportement étroitement lié à l'espace, comme dans un rayon de quelques centaines de mètres, elles peuvent être considérées comme constantes.

lati in corrispondenza dei riflettori artificiali 1 e 2 installati sullo sbarramento, rispetto a quelli del riflettore 3 scelto come riferimento. In questa operazione di sottrazione il contributo atmosferico andrà ad annullarsi. Tanto più questa approssimazione risulta reale (punti molto vicini tra loro), tanto meno rumoroso sarà il risultato.
Il vettore differenza risulterà quindi ora:

$$\Delta\phi 1\text{-}3 = \Delta\phi AR1 - \Delta\phi AR3 = \Delta\phi spostamento + \Delta\phi quota + \phi noise$$

Da notare che tale vettore rappresenta nel tempo, ovvero lungo il dataset delle immagini satellitari a disposizione, la variazione di posizione lungo la *line of sight* del satellite (LOS) e la differenza di quota.
In fase di installazione dei riflettori artificiali, la campagna GPS effettuata in modalità statica di fase ha permesso il calcolo, con precisione centimetrica, delle quote dei dispositivi. Grazie alla disponibilità di questi numeri è pertanto possibile eliminare una delle due incognite (ovvero $\Delta\phi quota$) e misurare così il valore relativo allo spostamento.
Con questa metodologia abbiamo quindi ottenuto per ciascuna area di interesse e per ciascuna geometria (ascendente e discendente) le serie storiche di spostamento dei riflettori AR1 e AR2 rispetto al riflettore AR3 utilizzato, a meno del rumore.

Scomposizione del moto

Come detto nel precedente paragrafo, la metodologia nota in letteratura come CRInSAR è stata applicata sia al dataset ascendente che a quello discendente, al fine di ottenere le misure di spostamento lungo la LOS (*Line-Of-Sight*) relativamente al punto scelto come riferimento.

Grâce à cette hypothèse, nous pouvons donc calculer la différence entre les valeurs Δϕ calculées conformément aux réflecteurs artificiels 1 et 2, installés sur le barrage, par rapport à ceux du réflecteur 3 choisi comme référence. Dans cette opération de soustraction, la contribution atmosphérique s'annule. Plus cette approximation est réelle (points beaucoup plus près entre eux), moins le résultat sera bruité.
Le vecteur différence sera donc :

$$\Delta\phi 1\text{-}3 = \Delta\phi AR1 - \Delta\phi AR3 = \Delta\phi déplacement + \Delta\phi altitude + \phi bruit$$

Ce vecteur représente, dans le temps, ou à long terme l'ensemble de données des images satellite à disposition, la variation de la position le long de l'axe de visée (LOS - Line-Of-Sight) et le reliquat d'altitude.
En phase d'installation des réflecteurs artificiels, la campagne GPS effectuée en mode statique de phase, a permis le calcul avec une précision centimétrique des altitudes des dispositifs. Grâce à la disponibilité de ces chiffres, il est donc possible d'éliminer une des deux inconnues (Δϕaltitude) et de mesurer ainsi la valeur relative au déplacement.
Nous avons ainsi obtenu, dans chacune zone d'intérêt et pour les deux géométries (ascendante et descendante) les données historiques de déplacement des réflecteurs AR1 et AR2 par rapport au réflecteur AR3 utilisé, voire moins de bruit car ayant le plus grand ratio signal / bruit.

Décomposition du mouvement

Comme énoncé dans le précédent paragraphe, la méthodologie connue dans la documentation sous le nom de CRInSAR a été appliquée, tant à l'ensemble de données

Il fatto che i riflettori installati siano visibili sia in geometria ascendente che in quella discendente, corrispondendo materialmente il medesimo punto, permette (senza alcuna approssimazione spaziale) di effettuare per ciascun AR la scomposizione delle fasi ascendenti e discendenti in quelle verticale (direzione Z) e orizzontale (direzione di Easting). Questa operazione è possibile (risoluzione di sistema di 2 equazioni in 2 incognite) sotto l'ipotesi che la componente del moto in direzione Nord-Sud sia trascurabile. Questo è un limite intrinseco del sistema di acquisizione, in quanto la componente di moto Nord-Sud risulterebbe, anche in presenza di una terza geometria, fortemente sottostimata, dato che la direzione di vista del sensore SAR è quasi ortogonale alla direzione Nord-Sud (il satellite viaggia lungo orbite quasi-polari con antenna orientata ortogonalmente rispetto alla direzione di volo) ed è quindi poco sensibile a variazioni in questa direzione.

Analisi CRInSAR

Area d'interesse e immagini utilizzate

Le aree di interesse dello studio sono rappresentate da quattro bacini idrici valdostani per l'innevamento artificiale, e più precisamente: Nouva (comune di Gressan), Weissmatten (comune di Gressoney-Saint-Jean), Cime Bianche (comune di Ayas) e Gran Testa (comune di LaThuile).
In Figura 1 viene rappresentata la copertura delle immagini satellitari utilizzate con riferimento all'ubicazione delle aree di studio. Vengono inoltre riportate alcune informazioni relative al satellite utilizzato in ciascuna area, alla track e alla modalità di acquisizione.

ascendant qu'à celui descendant, afin d'obtenir les mesures de déplacement relatif le long de la LOS (Line-Of-Sight) par rapport au point choisi comme référence.
Le fait que les réflecteurs installés soient visibles, tant en orbite ascendante que descendante, et correspondent matériellement au même point, permet – sans aucune approximation spatiale – d'effectuer pour chaque AR, la décomposition des phases ascendantes et descendantes dans ces distances verticales (direction Z) et horizontales (direction de Easting). Cette opération est possible (résolution d'un système de 2 équations à 2 inconnues) dans l'hypothèse que la composante Nord-Sud du mouvement soit négligeable. Ceci est une limite intrinsèque du système d'acquisition, en tant que la composante Nord-Sud du mouvement – même en présence d'une troisième géométrie – serait fortement sous-estimée, étant donné que la direction de vue du capteur SAR est presque orthogonale à la direction Nord-Sud (le satellite voyage le long de l'orbite quasi-polaire avec l'antenne orientée orthogonalement par rapport à la direction de vol) et elle est donc plus sensible aux variations dans cette direction.

Analyse CRInSAR

Sites d'application et images utilisées

L'étude a porté sur quatre retenues d'altitude valdotaines, dédiées à la production de neige de culture : Nouva (commune de Gressan), Weissmatten (commune de Gressoney-Saint-Jean), Cime Bianche (commune de Ayas) et Gran Testa (commune de La Thuile).
En Figure 1, on peut voir la couverture des images satellites utilisées, mentionnant la

Le immagini utilizzate per l'analisi degli spostamenti sono state acquisite dal satellite COSMO-SkyMed nell'ambito del programma "Map Italy".
In ciascuna delle aree sopra elencate sono stati installati tre riflettori artificiali (Figura 2) per il monitoraggio degli eventuali spostamenti della cresta del rilevato, che delimita ciascun bacino. Due dei riflettori sono posti sul coronamento dello sbarramento, il terzo è ubicato in posizione esterna all'area di studio con funzione di punto di riferimento, al quale sono riferiti gli eventuali movimenti misurati. I riflettori artificiali sui bacini di Nouva, Weissmatten e Cime Bianche sono stati installati alla fine del 2013, e orientati il 15 e 16 gennaio 2014, diventando quindi operativi a partire da tale data. I riflettori del bacino della Gran Testa sono stati invece installati e orientati il 16 luglio 2014.

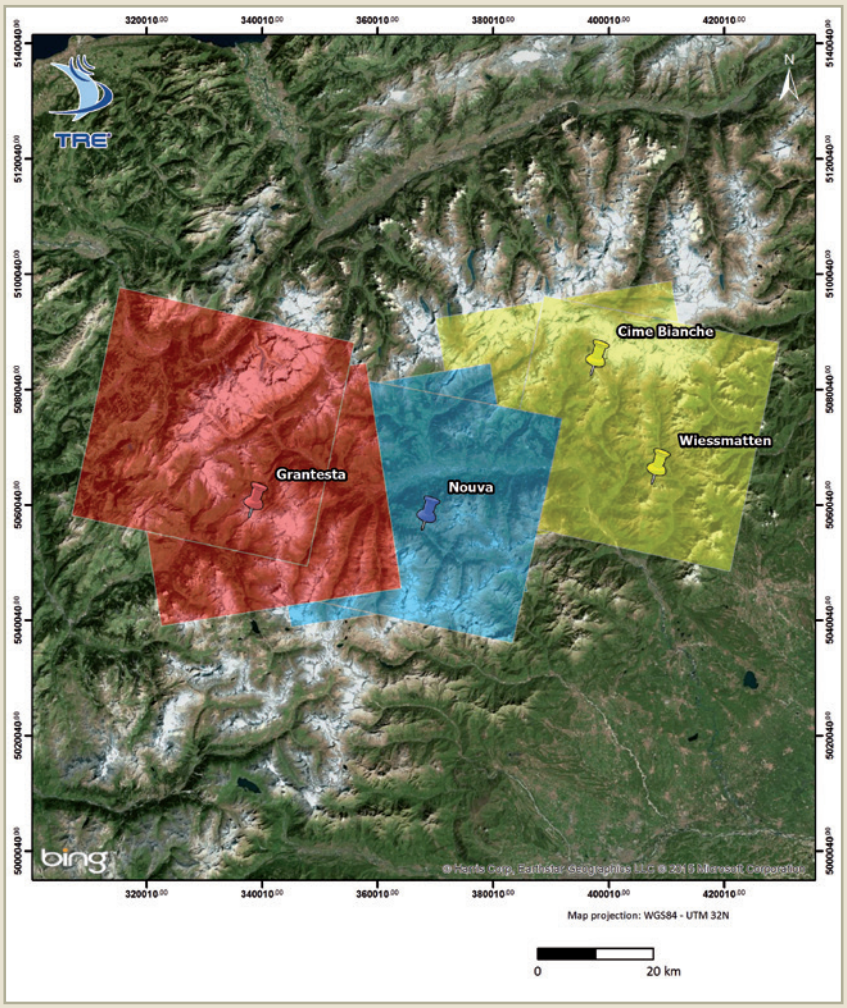


FIGURA 1
Ubicazione delle aree di studio e copertura areale delle immagini satellitari utilizzate. L'area di Gran Testa non è stata elaborata poiché i riflettori artificiali sono stati installati il 16 luglio 2014.

FIGURE 1
Localisation des domaines d'étude et couverture de la zone des images satellites utilisées pour l'étude. La zone de Gran Testa n'a pas été traitée puisque les réflecteurs artificiels ont été installés le 16 juillet 2014.

localisation des zones d'études. De plus, on a signalé certaines informations concernant le satellite utilisé dans chaque zone, la track et la modalité d'acquisition. Les images utilisées pour l'analyse des déplacements ont été acquises par le satellite COSMO-SkyMed dans le cadre du programme « Map Italy ».
Dans chacune des zones répertoriées ci-dessus, on a installé trois réflecteurs artificiels (Figure 2) pour la surveillance des éventuels déplacements du remblai de chaque retenue. Deux des réflecteurs sont placés sur le couronnement du barrage, le troisième est situé à l'extérieur de la zone d'étude, assurant la fonction de point de référence, auquel se rapporte tout mouvement mesuré. Les réflecteurs artificiels sur les retenues de Nouva, Weissmatten et Cime Bianche ont été installés à la fin du 2013, et orientés le 15 et

Le aree di studio sono tutte ubicate a quote superiori a 2000 metri e pertanto sono innevate per parte dell'anno. L'innevamento è, con ogni probabilità, responsabile della caduta dei valori di ampiezza che è stata riscontrata su alcune delle immagini elaborate ed è anche responsabile della rumorosità delle serie storiche di spostamento ottenute da questa prima analisi. La qualità dei risultati è destinata a migliorare nel tempo, con l'aumentare del numero di immagini elaborate.

Risultati

A titolo di esempio, vengono presentati i risultati dell'analisi di visibilità di uno dei riflettori del bacino di Nouva, effettuata sulle immagini disponibili alla fine del mese di otto-

FIGURA 2
Bacino di Gran Testa: vista di un riflettore artificiale senza copertura durante la fase di orientamento (in alto) e del riflettore dotato di copertura (in basso).

FIGURE 2
Retenue de Gran Testa : vue d'un réflecteur artificiel sans couverture durant la phase d'orientation (en haut) et du réflecteur avec de couverture (en bas).

16 janvier 2014, devenant donc opérationnels à partir de ce jour. Les réflecteurs de la retenue de la Gran Testa ont été au contraire installés et orientés le 16 juillet 2014.
Les zones d'étude sont toutes situées au-dessus de 2000 mètres d'altitude, et donc elles sont enneigées pour une partie de l'année. L'enneigement est, vraisemblablement, responsable de la réduction des valeurs d'amplitude, qui a été relevée sur quelques-unes des images élaborées, qui est aussi responsable du bruit des données historiques des déplacements, obtenues par cette première analyse. La qualité des résultats est destinée à s'améliorer dans le temps, par rapport à l'augmentation du nombre de images traitées.

Résultats

Nous présentons ici les résultats de l'analyse de visibilité d'un des réflecteurs installé sur la retenue de Nouva, sur la base des images disponibles à la fin du mois d'octobre 2014, et

bre 2014, e le serie storiche di spostamento ottenute dall'elaborazione dei dati disponibili nelle due geometrie di acquisizione nel primo semestre 2014. L'ubicazione dei punti di misura sul Bacino di Nouva è rappresentata in Figura 3.
Si ricorda che le misure di spostamento sono effettuate lungo la linea di vista (LOS Line-Of-Sight) del satellite, che nel caso specifico è di circa 30° rispetto alla verticale in geometria ascendente e di circa 27° rispetto alla verticale in geometria discendente.
Le serie storiche di ampiezza dei riflettori presentano dei cali di riflettività del tutto inattesi, da associare con ogni probabilità alle condizioni climatiche estreme (neve e probabile formazione di ghiaccio sui riflettori) che hanno caratterizzato le aree di studio nel periodo coperto dalle immagini analizzate. Ciò ha un impatto diretto sulla stabilità di fase e quindi sulla precisione delle serie storiche di spostamento. A causa del limitato numero di immagini elaborate, corrispondenti al minimo necessario per poter effettuare misure

FIGURA 3
Bacino di Nouva: ubicazione dei riflettori artificiali. Il triangolo giallo rappresenta il punto di riferimento della rete, i punti rossi corrispondono ai riflettori installati sul coronamento del rilevato.

FIGURE 3
Retenue de Nouva: localisation des réflecteurs artificiels. Le triangle jaune représente le point de référence du réseau, les points rouges correspondent aux réflecteurs installés sur le sommet du relevé.

les séries historiques de mouvements, obtenues par le traitement des données disponibles dans les deux géométries d'acquisition, du premier semestre 2014. La localisation des points de mesure sur la retenue de Nouva est représentée sur la Figure 3.
On se rappelle que les mesures de mouvement sont effectuées le long l'axe de visée (LOS Line-Of-Sight) du satellite, qui dans ce cas particulier, est d'environ 30° par rapport à la verticale en géométrie ascendante, et d'environ 27° par rapport à la verticale en orbite descendante.
Les données historiques d'amplitude des réflecteurs présentent des baisses de réflectivité totalement inattendues, qui sont en toute vraisemblance, à associer aux conditions climatiques extrêmes (neige et formation probable de glace sur les réflecteurs) qui ont caractérisé les zones d'étude, pendant la période couverte par les images analysées. Ce fait a un impact direct sur la stabilité de la phase, et donc sur la précision des données historiques de déplacement. A cause du nombre limité d'images traitées, correspondant

di spostamento, i valori di deviazione standard dei valori di velocità stimati risultano piuttosto elevati. Questi valori sono tuttavia destinati a ridursi con l'aumentare del numero di immagini disponibili.
Per le ragioni sopra esposte, per questa prima elaborazione non è stato possibile effettuare la stima delle componenti verticale e orizzontale Est-Ovest del moto.
In linea generale, considerati anche i valori di deviazione standard associati alle misure, i risultati dell'analisi non sembrano al momento indicare spostamenti degni di nota; si rimanda tuttavia l'interpretazione dei dati alla prossima elaborazione, quando saranno disponibili in numero maggiore.
In Figura 4 vengono proposte due immagini di ampiezza relative all'area del bacino di Nouva, riprese rispettivamente prima e dopo l'installazione e orientamento dei riflettori artificiali. Questi ultimi appaiono come pixel luminosi. In Figura 5 vengono presentate

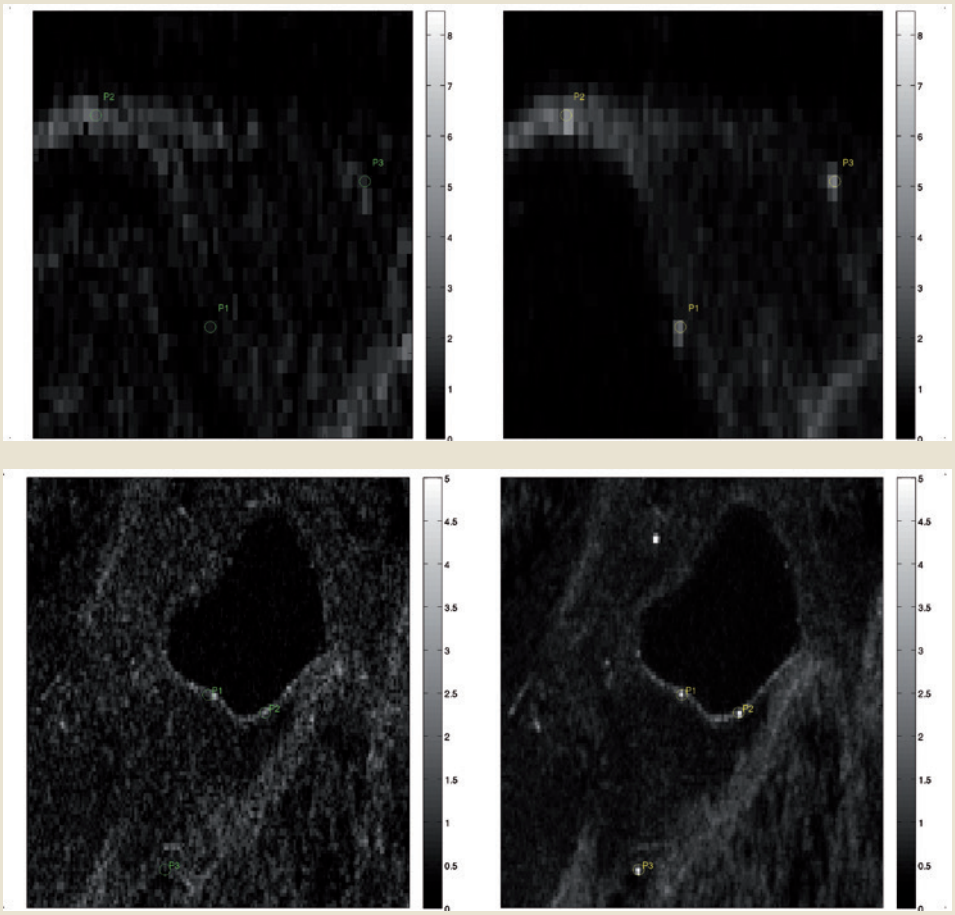
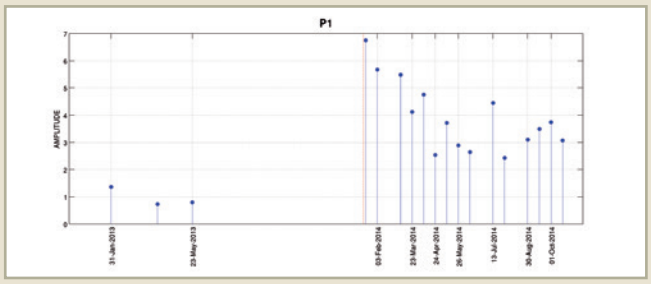


FIGURA 4
Bacino di Nouva: immagini di ampiezza riprese prima (a sinistra) e dopo (a destra) l'installazione dei riflettori, in geometria ascendente (sopra) e discendente (sotto). Le serie storiche di ampiezza sono riportate nelle figure che seguono.

FIGURE 4
Retenue de Nouva: images d'amplitude prises avant (à gauche) et après (à droite) l'installation des réflecteurs, en géométrie ascendante (au-dessus) et descendante (ci-dessous). Les données historiques d'amplitude sont reportées dans les figures suivantes.

au minimum nécessaire pour pouvoir effectuer des mesures de déplacement, les valeurs d'écart type des valeurs de vitesse estimées sont plutôt élevées. Ces valeurs sont toutefois destinées à diminuer, avec l'augmentation du nombre d'images disponibles.
Pour les raisons exposées ci-dessus, pour ce premier rapport, il n'a pas été possible d'effectuer l'estimation des composantes verticales et horizontales Est-Ouest du déplacement.
D'une manière générale, en considérant aussi les valeurs d'écart type associées aux mesures, les résultats de l'analyse ne semblent pas indiquer des déplacements particulièrement importants ; cependant on voudra bien se reporter à l'interprétation des données au prochain traitement, lorsqu'un plus grand nombre d'images sera disponible.
Dans la Figure 4, sont proposées deux images d'amplitude sur la zone de la retenue de Nouva, prises respectivement avant et après l'installation et l'orientation des réflecteurs

le serie storiche di ampiezza del punto P1 nelle due geometrie, che mostrano in generale un incremento del valore dopo l'installazione e l'orientamento del rispettivo riflettore, pur con dei cali, che sono probabilmente legati alla presenza di neve e/o ghiaccio, come già indicato in precedenza.
In Figura 6 vengono rappresentate le serie storiche di spostamento del riflettore P1 in geometria ascendente e discendente rispetto al punto di riferimento P3. Gli spostamenti sono misurati lungo la LOS del satellite.



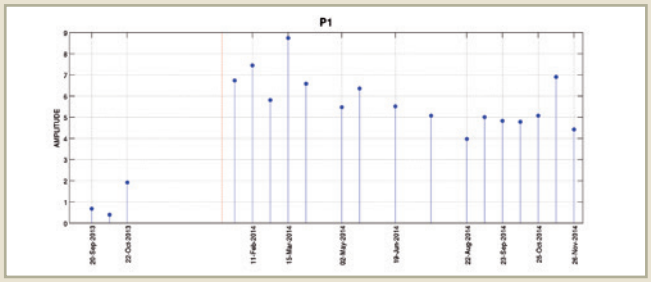
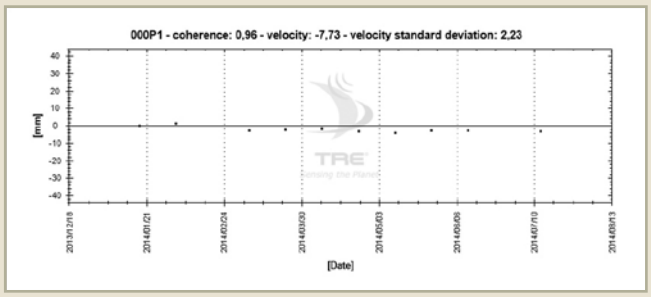


FIGURA 5
Bacino di Nouva: serie storiche di ampiezza del punto P1 in geometria ascendente (in alto) e discendente (in basso); la linea rossa tratteggiata rappresenta la data di orientamento del riflettore.

FIGURE 5
Retenue de Nouva : données historiques d'amplitude du point P1 en géométrie ascendante (en haut) et descendante (en bas) ; la ligne rouge en pointillés représente la date d'orientation du réflecteur.



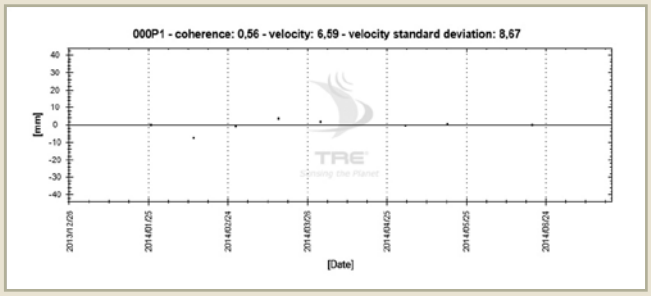


FIGURA 6
Bacino di Nouva: serie storiche di spostamento del punto P1 lungo la LOS del satellite in geometria ascendente (in alto) e discendente (in basso). Gli spostamenti sono riferiti al punto di riferimento P3.

FIGURE 6
Retenue de Nouva: données historiques de déplacement du point P1 le long de la LOS du satellite en géométrie ascendante (en haut) et descendante (en bas). Les déplacements s'appliquent au point de référence P3.

artificiels. Ces derniers apparaissent comme des pixels lumineux. Sur la Figure 5, sont présentées les données historiques d'amplitude du point P1 dans les deux géométries, qui montrent en général une augmentation de la valeur après l'installation et l'orientation du réflecteur correspondant, mais aussi une diminution qui est probablement liée à la présence de neige et/ou de glace, comme nous l'avons déjà observé précédemment.
Dans la Figure 6, sont représentées les données historiques de déplacement des réflecteurs P1 en géométrie ascendante et descendante, par rapport au point de référence P3. Les déplacements sont mesurés le long de l'axe de visée du satellite.

Vulnerabilità delle dighe rispetto al rischio dei fenomeni torrentizi

Contesto

Localizzazione delle opere

Gli invasi collinari e d'alta quota sono talvolta costruiti direttamente nell'alveo dei torrenti. Pertanto alcune opere montane di derivazione (Blanchet, 1975) come quella del Mont d'Arbois in Francia nonché sbarramenti di montagna (Bouvard, 2004) come la diga di Brusson in Italia, presentano problemi di interrimento.

Rischio da fenomeni torrentizi

Le due caratteristiche principali dei torrenti e dei rischi connessi a questi corsi d'acqua sono: (i) velocità e breve durata delle piene (da poche decine di minuti ad alcune ore; Fabre, 1797); (ii) grandi volumi di sedimenti erosi, trasportati e depositati (Armanini et al., 1991).
I rischi da fenomeni torrentizi devono essere affrontati su due livelli: (i) a livello del bacino imbrifero bisogna valutare l'idrologia del torrente e la potenziale produzione di sedimenti per poter definire l'intensità della piena in grado di raggiungere il sito e l'opera

Vulnérabilité des barrages vis-à-vis des aléas torrentiels

Contexte

Implantation des ouvrages

Les retenues collinaires et d'altitude sont pour certains d'entre elles construites directement dans le lit des torrents. Ainsi des prises d'eau de montagne (Blanchet, 1975), par exemple celle du Mont d'Arbois en France, et certains barrages de montagne (Bouvard, 2004), par exemple le barrage de Brusson en Italie, montrent des problèmes d'engravement.

Aléas torrentiels

Les deux caractéristiques principales des torrents et des aléas liés à ces cours d'eau sont : (i) la rapidité et la faible durée des crues qu'ils subissent (entre quelques dizaines de minutes et quelques heures; Fabre, 1797), et (ii) les volumes très importants de sédiments érodés, transportés et déposés (Armanini et al., 1991). Les aléas torrentiels doivent être abordés à deux échelles : (i) à l'échelle du bassin versant, il faut estimer l'hydrologie du torrent et les potentiels de production sédimentaire afin de caractériser l'intensité de la crue pouvant

studiata, e (ii) a livello del tratto che costeggia o attraversa il sito e l'opera di sbarramento bisogna valutare i rischi di erosione, di formazione di depositi, ecc.

Idrologia torrentizia

L'idrologia torrentizia è una scienza complessa: la rapidità dei fenomeni e la mancanza di dati sulle precipitazioni di montagna e sulle portate in questi corsi d'acqua rende difficoltose le analisi. Il lavoro di Mathys et al. (2013) ha recentemente riunificato i metodi appositamente destinati agli studi idro logici dei bacini imbriferi montani.

Erosione del suolo e limitazione degli apporti di sedimenti a scala di bacino imbrifero

L'erosione del suolo e la limitazione degli apporti di sedimenti costituiscono una criticità affrontata in area alpina partire dalla metà del XIX secolo (Duile, 1841; Gras, 1857; Surell, 1870; Demontzey, 1882), con i primi lavori pionieristici realizzati in Italia e in Francia (Frisi, 1770; Fabre, 1797). I primi timori degli ingegneri interessati ai rischi torrentizi riguardavano la protezione delle zone agricole, delle aree abitate e delle vie di trasporto (strade e ferrovie). La protezione delle opere idrauliche si è aggiunta successivamente, con lo sviluppo di queste ultime in montagna (Blanchet, 1975).
Nei paragrafi seguenti vengono indicati brevemente gli strumenti di cui dispongono i tecnici per la gestione dei rischi legati alla sedimentazione torrentizia. Queste risorse sono tuttora utilizzate nel mondo per proteggere gli invasi dai suddetti rischi (Kostadinov et al., 2008).

atteindre le site et l'ouvrage étudié, et (ii) à l'échelle du tronçon longeant ou traversant le site et l'ouvrage, il faut estimer les risques d'érosions, d'affouillements, de dépôts, etc.

Hydrologie torrentielle

L'hydrologie torrentielle est une science complexe : la rapidité des phénomènes et le manque de données sur les pluies en montagne aussi bien que sur les débits dans ces cours d'eau rend difficile les analyses. Le travail de Mathys et al. (2013) a récemment rassemblé les méthodes spécialement destinées aux études hydrologiques des bassins versants de montagne.

Erosion de sols et limitation des apports sédimentaires à l'échelle du bassin versant

L'érosion des sols et la limitation des apports sédimentaires est une préoccupation qui est étudiée sérieusement depuis le milieu du XIX^e^ siècle dans les Alpes (Duile, 1841; Gras, 1857; Surell, 1870; Demontzey, 1882), ces études ayant été inspirées par des travaux pionniers réalisés en Italie et en France (Frisi, 1770; Fabre, 1797). Les préoccupations premières des ingénieurs s'intéressant aux risques torrentiels étaient la protection des zones agricoles, des zones habitées et des voies de transport (routes et voies ferrées). La protection des ouvrages hydrauliques est arrivée plus tard avec le développement de ces derniers dans les montagnes (Blanchet, 1975).
Les paragraphes suivants rappellent rapidement les moyens d'action dont disposent les gestionnaires pour la gestion des risques sédimentaires. L'ensemble de ces moyens sont encore utilisés à travers le monde pour protéger les retenues des risques de sédimentation (Kostadinov et al., 2008).

Tecniche di sistemazioni torrentizie

Rimboschimento e ingegneria naturalistica

I primi ingegneri ad aver studiato la problematica della sistemazione torrentizia, fin dal XIX secolo, hanno sottolineato l'importanza che la vegetazione ricopre sulla stabilizzazione dei versanti. Le Alpi francesi avevano subito eccessive azioni di disboscamento e i rischi legati a fenomeni torrentizi erano aumentati fra il XVIII e il XIX secolo anche a causa della parziale scomparsa dei boschi e del loro effetto stabilizzante sui versanti (Demontzey, 1882). All'epoca, le comunità montane erano ancora in gran parte agricole e con forte presenza di manodopera. Lo Stato francese ha allora avviato grandi campagne d'acquisto dei terreni che costituiscono i bacini imbriferi torrentizi e ha investito in progetti di rimboschimento delle porzioni a quota maggiore. Queste operazioni sono state accompagnate dalla realizzazione di reticoli di drenaggio, che puntavano a migliorare la stabilizzazione dei pendii. L'obiettivo era allora quello di stabilizzare le zone di produzione dei sedimenti. I problemi di deforestazione sul versante italiano delle Alpi erano leggermente meno gravi di quelli sul versante francese.

Stabilizzazione dei canali nei bacini in quota

Parallelamente alle operazioni di rimboschimento, in Francia, venivano intrapresi dei lavori di consolidamento degli alvei dei torrenti attraverso la costruzione di briglie. Nello stesso periodo il versante italiano delle Alpi era interessato da lavori di realizzazione di opere dello stesso tipo (Marchi and Cavalli, 2007; Rinaldi et al., 2011).

Techniques de corrections torrentielles

Plantation et génie biologique

Les premiers ingénieurs ayant étudié la problématique de la correction torrentielle, dès le XIX^e^ siècle, ont souligné l'importance que la végétation a sur la stabilisation des versants. Les Alpes françaises avaient subi des opérations de déboisement excessives et les risques torrentiels avaient augmenté entre le XVIII^e^ et le XIX^e^ siècle, en partie du fait de la disparition partielle des forêts et de leur effet stabilisateur sur les pentes (Demontzey, 1882). À l'époque, les sociétés montagnardes étaient encore largement agricoles et une main d'œuvre nombreuse était présente dans les vallées. L'État français a alors amorcé de grandes campagnes d'achat des terrains couvrant les bassins versants torrentiels et a engagé des plans de plantation des hauts bassins versants. Ces mesures ont été associées à des réseaux de drainages visant à améliorer la stabilisation des versants. L'objectif était alors de stabiliser les zones de production sédimentaire. Les problèmes de déforestation du côté italien des Alpes étaient légèrement moins graves que côté français.

Stabilisation des chenaux dans les hauts bassins

En parallèle des opérations de plantations, des travaux de confortement des lits des torrents étaient engagés via la construction de barrages. Le côté italien des Alpes a, à la même époque, engagé des travaux de création de barrages du même type (Marchi and Cavalli, 2007; Rinaldi et al., 2011).

L'erosione che interessa un certo numero di bacini imbriferi è parzialmente controllata dall'evoluzione della base dei pendii: se il torrente tende regolarmente a erodere il piede dei versanti, questi ultimi vengono allora destabilizzati e i processi d'alimentazione dei sedimenti per erosione, smottamento di terreno, ecc. sono più regolari. Una forte attività torrentizia si traduce in: (i) destabilizzazione dei versanti a monte per erosione al piede dei pendii, e (ii) trasferimento di grandi volumi di sedimenti verso le zone a valle. Il primo fenomeno riduceva l'efficacia degli interventi di rimboschimento a monte, il secondo è la conseguenza del primo e presenta un problema da contrastare. Sono state costruite delle briglie per stabilizzare il livello e il profilo longitudinale dell'alveo del torrente, ridurre le destabilizzazioni di pendio attraverso rimboschimento e fermare gli abbassamenti a lungo termine dei torrenti (Demontzey, 1882; Bernard, 1927). Queste opere comportano effetti secondari di trattenuta totale di sedimenti durante il riempimento iniziale e di modulazione del trasporto solido attraverso la ritenuta transitoria dei sedimenti a seconda dei cicli sedimentari (modifiche transitorie dell'accumulo dei sedimenti nell'alveo che si manifestano attraverso cambiamenti nella quota di fondo alveo e propagazione di onde sedimentarie nel letto del corso d'acqua; Gras, 1850).

Cattura di sedimenti prima dell'ingresso nell'invaso

Accanto alle zone di deposizione naturale, è possibile implementare opere di trattenuta dei sedimenti. Queste opere sono state realizzate parallelamente alle briglie e agli interventi di rimboschimento, ma venivano utilizzate solo come ultima risorsa: i mezzi di sgombero meccanico dell'alveo erano molto limitati nel XIX secolo e pertanto le opera-

L'érosion sévissant dans un certain nombre de bassins versants est partiellement contrôlée par l'évolution du niveau du pied des pentes : si le torrent a régulièrement tendance à éroder le pied des pentes, ces dernières sont alors déstabilisées et les processus d'alimentation sédimentaire par ravinement, glissement de terrain... sont plus réguliers. Une forte activité torrentielle se traduit par : (i) la déstabilisation des versants amont par érosion des pieds de versants, et (ii) le transfert de volumes importants de sédiments vers la zone aval. Le premier phénomène limitait l'efficacité des plantations amont, le second est la conséquence du premier et le problème contre lequel il s'agit de lutter. Des barrages ont donc été construits pour stabiliser le niveau et le tracé en plan du lit du torrent, limiter les déstabilisations de versants en reboisement et stopper les incisions de long terme des torrents (Demontzey, 1882; Bernard, 1927). Ces ouvrages ont des effets secondaires de rétention totale de sédiment lors de leur remplissage initial et de modulation du transport solide par rétention temporaire des sédiments au gré des respirations torrentielles (variations transitoires du stock sédimentaire du lit se manifestant par des changements dans la côte du fond et la propagation de vagues sédimentaires dans le lit du cours d'eau ; Gras, 1850).

Piégeage des sédiments avant l'arrivée dans la retenue

Au droit des zones de dépôt naturel, des ouvrages de piégeage des sédiments peuvent être implantés. De tels ouvrages ont été créés en parallèle des barrages de correction et des plantations mais n'étaient utilisés qu'en dernier ressort : les moyens de curage mécanique étaient très limités au XIX^e siècle et devaient alors être réalisés à la main. Le développement des engins de terrassement après la seconde guerre mondiale a permis de faciliter les curages, et les ouvrages de piégeage se sont développés (Van Effenterre,

zioni di ripulitura dovevano essere effettuate manualmente. Lo sviluppo delle macchine di movimento terra dopo la seconda guerra mondiale, ha permesso di sveltire le operazioni di pulizia dell'alveo e di conseguenza le opere di ritenuta si sono moltiplicate (Van Effenterre, 1982). L'esodo rurale ha reso questa soluzione ancora più interessante poiché veniva meno la manodopera montana in grado di provvedere alla manutenzione delle briglie e di occuparsi della riforestazione dei bacini in quota.

Canalizzazioni

Oltre alle tecniche di riduzione degli afflussi di materiale solido alla sorgente, di stabilizzazione degli alvei torrentizi nelle zone di produzione e di spostamento, e di cattura dei sedimenti, a volte è sufficiente mantenere il deflusso torrentizio in un determinato tratto con una minima dinamica di deposizioni e di erosioni a livello locale. A tale scopo, vengono regolarmente utilizzate tecniche di protezione delle sponde, di arginatura e di canalizzazioni attraverso la ricalibratura dell'alveo (Van Effenterre, 1982). Queste tecniche sono di solito adoperate anche in contesti di deflusso lento. Bisogna prestare attenzione alla resistenza delle opere alle erosioni nel contesto torrentizio. Peraltro, il franco delle arginature, cioè l'altezza di sicurezza tra il pelo dell'acqua e il coronamento degli argini, deve tenere conto del rischio di variazione del fondo alveo (CIPC, 2013).

Protezione degli invasi dai sedimenti

I volumi di sedimenti prodotti e trasportati in ambiente montano sono tali che, laddove possibile, bisogna concepire delle opere trasparenti a questi afflussi.

1982). L'exode rural a rendu cette solution encore plus intéressante : la main d'œuvre montagnarde en mesure d'entretenir les barrages de correction et de continuer l'effort de végétalisation des hauts bassins diminuait.

Chenalisations

En complément des techniques de diminution des apports solides à la source, de la stabilisation des lits torrentiels dans les zones de production et de transfert, et du piégeage des sédiments, il est parfois simplement nécessaire de maintenir l'écoulement torrentiel dans un tronçon donné avec un minimum de dynamique de dépôts et d'érosions au niveau local. Pour ce faire, sont régulièrement utilisés des techniques de protections de berges, d'endiguements et de chenalisations par recalibrage du lit (Van Effenterre, 1982). Ces techniques sont aussi usuellement utilisées dans des contextes d'écoulements fluviaux. Un plus grand soin à la résistance des ouvrages aux érosions doit être pris dans le contexte torrentiel. Par ailleurs, la revanche des endiguements, c'est-à-dire la hauteur de sécurité entre la ligne d'eau et la crête des digues doit prendre en compte le risque de variation du fond du lit (CIPC, 2013).

La protection des retenues contre les sédiments

Les volumes sédimentaires produits et transportés dans les montagnes sont tels que partout où cela est possible, il faut concevoir des ouvrages transparents à ces apports. Cette transparence peut être obtenue par différents moyens tels que :

Questa trasparenza può essere ottenuta in vari modi, quali:

- lo svuotamento dell'invaso durante la piena, ovvero l'apertura massima di paratoie in grado di far scomparire il rigurgito liquido dovuto allo sbarramento;
- gli scarichi idraulici, che portano all'abbassamento controllato della superficie dell'acqua attraverso l'apertura di paratoie di fondo con l'obiettivo di rimettere in movimento i sedimenti depositati nell'invaso;
- l'adeguamento dell'invaso con un'opera di deviazione: una galleria di by-pass oppure il mantenimento di un canale parallelo all'invaso possono permettere lo spostamento dei deflussi di piena e del loro carico sedimentario senza passare nell'invaso.

Queste tecniche non possono essere adattate a tutti i siti, pertanto numerose briglie si riempiono gradualmente di sedimenti trasportati da fiumi e torrenti che li alimentano (Bouvard, 2004). Questo materiale solido viene convogliato secondo due processi:

1. sedimenti a grana fine: argilla, limo e sabbia vengono trasportati in sospensione e tendono a depositarsi nell'invaso;
2. sedimenti a grana grossa: sabbia grossolana, ghiaia e massi vengono trasportati attraverso meccanismi di trasporto di fondo e tendono a formare un deposito a forma di delta allo sbocco del corso d'acqua nell'invaso.

I depositi sedimentari in eccesso negli invasi vengono generalmente estratti e utilizzati sotto forma di materiale per riempimenti stradali o per il mercato edile. Negli ultimi decenni si è tenuto sempre più conto dei problemi causati dall'interruzione della continuità dei sedimenti e delle misure messe in atto per ridurre questi effetti (Malavoi et al., 2011). Queste preoccupazioni non costituiscono l'argomento del progetto RISBA, ma possono condizionare fortemente la destinazione finale dei sedimenti depositati negli invasi e nelle briglie associate. Ricordiamo semplicemente che negli invasi in cui la "trasparenza

- *l'effacement de la retenue lors de la crue, c'est-à-dire l'ouverture en grand de vannes permettant de faire disparaitre le remous liquide dû au barrage ;*
- *les chasses hydrauliques, c'est-à-dire l'abaissement contrôlé du plan d'eau par l'ouverture des vannes de fonds dans l'objectif de remettre en mouvement les sédiments déposés dans la retenue ;*
- *l'équipement de la retenue par un ouvrage de contournement : un tunnel de by-pass ou le maintien d'un chenal parallèle à la retenue peut permettre de transférer les écoulements de crues et leur charge sédimentaire sans passage dans la retenue.*

Ces techniques ne peuvent être adaptées à tous les sites et de nombreux barrages sont peu à peu comblés de sédiments par les rivières et torrents qui les alimentent (Bouvard, 2004). Ces sédiments sont transportés selon deux processus :

1. *les sédiments fins : argiles, limons et sables sont transportés en suspension et ont tendance à se déposer loin dans le lac de retenue ;*
2. *les sédiments grossiers : sables grossiers, graviers et blocs sont transportés par des mécanismes de charriage et ont tendance à former un dépôt de forme deltaïque au débouché du cours d'eau dans la retenue.*

Les dépôts qui ont eu lieu dans les queues de retenues depuis leur création sont généralement extraits et valorisés sous la forme de granulats pour les remblais routiers ou le marché de la construction. Depuis quelques dizaines d'années, les problèmes causés par la rupture de la continuité sédimentaire et les mesures de réduction de ces effets sont de plus en plus pris en compte (Malavoi et al., 2011). Ces préoccupations ne sont pas l'objet du projet RISBA, mais peuvent fortement influencer la destination finale des sédiments piégés par les retenues et pièges associés. Nous rappellerons simplement que dans les retenues où la transparence sédimentaire n'est pas possible par des effacements, des chasses ou

sedimentaria" non è possibile tramite svuotamenti, scarichi o strutture di by-pass, è consigliabile trattenere gli afflussi appena a monte dell'invaso in un'apposita struttura per poterli estrarre agevolmente e in seguito riutilizzarli nella maniera più appropriata per il sito (ricollocazione a valle).
Il lavoro realizzato nell'ambito dell'*Azione 2.5* del progetto RISBA si è quindi interessato alla protezione degli invasi dei sedimenti e dei depositi di origine torrentizia. Per questa ragione, l'azione ha lavorato sui tre punti seguenti:

1. Quali sono gli standard della progettazione di opere di protezione torrentizia?
2. Quali sono gli effetti delle briglie sul trasporto di materiale solido? Ciò permetterebbe di determinare se è opportuno dotare i corsi d'acqua situati a monte degli invasi di tali opere e di continuare a mantenere le opere esistenti;
3. Quali sono i meccanismi di cattura dei sedimenti alla base del funzionamento di una briglia di trattenuta? Ciò permetterebbe di determinare come progettare correttamente queste opere a monte degli invasi.

Stabilizzazione a monte degli alvei torrentizi: utilizzo delle briglie

Obiettivo delle briglie

Se l'obiettivo primario delle briglie è quello di contrapporsi alle erosioni verticali e laterali degli alvei torrentizi (Demontzey, 1882; Thiéry, 1891; Bernard, 1927), alcuni autori hanno indicato che tali opere possono avere altri effetti come la modulazione del tra-

*des structures de by-pass, il semble préférable de piéger les apports juste en amont de la retenue dans une structure dédiée pour pouvoir les extraire dans de bonnes conditions et ensuite les réutiliser de la façon la plus adaptée au site (réintroduction des matériaux en aval, valorisation extérieure). Le travail réalisé dans le cadre de l'*Action 2.5 *du projet RISBA s'est donc intéressé à la protection des retenues contre les sédiments et les dépôts torrentiels. Pour cela, cette action a travaillé sur les trois questions suivantes :*

1. *Quelles sont les règles de l'art de la conception des ouvrages de protection torrentielles ?*
2. *Quels sont les effets des barrages de correction torrentielle sur le transport solide ? Cela permettrait de déterminer s'il est pertinent d'équiper les cours d'eau situés en amont des retenues par de tels ouvrages et de continuer à maintenir les ouvrages existants ;*
3. *Quels sont les mécanismes de piégeage des sédiments qui permettent le bon ou le mauvais fonctionnement d'une plage de dépôt ? Cela permettrait de déterminer comment concevoir pertinemment ces ouvrages en amont des retenues.*

Stabilisation amont des lits torrentiels : utilisation des barrages de correction torrentielle

Objectif des barrages de correction

Si l'objectif premier des barrages de correction torrentielle était présenté comme étant une lutte contre les affouillements verticaux et latéraux des lits torrentiels (Demontzey,

sporto solido, vale a dire l'attenuazione dei picchi degli apporti di sedimenti del bacino imbrifero verso apporti più regolari e meno intensi (Gras, 1857). Quest'aspetto interessante per la gestione dei rischi torrentizi può essere utile anche agli operatori degli invasi collinari e montani: è più facile gestire afflussi sedimentari regolari e poco intensi piuttosto che afflussi sporadici e intensi. Sono state effettuate alcune prove su modelli fisici su lunghi periodi per comprendere meglio le conseguenze delle briglie e di questi fenomeni di modulazione del trasporto di sedimenti.

Nuovi elementi evidenziati dalle prove condotte nel progetto RISBA

Sperimentazioni e risultati

Sono state analizzate tre diverse configurazioni (Figura 1): un test di riferimento senza alcuna opera (Ref Test), un secondo test con una briglia (1CD Test) e un ultimo test con tre briglie (3CD Test). Maggiori dettagli sono disponibili nei lavori di Piton & Recking (2014a, 2014b).

ASPETTO DELL'ALVEO E ASSORTIMENTO GRANULOMETRICO Il trasporto di fondo può essere importante nei fiumi di montagna. La differenza di mobilità tra sedimenti fini e grossolani porta a un meccanismo molto efficace di assortimento granulometrico dalle conseguenze controverse, con alvei che si alternano fra stati stabili (corrazzamento di superficie) ed erosioni molto intense (distruzione del corrazzamento). Un forte assortimento granulometrico comporta un cambiamento dell'aspetto del letto tra due stati

1882; Thiéry, 1891; Bernard, 1927), certains auteurs indiquaient que ces ouvrages pouvaient avoir d'autres effets tels que la modulation du transport solide, c'est-à-dire l'atténuation des pics de fourniture sédimentaire du haut bassin versant en une fourniture plus régulière et moins intense (Gras, 1857). Cet aspect intéressant pour la gestion des risques torrentiels peut aussi intéresser les gestionnaires des retenues collinaires et d'altitude : il est plus aisé de gérer des apports sédimentaires réguliers et peu intenses, que des apports erratiques et intenses. Des essais sur modèles physiques ont été réalisés sur de longues durées pour mieux comprendre l'effet des barrages et de ces phénomènes de modulations du transport sédimentaire.

Nouveaux éléments mis en évidence par les essais conduits dans le projet RISBA

Dispositif expérimental et résultats

Trois configurations différentes ont été analysées (Figure 1) : un test de référence sans ouvrage (Ref Test), un second avec un ouvrage de correction torrentielle (1CD Test) et un dernier avec trois ouvrages de correction torrentielle (3CD Test). Plus de détails sont disponibles dans (Piton and Recking, 2014a, 2014b).

ASPECT DU LIT ET TRI GRANULOMÉTRIQUE *Le transport par charriage peut être important dans les rivières de montagne. La différence de mobilité entre les sédiments fins et grossiers conduit à un mécanisme très efficace de tri granulométrique aux conséquences contrastées, avec des lits alternant entre des états stables (pavage de surface) et des*

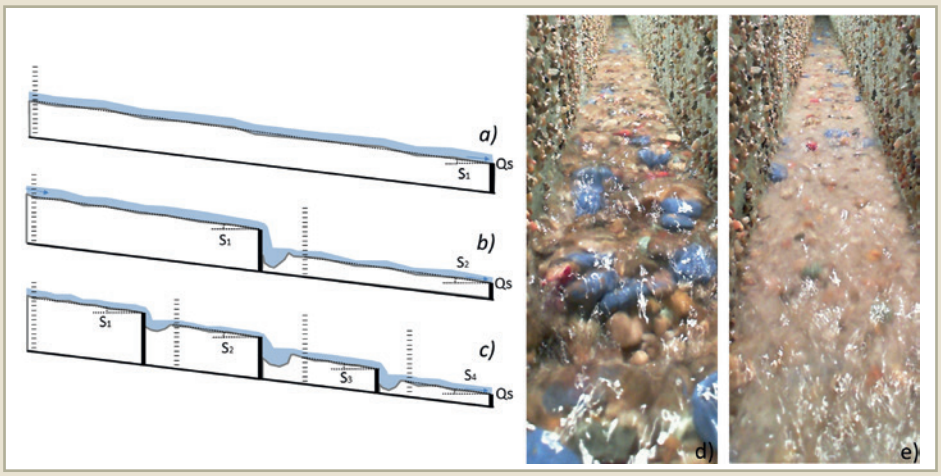
estremi, illustrati nella Figura 1: (i) un fondo alveo di sedimenti grossolani durante le fasi di aggradazione, e (ii) un alveo ricoperto di sedimenti fini portati a giorno durante le fasi di erosione. Questa capacità di oscillare fra i due stati estremi è tipica dei fiumi di montagna e costituisce la principale causa dei rischi connessi (Recking et al., 2008; Recking, 2010, 2013; Bacchi et al., 2014), oltre a costituire l'oggetto della ricerca descritta nel seguito.

TRASPORTO DI SEDIMENTI L'aspetto della superficie dell'alveo incide sull'efficacia del trasporto solido: più il letto è rugoso, più il trasporto di sedimenti è debole e viceversa. La portata solida in uscita del canale oscilla quindi fra meno dell'1% e più del 300% del tasso di alimentazione durante le fasi di aggradazione o di asportazione di sedimenti (Figura 2).

PENDENZE DELL'ALVEO Le fluttuazioni di portata solida inducono delle variazioni di accumulo nell'alveo per conservazione della massa (Figura 2). Le pendenze di ogni tratto del corso d'acqua evolvono quindi nel tempo, riproducendo i cicli dei torrenti rilevati sul campo dal RTM in Francia e dal Consorzio Forestale in Italia.

FIGURA 1
Schema dei diversi dispositivi: a) Ref Test; b) 1CD Test; c) 3CD Test – e stati estremi dell'alveo –; d) alveo pavimentato di sedimenti grossolani; e) letto ricoperto di sedimenti fini durante lo scorrimento in falde di fondo.

FIGURE 1
Schéma des différents dispositifs: a) Ref Test ; b) 1CD Test ; c) 3CD Test – et états extrêmes du lit –; d) lit grossier pavé; e) lit fin lors des nappes de charriage.



érosions très intenses (destruction du pavage). Un fort tri granulométrique induit une variation de l'aspect du lit entre deux états extrêmes illustrés en Figure 1 : (i) un lit pavé de sédiments grossiers lors des phases d'aggradation, et (ii) un lit recouvert de sédiments fins mis à jour lors des phases d'érosion. Cette capacité à basculer entre deux états extrêmes est propre aux rivières de montagne, et est en grande partie la cause des aléas associés (Recking et al., 2008; Recking, 2010, 2013; Bacchi et al., 2014) et c'est elle qui intéresse la recherche dans la suite.

TRANSPORT SÉDIMENTAIRE
L'aspect de surface du lit influence l'efficacité du transport solide : plus le lit est rugueux, plus le transport sédimentaire est faible et inversement. Le débit solide en sortie de canal varie ainsi entre moins de 1% et plus de 300% du taux d'alimentation lors des phases d'aggradation ou de dépavage (Figure 2).

PENTES DU LIT *Les fluctuations de débit solide induisent des variations de stockage dans le lit par conservation de la masse (Figure 2). Les pentes de chaque bief évoluent donc au cours du temps, reproduisant les respirations des torrents observées sur le terrain par le RTM en France et le Consorzio Forestale en Italie.*

FLUTTUAZIONE DELL'ALVEO La presenza di opere di sistemazione torrentizia condiziona la frequenza delle fluttuazioni dell'alveo in funzione della lunghezza dei tratti fra briglie (Figura 2). È stato osservato che la durata fra i due stati estremi del letto (massima aggradazione ed erosione) aumentava in parallelo alla lunghezza del tratto.

Discussioni e conclusioni

EFFETTO A LUNGO TERMINE SULL'EQUILIBRIO DELLE PENDENZE I risultati dei nostri esperimenti dimostrano che le briglie non influenzano in maniera significativa la pendenza media in condizioni di apporti sedimentari simili e dal confronto con un tratto alluvionale senza opere (Figura 2).
Tuttavia tali riduzioni di pendenze fra le briglie sono osservate sul terreno (Kostadinov, 1993; Porto and Gessler, 1999; Ferro and Porto, 2011). Riteniamo che queste osservazioni possano essere legate a due motivazioni:

1. i torrenti sono stati spesso contemporaneamente rimboschiti: se l'apporto di sedimenti diminuisce nel corso del tempo per queste e altre motivazioni, le pendenze tra le briglie e quella generale dell'alveo sono destinate a ridursi (Thiéry, 1891; Poncet, 1995).

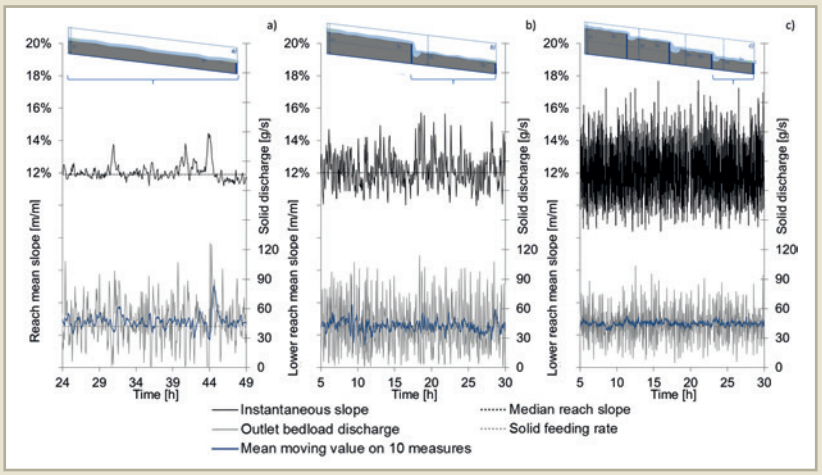


FIGURA 2
25h di evoluzione temporale delle pendenze dei tratti del corso d'acqua a valle e della portata solida a valle: a) Ref test senza briglie, b) 1CD test con una briglia e c) 3CD test con 3 briglie.

FIGURE 2
25h d'évolution temporelle des pentes des biefs aval et du débit solide aval: a) Ref test sans barrage, b) 1CD test avec un barrage et c) 3CD test avec 3 barrages.

FLUCTUATION DU LIT *La présence d'ouvrages de correction torrentielle influence la fréquence des fluctuations du lit en fonction de la longueur des biefs entre barrages (Figure 2). Il a été observé que la durée entre les deux états extrêmes du lit (aggradation et érosion maximales) augmentait avec la longueur du bief.*

Discussions et conclusions

INFLUENCE À LONG TERME SUR L'ÉQUILIBRE DES PENTES *Les résultats de nos expériences montrent que les barrages de correction torrentielle n'influencent pas significativement la pente moyenne dans des conditions de fourniture sédimentaire similaire et par comparaison avec un bief alluvial sans ouvrage (Figure 2).*
Pourtant de telles diminutions de pentes sont observées sur le terrain entre les barrages de correction torrentielle (Kostadinov, 1993; Porto and Gessler, 1999; Ferro and Porto, 2011). Nous pensons que ces observations peuvent être liées à deux raisons :

1. *les torrents qui ont été corrigés par des barrages ont souvent été reboisés en parallèle : si la fourniture sédimentaire diminue au cours du temps, pour ces raisons ou pour d'autres, les pentes entre les barrages et celle générale du lit sont vouées à diminuer (Thiéry, 1891; Poncet, 1995).*

2. le pendenze iniziali degli alvei coinvolti probabilmente non erano puramente alluvionali (letto scavato su roccia, influenza di massi rocciosi di origine colluviale). La realizzazione di sbarramenti al di sopra dell'alveo porta a pendenze alluvionali più modeste.

In questo contesto, ipotizziamo che l'aggiunta di opere di sistemazione torrentizia non porti a una riduzione sistematica e intrinseca della pendenza media dei tratti del corso d'acqua: la loro presenza accelera semplicemente il raggiungimento dell'equilibrio dinamico.

EFFETTO A BREVE TERMINE SUI VOLUMI DI EROSIONE Il test di riferimento dimostra che un evento erosivo può influenzare l'intero canale. L'aggiunta di opere di sistemazione torrentizia crea dei punti fissi nel letto del torrente: ogni segmento evolve allora in maniera indipendente dagli altri. La lunghezza dei tratti viene quindi ridotta, mentre il volume accumulato e la probabilità di erosioni di grandi dimensioni diminuiscono. Ciò spiega la variazione di frequenza dei picchi di trasporto solido a valle (Figura 2): se ciascun volume di erosione è minore, il principio di conservazione della massa impone che aumenti la frequenza dei cicli. Si osservano allora delle pulsazioni di materiale solido più frequenti ma di minor volume.

CONCLUSIONI Abbassando i volumi massimi trasportati durante gli eventi di erosione, le briglie e le soglie torrentizie intervengono efficacemente sulla riduzione dei rischi: permettono infatti di «liberare ciò che i torrenti rilascerebbero in massa troppo brutalmente» (Poncet, 1995). Questi risultati mettono in evidenza l'importanza della costruzione di queste strutture a monte degli invasi potenzialmente minacciati dai rischi dei fenomeni torrentizi: in presenza di briglie, la gestione dei flussi solidi, meno intensi e più regolari, è più agevole rispetto a quella con afflussi rari e massivi, che minacciano l'invaso d'interramento.

2. *les pentes initiales des lits concernés n'étaient probablement pas purement alluviales (lit creusé dans le socle rocheux, influences de blocs rocheux d'origines colluviales). La création de barrages au-dessus du lit permet la création de pentes alluviales plus faibles.*

Dans ce cadre, nous faisons l'hypothèse que l'ajout d'ouvrages de correction torrentielle ne conduit pas à une baisse systématique et intrinsèque de la pente moyenne des biefs : leur présence accélère simplement l'atteinte de l'équilibre dynamique.

INFLUENCE À COURT TERME SUR LES VOLUMES D'ÉROSION *Le test de référence montre qu'un événement érosif (dépavage) peut affecter la totalité du canal. L'ajout d'ouvrages de correction torrentielle crée des points fixes dans le lit du torrent : chaque segment évolue alors indépendamment des autres. La longueur des biefs est ainsi raccourcie, le volume stocké et la probabilité de dépavages de grande ampleur diminuent. Ce constat explique le changement de fréquence des bouffées sédimentaires à l'aval (Figure 2) : si chaque volume d'érosion est plus petit, le principe de conservation de la masse impose que la fréquence des cycles augmente. On observe alors des pulsations solides plus fréquentes mais de moindre volume.*

CONCLUSION *En abaissant les volumes maximaux transportés lors des événements de dépavage, les barrages et seuils de correction torrentielle participent efficacement à la réduction des risques : ils permettent en effet de « libérer au détail ce que les torrents relâcheraient en masse trop brutalement » (Poncet, 1995). Ces résultats mettent en évidence l'intérêt de l'installation de telles structures en amont des retenues potentiellement menacées par des aléas torrentiels : en présence de barrages de correction, la gestion des flux solides, moins intenses et plus réguliers, est rendue plus aisée que celle d'apports rares et massifs menaçants la retenue d'engravement.*

Cattura dei sedimenti a monte dell'invaso: le briglie filtranti

Obiettivo delle briglie filtranti

Le briglie filtranti possono avere obiettivi molto diversi (Hübl et al., 2005), il che spiega la grande varietà di forme delle opere esistenti (Figura 3):

- ritenzione: cattura del carico di sedimenti nell'opera;
- modulazione della portata solida: cattura temporanea dei volumi solidi per ridurre le elevate portate istantanee nel tratto a valle;
- filtraggio: cattura selettiva di massi rocciosi o di legname che potrebbero causare problemi nel tratto a valle;
- dispersione di energia: opere destinate a disperdere la grande energia dei flussi di colata detritica per ridurne il potere erosivo nel canale a valle.

L'attribuzione di un determinato obiettivo a un'opera è direttamente collegata agli effetti desiderati a valle e a monte della stessa e ai fenomeni che possono causare problemi (tendenza al deposito, limitata capacità di trasporto, rischio d'ostruzione dell'alveo, sensibilità all'erosione, ecc.). Nel caso di invasi collinari e montani che rendono impossibili le operazioni di "trasparenza sedimentaria", l'obiettivo di una briglia filtrante sarà quello di effettuare una trattenuta completa dei sedimenti grossolani. La trattenuta dei sedimenti fini richiede grandi bacini in cui i deflussi siano sufficientemente calmi per permettere la sedimentazione del carico in sospensione. Questo tipo di opera è generalmente troppo ingombrante per essere realizzata in montagna e non costituisce l'oggetto di questo studio. I sedimenti fini possono essere almeno in parte gestiti dagli scarichi degli invasi.

Piégeage des sédiments en amont de la retenue : les barrages filtrants

Objectif des barrages filtrants

Les barrages filtrants peuvent avoir des objectifs très divers (Hübl et al., 2005), ce qui explique la grande diversité de formes d'ouvrages existants sur le terrain (Figure 3) :

- *rétention : piégeage définitif de la charge sédimentaire dans l'ouvrage ;*
- *modulation du débit solide : piégeage temporaire de volumes solides pour diminuer les forts débits instantanés dans le bief aval ;*
- *filtration : piégeage sélectif des blocs rocheux ou bois flottants qui pourraient poser des problèmes dans le bief aval ;*
- *brise charge : ouvrages dédiés à dissiper la forte énergie des bouffées de laves torrentielles pour en diminuer le pouvoir érosif dans le chenal aval.*

L'assignation d'un objectif donné à un ouvrage est directement liée aux enjeux aval et aux phénomènes pouvant poser problèmes (tendance aux dépôts, capacité de transport limitée, risque d'embâcles, sensibilité à l'érosion, etc.). Dans le cas des retenues collinaires et d'altitude où les opérations de transparence sédimentaire sont impossibles, l'objectif d'un barrage filtrant sera d'opérer une rétention complète des sédiments grossiers.
La rétention des sédiments fins nécessite de grands bassins où les écoulements sont assez calmes pour permettre la sédimentation de la charge en suspension. Ce type d'ouvrage est généralement trop encombrant pour être mis en place en montagne et ne fait pas l'objet de la présente note. Les sédiments fins peuvent faire l'objet de chasses dans les retenues.

Meccanismi di controllo della cattura dei sedimenti

La deposizione del carico solido grossolano trasportato dai torrenti può essere controllata da diversi processi correlati alle caratteristiche delle briglie filtranti (Figura 4; Zollinger, 1983):

1. riduzione della capacità di trasporto nell'invaso connessa a una pendenza inferiore alla pendenza del corso d'acqua a monte;
2. dispersione laterale d'acqua e dei deflussi che determina un crollo della capacità di trasporto;
3. sedimentazione del carico grossolano nella zona di basso moto ondoso idrico a monte della briglia filtrante: formazione di un delta;
4. bloccaggio meccanico dei materiali trasportati contro la briglia filtrante.

FIGURA 3
Briglie filtranti: a) Briglia a pettine del Rio Fosse (Val de Susa, It.): ritenzione completa per bloccaggio meccanico dei ciottoli; b) Briglia a dente del Rio Joans (Val de Susa, It.) cattura selettiva dei grandi massi per bloccaggio meccanico; c) Grande briglia ad aperture verticali dotata di griglie in acciaio del torrente Grand Valey (Valle d'Aosta, It.): ritenzione degli eventi estremi mediante riempimento delle griglie per bloccaggio meccanico di grossi massi e d) Briglia a fessura del Lavanchon (Isère, Fr.): modulazione tramite controllo idraulico e ritenzione completa per bloccaggio meccanico del materiale galleggiante.

FIGURE 3
Barrages flitrants : a) Barrage peigne de Rio Fosse (Val de Susa, It.) : rétention complète par blocage mécanique des galets ; b) Barrage à dent de Rio Joans (Val de Susa, It.) piégeage sélectif des gros blocs par blocs mécanique ; c) Barrage à fentes large équipées de grilles aciers du Torrent de Grand Valey (Val d'Aoste, It.) : rétention des évènements extrêmes liée au colmatage des grilles par blocage mécanique de gros blocage et d) Barrage à pertuis du Lavanchon (Isère, Fr.) : modulation par contrôle hydraulique et rétention complète par blocage mécanique des flottants.

Mécanismes contrôlant le piégeage

Le dépôt de la charge solide grossière transportée par les torrents peut être contrôlé par différents processus liés aux caractéristiques des barrages filtrants (Figure 4; Zollinger, 1983) :

1. *la diminution de la capacité de transport dans le bassin du barrage liée à une pente de bassin plus faible que la pente amont du cours d'eau ;*
2. *l'étalement de la lame d'eau et des écoulements résultant en une chute de la capacité de transport ;*
3. *la sédimentation de la charge grossière dans la zone d'eau calme liée au remous liquide en amont du barrage filtrant : formation d'un delta ;*
4. *le blocage mécanique des matériaux transportés contre le barrage filtrant.*

A seconda dello spazio disponibile per la realizzazione delle opere di cattura dei sedimenti, i progettisti metteranno a frutto i differenti meccanismi: per esempio su un sito in cui è disponibile una grande area a monte dell'invaso, un bacino grande e con scarsa pendenza genererà deposizioni grazie ai meccanismi ❶ e ❷, anche in presenza di una briglia di piccole dimensioni.
Se invece lo spazio a disposizione è ridotto, uno sbarramento di altezza maggiore permetterà di sfruttare i meccanismi ❸ e ❹ per catturare i sedimenti su un'altezza maggiore.

Nuovi elementi evidenziati

Quesiti scientifici

I criteri di progettazione che permettono di controllare i meccanismi ❸ e ❹ sono, secondo la sintesi delle conoscenze attuali realizzata nell'ambito del progetto RISBA, relativamente ben riportati in letteratura (Piton & Recking, 2015a, 2015b).

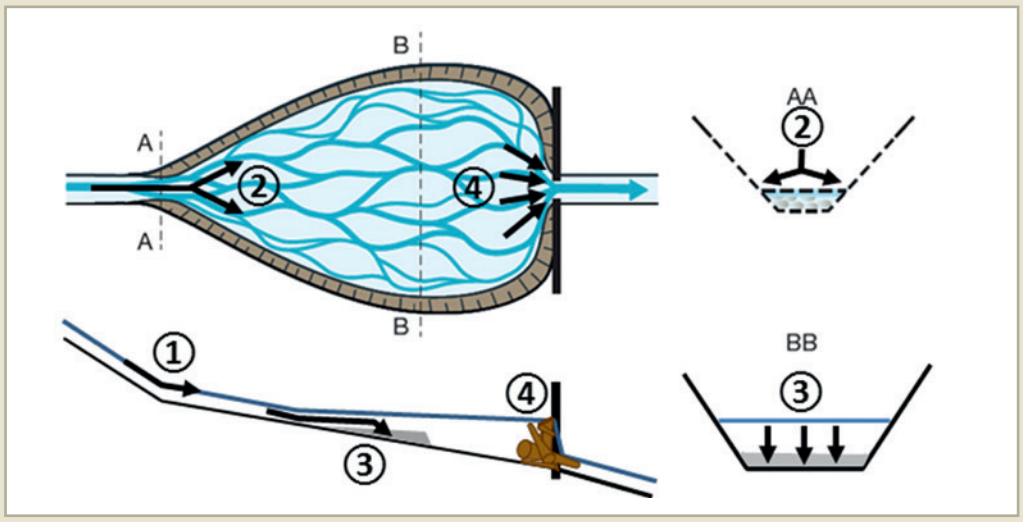


FIGURA 4
Meccanismi di controllo del deposito di sedimenti in una briglia filtrante: 1) riduzione della capacità di trasporto correlata a pendenza del bacino inferiore alla pendenza del torrente, 2) riduzione della capacità di trasporto legata alla dispersione laterale dei deflussi, 3) sedimentazione a forma di delta nella zona di basso moto ondoso a monte della briglia e 4) bloccaggio dei materiali trasportati contro la briglia filtrante (adattato da Zollinger 1983).

FIGURE 4
Mécanismes contrôlant le dépôt des sédiments dans un barrage filtrant : 1) diminution de la capacité de transport liée à une pente de bassin inférieure à la pente du torrent, 2) diminution de la capacité de transport liée à l'étalement des écoulements, 3) sédimentation deltaïque dans la zone de remous liquide du barrage filtrant et 4) blocage mécanique des matériaux transportés contre le barrage filtrant (adapté de Zollinger 1983).

En fonction de la place disponible pour la mise en place du piège à sédiments, les concepteurs mettront à profit les différents mécanismes : par exemple sur un site où une surface importante est disponible en amont de la retenue, un bassin large et de faible pente générera des dépôts grâce aux mécanismes ❶ et ❷, même en présence d'un barrage de petite taille. Si au contraire, peu de place est disponible, un barrage de plus grande hauteur permettra de mettre à profit les mécanismes ❸ et ❹ pour piéger des sédiments sur une plus grande épaisseur.

Nouveaux éléments mis en évidence

Questions scientifiques

Les critères de conception permettant de contrôler les mécanismes ❸ et ❹ sont, d'après la synthèse de l'état de l'art réalisé dans le cadre du projet RISBA, relativement bien renseignés dans la littérature (Piton and Recking, 2015a, 2015b).

I meccanismi ❶ e ❷ sono invece meno noti. Pochi esperimenti hanno studiato in dettaglio la dinamica di deposizione e di erosione nei bacini delle briglie filtranti. Sono stati pertanto condotti degli esperimenti per fornire elementi di conoscenza all'idraulica e alla morfo-dinamica che si verificano nei bacini di trattenuta (Le Guern, 2014; Le Guern et al., 2014). Osservazioni sul terreno sono in corso di svolgimento per completare queste analisi.

Meccanismi di deposizione nelle opere di cattura di sedimenti

METODO DI RICERCA Sono stati effettuati esperimenti di laboratorio per modellizzare i fenomeni di deposizione del materiale di fondo alveo in una zona di allargamento dell'alveo chiusa da una briglia filtrante. I dettagli riguardanti la tipologia sperimentale possono essere trovati nel lavoro di Le Guern (2014). Inoltre sono state avviate simulazioni sperimentali per modellizzazione numerica delle problematiche per testare la capacità dei software a riprodurre le morfologie complesse di tipo "intrecciata" (Rifaï, 2014). Sono state condotte campagne d'osservazione del riempimento di bacini di trattenuta grazie a telecamere installate sul campo.
A completamento della ricerca sono stati effettuati dei sopralluoghi su opere in Francia e in Italia con la partecipazione degli ingegneri di Irstea, della Regione Piemonte e Regione Autonoma Valle d'Aosta e gli esperti locali delle problematiche torrentizie: Valerio Segor della Divisione Assetto Idrogeologico dei Bacini Imbriferi della Regione Valle d'Aosta, Alberto Dotta del Consorzio Forestale dell'Alta Val di Susa e Yann Quéféléan del RTM (Figura 3).

Les mécanismes ❶ et ❷ sont par contre moins connus et peu d'expériences ont étudié en détail la dynamique de dépôt et d'érosion dans les bassins des barrages filtrants. Des expériences ont donc été réalisées pour apporter des éléments de connaissance à l'hydraulique et à la morpho-dynamique des dépôts massifs se déroulant dans les plages de dépôts (Le Guern, 2014; Le Guern et al., 2014). Des observations de terrains sont en cours pour compléter ces analyses.

Dynamique des mécanismes de dépôts dans les pièges à sédiments

DÉMARCHE DE RECHERCHE *Des expériences en laboratoire ont été réalisées afin de modéliser les phénomènes de dépôts de charriage dans une zone d'élargissement terminée par un barrage filtrant. Les détails concernant le dispositif expérimental peuvent être trouvés dans (Le Guern, 2014). En complément, des simulations exploratoires par modélisation numérique des problématiques ont été entreprises pour tester la capacité des logiciels à reproduire les morphologies complexes de type tressage (Rifaï, 2014).*

Des missions d'observation des remplissages de plages de dépôt ont été menées grâce à des caméras installées sur le terrain. Pour compléter l'ensemble des visites d'ouvrages ont été réalisées en France et en Italie faisant intervenir les ingénieurs d'Irstea, des Regions Piémont et Val d'Aoste et les experts locaux des problématiques torrentielles : Valerio Segor de la Division Aménagement Hydrogéologiques des Bassins Versant de la région Val d'Aoste, Alberto Dotta du Consorzio Forestale du Haut Val de Suse et Yann Quéféléan du RTM (Figure 3).

ASSORTIMENTO GRANULOMETRICO L'assortimento granulometrico che generava dei fenomeni di fluttuazioni 2D a livello del letto negli esperimenti in canale stretto ha esteso la sua manifestazione a fluttuazioni 3D del tracciato in piano dei canali di scorrimento. La morfologia dei depositi è risultata estremamente controllata dai meccanismi di distribuzione granulometrica.

MORFOLOGIA DI DEPOSITI Abbiamo rilevato una tendenza dei depositi a presentare dei cicli fra uno stato canalizzato e uno stato di scorrimento in falde o a canali multipli. Queste fluttuazioni cicliche sono state precedentemente osservate su esperimenti riguardanti la dinamica dei coni di deiezione o dei delta (Van Dijk et al., 2009, 2012; Reitz and Jerolmack, 2012).
La prima fase del ciclo morfologico corrisponde alla formazione di un deposito a monte del bacino di trattenuta. Quest'ultimo è legato principalmente al meccanismo ❷. Il deflusso smuove l'area creando piccoli avanzamenti di depositi di forma lobata da una parte all'altra della deposizione iniziale. Quest'ultima si allunga e si allarga mentre si solleva, formando un'accumulo ripido concentrato a monte del bacino di trattenuta. Nei canali multipli ha luogo un trasporto di sedimenti secondario, che finisce col costituire delle morfologie di tipo intrecciato (Le Guern et al., 2014).
L'accumulo raggiungerà infine uno stato instabile perché troppo ripido e alto, portando a una distruzione locale della pavimentazione naturale dell'alveo e alla liberazione delle "falde di fondo" (ondate di sedimenti più fini levigano il fondo dell'alveo aumentando la capacità di trasporto). Questi fenomeni destabilizzano allora bruscamente la deposizione e l'erosione si arresta. Un canale centrale si abbassa nel deposito e trascina i sedimenti a valle del bacino di accumulazione.

TRI GRANULOMÉTRIQUE *Le tri granulométrique qui générait des phénomènes de fluctuations 2D du niveau du lit dans les expériences en canal étroit a étendu son expression à des fluctuations 3D du tracé en plan des chenaux d'écoulement. La morphologie des dépôts s'est trouvée extrêmement contrôlée par les mécanismes de tri granulométrique.*

MORPHOLOGIES DES DÉPÔTS *Nous avons mis en évidence une tendance des dépôts à présenter des cycles entre un état chenalisé et un état d'écoulements en nappes ou à chenaux multiples. Ces fluctuations cycliques ont été précédemment observées sur des expériences concernant la dynamique des cônes de déjection ou des deltas (Van Dijk et al., 2009, 2012; Reitz and Jerolmack, 2012).*
La première phase du cycle morphologique correspond à la formation d'un dépôt massif en amont de la plage. Ce dernier est lié principalement au mécanisme ❷. L'écoulement balaye la zone, créant de petites avancées des dépôts sous la forme de lobes de part et d'autre du dépôt initial. Celui-ci s'allonge et s'élargit en même temps qu'il s'élève. Il forme une accumulation raide concentrée dans l'amont de la plage de dépôt. Un transport sédimentaire secondaire a lieu dans les chenaux multiples. Ce transport finit par former des morphologies de tressage (Le Guern et al., 2014).
L'accumulation finit par atteindre un état instable car trop raide et haut, conduisant à une destruction locale du pavage et à la libération des nappes de charriages (bouffées de sédiments plus fins lissant le fond du lit et augmentant la capacité de transport). Ces phénomènes déstabilisent alors brusquement le dépôt et l'érosion s'emballe. Un chenal central s'incise dans le dépôt et entraine les sédiments vers l'aval du bassin de stockage.

La dispersione del deflusso a valle del deposito (meccanismo ❷) e le deposizioni massive legate al meccanismo ❸ generano un nuovo arresto dei sedimenti rimessi in movimento. Le deposizioni che si verificano in un bacino di trattenuta non sembrano quindi avvenire in maniera regolare sotto forma di processo continuo. Si verificano di preferenza allo sbocco del torrente nel bacino. Alcuni cicli di deflusso canalizzati e in falda disperdono poi i sedimenti nel bacino. I meccanismi ❸ e ❹ finiscono per catturare gli afflussi nella parte a valle del bacino. Le deposizioni nelle opere di cattura per sedimenti sono quindi il risultato della confluenza di fronti sedimentari che avanzano in maniera ciclica e controllata dai meccanismi ❶ e ❷ e i moti ondosi solidi controllati da valle dai meccanismi ❸ e ❹.

APPLICAZIONE DI FORMULE DI VALUTAZIONE DEL TRASPORTO SOLIDO Grazie alle formule di trasporto solido solitamente utilizzate in ambito torrentizio (Smart and Jaeggi, 1983; Couvert et al., 1991; Rickenmann, 1991) è stato effettuato un tentativo di modellizzazione dei fenomeni descritti. Variando le larghezze di trasporto in funzione delle larghezze misurate nel corso degli esperimenti, ci aspettiamo di osservare le pendenze misurate per le diverse concentrazioni solide introdotte nel canale. Abbiamo rilevato invece che le formule ricavate dalla letteratura sottostimavano sistematicamente le pendenze dei depositi. Se ne deduce che la pendenza dei depositi non può essere valutata in maniera precisa nei grandi bacini di ritenuta. È necessario pertanto sviluppare un metodo alternativo; il lavoro proseguirà su quest'argomento.

MODELLIZZAZIONE NUMERICA Sono stati effettuati dei test per valutare la capacità dei software di modellizzazione numerica di riprodurre i processi idraulici e geomorfologici che si verificano nei bacini di ritenuta.
Gli esperimenti di Le Guern et al. (2014) hanno confermato che i depositi nelle opere di

L'étalement de l'écoulement en aval du dépôt (mécanisme ❷) et les dépôts massifs liés au mécanisme ❸ génèrent un nouvel arrêt de ces sédiments remis en mouvement.
Les dépôts ayant lieu dans le bassin d'une plage de dépôt ne semblent donc pas avoir lieu de manière régulière sous la forme d'un processus continu. Ils se font préférentiellement au débouché du torrent dans le bassin. Des cycles d'écoulements en nappe et chenalisés dispersent ensuite les sédiments dans le bassin. Les mécanismes ❸ et ❹ finissent par piéger les apports dans la partie aval du bassin. Les dépôts dans les pièges à sédiments sont donc le résultat de la rencontre de fronts sédimentaires avançant de façon cyclique et contrôlés par les mécanismes ❶ et ❷ et les remous solides contrôlés par l'aval par les mécanismes ❸ et ❹.

APPLICATION DE FORMULES D'ESTIMATION DU TRANSPORT SOLIDE *Une tentative de modélisation des phénomènes décrits plus haut grâce aux formules de transport solide usuellement utilisées dans les torrents a été réalisée (Smart and Jaeggi, 1983; Couvert et al., 1991; Rickenmann, 1991). En faisant varier les largeurs de transport en fonction des largeurs mesurées lors des expériences, nous espérions retrouver les pentes mesurées pour les différentes concentrations solides injectées dans le canal. Nous avons observé que les formules tirées de la littérature* sous estimaient systématiquement *les pentes des dépôts. Nous en concluons que la pente des dépôts ne peut pas être estimée de façon précise dans les bassins larges des plages de dépôt. Une méthode alternative doit être développée pour cela. Le travail sera poursuivi sur ce sujet.*

MODÉLISATION NUMÉRIQUE *Des tests ont été entrepris pour explorer la capacité des logiciels de modélisation numérique à reproduire les processus hydrauliques et géomorphologiques qui ont lieu dans les plages de dépôts.*

cattura di sedimenti assomigliano alle morfologie dei fiumi intrecciati. Rifaï (2014) ha pertanto testato la capacità del software TELEMAC2D-SYSIPHE a riprodurre dei sistemi ramificati. I test presentano risultati incoraggianti, ma anche un'incapacità del software a mantenere le facies caratteristiche a canali multipli. Bisognerà condurre ricerche più approfondite sulle equazioni che descrivano i meccanismi di distribuzione granulometrica e sulla capacità del software di revisionare le sue griglie di calcolo in tempo reale prima di poter applicare i dispositivi numerici nelle fasi di progettazione di bacini di ritenuta.

Conclusioni

Gli invasi collinari e montani devono essere protetti contro i rischi torrentizi che possono scatenarsi nelle aree limitrofe.
È necessario mettere in atto tecniche di protezione contro le erosioni in caso di vicinanza dei deflussi alle infrastrutture. Si deve inoltre proteggere l'opera dagli accumuli se la stessa non è progettata come "trasparente". Per trattenere tutto il carico sedimentario a monte degli invasi collinari e montani, raccomandiamo quindi di realizzare a monte delle opere di cattura di sedimenti.
Queste ultime saranno dotate di un bacino dalla larghezza massima possibile al fine di ottimizzare l'effetto ❷ (la dispersione laterale dei deflussi). Laddove possibile, le loro pendenze verranno ridotte per massimizzare l'effetto ❶ (la riduzione della capacità di trasporto nel bacino della briglia legata a una pendenza di bacino inferiore alla pendenza a monte del corso d'acqua). Qualora si rendessero necessari degli scavi per costruire i bacini, la parte superiore dei bacini sarà dotata di una struttura tipo briglia che riduce il

Les expériences de (Le Guern et al., 2014) ont confirmé que les dépôts dans les pièges à sédiments ressemblent aux morphologies des rivières en tresses. (Rifaï, 2014) a donc testé la capacité du logiciel TELEMAC2D-SYSIPHE à reproduire des systèmes en tresses. Les tests montrent des résultats encourageant mais une incapacité du logiciel à maintenir le faciès caractéristiques à chenaux multiples. Des recherches plus approfondies sur les équations décrivant les mécanismes de tri granulométriques et sur la capacité du logiciel à réviser son maillage de calcul en temps réel doivent être menées avant de pouvoir espérer appliquer les outils numériques actuels dans des études de conceptions de plages de dépôts.

Conclusions

Les retenues collinaires et d'altitude doivent être protégées contre les risques torrentiels qui peuvent sévir à leur voisinage.
Des techniques de protection contre les érosions doivent être mises en place si des écoulements approchent les infrastructures. Il faut en complément protéger l'ouvrage contre les dépôts si ce dernier n'est pas transparent. Pour piéger l'ensemble de la charge sédimentaire en amont des retenues collinaires et d'altitude, nous préconisons donc de mettre en place des pièges à sédiments.
Ces derniers seront équipés d'un bassin à la largeur maximum possible afin de maximiser l'effet ❷ (l'étalement de la lame d'eau et des écoulements). Partout où cela est possible, leurs pentes seront abaissées pour maximiser l'effet ❶ (la diminution de la capacité de transport dans le bassin du barrage liée à une pente de bassin plus faible que la pente amont du cours d'eau). Si des déblais sont nécessaires pour établir les bassins, le haut

rischio di destabilizzazione del canale a monte. Le briglie filtranti di chiusura delle opere saranno dotate di barre molto ravvicinate o di un piccolo varco (Figura 3a e d) per ottimizzare il risultato ❸ e ❹ (sedimentazione del carico di materiale grossolano nella zona di basso moto ondoso idrico a monte della briglia filtrante e bloccaggio meccanico dei materiali trasportati contro la briglia filtrante).
Se non vi è spazio sufficiente per installare opere di cattura di sedimenti di dimensione adatta all'apporto naturale di sedimenti del bacino imbrifero a monte, verranno realizzate delle briglie per sfruttare il loro effetto di modulazione del trasporto solido a monte dell'opera.
Infine, nell'ambito dell'*Azione 2.5* del progetto RISBA, è stato realizzato un importante lavoro bibliografico per evidenziare le buone pratiche e attuali conoscenze in materia di protezione contro i rischi dei fenomeni torrentizi. Un ulteriore risultato è che il team di Irstea impegnato nell'ambito del progetto RISBA si è associato a un team di ONF-Irstea per redigere un testo di sintesi sulle buone pratiche in materia di progettazione contro i rischi torrentizi; questo lavoro verrà pubblicato nel 2015 (Tacnet et al. in prep.).

des bassins sera équipé d'une structure de type barrage de correction limitant le risque de déstabilisation du chenal amont. Les barrages filtrants de fermeture des ouvrages seront équipés de barreaux très rapprochés ou de petit pertuis (Figure 3a et d) pour maximiser les effets ❸ et ❹ (sédimentation de la charge grossière dans la zone d'eau calme liée au remous liquide en amont du barrage filtrant et blocage mécanique des matériaux transportés contre le barrage filtrant).
Si la place manque pour mettre en place des pièges à sédiments de taille adaptée à la production sédimentaire naturelle du bassin versant amont, des barrages de correction torrentielle seront mis en place pour mettre à profit leur effet de modulation du transport solide en amont du piège à sédiment.
*Enfin, dans le cadre de l'*Action 2.5 *du projet RISBA, un important travail bibliographique a été réalisé pour mettre en évidence les bonnes pratiques et règles de l'art en matière de protection contre les risques torrentiels. Une valorisation directe est que l'équipe d'Irstea travaillant dans le cadre du projet RISBA s'est associée à une équipe ONF-Irstea pour rédiger un livre de synthèse sur les bonnes pratiques en matière de conception des protections contre les risques torrentiels. Ce travail sera publié en 2015 (Tacnet et al. in prep.).*

Riferimenti bibliografici / *Références*

Armanini, A., Dellagiacoma, F., Ferrari, L., 1991. *From the check dam to the development of functional check dams*. Fluvial Hydraulics of Mountain Regions 37, 331–344.

Bacchi, V., Recking, A., Eckert, N., Frey, P., Piton, G., Naaim, M., 2014. *The effects of kinetic sorting on sediment mobility on steep slopes*. Earth Surface Processes and Landforms 39, 8.

Bernard, C., 1927. *Cours de restauration des montagnes. Ecole normale des eaux et forêts.*

Blanchet, C., 1975. *Importance de l'emplacement de la prise d'eau dans la rivière pour la Protection contre le débit solide*, in: 9th congress international commission Irrigation drainage conference proceedings. Moscow, USSR - 28 July-02 August, pp. 303–320.

Bouvard, M., 2004. *Transport des sédiments dans les ouvrages hydrauliques*. Presses de l'École nationale des ponts et chaussées.

CIPC, 2013. *La revanche dans les projets de protection contre les crues et de l'analyse de dangers* - Recommendations de la Commission pour la protection contre les crues (CIPC). Wasser Energie Luft 105, 122–132.

Couvert, B., Lefebvre, B., Lefort, P., Morin, E., 1991. *Étude generale sur les seuils de correction torrentielle et les plages de dépôt*. Houille Blanche 46, 449–456.

Demontzey, P., 1882. *Traité pratique du reboisement et du gazonnement des montagnes*. Ministères de l'agriculture et du commerce et des travaux publiques.

Duile, J., 1841. *Bericht und Anträge des Herrn J. Duile ... an Landammann und Rath des Kantons Glarus über den Untersuch der Wild- und Gebirgsbäche im Kanton Glarus*. Glarus.

Fabre, J.-A., 1797. *Essai sur la théorie des torrens et des rivières*. chez Bidault Libraire.

Ferro, V., Porto, P., 2011. *Predicting the equilibrium bed slope in natural streams using a stochastic model for incipient sediment motion*. Earth Surface Processes and Landforms 36, 1007–1022.

Frisi, P., 1770. *A Treatise on Rivers and Torrents; with the Method of Regulating Their Course and Channels.* J. Weale, London.

Gras, S., 1850. *Exposé d'un système de défense des cours d'eau torrentiels des Alpes et application au torrent de la Romanche dans le département de l'Isère*. Charles Vellot, Grenoble.

Gras, S., 1857. *Études sur les torrents des Alpes.* F. Savy, Paris.

Hübl, J., Strauss, A., Holub, M., Suda, J., 2005. *Structural mitigation measures*, in: Proceeding szum 3rd Probabilistic Workshop Technical Systems+NaturalHazards, 2425 Nov. Wien.

Kostadinov, S., 1993. *Possibility of Assessment of the Slope of Siltation Based on the Some Hydraulic Characteristics of the Torrential Flows*. Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering 45, 28–33.

Kostadinov, S., Dragovic, N., Zlatic, M., Todosijevic, M., 2008. *Erosion control works and the intensity of soil erosion in the upper part of the river Toplica drainage basin*, in: IOP Conference Series Earth Environmental Science, 112. IOP Publishing.

Le Guern, J., 2014. *Modélisation physique des plages de dépôt : analyse de la dynamique de remplissage*.

Le Guern, J., Piton, G., Recking, A., 2014. *Braiding-like pattern initiation in a steep slope sediment trap*.

Malavoi, J.R., Garnier, C.C., Landon, N., Recking, A., Baran, P., 2011. *Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière*. Onema.

Marchi, L., Cavalli, M., 2007. *Procedures for the documentation of historical debris flows: Application to the Chieppena Torrent* (Italian Alps). Environmental Management 40, 493–503.

Mathys, N., Lang, M., Sauquet, E., Cipriani, T., Peteuil, C., 2013. *Torrents et Rivières de Montagne: dynamique et aménagement*, in: A. Recking, G.D. D. Richard (Ed.), QUAE, pp. 81–138.

Piton, G., Recking, A., 2014a. *The dynamic of streams equipped with check dams*, in: Proceedings International Conference Fluvial Hydraulics, RIVERFLOW 2014. pp. 1437–1445.

Piton, G., Recking, A., 2014b. *Grade control structure influences on steep slope stream dynamics: bed level fluctuations and sediment transport variations*, in: SHF Conference Smallscale Morphological evolution coastal, estuarine River systems. Nantes; 6 & 7 October 2014.

Piton, G., Recking, A., 2015a. *Design of sediment trap using open check dams: a review, part I: hydraulic and deposition processes*. (Submitted to the) Journal of Hydraulic Engineering 23.

Piton, G., Recking, A., 2015b. *Design of sediment trap using open check dams: a review, part II: woody debris problems*. (Submitted to the) Journal of Hydraulic Engineering 17.

Poncet, A., 1995. *Restauration et conservation des terrains en montagne*, Office national des forêts, Paris. Office National des Forêts.

Porto, P., Gessler, J., 1999. *Ultimate bed slope in Calabrian streams upstream of check dams*: Field study. Journal of Hydraulic Engineering 125, 1231–1242.

Recking, A., 2010. *A comparison between flume and field bed load transport data and consequences for surface-based bed load transport prediction*. Water Resources Research 46.

Recking, A., 2013. *Relations between bed recharge and magnitude of mountain streams erosions*. Journal of Hydro-Environment Research -, 1–10.

Recking, A., Frey, P., Paquier, A., Belleudy, P., Champagne, J.Y., 2008. *Bed-Load transport flume experiments on steep slopes*. Journal of Hydraulic Engineering 134, 1302–1310.

Reitz, M.D., Jerolmack, D.J., 2012. *Experimental alluvial fan evolution: Channel dynamics, slope controls, and shoreline growth*. Journal of Geophysical Research F: Earth Surface 117, 1–19.

Rickenmann, D., 1991. *Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes*. Journal of Hydraulic Engineering 117, 1419–1439.

Rifaï, I., 2014. *2D modeling of braided river sediment dynamic (Modélisation 2-D de la dynamique sédimentaire d'une rivière en tresses)*.

Rinaldi, M., Piégay, H., Surian, N., 2011. *Geomorphological approaches for river management and restoration in Italian and French Rivers*. Geophysical Monograph Series 194, 95–113.

Smart, G.M., Jaeggi, M., 1983. *Sediment Transport on Steep Slopes*, in: Mitteilungder Versuchsanstaltfür Wasserbau, Hydrologie Und Glaziologie Der ETH Zürich,Nr.64.

Surell, A., 1870. *Etude sur les torrents des Hautes Alpes* (1st Edition). Librairie des corps impériaux des ponts et chaussées et des mines, Paris.

Tacnet, J. M., Y. Quefféléan, C. Deymier, S. Carladous, and G. Piton. (in preparation). *Design of protection works against torrential floods*. Wiley Online Library.

Thiéry, E., 1891. *Restauration des montagnes, correction des torrents, reboisement*. Librairie Polytechnique, PARIS.

Van Dijk, M., Kleinhans, M.G., Postma, G., Kraal, E., 2012. *Contrasting morphodynamics in alluvial fans and fan deltas: Effect of the downstream boundary*. Sedimentology 59, 2125–2145.

Van Dijk, M., Postma, G., Kleinhans, M.G., 2009. *Autocyclic behaviour of fan deltas: An analogue experimental study*. Sedimentology 56, 1569–1589.

Van Effenterre, C., 1982. *Les barrage perméables de sédimentation*. Revue Forestière Française 5, 87–93.

Zollinger, F., 1983. *processes in debris detention basins for torrent control (A morphology and the possibilities of control)*.

Sbarramenti in presenza di vegetazione arborea ed erosione interna

Introduzione

Gli sbarramenti collinari in rilevato osservati nella zona frontaliera franco-italiana sono spesso soggetti allo sviluppo di vegetazione arborea indesiderata (Figura 1). Molti di loro soffrono di un'assenza di manutenzione, che ha portato allo sviluppo di un'abbondante vegetazione arborea sui rilevati o nei loro dintorni, a volte trasformandosi in una vera e propria foresta. In altri casi sono stati impiantati alberi allineati sugli sbarramenti o ai loro piedi, in un'ottica di stabilizzazione, di miglioramento del paesaggio e dell'ombrosità.

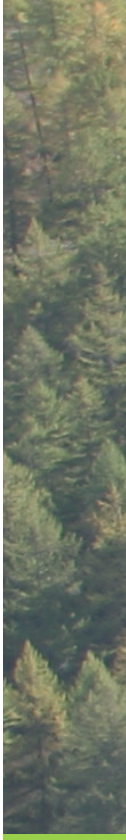
Lo sviluppo radicale di questa vegetazione mette in pericolo le opere, perché può contribuire a un meccanismo di erosione interna. Tra tutti i fenomeni di deterioramento degli sbarramenti, questo meccanismo costituisce una delle cause principali di cedimento dei rilevati. È causato dalla presenza di filtrazioni incontrollate, che trascinano via le particelle costitutive dell'opera dopo averle asportate (CFGB, 1997). Questo fenomeno può riguardare il rilevato dell'opera così come le sue fondazioni.

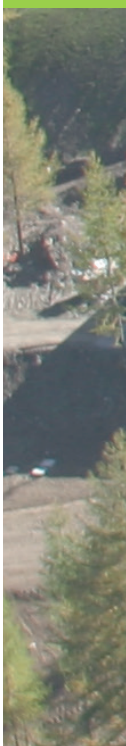
Barrages soumis à la présence d'une végétation arborescente et d'érosion interne

Introduction

Les barrages collinaires en remblai rencontrés dans la zone frontalière franco-italienne sont souvent soumis au développement d'une végétation arborescente indésirable (Figure 1) : nombreux parmi eux souffrent ou ont souffert d'un manque d'entretien qui a notamment conduit au développement d'une végétation arborescente abondante sur les remblais ou à leurs abords, parfois devenue une véritable forêt. Dans d'autres cas, des arbres ont été plantés en alignement sur les remblais ou à leur pied, dans un objectif de stabilisation, d'amélioration paysagère ou d'ombrage.

Or, le développement racinaire de cette végétation met en péril les ouvrages car il est susceptible de contribuer à un mécanisme d'érosion interne. Ce mécanisme est, parmi les phénomènes de dégradation des barrages, l'une des causes majeures de rupture des barrages en remblai. Il est provoqué par l'existence de fuites non contrôlées qui entraînent les particules constitutives de l'ouvrage suite à leur arrachement (CFGB, 1997). Ce phénomène peut toucher le remblai de l'ouvrage comme ses fondations.





Una volta impiantata, la vegetazione arborea può essere sottoposta a operazioni di disboscamento parziale o totale, che risultano inadeguate se non sono accompagnate da lavori di estirpazione e di ricostituzione delle scarpate o della cresta del rilevato. Questi tagli possono infatti provocare la morte di numerosi alberi e creare altrettante vie preferenziali potenziali per le infiltrazioni, a seguito della decomposizione delle loro radici. Bisogna poi aggiungere a questa mortalità «artificiale», la mortalità naturale degli alberi che porta alle stesse conseguenze. Si può stimare che in Francia e in Italia migliaia di piccoli sbarramenti collinari presentino dei ritardi nella manutenzione sul controllo della vegetazione arborea, il che rappresenta un notevole rischio potenziale. Gli sbarramenti

A

B

FIGURA 1
Esempi di sbarramento italiano (A) e francese (B) soggetti allo sviluppo di una vegetazione arborea.

FIGURE 1
Exemples de barrage italien (A) et français (B) soumis au développement d'une végétation arborescente.

Une fois installée, la végétation ligneuse peut faire l'objet d'opérations de déboisement partiel ou total, inappropriées si elles ne sont pas accompagnées de travaux de dessouchage et de reconstitution des talus ou de la crête. En effet, ces coupes peuvent entraîner la mort de nombreux arbres et créer autant de chemins préférentiels potentiels pour les écoulements internes lorsque leurs racines se décomposent. Il faut bien entendu rajouter à cette mortalité « artificielle », la mortalité naturelle des arbres avec les mêmes conséquences. On peut estimer qu'en France et en Italie, des milliers de petits barrages collinaires sont en retard d'entretien quant au contrôle de la végétation ligneuse, ce qui représente un potentiel de danger important. Les barrages collinaires en zone frontalière

collinari piemontesi presso la zona frontaliera sono particolarmente interessati da questo fenomeno. Di conseguenza è fondamentale per entrambi i Paesi sviluppare lavori finalizzati a valutare meglio la performance rispetto al meccanismo di erosione interna, degli invasi collinari indeboliti dallo sviluppo di vegetazione arborea. In particolare è fondamentale che il gestore dell'invaso conosca la performance dell'opera rispetto al rischio di erosione interna, in modo da scegliere da una parte quali azioni preventive o correttive intraprendere e dall'altra le tempistiche relative a queste azioni: bisogna effettuare un disboscamento totale o parziale? Bisogna limitare gli abbattimenti ad alcune specie? In quale periodo dovranno essere effettuate le azioni di disboscamento? Bisogna eliminare le ceppaie oppure lasciarle germogliare? Di quale termine temporale disponiamo per gli interventi tecnici che mirano a ristabilire l'integrità dell'opera? Queste considerazioni permettono al gestore di programmare meglio i suoi interventi, realizzati sempre con risorse finanziarie limitate.

Approccio metodologico

Rispetto al meccanismo di erosione interna, la performance degli invasi in rilevato soggetta allo sviluppo di una vegetazione boschiva è correlata a più parametri interdipendenti, che è possibile suddividere in quattro categorie:

1. geometrico: la dimensione dello sbarramento, le sue pendenze di scarpata, la sua altezza sono direttamente collegate alla performance dell'opera;
2. geotecnico (rilevato e fondazione): il tipo di materiale, la sua granulometria, la sua compattezza, il suo contenuto di acqua, di materia organica e di argilla, ecc.;

de piémont sont particulièrement concernés par ce phénomène. Par conséquent, il est essentiel pour ces deux pays de développer des travaux visant à mieux évaluer la performance, vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne, des barrages collinaires rendus vulnérables du fait du développement d'une végétation arborescente.
Il est notamment capital pour le gestionnaire de connaître la performance de l'ouvrage quant au risque d'érosion interne afin de choisir d'une part le type d'actions préventives ou correctives à mettre en œuvre et d'autre part, les pas de temps associés à ces actions : faut-il réaliser un déboisement total ou partiel ? Faut-il limiter les abattages à certaines espèces ? Dans quelle période de temps les actions de déboisement doivent-elle intervenir ? Faut-il dévitaliser les souches ou les laisser rejeter ? De quel délai dispose-t-on pour les travaux de génie civil visant à rétablir l'intégrité de l'ouvrage ? Ceci permet au gestionnaire de mieux gérer ses interventions, toujours réalisées sous contraintes économiques.

Démarche méthodologique

La performance, vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne, des barrages en remblai soumis au développement d'une végétation boisée est liée à de multiples paramètres interdépendants, qu'il est possible de répartir dans quatre catégories :

1. *géométrique : la taille du barrage, ses pentes de talus, son épaisseur ont un lien direct sur la performance de l'ouvrage ;*
2. *géotechnique (remblai et fondation) : le type de matériaux, sa granulométrie, sa compacité, sa teneur en eau, sa teneur en matière organique, son argilosité, etc. ;*

3. idraulico: il carico idraulico subito dall'opera ha un'influenza diretta sul gradiente idraulico, sulle infiltrazioni interne e sulle pressioni interstiziali all'interno del rilevato. Peraltro la presenza d'acqua ha una notevole influenza sullo sviluppo della vegetazione arborea e delle sue radici, che sono sempre alla ricerca di risorse;
4. biologico: il tipo di vegetazione e i fattori ambientali (acqua, suolo, clima ecc.), il grado di decomposizione delle radici.

Il numero di variabili da studiare è elevato e il meccanismo è complesso: è quindi importante sviluppare dei modelli di valutazione dei rilevati soggetti allo sviluppo di vegetazione arborea rispetto al meccanismo di erosione interna. I modelli proposti devono integrare i parametri summenzionati e riguardano il rilevato stesso, la fondazione e l'interfaccia rilevato-fondazione.
Il metodo di modellizzazione preso in considerazione è un sistema basato sui dati conoscitivi (Booker et McNamara, 2004; Akerka et Sajja, 2009): possibilità di utilizzare rilievi visivi, di combinare dati di natura differente come dati di progettazione, misure di auscultazione e rilievi in campo, ecc. Questo tipo di approccio ha anche il vantaggio di produrre modelli di facile comprensione per gli ingegneri e i tecnici dei gestori degli sbarramenti o per gli studi di progettazione.
Il punto di partenza della metodologia implementata nell'*Azione 2.6* del progetto RISBA è il modello di valutazione della performance di rilevati omogenei e della loro fondazione sviluppato in recenti articoli (Curt, 2008; Curt et al., 2010; Curt, 2013). Tuttavia gli invasi collinari di piccole dimensioni studiati nell'ambito del progetto RISBA non sono sempre dotati di drenaggi e/o di strumenti d'auscultazione. Quindi i modelli iniziali sviluppati da Curt (2008) hanno dovuto essere semplificati per tener conto di questa particolarità e per

3. *hydraulique : la charge hydraulique que subit l'ouvrage a une influence directe sur le gradient hydraulique, sur les percolations internes et sur les pressions interstitielles régnant dans le remblai. Par ailleurs, la présence d'eau a une influence majeure sur le développement d'une végétation arborescente et de ses racines, toujours à la recherche de ressource ;*
4. *biologique : le type de végétation et les facteurs environnementaux (eau, sol, climat etc.), le degré de décomposition des racines.*

Le nombre de variables à étudier est élevé et le mécanisme est complexe : il est donc important de développer des modèles d'évaluation des barrages vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne, soumis au développement d'une végétation arborescente. Les modèles proposés doivent intégrer les différents paramètres cités ci-dessus. Ils concernent le remblai lui-même, les fondations et l'interface remblai-fondation. L'approche de modélisation retenue est un système à base de connaissances (Booker et McNamara, 2004; Akerka et Sajja, 2009) car elle répond bien aux contraintes du système : possibilité d'utiliser des observations visuelles, de combiner des données de nature différente telles que des données de construction, des mesures d'auscultation et des observations visuelles, etc. Ce type d'approche a aussi pour avantage de produire des modèles aisément compréhensibles par les ingénieurs et techniciens des services techniques des gestionnaires de barrages ou pour les bureaux d'études.
*Le point de départ de la démarche mise en œuvre dans l'*Action 2.6 *du projet RISBA est le modèle d'évaluation de la performance des barrages en remblai homogènes et de leur fondation développé dans (Curt, 2008; Curt et al., 2010; Curt, 2013). Cependant, les barrages collinaires de petites dimensions étudiés dans le cadre du projet RISBA ne sont pas toujours équipés de drains et/ou d'instruments d'auscultation. Ainsi, les modèles*

integrare gli indicatori di analisi della vegetazione. Inoltre, è stato necessario sviluppare un modello per la valutazione della performance all'interfaccia rilevato-fondazione. In effetti, questo meccanismo trattato finora per il solo rilevato, è stato necessario esplicitarlo per la zona di interfaccia rilevato-fondazione per gli invasi sprovvisti di strumentazione. I modelli di valutazione hanno una struttura gerarchica su tre livelli: i) gli indicatori di stato, ii) le funzioni (per esempio la funzione di «tenuta») la cui performance viene calcolata attraverso una combinazione di valori degli indicatori e iii) la performance del componente (rilevato, fondazione o interfaccia) rispetto al meccanismo di erosione interna, calcolata a partire da una combinazione della performance delle funzioni.

La variabile di base del modello è costituita dagli indicatori di stato, che sono dati formalizzati. Diversi dati sono utilizzabili dall'ingegnere per effettuare una valutazione: dati d'auscultazione se l'invaso dispone di strumentazione, di rilievi visivi, di dati di progettazione o di realizzazione e dati derivati da calcoli (per esempio gradiente ammissibile). È importante formalizzarli per poter da una parte ottenere delle misurazioni stabili cioè ripetibili e riproducibili e dall'altra, per poterli utilizzare in combinazione tra loro. Viene allora utilizzata una griglia di formalizzazione, che si basa su 5 campi (Tabella 1): denominazione dell'indicatore di stato, definizione, scala di misurazioni e relativi riferimenti che permettano di descrivere i vari stati possibili dell'indicatore, caratteristiche spaziali che definiscano la parte di rilevato da analizzare e le caratteristiche temporali che indichino il passo temporale per misurare l'indicatore e analizzare la tendenza di questa misurazione (Curt, 2008).
Gli indicatori di stato sono valutati dal tecnico in un'unica scala di misurazioni presentata nella Figura 2.

initiaux développés par Curt (2008) ont dû être simplifiés afin de tenir compte de cette particularité et afin d'intégrer les indicateurs d'analyse de la végétation. De plus, un modèle a dû être développé pour évaluer la performance à l'interface remblai-fondation. En effet, ce mécanisme était jusqu'alors traité dans le remblai, mais il est apparu important de l'expliciter en tant que tel, pour les barrages non équipés, car la zone d'interface peut être une zone préférentielle d'installation des racines.
Les modèles d'évaluation ont une structure hiérarchique en trois niveaux : i) les indicateurs d'état, ii) les fonctions (par exemple la fonction d' « étanchéité ») dont la performance est calculée par une combinaison des valeurs des indicateurs et iii) la performance du composant (remblai, fondation ou interface) vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne calculée à partir d'une combinaison de la performance des fonctions. La variable de base du modèle est constituée par les indicateurs d'état qui sont des données formalisées. Différentes données sont utilisables par l'ingénieur pour réaliser une évaluation : données d'auscultation si le barrage dispose d'instruments, observations visuelles, données de conception ou de réalisation et données issues de calcul (gradient admissible par exemple). Il est important de les formaliser afin, d'une part, d'obtenir des mesures robustes c'est-à-dire répétables et reproductibles et, d'autre part, de pouvoir les utiliser en combinaison. Une grille de formalisation est alors utilisée. Elle repose sur 5 champs (Tableau 1) : nom de l'indicateur d'état, définition, échelle de mesure et références associées permettant de décrire les différents états possibles de l'indicateur, caractéristiques spatiales spécifiant la partie du barrage à analyser et les caractéristiques temporelles indiquant le pas de temps pour la mesure de l'indicateur et l'analyse de la tendance de cette mesure (Curt, 2008).
Les indicateurs d'état sont évalués par l'ingénieur sur une seule et même échelle de mesure présentée en Figure 2.

Integrazione di indicatori di stato relativi alla vegetazione arborea

Determinazione degli indicatori (vegetazione boschiva)

Le informazioni necessarie sono raccolte da un gruppo di lavoro costituito da ingegneri civili con un'esperienza minima di vent'anni in diagnosi di opere idrauliche. Le sessioni di lavoro sono preparate e gestite da un esperto nella raccolta di esperienze, che costruisce anche casi di studio per testare le formalizzazioni e i modelli prima dell'applicazione su opere reali. Il gruppo di esperti ha identificato quattro indicatori di stato specifici alla vegetazione arborea che potrebbero risultare dannosi per la performance di un rilevato omogeneo rispetto al meccanismo di erosione interna:

- Densità di individui;
- Volume radicale per individuo;
- Tipo di struttura radicale degli individui;
- Grado di decomposizione della ceppaia o delle radici di un individuo.

NB: col termine «individui» ci riferiamo indifferentemente agli alberi viventi e alle ceppaie.

TABELLA 1
Indicatore di stato «densità degli individui».

TABLEAU 1
Indicateur d'état « Densité des individus ».

Denominazione / *Nom*	Densità degli individui / *Densité des individus*
Definizione / *Définition*	Maggiore è la densità degli individui, maggiori sono le probabilità che possano emergere delle eterogeneità di permeabilità nel rilevato, in particolare durante la decomposizione del sistema radicale (per quest'indicatore vengono osservati principalmente gli individui più grandi). / *Plus la densité des individus, est élevée, plus les hétérogénéités de perméabilité dans le remblai peuvent apparaitre notamment lors de la décomposition des systèmes racinaires (on regarde prioritairement les plus gros individus pour cet indicateur).*
Scala e riferimento / *Échelle et référence*	*10 :* assenza di individui / *absence d'individus* *5-4 :* presenza di un individuo per 10 m² / *présence d'un individu par 10 m²* *3-1 :* presenza da 2 a 5 individui per 10 m² / *présence de 2 à 5 individus par 10 m²* *0 :* presenza superiore a 5 individui per 10 m² / *présence supérieure à 5 individus par 10 m²*
Caratteristica di luogo / *Caractéristique de lieu*	Coronamento, scarpata a monte, scarpata a valle / *Crête, talus amont, talus aval*
Caratteristica di tempo / *Caractéristique de temps*	Misurazione effettuata durante un esame visivo e focalizzata sulla definizione della vegetazione presente sull'opera. / *Mesure réalisée lors d'un examen visuel axée sur la qualification de la végétation présente sur l'ouvrage.*

Intégration des indicateurs d'état spécifique à la végétation arborescente

Détermination des indicateurs (végétation boisée)

Les informations nécessaires sont collectées auprès d'un groupe d'ingénieurs en génie civil avec une expérience en diagnostic d'ouvrages hydrauliques de vingt ans minimum. Les séances sont préparées et animées par un spécialiste du recueil de connaissances. Il construit également des cas d'études afin de tester les formalisations et les modèles avant le passage à l'application sur des ouvrages réels. Quatre indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente ont été identifiés par le groupe d'experts comme étant potentiellement préjudiciables à la performance d'un barrage en remblai homogène vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne :

- *Densité d'individus ;*
- *Volume racinaire par individu ;*
- *Type de structure racinaire des individus ;*
- *Degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu.*

NB : nous nommons indifféremment par le terme « individus » les arbres vivants et les souches.

Questi quattro indicatori sono stati formalizzati con l'ausilio della griglia di formalizzazione e verranno approfonditi nel seguito.

Indicatore di stato «densità degli individui»

Quest'indicatore viene valutato visivamente durante il sopralluogo effettuato dall'ingegnere incaricato di valutare la performance.
La densità di individui presenti sull'opera analizzata testimonia indirettamente l'influenza delle radici sul rilevato o nelle sue vicinanze. La comparsa di un'erosione interna può essere favorita dalla presenza di radici che costituiscono aree di eterogeneità e di permeabilità nel rilevato, in particolare durante la loro decomposizione.
L'indicatore di stato «densità degli individui» è quindi il primo indicatore di cui il tecnico deve tenere conto. Se sull'opera non è presente nessun individuo (albero o ceppaia), il tecnico attribuirà un punteggio di 10 a quest'indicatore e sarà inutile concentrarsi sugli altri indicatori di stato.
In caso di presenza di vegetazione arborea, per effettuare la valutazione del rilevato rispetto al meccanismo d'erosione interna, il tecnico sceglierà il profilo più sfavorevole, cioè quello in cui la densità degli individui è più elevata. Tuttavia, se la distribuzione della vegetazione arborea è omogenea sull'insieme del rilevato (Figura 3), si prenderà in considerazione la geometria più sfavorevole (larghezza minima del coronamento, pendenza di scarpata ripida) nella scelta della sezione da valutare.

FIGURA 2
Scala di valutazione.

FIGURE 2
Echelle d'évaluation.

Ces quatre indicateurs ont été formalisés à l'aide de la grille de formalisation, développées dans la suite du texte.

Indicateur d'état « densité des individus »

Cet indicateur est appréhendé visuellement lors d'une visite de terrain par l'ingénieur qui est en charge de l'évaluation de la performance d'un barrage boisé vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne.
La densité des individus présents sur l'ouvrage analysé témoigne indirectement de l'emprise des racines dans le remblai ou à ses abords. L'apparition d'une érosion interne peut être favorisée par la présence de racines ligneuses qui constituent des zones d'hétérogénéité et de perméabilité dans le remblai notamment lors de la décomposition de celles-ci.
L'indicateur d'état « densité des individus » est donc le premier indicateur à prendre en compte par l'ingénieur. Si aucun individu (arbre ou souche) n'est présent sur l'ouvrage, l'ingénieur donnera une note de 10 à cet indicateur et il sera inutile de s'intéresser aux autres indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente.
Dans le cas où la végétation arborescente est présente, l'ingénieur choisira le profil le plus défavorable, c'est-à-dire où la densité des individus est la plus élevée pour réaliser l'évaluation du barrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne. Cependant, si la répartition de la végétation arborescente est équivalente sur l'ensemble du remblai (Figure 3), la géométrie du remblai la plus défavorable (largeur en crête étroite, pente de talus raide) sera considérée dans le choix du profil à évaluer.

In Tabella 1 è presente la griglia di formalizzazione dell'indicatore «densità degli individui», utilizzata dal tecnico per valutare quest'ultimo attribuendogli un punteggio sulla scala di numerazioni utilizzata (Figura 2). La notazione viene effettuata in funzione del numero di individui presenti su 10 m².

Indicatore di stato «volume radicale per individuo»

Il «volume radicale per individuo» è il secondo indicatore di stato che il tecnico deve tenere presente perché, unitamente all'indicatore di stato «densità degli individui», gli permetterà di conoscere il volume radicale totale per la sezione analizzata. Sapendo che i sistemi radicali aumentano con l'età degli alberi, un individuo il cui ceppo possieda un diametro considerevole lascia presupporre un notevole volume radicale. Così il tecnico misurerà sul campo il diametro dell'albero (Figura 4) e a seconda del risultato ottenuto, farà riferimento ai parametri stabiliti durante la formalizzazione di quest'indicatore per attribuire il punteggio. È importante conoscere questo parametro, per poter prevedere le

FIGURA 3
Distribuzione omogenea degli alberi sul coronamento dell'invaso di Grengia (Italia) (Foto Irstea).

FIGURE 3
Répartition équivalente des arbres sur le couronnement aval du barrage de Grengia (Italie) (Photo Irstea).

Nous présentons ici la grille de formalisation de l'indicateur « densité des individus » (Tableau 1) que l'ingénieur utilise afin d'évaluer ce dernier en lui attribuant une note sur l'échelle de notation utilisée (Figure 2). La notation est réalisée en fonction du nombre d'individus présents sur 10 m².

Indicateur d'état « volume racinaire par individu »

Le « volume racinaire par individu » est le second indicateur d'état à évaluer par l'ingénieur. Il permettra d'appréhender, avec l'indicateur d'état « densité des individus », le volume racinaire global pour le profil analysé. Sachant que les systèmes racinaires croissent avec l'âge de l'arbre, un individu dont la souche possède un diamètre important laisse supposer un volume racinaire important. Ainsi, l'ingénieur mesurera sur le terrain le diamètre au collet de l'arbre (Figure 4). Selon le diamètre obtenu, il se référera aux références établies lors de la formalisation de cet indicateur pour donner une note. Ce paramètre est important à connaître afin de prévoir les conséquences en termes d'augmentation globale de la perméabilité du remblai lors de la décomposition du système racinaire.

conseguenze relative all'incremento complessivo della permeabilità del rilevato durante la decomposizione del sistema radicale.

Indicatore di stato «tipo di struttura radicale degli individui»

L'indicatore di stato «tipo di struttura radicale degli individui» è un importante indicatore, poiché consente al tecnico di disporre di una caratterizzazione radicale totale in riferimento alla sezione analizzata.
La struttura radicale degli alberi dipende dalle tensioni connesse alle caratteristiche del suolo e dalla presenza di acqua e di sostanze nutritive. I vari tipi di struttura radicale possono essere più o meno dannosi durante la decomposizione delle radici legnose. Pertanto un sistema radicale dotato di lunghe radici orizzontali, che potenzialmente possono attraversare il rilevato da valle a monte alla ricerca dell'acqua, risulterà particolarmente problematico. La decomposizione di questo tipo di radici creerà probabilmente un condotto attraverso il rilevato in grado di attivare un'erosione interna. Quest'indicatore di

FIGURA 4
Misurazione del diametro per valutare il volume radicale per individuo (foto: sbarramento di Grengia, Italia – Irstea).

FIGURE 4
Mesure du diamètre du collet pour l'estimation du volume racinaire par individu (photo : barrage de Grengia, Italie – Irstea).

Indicateur d'état « type de structure racinaire des individus »

L'indicateur d'état « type de structure racinaire des individus » est un indicateur important à appréhender par l'ingénieur afin de disposer d'une caractérisation racinaire globale au droit du profil analysé.
La structure racinaire des arbres est qualifiée d'opportuniste vis-à-vis des contraintes liées aux caractéristiques du sol et de l'accès des racines à l'eau et aux nutriments. Les différents types de structures racinaires peuvent être plus ou moins préjudiciables lors de la décomposition des racines ligneuses vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne. Ainsi, un système racinaire doté de longues racines horizontales pouvant potentiellement traverser le remblai de l'aval vers l'amont pour y chercher de l'eau sera particulièrement problématique. La décomposition de ce type de racines créera vraisemblablement un conduit à travers le remblai, susceptible d'initier une érosion interne.
Cet indicateur d'état est évalué par l'ingénieur qui prend en compte sur le terrain les différents paramètres influençant la structure du système racinaire (type de sol, accès à

stato viene stimato dal tecnico che deve tener conto sul campo dei vari parametri che condizionano la struttura del sistema radicale (tipo di suolo, accesso all'acqua, ecc.). A seconda del tipo di struttura radicale identificato, il tecnico farà riferimento ai parametri stabiliti nella griglia di formalizzazione.

Indicatore di stato «grado di decomposizione»

L'indicatore di stato «grado di decomposizione» è stato identificato dal gruppo di lavoro come un indicatore fondamentale per valutare la propensione alla creazione di percorsi preferenziali per l'acqua nel rilevato e quindi all'erosione interna. Quest'indicatore non può essere ottenuto a partire da una sola informazione. È stata dunque approntata una metodologia che permette di stimarlo (Bambara et al., 2013). Sono stati installati dei dispositivi sperimentali su alcune opere idrauliche in rilevato situate in varie aree geografiche francesi (Zanetti et al., 2013). Campioni di radici di alberi tagliati di recente, di vario diametro (2, 3, 5, 8 e 10 cm) e specie (quercia, frassino, pioppo, pino silvestre e larice) sono stati collocati all'interno del rilevato per seguire l'evoluzione della loro decomposizione nel tempo (Figura 5).
Una parte dei campioni viene raccolta ogni due anni. Le analisi condotte su questi campioni riguardano l'evoluzione della loro densità e l'evoluzione delle caratteristiche chimiche

FIGURA 5
Campioni di radici in decomposizione all'interno di uno dei rilevati (foto: Irstea).

FIGURE 5
Echantillons de racines ligneuses en décomposition au sein d'un des dispositifs expérimentaux en place (photo : Irstea).

l'eau…). Il utilise ensuite une clef d'aide à l'identification de la structure racinaire qu'un individu est susceptible d'avoir développé. En fonction du type de structures racinaires identifiées, l'ingénieur se réfèrera aux références établies dans la grille de formalisation.

Indicateur d'état « degré de décomposition »

L'indicateur d'état « degré de décomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu » a été identifié par le groupe d'ingénieurs comme un indicateur essentiel pour l'évaluation de la propension aux écoulements dans le barrage et donc pour l'évaluation du barrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne. Cet indicateur ne peut pas être obtenu à partir d'une information directement accessible. Une méthodologie permettant l'accès à cette information a donc été mise au point (Bambara et al., 2013). Des dispositifs expérimentaux ont été installés sur des ouvrages hydrauliques en remblai « tests » situés dans différentes zones géographiques françaises (Zanetti et al. 2013). Des échantillons de racines issus d'arbres fraîchement coupés, de différents diamètres (2, 3, 5, 8 et 10 cm) et espèces (chêne, frêne, peuplier, robinier, pin sylvestre et mélèze) ont été placés au sein du dispositif afin de suivre l'évolution de leur décomposition au cours du temps (Figure 5).
Une partie des échantillons est récoltée environ tous les deux ans. Les analyses menées sur ces échantillons concernent l'évolution de leur densité (estimation par déplacement

per spettrometria nell'infrarosso (SPIR). Il trattamento di questi dati viene effettuato con l'ausilio di metodi chemiometrici che permettono di discriminare i campioni tra di loro a seconda del loro grado di decomposizione, della loro specie e del loro diametro. I primi risultati ottenuti (4 anni d'invecchiamento) hanno permesso di fornire dei valori per la propensione alla decomposizione radicale e quindi di aggiornare la scala dell'indicatore «grado di decomposizione». La prosecuzione del monitoraggio dei dispositivi sperimentali, così come l'installazione di nuovi dispositivi, ci permette di perfezionare e di completare questa scala.

I modelli di valutazione della performance

Sono stati stabiliti tre modelli per la valutazione della performance rispetto al meccanismo d'erosione interna di un rilevato omogeneo arborato non drenato né provvisto di strumentazioni. Ognuno di essi permette di valutare uno dei componenti dello sbarramento (rilevato, fondazione e interfaccia rilevato-fondazione). Questi modelli sono sintetizzati nella Figura 6.
La valutazione della performance della funzione «tenuta» del rilevato, dell'interfaccia o della fondazione implica indicatori di stato specifici alla vegetazione arborea che sono aggregati secondo una logica funzionale (Figura 6).
La valutazione della performance della funzione «tenuta» del rilevato, la combinazione degli indicatori di stato «volume radicale per individuo» e «densità di individui» indica il volume radicale complessivo nel rilevato. Il risultato di questa prima combinazione è aggregato a una seconda combinazione con l'indicatore di stato «tipo di struttura radicale» allo scopo di ottenere la caratterizzazione radicale. Questa seconda combinazione è poi

d'eau) et l'évolution des caractéristiques chimiques par spectrométrie proche infrarouge (SPIR). Le traitement de ces données est réalisé à l'aide de méthodes chimiométriques qui permettent de discriminer les échantillons entre eux en fonction de leur degré de décomposition, de leur espèce et de leur diamètre. Les premiers résultats acquis (4 années de vieillissement) ont permis de fournir des valeurs pour les tendances de la décomposition des racines et donc de renseigner l'échelle de notation de l'indicateur « degré de décomposition ». La poursuite du suivi des dispositifs expérimentaux, ainsi que la mise en place de nouveaux dispositifs nous permettent d'affiner et de compléter cette échelle.

Les modèles d'évaluation de la performance

Trois modèles pour l'évaluation de la performance, vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne, d'un barrage en remblai homogène boisé non drainé, ni instrumenté ont été établis. Chacun permet l'évaluation d'un des composants du barrage (remblai, fondation et interface remblai-fondation). Ces modèles sont synthétisés sur la Figure 6.
L'évaluation de la performance de la fonction « étanchéité » du remblai, de l'interface ou de la fondation implique les indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente qui sont agrégés selon une logique fonctionnelle (Figure 6).
Pour l'évaluation de la performance de la fonction « d'étanchéité » du remblai, la combinaison des indicateurs d'état « volume racinaire par individu » et « densité d'individus » renseigne le volume racinaire global dans le remblai. Le résultat de cette première combinaison est agrégé dans une deuxième combinaison avec l'indicateur d'état « type de structure racinaire » afin d'obtenir la caractérisation racinaire dans le remblai. Cette deuxième combinaison

abbinata all'indicatore di stato «grado di decomposizione» delle ceppaie o delle radici per ottenere, attraverso una terza combinazione, la propensione alla formazione di percorsi preferenziali all'interno del rilevato. In un'ultima fase, la terza combinazione è aggregata agli indicatori di stato relativi alla permeabilità intrinseca: «permeabilità del materiale», «granulometria» e «costipamento», per ottenere infine la performance della funzione «tenuta dell'argine» (Figura 6).
La valutazione della performance della funzione «tenuta» della fondazione segue la stessa logica. L'unica differenza consiste nella permeabilità intrinseca della fondazione che è ottenuta da un solo indicatore di stato: «permeabilità del materiale della fondazione».
In maniera analoga si valuta la performance della funzione «di resistenza all'erosione interna» del componente (rilevato, interfaccia e fondazione) attraverso la combinazione di indicatori di stato (Figura 6).
Infine si combinano i valori delle performance delle funzioni di «tenuta» e di «resistenza all'erosione interna» per i componenti rilevato e fondazione. Per quanto riguarda il componente interfaccia rilevato-fondazione, verranno combinate le due funzioni di «tenuta» del rilevato e della fondazione con la funzione di «resistenza all'erosione interna».

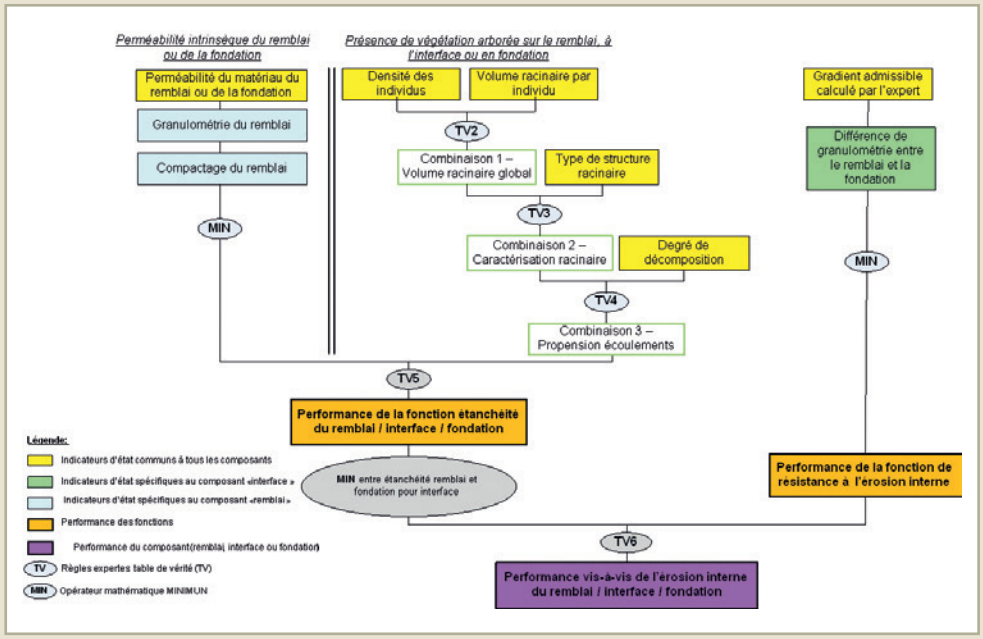


FIGURA 6
Modello di valutazione della performance di un rilevato omogeneo arborato per i tre componenti (rilevato, interfaccia, fondazione).

FIGURE 6
Modèle d'évaluation de la performance d'un barrage en remblai homogène boisé pour les trois composants (remblai, interface, fondation).

est ensuite agrégée avec l'indicateur d'état « degré de décomposition » de la souche ou des racines ligneuses pour obtenir, au moyen d'une troisième combinaison, la propension aux écoulements au sein du remblai. Dans une dernière étape, la troisième combinaison est agrégée avec les indicateurs d'état relatifs à la perméabilité intrinsèque : « perméabilité du matériau », « granulométrie » et « compactage », afin d'obtenir au final la performance de la fonction « étanchéité du remblai » (Figure 6).
L'évaluation de la performance de la fonction « étanchéité » de la fondation suit la même logique. La seule différence se situe au niveau de la perméabilité intrinsèque de la fondation qui est obtenue par un seul indicateur d'état: « perméabilité du matériau de la fondation ». De façon analogue, on évalue la performance de la fonction « de résistance à l'érosion interne » du composant (remblai, interface et fondation) par combinaisons d'indicateurs d'état (Figure 6). Au final, on combine les valeurs des performances des fonctions « d'étanchéité » et de « résistance à l'érosion interne » pour les composants remblai et fondation. Pour le composant interface remblai-fondation, on combine les deux fonctions « d'étanchéité » du remblai et de la fondation, avec la fonction de « résistance à l'érosion interne ».

Applicazione: sbarramento di Grengia

La performance dei tre sbarramenti italiani e dei quattro francesi (rilevato, fondazione, interfaccia) è stata valutata utilizzando i modelli sviluppati. Nel seguito si presentano i risultati ottenuti su uno degli sbarramenti italiani, quello di Grengia.
L'insieme degli indicatori di stato necessari per valutare la performance rispetto al meccanismo d'erosione interna è stato valutato da tre[1] esperti in sbarramenti (un tecnico francese e due italiani). Le performance delle diverse funzioni e quella del componente analizzato sono stati calcolati utilizzando il modello. Parallelamente, i tecnici hanno stabilito un punteggio globale senza utilizzare il modello, il che permette di verificarne la concordanza con la loro opinione.

Descrizione dello sbarramento

Lo sbarramento di Grengia si trova a un'altitudine di circa 480 metri nel comune di Envie in provincia di Cuneo. È stato costruito nel 1971 e ha una duplice funzione: da una parte permette l'irrigazione delle coltivazioni di kiwi e peschi situati a valle e dall'altra consente di praticare la pesca sportiva.
Questo rilevato è di tipo omogeneo ed è stato realizzato in scavo e riempimento. Non possiede alcun sistema di drenaggio. Ha un'altezza di circa 10 metri per una capacità massima vicina ai 30.000 m^3. L'opera è stata dotata nel 2005 di piezometri e di punti di rilievo topografici. Tuttavia, poiché questi strumenti d'auscultazione non sono rileva-

1 Due esperti per gli sbarramenti francesi.

Application : barrage de Grengia

La performance de trois barrages italiens et quatre barrages français (remblai, fondation, interface) a été évaluée en utilisant les modèles développés. La suite est consacrée à la présentation détaillée des résultats obtenus sur l'un des barrages italiens, le barrage de Grengia.
L'ensemble des indicateurs d'état nécessaires pour l'évaluation de la performance vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne a été noté par trois[1] experts en barrages (1 ingénieur français et 2 ingénieurs italiens). Les performances des fonctions et la performance du composant analysé ont été calculées en utilisant le modèle. En parallèle, les experts ont établi une note globale sans utilisation du modèle, ce qui permet de vérifier sa concordance avec l'opinion des experts.

Description du barrage

Le barrage de Grengia est situé à une altitude d'environ 480 mètres sur la commune d'Envie dans la région de Cunéo. Il a été construit en 1971 et a une double fonction : d'une part, il permet l'irrigation des cultures de kiwis et de pêchers situées en aval et d'autre part, il permet la pratique de la pêche sportive.
Ce barrage en remblai est de type homogène et a été réalisé en remblai-déblai. Il ne possède aucun système de drainage. Il a une hauteur d'environ 10 mètres pour

1 Deux experts pour les barrages français.

ti, consideriamo questo sbarramento sprovvisto di strumentazioni. Nel 2012 sono state effettuate delle prove geotecniche allo scopo di valutare la stabilità dell'opera. Due sondaggi a carotaggio e due prove penetrometriche SPT hanno permesso di conoscere rispettivamente la costituzione stratigrafica del rilevato e le sue principali caratteristiche geotecniche.
Una vegetazione arborea è presente sul coronamento dell'opera (Figura 3). Differenti specie di alberi sono presenti sul coronamento, come conifere (pino, pecci, ecc.) e una latifoglia (quercia). Su alcune zone, sono presenti ceppaie (sempre sul coronamento dell'opera). I proprietari testimoniano dei tagli d'alberi eseguiti nel 2004.

Valutazione degli indicatori di stato

Dopo aver valutato tutte le informazioni presenti nel dossier dell'opera e le informazioni del proprietario, il gruppo di tecnici ha scelto un tronco di rilevato rappresentativo dell'intera opera e interessante per la diagnosi della vegetazione arborea (Figura 7).
Su questo tronco lungo 5 metri e largo 10 metri sul coronamento, la scarpata a valle presenta una pendenza differenziata: 80% in alto e 70% a valle.
La vegetazione arborea presente sul coronamento e subito a valle dello stesso ha un ruolo importante. La densità degli individui è alta: fra i 2 e i 5 individui per 10 m². La vegetazione comprende 3 individui vivi: 3 conifere e 2 individui morti (conifere) e 1 individuo germogliato (latifoglia), recisi nel 2004. Il diametro degli individui è superiore ai 30 cm.
Per illustrare la valutazione degli indicatori di stato specifici alla vegetazione arborea, presentiamo i punteggi realizzati sugli indicatori di stato relativi alla valutazione della performance della funzione «tenuta» dell'argine dell'opera (Figura 6). A seconda delle

une capacité maximale avoisinant les 30 000 m³. L'ouvrage a été équipé en 2005 de piézomètres et de bornes topographiques. Cependant, ces instruments d'auscultation n'étant pas relevés, nous considérons ce barrage comme non équipé. En 2012, des essais géotechniques visant à statuer sur la stabilité de l'ouvrage ont été réalisés. Deux sondages carottés, ainsi que deux essais pénétrométriques SPT ont permis de connaître respectivement la constitution stratigraphique du remblai ainsi que ses principales caractéristiques géotechniques.
Une végétation arborescente est présente sur le couronnement aval de l'ouvrage (Figure 3). Différentes essences d'arbres matures bordent ce couronnement. Nous y rencontrons des conifères (pin, épicéa…) et un feuillu (chêne). Sur certains profils, des souches sont présentes (toujours sur le couronnement aval de l'ouvrage). Les propriétaires témoignent de coupes d'arbres effectuées en 2004.

Evaluation des indicateurs d'état

Après avoir pris connaissance de l'ensemble des informations nécessaires à travers le dossier d'ouvrage et les renseignements apportés par le propriétaire, un profil, à la fois représentatif de l'ensemble de l'ouvrage et intéressant vis-à-vis du diagnostic de la végétation arborescente, a été choisi par le groupe d'experts vers le point le plus haut du barrage (Figure 7).
Sur ce profil de 5 mètres de longueur rive à rive, la crête a une largeur de 10 mètres. Le talus aval présente une rupture de pente : 80% en haut, puis 70% en aval.
La végétation arborée présente sur le couronnement aval du profil est importante. La densité des individus est élevée : entre 2 et 5 individus par 10 m². On y retrouve 3

informazioni disponibili, alcuni di questi indicatori non possono essere valutati dai tecnici e, all'occorrenza, si annota «nessuna informazione» sulla scheda tecnica. Non essendo stata riscontrata nessuna perdita visibile sul rilevato i tecnici hanno quindi valutato gli altri indicatori di stato che permettono di stimare la performance di tenuta. Il diagramma radar illustra i risultati dell'annotazione unanime degli indicatori forniti dai tecnici (Figura 8).

La sezione di rilevato scelta presenta tra i 2 e i 5 individui per 10 m² (Figura 7). Di conseguenza l'indicatore «densità degli individui» ha ricevuto una valutazione negativa (punteggio uguale a 3), conformemente ai parametri stabiliti durante la formalizzazione di quest'indicatore.

Per valutare l'indicatore «volume radicale per individuo», il gruppo di esperti ha misurato il diametro degli individui più grandi. Poiché il diametro era superiore ai 30 cm, l'indicatore è stato valutato negativamente (punteggio uguale a 3).

L'indicatore «tipo di struttura radicale degli individui» è stato valutato dai tecnici identificando la struttura radicale potenziale di un individuo, sulla base dei parametri che determinano la struttura radicale di un albero (tipo di suolo, accesso all'acqua, posizione

FIGURA 7
Profilo scelto dal gruppo di esperti per valutare la performance dello sbarramento di Grengia (Italia) rispetto al meccanismo d'erosione interna (foto: Irstea).

FIGURE 7
Profil choisi par le groupe d'experts pour l'évaluation la performance du barrage de Grengia (Italie) vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne (photo : Irstea).

individus vivants : 3 conifères et 2 individus morts (conifères) et 1 ayant rejeté (feuillu) coupés en 2004. Le diamètre des individus est supérieur à 30 cm.

Afin d'illustrer l'évaluation des indicateurs d'état spécifiques à la végétation arborescente, nous présentons les notations réalisées sur les indicateurs d'état relatifs à l'évaluation de la performance de la fonction étanchéité du remblai de l'ouvrage (Figure 6). En fonction des informations disponibles, certains de ces indicateurs ne peuvent pas être évalués par les experts et, le cas échéant, on note « non renseigné » sur leur fiche de notation. Aucune fuite ou indice de fuites n'a été observée sur le remblai, les experts ont donc noté les autres indicateurs d'état permettant l'évaluation de la performance d'étanchéité. Le diagramme radar illustre les résultats de la notation consensuelle des indicateurs par les experts (Figure 8).

Le profil choisi présente entre 2 et 5 individus par 10 m² (Figure 7). L'indicateur « densité des individus » a par conséquent été évalué par le groupe d'experts comme mauvais (note égale à 3) conformément aux références établies lors de la formalisation de cet indicateur.

Pour évaluer l'indicateur « volume racinaire par individu », le groupe d'experts a

sull'opera). Tenendo conto di questi parametri, la vegetazione arborea dello sbarramento di Grengia presenta potenzialmente una struttura radicale mista (radici orizzontali e fittoni). Tale struttura induce il gruppo di tecnici a stimare come "mediocre" l'indicatore di stato «tipo di struttura radicale degli individui» (punteggio uguale a 5) in conformità ai parametri stabiliti durante la formalizzazione di quest'indicatore.
Infine, il punteggio di 5 (mediocre) per l'indicatore «grado di decomposizione» è stato attribuito all'unanimità dai tecnici sulla base degli elementi forniti nella griglia di formalizzazione, tenendo conto dello stato di deterioramento delle due ceppaie di conifere (Figura 9a) e dei germogli osservati sul ceppo di quercia (Figura 9b). Il taglio degli alberi risale a una decina di anni fa e noi disponiamo attualmente di dati sull'evoluzione della decomposizione delle radici fino a 4 anni d'invecchiamento. Questa griglia verrà completata negli prossimi anni per includere periodi più lunghi di decomposizione.

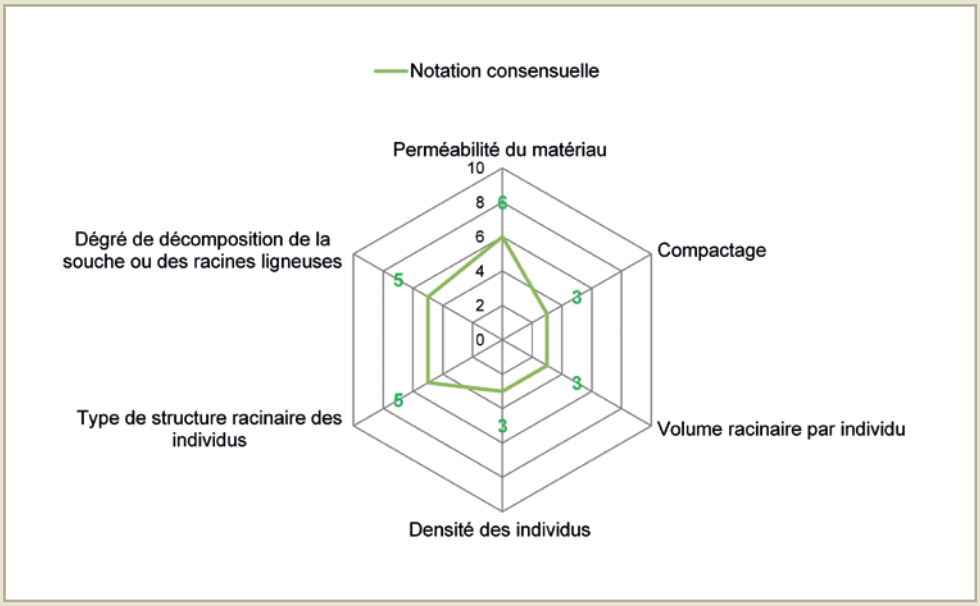


FIGURA 8
Valutazione degli indicatori di stato relativi alla performance della funzione tenuta (annotazione unanime dei tecnici).

FIGURE 8
Evaluation des indicateurs d'état relatifs à la performance de la fonction étanchéité (notation consensuelle).

mesuré le diamètre au collet des plus gros individus. Ce dernier étant supérieur à 30 cm, l'indicateur a été évalué comme mauvais (note égale à 3).
L'indicateur « type de structure racinaire des individus » a été évalué par le groupe d'experts à partir de la clef d'aide à l'identification de la structure racinaire potentielle d'un individu qui a été construite sur la base des paramètres déterminant la structure racinaire d'un arbre (type de sol, accès à l'eau, position sur l'ouvrage). Compte tenu de ces paramètres, la végétation arborescente du barrage de Grengia présente potentiellement une structure racinaire mixte (racines horizontales et pivots). Cette structure racinaire amène le groupe d'expertise à évaluer l'indicateur d'état « type de structure racinaire des individus » comme étant médiocre (note égale à 5) conformément aux références établies lors de la formalisation de cet indicateur.
Enfin, la note de 5 (médiocre) pour l'indicateur « degré de decomposition de la souche ou des racines ligneuses d'un individu» a été attribuée de façon consensuelle par les experts sur la base des éléments fournis dans la grille de formalisation, compte tenu de l'état de dégradation des deux souches de conifères (Figure 9a) et des rejets observés sur la souche de chêne (Figure 9b). La coupe des arbres date d'une dizaine d'années et nous disposons actuellement de connaissances sur l'évolution de la décomposition des racines jusqu'à 4 années de vieillissement. Cette grille va être complétée dans les prochaines années pour prendre en compte des durées plus longues de décomposition.

Valutazione della performance

La performance della funzione «tenuta» è stata calcolata dal modello prendendo in considerazione da una parte gli indicatori relativi alla vegetazione corrispondente all'opera nel suo stato attuale (punteggio ottenuto: 1), e dall'altra senza tenere conto della presenza della vegetazione, come se l'opera fosse priva di alberi (punteggio ottenuto: 3). Si può concludere che la presenza di vegetazione riduce significativamente la performance di questa funzione.
Nella Figura 10 presentiamo le valutazioni della performance del rilevato, dell'interfaccia rilevato-fondazione e della fondazione mobile rispetto al meccanismo d'erosione interna ottenute dal modello.

A

B

FIGURA 9
Ceppaia di conifera morta (A) e ceppaia di quercia germogliata (B) su coronamento e a valle dello sbarramento di Grengia (Italia) – (foto: Irstea).

FIGURE 9
Souche de conifère morte (A) et souche de chêne ayant rejeté (B) sur le couronnement aval du barrage de Grengia (Italie) – (photo : Irstea).

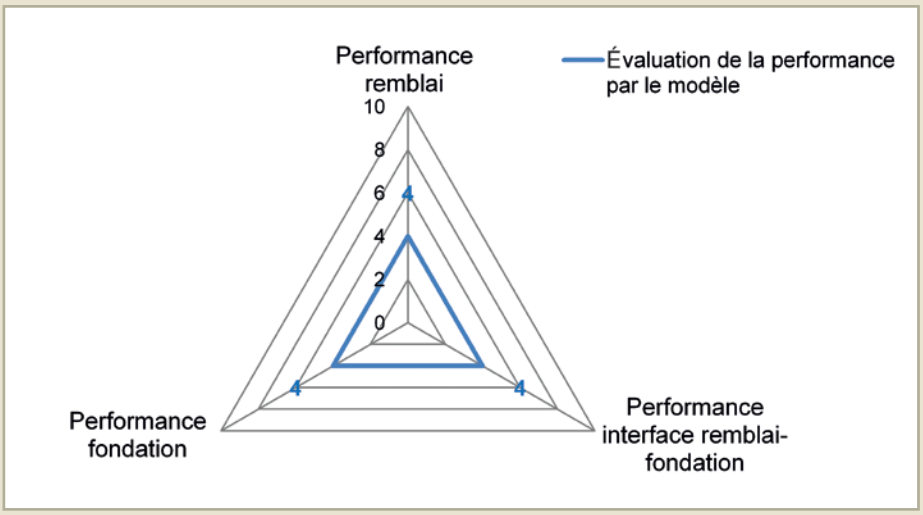
Evaluation de la performance

La performance de la fonction étanchéité a été calculée par le modèle en considérant, d'une part, les indicateurs relatifs à la végétation correspondant à l'ouvrage dans son état actuel (note obtenue : 1), d'autre part, sans considérer la présence de la végétation en imaginant le barrage sans arbre (note obtenue : 3). Nous pouvons en conclure que la présence de végétation vient dégrader significativement la performance de cette fonction. Nous présentons sur la Figure 10, les évaluations de la performance du remblai, de l'interface remblai-fondation et de la fondation meuble vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne obtenues par le modèle.

Notiamo che i punteggi della performance ottenuti dal modello riflettono l'opinione dei tecnici in riferimento alla sicurezza di quest'opera rispetto al meccanismo d'erosione interna.
Infine il modello indica che lo sbarramento di Grengia presenta una performance mediocre (Figura 10) rispetto al meccanismo d'erosione interna. Si può notare come i tre componenti dell'opera (rilevato, fondazione, interfaccia rilevato-fondazione) abbiano una performance simile.
Riguardo al rilevato, tale risultato si spiega con la mediocre impermeabilità dovuta alle caratteristiche intrinseche del rilevato (permeabilità e costipamento) molto scarse, combinate alla presenza di una fitta vegetazione di alberi grandi, alcuni dei quali tagliati, il che lascia intuire la presenza di radici decomposte e quindi di vie preferenziali per l'acqua. Inoltre si spiega con una performance mediocre della funzione di resistenza all'erosione interna, che risulta da una valutazione mediocre dell'indicatore «gradiente ammissibile» (che a sua volta è conseguenza della forte pendenza della scarpata a valle). L'aggregazione delle performance di queste funzioni fornisce una valutazione mediocre della performance del rilevato rispetto al meccanismo d'erosione interna.
Per quanto riguarda la fondazione, la performance mediocre è indicata col punteggio di 4 evidenziato dai tecnici sulla base dell'indicatore di stato «gradiente ammissibile».

FIGURA 10
Valutazione della performance dello sbarramento di Grengia rispetto al meccanismo d'erosione interna con e senza utilizzo del modello.

FIGURE 10
Evaluation de la performance du barrage de Grengia vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne avec et sans utilisation du modèle.



Nous notons que les notes de performance obtenues par le modèle reflètent l'opinion des experts vis-à-vis de la sécurité de cet ouvrage vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne. Finalement, le modèle indique que le barrage de Grengia présente une performance médiocre (Figure 10) vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne. Les trois composants du barrage (remblai, fondation, interface remblai-fondation) ont une performance similaire vis-à-vis de ce mécanisme.
Pour le remblai, cette performance médiocre s'explique par une étanchéité mauvaise due à des caractéristiques intrinsèques du barrage (perméabilité et compactage) assez faibles combinées à la présence d'une végétation dense de grands arbres dont certains ont été coupés, ce qui laisse présager la présence de racines décomposées et donc de chemins préférentiels pour l'eau. Egalement, elle s'explique par une performance médiocre de la fonction de résistance à l'érosion interne résultant d'une évaluation médiocre de l'indicateur « gradient admissible » (résultant elle-même de la forte pente du talus aval). L'agrégation de la performance de ces fonctions nous donne une évaluation médiocre de la performance du remblai vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne.
Pour la fondation, la performance médiocre s'explique par la note de 4 élicitée par les experts vis-à-vis de l'indicateur d'état « gradient admissible ». Cet indicateur d'état relatif à la fonction « de résistance à l'érosion interne » vient dégrader la performance

Quest'indicatore relativo alla funzione di «resistenza all'erosione interna» riduce la performance della fondazione, rispetto all'erosione interna che presentava tuttavia una performance tollerabile della funzione «tenuta» (punteggio ottenuto: 6). In effetti, essendo la fondazione sprovvista di vegetazione arborea, la performance della funzione «tenuta» della fondazione si è dimostrata nettamente migliore a quella dell'argine.

Conclusioni

Nell'ambito dell'*Azione 2.6* del progetto RISBA sono stati realizzati adattamenti e miglioramenti di modelli preesistenti di valutazione della performance delle opere in rilevato rispetto al meccanismo d'erosione interna. Questi modelli consentono adesso di stimare la performance dei rilevati omogenei in presenza di alberi, sprovvisti di drenaggi e di strumentazione d'auscultazione, della loro fondazione e della loro interfaccia rilevato-fondazione. L'applicazione di questi modelli a casi reali di rilevati collinari francesi e italiani ha permesso di dimostrare la loro solidità, soprattutto dopo aver constatato che sono in grado di riprodurre il ragionamento di un tecnico esperto.

Riferimenti bibliografici / *Références*

Akerka R., Sajja P. (2009). I*ntroduction to Knowledge-based Systems*, in: Knowledge-based Systems, Jones & Bartlett Publishers, pp. 1-28.

Bambara G., Curt C., Vennetier M., Mériaux P., Vanloot P. (2013). *Characterization of woody roots located in dikes by near-infrared spectroscopy and chemometrics*, Proceedings of the ICNIRS - 16th International Conference on Near Infrared Spectroscopy, La Grande Motte, France.

Booker J. M., McNamara L. A. (2004). *Solving black box computation problems using expert knowledge theory and methods*, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 85, 331-340.

CFGB (1997). *Internal erosion: typology, detection, repair*.

Curt C. (2008). *Evaluation de la performance des barrages en service basée sur une formalisation et une agrégation des connaissances*, PhD Thesis, Université Blaise Pascal - Clermont II.

Curt C., Peyras L., Boissier D. (2010). *A knowledge formalization and aggregation-based method for the assessment of dam performance*, Computer-aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol. 25, 171-184.

Curt C. (2013). *Combining knowledge-based method and possibility-based approach for the assessment of dam performance*, in: Dams: Structure, Performance and Safety Management, Nova Science Publishers, pp. 1-38.

Zanetti C., Vennetier M., Mériaux P. (2013). *Développement et décomposition des systèmes racinaires: risques induits pour les digues et solutions de gestion*, 2e colloque national - Digues 2013, Aix en Provence, France.

de la fondation vis-à-vis de l'érosion interne qui avait pourtant une performance de la fonction « étanchéité » tolérable (note obtenue : 6). En effet, la fondation étant dépourvu de végétation arborescente, la performance de la fonction « étanchéité » de la fondation s'est avéré nettement meilleure que celle du remblai.

Conclusions

*Au titre de l'*Action 2.6 *du projet RISBA, des adaptations et améliorations de modèles préexistants d'évaluation de la performance des barrages en remblai vis-à-vis du mécanisme d'érosion interne ont été réalisées. Ces dernières permettent maintenant d'évaluer la performance des barrages en remblai homogènes boisés, non équipés de drain et d'instruments d'auscultation, leur fondation et leur interface remblai-fondation. L'application de ces modèles sur des cas réels de barrages collinaires français et italiens a permis de démontrer la robustesse de ces modèles notamment par le fait qu'ils sont capables de reproduire le raisonnement d'un expert.*

ATTIVITÀ 3 / *ACTIVITÉ 3*

«DAM-BREAK» - DEFINIZIONE DEL RISCHIO A VALLE DELLO SBARRAMENTO

« DAM-BREAK » - DÉFINITION DU RISQUE EN AVAL DU BARRAGE

Aree vulnerabili per onde di piena dovute a rottura di sbarramenti

Problematica di base

La problematica da affrontare riguarda la valutazione con metodi speditivi delle aree vulnerabili a valle dei piccoli invasi in terra di competenza regionale (Regione Piemonte). Al fine di valutare il rischio associato a tali dighe è necessario conoscere le aree interessate, il danno potenziale degli elementi esposti al rischio e la relativa vulnerabilità, l'intensità dell'evento.

Strategie utilizzate

1. Definizione delle soglie di vulnerabilità *V*.
   Il primo obiettivo è quello di definire un certo numero di soglie di vulnerabilità che leghi il danno potenziale degli elementi esposti al rischio al danno reale.
2. Definizione dell'intensità dell'evento e delle aree interessate.
   Per affrontare il problema della modellazione di un'onda di dam-break conseguente il collasso di una diga in materiale sciolto sono necessarie preventive analisi inerenti:
   a. Lo sviluppo e la morfologia della breccia: tali informazioni sono le condizioni al contorno del modello numerico.

Zones vulnérables aux ondes de crue provoquées par la rupture des barrages

Problématique

Il s'agit d'évaluer les zones vulnérables en aval des petits barrages en terre de compétence régionale (Région Piémont) suivant des méthodes simples. Pour évaluer les risques associés à ces digues, il est nécessaire de connaître les zones intéressées, le dommage potentiel aux enjeux et leur vulnérabilité, ainsi que l'intensité de l'événement.

Stratégies utilisées

1. *Définition des seuils de vulnérabilité V.*
   Le premier objectif est de définir un certain nombre de seuils de vulnérabilité qui associent le dommage potentiel aux enjeux au dommage réel.
2. *Définition de l'intensité de l'événement et des zones exposées .*
   Pour aborder le problème de la modélisation d'une onde provoquée par la rupture d'un barrage, il est nécessaire d'effectuer des analyses préalables concernant :

b. L'idrogramma delle portate in uscita dalla breccia: sulla base della tipologia di apertura della breccia il modello numerico stima l'idrogramma alla breccia.
c. La morfologia dell'alveo di valle: una volta calcolato l'idrogramma in uscita, la relativa propagazione è funzione delle condizioni al contorno imposte dalla valle. Da qui si individuano, velocità media, profondità e aree interessate.

Definizione delle soglie di vulnerabilità

Per quanto concerne l'intensità di piena, viene assunto, come da letteratura scientifica, che sia possibile utilizzare due grandezze caratteristiche: la profondità (tirante idrico, y) e la velocità localmente raggiunta dall'acqua (v), reperibili dalle analisi idrauliche. La difficoltà di correlare l'intensità di piena al danno e quindi giungere alla costruzione di funzioni di vulnerabilità, è un argomento dibattuto e oggetto di sviluppo in letteratura. Usualmente la relazione che intercorre tra l'intensità di piena e il danno prende il nome di funzioni di danno o curve di vulnerabilità.
Le curve di vulnerabilità differiscono anche in funzione degli elementi esposti a rischio considerati (beni materiali piuttosto che soggetto umano). A titolo di esempio, relativamente alle aree urbanizzate si propone:

- V_{100}: distruzione totale (ovvero perdita del 100% del valore), $vy = 7$ m²/s;
- V_{70} : distruzione significativa (ovvero perdita del 70% del valore), $vy = 3$ m²/s;
- V_{30} : distruzione parziale (ovvero perdita del 30% del valore), $vy = 1$ m²/s.

La definizione di una relazione analitica mediante la quale stimare, in funzione della geometria della breccia e dell'invaso, nonché della geometria e dei parametri idraulici dell'alveo, la distanza minima dallo sbarramento cui collocare, in funzione del livello di

a. *Le développement et la morphologie de la brèche : ces informations sont nécessaires à la définition des conditions aux limites du modèle numérique.*
b. *L'hydrogramme du débit en sortie de la brèche : le modèle numérique estime l'hydrogramme en fonction du type d'ouverture de la brèche.*
c. *La morphologie du lit en aval : une fois calculé l'hydrogramme en sortie, sa propagation est déterminée par les conditions aux limites imposées par la vallée à partir desquelles on calcule la vitesse moyenne, la profondeur et les zones concernées.*

Définition des seuils de vulnérabilité

En ce qui concerne l'intensité des crues, on suppose, conformément à la littérature scientifique, qu'il est possible d'utiliser deux grandeurs caractéristiques : la profondeur (tirant d'eau, y) et la vitesse localement atteinte par l'eau (v), disponibles à partir des analyses hydrauliques. La difficulté de corréler l'intensité des crues au dommage et donc de définir les fonctions de vulnérabilité est un sujet débattu et un thème de développement dans la littérature. Habituellement, la relation entre l'intensité des crues et les dommages est appelée fonctions de dommages ou courbes de vulnérabilité.
Les courbes de vulnérabilité changent aussi en fonction des éléments desquelles on calcule exposés au risque (biens matériels ou êtres humains). Par exemple, par rapport aux zones urbaines on propose :

- V_{100} *: destruction totale (c'est-à-dire la perte de 100% de la valeur), vy = 7 m²/s ;*
- V_{70} *: destruction significative (c'est-à-dire la perte de 70% de la valeur), vy = 3 m²/s ;*
- V_{30} *: destruction partielle (c'est-à-dire la perte de 30% de la valeur), vy = 1 m²/s .*

rischio accettato, insediamenti produttivi e umani, necessita dunque della quantificazione del valore massimo del prodotto *vy* rilevabile in corrispondenza di ogni sezione a valle dello sbarramento.
L'equazione di continuità unitamente alle relazioni adottate nel presente studio consentono di scrivere la seguente equazione:

$$v(x)y(x) = \frac{q_{max}(x)}{b} \qquad [eq.3.1a]$$

È dunque possibile formulare il problema dell'identificazione della distanza di sicurezza o della vulnerabilità di una certa area a valle di un invaso, per ogni sezione, in termini di ampiezza e di portata massima. È quindi indispensabile studiare l'orografia del territorio e la propagazione dell'onda di piena.

L'INTENSITÀ DELL'EVENTO

Sviluppo della breccia, relativa morfologia e portate massime

Contrariamente ai casi di collasso istantaneo di dighe in calcestruzzo, dove la forma e le tempistiche di rottura sono semplicemente desumibili, nelle dighe in terra le maggiori difficoltà risiedono nella modellazione della forma della breccia, della sua evoluzione nel tempo e del relativo idrogramma delle portate in uscita. Gran parte del lavoro svolto

La définition d'une fonction analytique permettant d'estimer, selon la géométrie de la brèche et de la retenue, ainsi que la géométrie et les paramètres hydrauliques du lit, la distance minimale entre le barrage et les sites de production et les établissements humains en fonction du niveau de risque accepté nécessite la quantification de la valeur maximale du produit vy *au niveau de chaque section en aval du barrage.*
L'équation de continuité associée aux relations utilisées dans cette étude permet d'écrire l'équation suivante :

$$v(x)y(x) = \frac{q_{max}(x)}{b} \qquad [eq.3.1a]$$

Il est donc possible de formuler le problème de l'identification de la distance de sécurité ou de la vulnérabilité d'une certaine région en aval d'une retenue, pour chaque section, en termes d'amplitude et de débit maximal. Il est donc essentiel d'étudier l'orographie du territoire et la propagation de l'onde de crue.

L'INTENSITÉ DE L'ÉVÉNEMENT

Développement de la brèche, sa morphologie et ses débits maximaux

Contrairement aux cas d'effondrement instantané de barrages en béton où la forme et le moment de la rupture sont simplement déduits, dans les digues en terre les plus grandes difficultés sont concentrées dans la modélisation de la forme de la fente, de son

nella prima parte del presente lavoro ha riguardato la ricerca delle formulazioni più opportune per la modellazione di tale fenomeno.
La geometria della breccia è stata modellizzata in funzione dell'elaborazione statistica di dati degli invasi reali. Nel dettaglio, sono stati analizzati gli articoli di letteratura e i report tecnico-scientifici pubblicati negli ultimi decenni. Le principali formule empiriche suggerite per la stima della portata di picco e per la formazione della breccia sono state confrontate tra di loro e utilizzate per stimare le variabili di interesse per i casi della Regione Piemonte (M.W. Pierce et al., 2010; Singh e Scarlatos, 1988; Wahl, 1998; Froehlich, ecc.). Di particolare interesse per il caso degli invasi della Regione Piemonte risulta il lavoro di Pierce che ha ampliato un database preesistente (Wahl, 1998) con 44 nuovi casi, raddoppiando il numero degli eventi relativi a sbarramenti di altezza inferiore ai 10 m (considerando dighe di altezza compresa tra 0.6 m e 31.46 m).
Il lavoro è suddiviso in due parti: nella prima si è studiata l'evoluzione della breccia in funzione dei tempi di apertura e della relativa forma durante l'evento. Tale sviluppo è imposto come condizione di monte al modello numerico al fine di stimare l'idrogramma delle portate di collasso alla breccia.
Nella seconda parte si è affrontato il problema di valutare l'entità delle portate massime in uscita dallo sbarramento. Tali valori sono utili sia per aumentare la confidenza nei risultati ottenuti dal modello numerico, sia per scalare le onde sintetiche adimensionali che si possono ricavare dal laboratorio numerico. In particolare, nella procedura adottata in precedenti lavori per la Regione Piemonte, l'intento è quello di ottenere delle forme di onde adimensionali in funzione delle variabili tipiche della valle (pendenza, scabrezza, ampiezza, ecc.) e di renderle dimensionali utilizzando la portata massima allo sbarramento, nota dalle formule empiriche.

évolution dans le temps et de l'hydrogramme des débits en sortie. Une grande partie du travail accompli dans la première partie de cet ouvrage a concerné la recherche des formules les plus appropriées pour la modélisation de ce phénomène.
La géométrie de la brèche a été modélisée en fonction des données statistiques des retenues réelles. Dans le détail, on a analysé les articles de la littérature et les rapports techniques et scientifiques publiés au cours des dernières décennies. Les principales formules empiriques suggérées pour l'estimation du débit maximal et pour la formation de la brèche ont été comparées les unes aux autres et utilisées pour estimer les variables d'intérêt pour les cas de la Région Piémont (M.W. Pierce et al., 2010; Singh et Scarlatos, 1988; Wahl, 1998; Froehlich, etc.).
L'œuvre de Pierce est d'un intérêt particulier dans le cas des retenues de la Région Piémont : elle a étoffé une base de données déjà existante (Wahl, 1998) avec 44 nouveaux cas, doublant le nombre des événements relatifs aux barrages d'une hauteur inférieure à 10 m (on considère des barrages d'une hauteur comprise entre 0,6 et 31,46 mètres).
Le travail est divisé en deux parties : dans la première, on a étudié l'évolution de la brèche en fonction des temps d'ouverture et de sa forme pendant l'événement. Ce développement est imposé comme condition en amont du modèle numérique pour estimer l'hydrogramme des débits de rupture en fonction de l'ouverture de la brèche. Dans la seconde partie, on a abordé le problème de l'évaluation des débits maximaux sortant du barrage. Ces valeurs sont utiles pour augmenter la confiance dans les résultats obtenus à partir du modèle numérique et pour dimensionner les ondes de synthèse adimensionnelles pouvant être obtenues du modèle numérique. En particulier, dans la procédure classique adoptée dans les précédents travaux pour la Région Piémont, l'objectif serait d'obtenir les formes des ondes adimensionnelles en fonction des variables typiques de la vallée (pente, rugosité, amplitude, etc.) et de les dimensionner en utilisant le débit maximal au barrage, déduit des formules empiriques.

L'apertura e la morfologia della breccia

Per ciò che concerne la forma, la dimensione trasversale e il tempo di evoluzione della breccia, l'analisi ha riguardato i dati raccolti da Babb & Mermel (1968), Froelich (1987, 1993, 1995), Singh & Snorasson (1982, 1984), Costa (1985), Singh & Scarlatos (1988), Von Thun & Gilette (1990). In particolare, l'analisi condotta da Singh utilizzando i dati attinenti a 52 crolli di dighe in terra di durata compresa fra una e dodici ore costituisce un interessante riferimento. Sulla base di tale studio la forma finale della breccia ha generalmente una forma trapezoidale, con rapporto medio tra la larghezza sommitale e alla base pari a 1,29 e un angolo di inclinazione dei lati compreso tra 40° e 50°. In riferimento ai lavori di Froehlich, la breccia si sviluppa dapprima con forma triangolare, poi, al raggiungimento della quota minima (piede della diga), si espande lateralmente secondo una forma a trapezio. L'autore ha successivamente condotto validazione del metodo quantificandone le incertezze con il metodo Monte Carlo (metodo di analisi statistico) in riferimento a un database contenente 74 casi reali (solo 23 per il tempo di formazione) di collasso parziale nel 2008, migliorando anche la formulazione per la stima del tempo di formazione della breccia.
Il rapporto tra la larghezza della breccia alla sommità B e la profondità della breccia d varia linearmente con il rapporto Hs/H, essendo H l'altezza della diga e $Hs = Vs^{1/3}$, con Vs volume immagazzinato nell'invaso. In particolare, si evince come il ruolo del volume nella formazione e nella forma finale della breccia giochi un ruolo fondamentale. Infatti, a parità di altezza, una diga che sottenda un serbatoio di grande volume potrà essere totalmente erosa a causa del fatto che le portate in uscita si manterranno elevate, essendo sostenute dal volume d'acqua immagazzinato nel serbatoio stesso. Contrariamente, nel

L'ouverture et la morphologie de la brèche

Pour ce qui est de la forme, de la dimension transversale et du temps d'évolution de la brèche, l'analyse a concerné les données collectées par Babb & Mermel (1968), Froelich (1987, 1993, 1995), Singh & Snorasson (1982, 1984), Costa (1985), Singh & Scarlatos (1988), Von Thun & Gilette (1990). En particulier, l'analyse conduite par Singh en utilisant les données relatives à 52 ruptures de digues en terre d'une durée comprise entre une et douze heures représente une référence intéressante. Sur la base de cette étude, la brèche a généralement une forme trapézoïdale dont le rapport moyen entre la largeur du sommet et la base est de 1,29, ainsi qu'un angle d'inclinaison des côtés compris entre 40° et 50°. En référence à l'œuvre de Froehlich, la brèche se développe d'abord suivant une forme triangulaire ; quand elle atteint l'altitude minimale (pied du barrage), elle s'étend latéralement selon une forme trapézoïdale. Ensuite, l'auteur a validé cette méthode en quantifiant ses incertitudes à travers la méthode de Monte-Carlo (méthode d'analyse statistique) en se référant à une base de données contenant 74 cas réels (seulement 23 pour le temps de formation) d'effondrement partiel en 2008 en améliorant la formulation pour l'estimation du temps de formation de la brèche.
Le rapport entre la largeur de la fente dans la partie supérieure B *et sa profondeur* d *varie de façon linéaire suivant le rapport* Hs/H, *où* H *est la hauteur du barrage et* $Hs = Vs^{1/3}$, *avec* Vs = *volume stocké dans la retenue. En particulier, il est clair que le volume joue un rôle clé dans la formation de la bréche et dans sa forme finale. En effet, à hauteur égale, un barrage qui sous-tend un réservoir de grand volume peut être totalement érodé en raison du fait que le débit en sortie reste élevé, étant alimenté par le volume d'eau stocké. Au contraire, dans le cas d'un réservoir de volume réduit, la*

caso di un serbatoio di volume limitato, la breccia non si evolverà fino a divenire trapezoidale, poiché le portate in uscita porteranno allo svuotamento del serbatoio prima che la breccia raggiunga l'estremità inferiore dello sbarramento. In Figura 1, sono riportati i volumi e le altezze di circa 100 invasi regionali insieme alla rappresentazione della frontiera che delimita, sulla base delle precedenti formulazioni empiriche, gli invasi che presenteranno una breccia completamente formata.

Le portate massime in uscita dalla breccia

Si sono raccolte e analizzate le principali formule per la stima della portata di picco presenti in letteratura. Esse sono state confrontate con i database ottenuti mediante integrazione di dati provenienti da diverse pubblicazioni (1975-2007).
La maggior parte delle formulazioni proposte in letteratura trae origine da regressioni lineari e lega la portata di picco a:

a. l'altezza d'acqua presente nell'invaso al momento del collasso;
b. il volume d'acqua contenuto nel serbatoio al momento del collasso;
c. la lunghezza dell'invaso.

Nella Tabella 1 sono indicati per ciascuna formula il numero di casi studio utilizzati e il valore del coefficiente di regressione. Un primo confronto viene effettuato con dati raccolti da Wahl (1998) utilizzando i casi studio di diversi autori precedenti (108 casi di cui solo 43 completi dei valori di altezza d'acqua nello sbarramento *H*, volume d'acqua nell'invaso al collasso *V* e valore stimato della portata di picco *Qp*).
Lo stesso Wahl considera la relazione di Froehlich (Tabella 1, n.10) uno dei migliori modi per stimare la portata di picco, tuttavia, a prova dell'elevato grado di complessità e incer-

brèche ne deviendra pas trapézoïdale, car le débit en sortie videra le réservoir avant que la fente ait atteint l'extrémité inférieure du barrage. La Figure 1 montre les volumes et hauteurs d'environ 100 barrages régionaux avec la représentation de la frontière qui délimite, sur la base des formulations empiriques précédentes, les retenues qui ont une brèche totalement formée.

Les débits maximaux en sortie de la brèche

On a collecté et analysé les principales formules pour l'estimation du débit maximal dans la littérature. Elles ont été comparées avec les bases de données obtenues par intégration des données provenant de différentes publications (1975-2007).
La plupart des formulations proposées dans la littérature proviennent de régressions linéaires et lient le débit maximal :

a. *à la hauteur d'eau présente dans le réservoir au moment de l'effondrement ;*
b. *au volume d'eau contenu dans le réservoir au moment de l'effondrement ;*
c. *à la longueur du réservoir.*

Dans le Tableau 1, on indique pour chaque formule le nombre de cas d'étude utilisés et la valeur du coefficient de régression. Une première comparaison est faite avec les données collectées par Wahl (1998) en utilisant les cas d'étude de plusieurs auteurs précédents (108 cas dont seulement 43 avec toutes les valeurs de hauteur d'eau dans le barrage H, *de volume d'eau dans la retenue à l'effondrement* V *et de valeur estimée du débit maximal* Qp*).*
Wahl considère la relation de Froehlich (Tableau 1, n° 10) comme l'une des meilleures façons d'estimer le débit maximal. Cependant, pour démontrer le degré élevé de complexité et d'incertitude du problème, on souligne qu'en comparant les valeurs

tezza del problema, si fa presente che, confrontando i valori ottenuti con i 43 casi raccolti da Wahl, lo scostamento medio tra i valori stimati e i valori noti è del 119% con uno scostamento massimo del 1682%. Si nota inoltre che gli scostamenti maggiori si hanno per piccoli invasi (portata di picco inferiore a 1050 m^3/s), mentre per gli invasi più grandi la differenza varia dal 4% al 113%, con una media del 34%. Un recente lavoro di Pierce et al. (2010) è particolarmente interessante per il caso degli invasi della Regione Piemonte. In particolare, il database di Wahl è stato integrato con 44 casi verificatisi tra il 1975 e il 2007. Tali dati raddoppiano il numero degli eventi relativi a sbarramenti di altezza inferiore ai 10 m (considerando dighe di altezza compresa tra 0.6 m e 31.46 m, con picchi di portata tra 0.28 e 78000 m^3/s). Sulla base di tali dati, Pierce ha proposto una serie di formulazioni simili a quelle già proposte in precedenza ma tarando i coefficienti sul nuovo set di eventi di collasso. Le formulazioni più robuste risultano, secondo quanto riscontrato in letteratura, quelle che tengono conto sia dell'altezza dello sbarramento sia del volume di acqua immagazzinata, quali quelle di Froehlich (1995) e Pierce et al. (2008), entrambe ottenute attraverso regressione multipla in funzione dell'altezza d'acqua e del volume all'interno dell'invaso al momento della rottura.

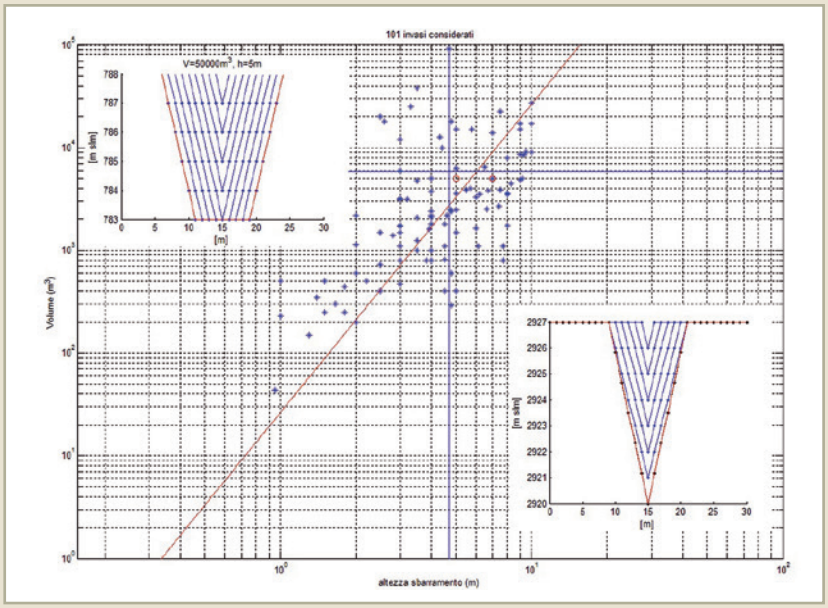


FIGURA 1
La suddivisione tra le dighe che presentano una breccia completamente formata e quelle aventi breccia incompleta di forma triangolare.

FIGURE 1
La division entre les barrages qui ont une brèche complètement formée et ceux qui ont une brèche incomplète de forme triangulaire.

obtenues avec les 43 cas recueillis par Wahl, l'écart moyen entre les valeurs estimées et les valeurs connues est de 119%, avec un écart maximal de 1682%. En outre, on voit que les écarts les plus importants concernent les petites retenues (débit maximal de moins de 1050 m^3/s), tandis que pour les plus grandes retenues la différence varie de 4% à 113%, avec une moyenne de 34%. Un récent travail de Pierce et al. (2010) est particulièrement intéressant pour les cas des barrages de la Région Piémont. En particulier, la base de données de Wahl a été complétée par 44 cas survenus entre 1975 et 2007. Ces données doublent le nombre des événements relatifs aux barrages d'une hauteur inférieure à 10 m (on considère des barrages d'une hauteur comprise entre 0.6 et 31.46 m, avec débits maximaux compris entre 0.28 et 78000 m^3/s). Sur la base de ces données, Pierce a proposé une série de formulations similaires à celles déjà proposées auparavant, mais avec l'étalonnage des coefficients sur la nouvelle série d'événements d'effondrement. Les formulations les plus solides, telles qu'elles sont constatées dans la littérature, sont celles qui considèrent la hauteur du barrage et le volume d'eau stockée, comme celles de Froehlich (1995) et Pierce et al. (2008), toutes les deux obtenues à travers la régression multiple en fonction de la hauteur et du volume d'eau dans le réservoir au moment de la rupture.

Le portate massime alla breccia stimate per alcuni invasi piemontesi

Si procederà nel seguito alla valutazione dell'ordine di grandezza delle portate in uscita dagli invasi in terra di competenza regionale. In particolare in Figura 2 si riportano i risultati ottenuti applicando le formulazioni di Pierce et al. (2008), Froehlich (1995) e Poggi et al. (2011, collasso istantaneo) a un centinaio di invasi. Si può notare che le portate massime stimate da Pierce e Froehlich sono sempre, come è lecito aspettarsi, inferiori rispetto a quelle che si possono ottenere dal collasso istantaneo (Poggi et al., 2011). Inoltre le portate di Pierce sono sempre inferiori, per gli invasi analizzati caratterizzati da piccoli volumi del serbatoio, rispetto a quelle di Froehlich.
Non è però possibile, sulla base dei dati e dei modelli raccolti fino a ora, prediligere una formulazione rispetto all'altra. Certamente a vantaggio dell'espressione di Froehlich c'è il fatto che essa è a favore di sicurezza rispetto a quella di Pierce. Nondimeno, l'equazione

	n.	Formula / *Formule*	Autore / *Auteur*	anno / *année*	R^2	casi studio / *cas d'étude*	
						reali / *réels*	sperim. / *expérim.*
Q_p=f(H)	1	$Q_p=1.268(H_w+0.3)^{2.5}$	Kirkpatrick	1977	0.79	13	6
	2	$Q_p=19.1(H_w)^{1.85}$	USBR	1982	0.724	21	
	3	$Q_p=13.4(H_d)^{1.89}$	Singh & Snorrason	1982	0.488		8
Q_p=f(V)	4	$Q_p=1.776(S)^{0.47}$	Singh & Snorrason	1984	0.918		8
	5	$Q_p=0.72(V_w)^{0.53}$	Evans	1986	0.836	29	
Q_p=f(H,V)	6	$Q_p=1.205(V_wH_w)^{0.48}$	Hagen	1982		6	
	7	$Q_p=1.154(V_wH_w)^{0.412}$	Mac Donald & Langridge-Monopolis	1984	0.788	23	
	8	$Q_p=3.85(V_wH_w)^{0.411}$	Mac Donald & Langridge-Monopolis	1984	0.156	23	
	9	$Q_p=0.763(V_wH_w)^{0.42}$	Costa	1985	0.745	31	
	10	$Q_p=0.607(V_w^{0.295}H_w^{1.24})$	Froehlich	1995	0.934	22	
	11	$Q_p=0.038(V^{0.475}H^{1.09})$	Pierce	2008	0.934*	87	

* valutato su un database più ampio rispetto ai precedenti (43 casi raccolti da Wahl nel 1998 più 44 casi aggiunti dallo stesso Pierce)

** évalué sur une base de données plus vaste que les précédentes (43 cas recueillis par Wahl en 1998, plus 44 cas ajoutés par Pierce)*

TABELLA 1
Le principali formule empiriche per la definizione della portata alla breccia.

TABLEAU 1
Les principales formules empiriques pour la définition du débit à la brèche.

Les débits maximaux à la brèche estimés pour quelques retenues piémontaises

On procède maintenant à l'évaluation de l'ordre de grandeur des débits en sortie des barrages en terre de compétence régionale. En particulier, la Figure 2 montre les résultats obtenus en appliquant les formulations de Pierce et al. (2008), Froehlich (1995) et Poggi et al. (2011, effondrement instantané) à une centaine de barrages. On peut remarquer que les débits maximaux estimés par Pierce et Froehlich sont toujours, comme on pouvait s'y attendre, inférieurs à ceux qui peuvent être obtenus à partir de l'effondrement instantané (Poggi et al., 2011). De plus, les débits de Pierce sont toujours inférieurs, pour les barrages analysés caractérisés par de petits volumes du réservoir, à ceux de Froehlich.
Toutefois, il n'est pas possible, sur la base des données et des modèles recueillis jusqu'à présent, de préférer une formulation à l'autre. Certes, l'expression de Froehlich est plus en

di Pierce è stata tarata su invasi di dimensione più piccola e, conseguentemente, dovrebbe adattarsi meglio alla tipologia di invasi in esame in questo lavoro. Sulla base della formula di Pierce, le portate degli invasi analizzati spaziano da 1 m^3/s a circa 60 m^3/s. Diversamente, sulla base della formulazione di Froehlich il range delle portate è tra 3 e 200 m^3/s. Globalmente le stime di portata di quest'ultima sono sempre circa tre volte quelle che si ricavano da Pierce. Entrambe le portate, stimate da entrambe le formulazioni, sono di un ordine di grandezza inferiori a quelle ricavabili dal collasso istantaneo (10-2000 m^3/s).
Al fine di effettuare una valutazione comparativa, viene qui di seguito utilizzato un modello numerico per la modellazione delle portate in uscita dal serbatoio e della propagazione dell'onda di collasso verso valle.

Il modello numerico

Il modello numerico utilizzato è BREZO. Tale modello, pur non essendo commerciale e "user-friendly", ha un buon livello di sviluppo ed è internazionalmente accettato come uno dei più robusti e affidabili. Le simulazioni fino a ora effettuate hanno riguardato principalmente due invasi fittizi aventi caratteristiche "medie" in termini di volume in-

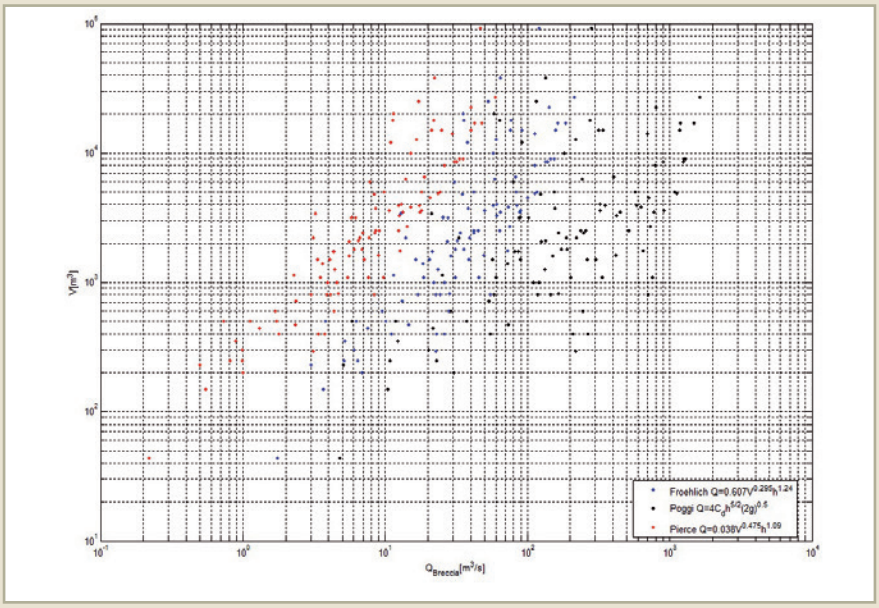


FIGURA 2
Applicazione agli invasi in Regione Piemonte delle formule di Pierce, Poggi e Froehlich per la stima della portata di picco alla breccia.

FIGURE 2
Application aux barrages en Région Piémont des formules de Pierce, Poggi et Froehlich pour l'estimation du débit maximal à la brèche.

faveur de la sécurité par rapport à celle de Pierce. Néanmoins, l'équation de Pierce a été calibrée sur les retenues de plus petite taille et, par conséquent, devrait mieux s'adapter au type de barrages étudiés dans ce travail. Sur la base de la formule de Pierce, les débits des barrages analysés varient entre 1 m^3/s et environ 60 m^3/s. Dans le cas contraire, sur la base de la formulation de Froehlich, la gamme des débits est comprise entre 3 et 200 m^3/s. Globalement, les débits estimés suivant cette dernière formule sont toujours environ trois fois supérieurs à ceux de Pierce. Les débits estimés par les deux formulations sont un ordre de grandeur inférieur à celles obtenues par l'effondrement instantané (10-2000 m^3/s).
Afin de commencer une évaluation comparative, on utilisera ci-après un modèle numérique pour la modélisation du débit en sortie du réservoir et de la propagation des ondes d'effondrement en aval.

Le modèle numérique

Le modèle numérique utilisé est BREZO. Ce modèle, même s'il n'est ni commercial ni facile d'utilisation, a un bon niveau de développement et il est internationalement reconnu comme l'un des plus robustes et fiables. Les simulations effectuées jusqu'ici ont

vasato (5.000 m^3) e altezza (5 e 7 m, rispettivamente). Questi due invasi, come è possibile vedere nella Figura 1 (cerchi rossi), si posizionano nel settore degli invasi con breccia completamente sviluppata (5 m) e di breccia triangolare (7 m). Su questi due invasi sono state eseguite numerose simulazioni al variare delle pendenze della valle sulla quale i serbatoi insistono. In particolare il range di pendenze indagato è stato fatto variare tra la minima e la massima pendenza media dei tratti a valle dei serbatoi sotto osservazione (si veda successivo paragrafo). L'apertura della breccia è il processo fisico che ha dato maggiori problemi durante la simulazione. Infatti, tale fenomeno non può essere direttamente incluso nel modello ma deve essere implementato per steps successivi. In Tabella 2 si riportano le principali prove effettuate per i due serbatoi.

Le portate derivate dal modello numerico e le onde di propagazione

Risulta innanzitutto interessante paragonare le portate massime in uscita dalla diga ottenute con il modello numerico e quelle stimate dalle formule empiriche di letteratura. In Tabella 3 vengono riportate le portate ricavate dalle formule più comunemente utilizzate che sono state descritte in precedenza e le portate derivate da BREZO. Si sottolinea che le portate in uscita dai due serbatoi simulati non variano sostanzialmente al variare delle condizioni di valle. La grande variazione è invece dovuta alle condizioni di apertura della breccia.
Si può notare come la dispersione dei dati ottenuti sia molto ampia. In particolare, tutte le formulazioni che non tengono conto del volume del serbatoio tendono a sovrastimare in modo sistematico le portate. Ciò è dovuto al fatto che tali formule sono comunemente ricavate per invasi molto grandi, le cui brecce sono solitamente, in caso di collasso, completamente sviluppate. Tra le formule che includono sia il volume che l'altezza, quelle che

concerné surtout deux retenues fictives aux caractéristiques "moyennes" en termes de volume (5000 m^3) et de hauteur (respectivement 5 et 7 m). Ces deux retenues, comme on peut le voir dans la Figure 1 (cercles rouges), sont placés dans la zone des barrages avec brèche totalement développée (5 m) et triangulaire (7 m). Sur ces deux retenues on a effectué plusieurs simulations en variant l'inclinaison de la vallée sur laquelle s'appuient les réservoirs. En particulier, on a varié l'inclinaison entre les pentes moyennes minimale et maximale des sections en aval des réservoirs analysés (voir paragraphe suivant). L'ouverture de la brèche est le processus physique qui a donné le plus de problèmes lors de la simulation. En effet, ce phénomène ne peut pas être directement inclus dans le modèle, mais doit être mis en œuvre par étapes successives. Dans le Tableau 2, on montre les principales simulations effectuées pour les deux réservoirs.

Les débits dérivés du modèle numérique et les ondes de propagation

Il est surtout intéressant de comparer les débits maximaux en sortie du barrage obtenus avec le modèle numérique et les débits estimés suivant les formules empiriques de la littérature. Dans le Tableau 3, on présente les débits obtenus à partir des formules précédemment décrites et les plus couramment utilisées, ainsi que les débits provenant de BREZO. On souligne que les débits en sortie des deux réservoirs simulés ne varient pas en fonction des conditions en aval. Au contraire, le principal changement est dû aux conditions d'ouverture de la brèche.
On remarque que la dispersion des données obtenues est très vaste. En particulier, toutes les formulations qui ne prennent pas en compte le volume du réservoir ont tendance à surestimer systématiquement les débits. Cela est dû au fait que ces formules sont

si avvicinano di più sono quelle di Froehlich e di Pierce. Nondimeno, entrambe si discostano ampiamente dalle portate simulate, la prima in eccesso e la seconda in difetto. Altri invasi, al variare delle caratteristiche del serbatoio verranno simulati in future ricerche, al fine di migliorare il database utilizzabile per il confronto.

La propagazione delle onde di piena

Un secondo aspetto da valutare al fine di stimare l'intensità dell'evento di collasso a valle degli invasi è l'attenuazione dell'onda di piena dovuta alla propagazione e alla diffusione dell'onda stessa. In Figura 3 si può osservare l'andamento dei massimi degli idrogrammi di piena, al variare della distanza dall'invaso, delle onde dovute al collasso istantaneo e di quelle dovute al collasso graduale per lo sbarramento di 7 m. Il collasso istantaneo è riportato solo per confronto; l'unico fenomeno utile per il calcolo dell'intensità della piena è quello relativo al collasso graduale.

TABELLA 2
Alcune delle simulazioni numeriche effettuate.

TABLEAU 2
Quelques exemples des simulations effectuées.

Step apertura / Étapes d'ouverture	C[m]	L [m]	H [m]	i_f [%]	t_{step} [s]
6	30	34	5	1	47.56
6	30	34	5	5.22	47.56
6	30	34	5	10	47.56
6	30	34	5	17	47.56
6	30	34	5	23	47.56
6	30	34	5	28	47.56
6	30	34	5	50	47.56
6	30	34	5	73	47.56
1 (Istantanea / Instantané)	30	34	5	5.22	0
7	30	23.81	7	1	29.12
7	30	23.81	7	5.22	29.12
7	30	23.81	7	10	29.12
7	30	23.81	7	17	29.12
7	30	23.81	7	23	29.12
7	30	23.81	7	28	29.12
7	30	23.81	7	50	29.12
7	30	23.81	7	73	29.12
1 (Istantanea / Instantané)	30	23.81	7	5.22	0
9	30	34	5	5.22	29.12
5	30	55.5	3	5.22	

couramment obtenues pour de très grandes retenues dont les brèches sont généralement, en cas d'effondrement, totalement développées. Parmi les formules qui comprennent le volume et la hauteur, ce sont celles de Froehlich et Pierce qui se rapprochent le plus. Néanmoins, toutes les deux sont très différentes des débits simulés, la première par excès et la seconde par défaut. D'autres barrages seront simulés en variant les caractéristiques du réservoir afin d'améliorer la base de données utilisable pour la comparaison.

La propagation des ondes de crue

Un autre aspect à évaluer afin d'estimer l'intensité en aval des barrages est l'atténuation de l'onde de crue due à la propagation et à la diffusion de l'onde elle-même. Pour mener à bien cette évaluation on observe dans la Figure 3 l'évolution des maxima des hydrogrammes de crue, suivant la variation de la distance de la retenue, des ondes dues à l'effondrement instantané et des ondes dues à l'effondrement progressif pour le

Osservando la Figura 3, si può notare come i massimi delle portate a valle dell'invaso abbiano andamenti molto differenti tra quelli del caso del collasso istantaneo e quelli del collasso graduale. In particolare l'attenuazione dei colmi nel caso del collasso istantaneo è estremamente più marcata se confrontata con quello del collasso graduale. Ciò è certamente dovuto al fatto che l'onda di collasso a seguito di un cedimento graduale presenta delle derivate seconde $\left(\text{i.e. } \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2}\right)$, responsabili della laminazione del colmo di piena, molto più piccole rispetto al collasso istantaneo.
Ciò comporta che l'onda derivante dal collasso graduale non si attenua propagandosi verso valle. Inoltre, le due onde (collasso istantaneo e graduale) dopo poco più di un chilometro (per l'invaso da 7 m e 5.000 m^3 in esame) tendono ad avere la stessa portata massima al colmo. Ciò comporta che, mentre vicino al serbatoio l'intensità dell'evento di collasso graduale è molto inferiore a ciò che sarebbe se il collasso fosse istantaneo, lontano dall'invaso le due situazioni divengono simili.

autore / auteur	formula / formule	H = 5 m, Q_p[m^3/s]	H = 7 m, Q_p[m^3/s]
Kirkpatrick	$Q_p = 1.268(H_w+0.3)^{2.5}$	82.00	182.57
USBR	$Q_p = 19.1(H_w)^{1.85}$	375.08	698.98
Singh & Snorrason	$Q_p = 13.4(H_d)^{1.89}$	280.65	530.08
Singh & Snorrason	$Q_p = 1.776(S)^{0.47}$	97.27	97.27
Evans	$Q_p = 0.72(V_w)^{0.53}$	65.73	65.73
Mac Donald &Langridge-Monopolis	$Q_p = 1.154(V_w H_w)^{0.412}$	74.84	85.97
Costa	$Q_p = 0.763(V_w H_w)^{0.42}$	53.66	61.81
Froehlich	$Q_p = 0.607(V_w^{0.295} H_w^{1.24})$	55.09	83.62
Pierce	$Q_p = 0.784(H)^{2.668}$	57.43	140.94
Pierce	$Q_p = 2.325\ln(H)^{6.405}$	49.00	165.29
Pierce	$Q_p = 0.038(V^{0.475} H^{1.09})$	12.55	18.11
Pierce	$Q_p = 0.1202(L)^{1.7856}$	52.17	52.17
Pierce	$Q_p = 0.012(V^{0.493} H^{1.205} L^{0.226})$	11.99	17.99
Poggi et al. (istantaneo / instantané)	$Q_p = 4C_d H^{5/2}(2g)^{0.5}$	225	488
Brezo rettangolare (istantaneo / instantané)	numerico	216.04	493.82
Brezo Froehlich (istantaneo / instantané)	numerico	70.44	123.15
Brezo Froehlich graduale / Brezo Froehlich graduel	numerico	21	24

TABELLA 3
Le portate alla breccia stimate con le formule empiriche e valutate da modello numerico.

TABLEAU 3
Les débits à la brèche estimés avec les formules empiriques et évalués avec modèle numérique.

barrage de 7 m. L'effondrement instantané n'est représenté que pour la comparaison. Le seul phénomène utile pour le calcul de l'intensité de la crue est celui qui se rapporte à l'effondrement progressif.
En observant la Figure 3, on peut voir que les maxima des débits en aval de la retenue ont des évolutions très différentes entre l'effondrement instantané et l'effondrement progressif. En particulier, l'atténuation des maxima dans le cas de l'effondrement instantané est bien plus prononcée que à celle de l'effondrement progressif. Cela est certainement dû au fait que l'onde d'effondrement qui suit un effondrement progressif a des dérivées secondes $\left(\text{i.e. } \frac{\partial^2 Q}{\partial x^2}\right)$, *responsables du laminage de la crue, beaucoup plus petites que celles de l'effondrement instantané. Cela implique que l'onde résultant de l'effondrement progressif ne diminue pas avec la propagation en aval. En outre, les deux ondes (effondrement instantané et progressif), après un peu plus d'un kilomètre (pour la retenue de 7 m et 5000 m^3) ont tendance à avoir le même débit de crue maximal. Cela signifie que, alors que l'intensité de l'effondrement progressif est beaucoup plus faible*

Riassumendo, nel caso di dighe in calcestruzzo possiamo osservare che:

a. la propagazione dell'onda è il fenomeno principale da indagare poiché l'intensità a valle è fortemente variabile,
b. le condizioni di valle non sono fortemente variabili, essendo tali dighe costruite solitamente in valli strette, e l'onda si propaga quasi monodimensionalmente.

Contrariamente, nel caso di dighe in terra abbiamo che:

c. la propagazione dell'onda non comporta fenomeni di laminazione marcati,
d. i territori a valle delle dighe possono avere le forme più varie e, quasi sempre, non comportano propagazioni monodimensionali.

Tutto ciò premesso, si ritiene opportuno concentrare l'attenzione più sull'orografia del territorio che sul fenomeno di propagazione e laminazione della piena derivante dal collasso dei serbatoi in terra.

Gli invasi analizzati

Al fine di condurre le analisi di vulnerabilità attraverso l'applicazione del metodo speditivo, è fondamentale conoscere con certezza le caratteristiche geometriche degli invasi e del territorio a valle degli stessi. Le prime analisi propedeutiche sono state condotte sulla base delle informazioni GIS messe a disposizione dalla Regione Piemonte.
Nondimeno, alcune delle informazioni necessarie allo svolgimento della ricerca non

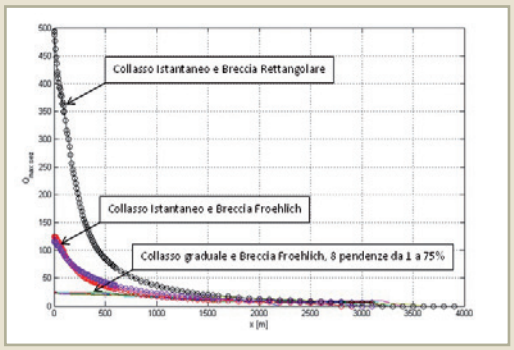


FIGURA 3
L'andamento dei massimi degli idrogrammi di piena al variare della distanza della breccia.

FIGURE 3
La tendance des maxima des hydrogrammes de crue en fonction de la distance de la brèche.

près du barrage par rapport à ce qu'elle serait si l'effondrement était instantané, loin du réservoir les deux situations deviennent semblables.
En résumé, dans le cas des barrages en béton on peut observer que :

a. *la propagation de l'onde est le principal phénomène à étudier car l'intensité en aval est très variable ;*
b. *les conditions de la vallée ne sont pas très variables, car ces barrages sont généralement construits dans des vallées étroites, et l'onde se propage presque de façon unidimensionnelle.*

Au contraire, dans le cas des digues en terre :

c. *la propagation de l'onde ne conduit pas à des phénomènes de laminage marqués ;*
d. *les zones situées en aval des barrages peuvent avoir de nombreuses formes, et, presque toujours, n'impliquent pas de propagations unidimensionnelles.*

Compte tenu de ce qui précède, il est jugé approprié de se concentrer davantage sur l'orographie du territoire que sur le phénomène de propagation et de laminage de la crue découlant de l'effondrement des réservoirs en terre.

Les retenues analysées

Afin de procéder à l'analyse de la vulnérabilité à travers l'application de la méthode simplifiée , il est important de connaître avec certitude les caractéristiques géométriques

sono direttamente reperibili sulla piattaforma GIS. A tal fine si sono ricostruite delle nuove schede propedeutiche alla valutazione della vulnerabilità. Una seconda componente dell'analisi, fondamentale al fine della propagazione dell'onda di collasso, è relativa alle pendenze medie a valle degli sbarramenti. Siccome non è possibile condurre una simulazione per ogni invaso in esame, è necessario estrarre per ognuno di essi le caratteristiche peculiari principali. Per ogni invaso è stata ricercata a valle dello stesso la direzione di flusso dell'onda di piena e, lungo questa, è stata ricercata la pendenza media su tre distanze ritenute peculiari (0-100 m, 100-600 m e 600-1600 m). In Figura 4 sono riportate le distribuzioni di probabilità delle pendenze per le tre soglie. Una distinzione fondamentale sta nell'individuazione della tipologia di territorio a valle dell'invaso, se si tratta cioè di una valle incisa piuttosto che di un versante o di una zona pianeggiante, in quanto l'approccio speditivo al problema cambia radicalmente. Da un esame degli invasi oggetto di studio è emerso un numero pressoché uguale di elementi nelle due categorie.

Caso A: invaso in una valle incisa

Come argomentato nei paragrafi precedenti, in caso di collasso parziale e propagazione dell'onda lungo una valle stretta, i termini diffusivi non rivestono un ruolo preponderante e non si hanno evidenti fenomeni di laminazione dell'onda. Si può dunque appros-

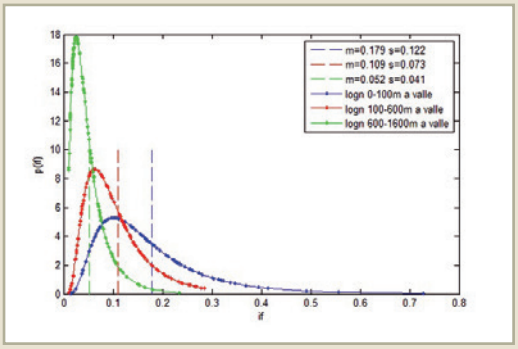


FIGURA 4
La distribuzione di probabilità delle pendenze del territorio a valle degli invasi al variare della distanza dall'invaso stesso.

FIGURE 4
La distribution des probabilités d'inclinaisons de la zone en aval des retenues en fonction de la distance de la retenue elle-même.

des retenues et du territoire en aval de ces dernières. Les premières analyses préliminaires ont été effectuées sur la base des informations SIG fournies par la Région Piémont. Cependant, une partie des informations nécessaires pour mener la recherche ne sont pas directement disponibles sur la plate-forme SIG. Pour cela, on a reconstruit de nouvelles fiches pour l'évaluation de la vulnérabilité. Un second élément de l'analyse, fondamental pour la propagation de l'onde d'effondrement, concerne les pentes moyennes en aval des barrages. Puisqu'il n'est pas possible de procéder à une simulation pour chaque retenue considérée, il est nécessaire d'extraire pour chacune d'elles les principales caractéristiques. Pour chaque retenue on a identifié la direction d'écoulement de l'onde de crue en aval et, en la suivant, on a déterminé l'inclinaison moyenne sur trois distances considérées typiques (0-100 m, 100-600 m et 600-1600 m). La Figure 4 montre la distribution des probabilités d'inclinaisons pour les trois seuils. Il est essentiel d'identifier le type de zone en aval de la retenue, c'est-à-dire s'il s'agit d'une vallée incisée, d'une pente ou d'une plaine car l'approche simplifiée du problème change radicalement. Un examen des retenues étudiées a montré un nombre presque égal d'éléments dans les deux catégories.

Cas A : retenue dans une vallée incisée

Comme il a été argumenté dans les paragraphes précédents, en cas d'effondrement partiel et de propagation de l'onde le long d'une vallée étroite, les termes de diffusion

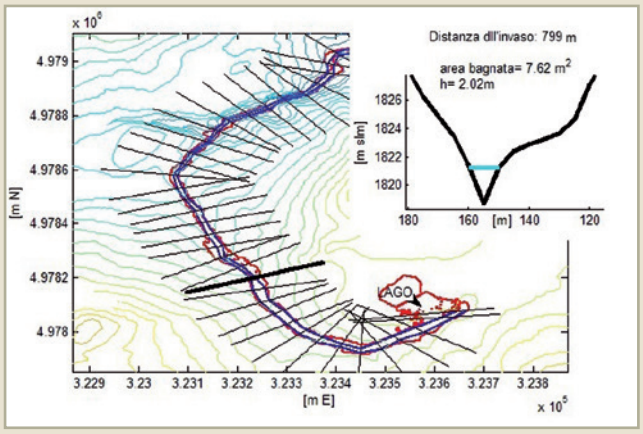
simare la portata in ogni sezione a valle dello sbarramento al valore della portata di picco alla breccia. Il territorio a valle viene descritto estraendo un congruo numero di sezioni ortogonali alla direzione di deflusso da un modello digitale del terreno (DTM). Il valore del tirante in ogni sezione può essere valutato assumendo localmente una condizione di moto uniforme. Risultano dunque note l'area allagata e il valore del parametro vulnerabilità in ciascuna sezione; quest'ultimo viene calcolato secondo l'eq. 3.1a come:

$$vy = \frac{Q}{A}\bar{y} \quad [eq.\,3.1b\,]$$

in cui A è l'area bagnata della sezione, $\bar{y}$ è la profondità media dell'acqua nella sezione e Q è la portata di picco alla breccia. L'indagine si arresta al raggiungimento di una sezione sufficientemente ampia per la dispersione dell'onda (tirante minimo) ovvero in presenza di una serie di sezioni molto incise, come possono essere quelle di un corso d'acqua naturale in grado di contenere il deflusso dell'onda. Questa metodologia è già stata applicata a diversi invasi tra cui quello in località La Coche (cod. TO00201) su cui si stanno confrontando le aree allagate ottenute con il software BREZO e con il software Castor, quest'ultima stimata dai tecnici di Irstea (Figura 5).

FIGURA 5
Invaso TO00201: in rosso l'area allagata (h>0.1m) stimata utilizzando il software BREZO, in blu utilizzando la metodologia speditiva. In nero la traccia delle sezioni utilizzate nel calcolo.

FIGURE 5
Retenue TO00201 : la surface mouillée (h>0,1 m) estimée avec le logiciel BREZO en rouge et selon la méthode expéditive en bleu. En noir, la projection des sections utilisées dans le calcul.



ne jouent pas un rôle de premier plan et on ne constate aucun phénomène évident de laminage de la crue. Le débit dans chaque section en aval du barrage peut donc être proche de la valeur du débit maximal à la brèche. La zone en aval est décrite suivant l'extraction d'un certain nombre de sections orthogonales à la direction de l'écoulement à travers un modèle numérique de terrain (MNT). La valeur de la hauteur d'eau dans chaque section peut être évaluée localement en supposant un écoulement uniforme. On connaît ainsi la zone inondée et la valeur de la vulnérabilité dans chaque section. Celle-ci est calculée suivant l'equation 3.1a comme :

$$vy = \frac{Q}{A}\bar{y} \quad [eq.\,3.1b\,]$$

où A est la surface mouillée de la section, $\bar{y}$ est la profondeur moyenne de l'eau dans la section et Q est le débit maximal à la brèche. L'étude s'arrête lorsqu'on atteint une section suffisamment grande pour la dispersion de l'onde (hauteur d'eau minimale) ou en présence d'une série de sections très incisées, comme peuvent l'être celles d'un cours d'eau naturel capable de contenir l'écoulement de l'onde. Cette méthodologie a déjà été appliquée à plusieurs retenues dont celle de La Coche (TO00201) sur laquelle on est en train d'effectuer des comparaisons entre les zones inondées obtenues avec le logiciel BREZO et le logiciel Castor, cette dernière estimée par les techniciens d'Irstea (Figure 5).

Caso B: invaso su territorio vasto o pianeggiante

A differenza del caso precedente, l'onda non si propaga in modo assimilabile a un flusso monodimensionale, ma si espande con un angolo di apertura variabile, in funzione della pendenza del territorio a valle. Sono state effettuate diverse simulazioni della durata di 4 minuti, facendo propagare l'onda ottenuta considerando l'invaso tipo (volume di 5000 m^3 e altezza 5 m) con un'apertura istantanea della breccia secondo il modello di Frohelich su un piano inclinato di larghezza pari a 5 volte la lunghezza del coronamento, in modo da non costituire limiti alla propagazione in direzione trasversale. L'inclinazione è stata fatta variare dal 2% al 50% (sulla base dell'analisi degli invasi reali).
Si è osservata un'apertura graduale dell'onda sino al raggiungimento di una larghezza massima che rimane costante proseguendo verso valle (Figura 6). Si è condotto un confronto diretto tra i risultati ottenuti utilizzando una portata di picco dell'ordine delle massime portate ottenute applicando la formula di Frohelich agli invasi regionali in oggetto e una dell'ordine della minima (rispettivamente 238 m^3/s e 14 m^3/s). Fissati questi due valori di portata, sono state effettuate simulazioni massimizzando il volume d'invaso ovvero massimizzando l'altezza dello sbarramento; ciò al fine di studiare l'influenza, sull'angolo di apertura dell'onda, delle due tipologie di breccia estreme: forma a trapezio e forma triangolare.

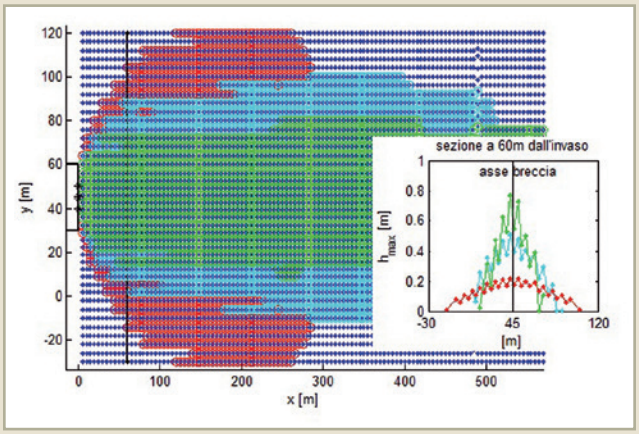


FIGURA 6
Invaso tipo (V = 5000 m^3 e altezza 5 m), variazione dell'apertura del fronte al variare della pendenza di valle: in rosso pendenza 2%, in azzurro pendenza 5%, in verde pendenza 10%, in blu la zona asciutta.

FIGURE 6
Retenue typique (V = 5000 m^3 et hauteur = 5 m), variation de l'ouverture du front en variant l'inclinaison en aval : en rouge pente 2%, en azur pente 5%, en vert pente 10%, en bleu la zone sèche.

Cas B : retenue sur un territoire vaste ou constitué de plaines

Contrairement au cas précédent, l'onde ne se propage pas d'une manière analogue à un écoulement unidimensionnel, mais s'étale suivant un angle d'ouverture variable en fonction de l'inclinaison de la zone située en aval.
On a réalisé plusieurs simulations d'une durée de 4 minutes : l'onde est propagée en considérant la retenue typique (volume de 5 000 m^3 et hauteur de 5 m) avec une ouverture de la brèche instantanée selon le modèle de Frohelich sur un plan incliné d'une largeur égale à 5 fois la longueur du couronnement pour ne pas entraver la propagation dans la direction transversale. On a varié l'inclinaison de 2% à 50% (sur la base de l'analyse des retenues réelles). On a observé une ouverture progressive de l'onde jusqu'à atteindre une largeur maximale qui reste constante en continuant vers l'aval (Figure 6). On a procédé à une comparaison directe entre les résultats obtenus en utilisant un débit de pointe de l'ordre du débit maximal obtenu en appliquant la formule de Frohelich aux retenues régionales analysées et un débit de l'ordre du débit minimal (respectivement 238 m^3/s et 14 m^3/s). Une fois fixé ces deux valeurs de débit, on a effectué les simulations en maximisant le volume de la retenue, c'est-à-dire en maximisant la hauteur du barrage dans le but d'étudier l'influence, sur l'angle d'ouverture de l'onde, des deux types de brèche extrêmes : forme trapézoïdale et forme triangulaire.

Riferimenti bibliografici / *Bibliographie*

D. Poggi, S. Grimaldi, E. Perucca, F. Miotto, M. Pozzallo, A. Cagninei (2009). *"Definizione di una metodologia speditiva per il calcolo del coefficiente di rischio globale per gli sbarramenti di competenza regionale"*. Contratto di ricerca, Regione Piemonte.

L. Begnudelli, B.F. Sanders (2006). *"Unstructured Grid Finite-Volume Algorithm for Shallow Water Flow and Scalar Transport with Wetting and Drying"*. Journal of Hydraulic Engineering (Vol 132, No 4, 371-384).

L. Begnudelli, S. Bradford, B.F. Sanders (2008). *"Adaptive Godunov-Based Model for Flood Simulation."* Journal of Hydraulic Engineering (Vol 134, No 6, 714-724).

US Corps of Engineers (1960). *"Flood resulting from suddenly breached dams"*. Report 1, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi.

G.B. Whitham (1955). *"The effects of Hydraulic Resistance in the Dam-Break Problems"*. Proceeding. Royal Society of London (Vol 227, No 1170, 399-407).

ICOLD Bulletin 111 (1998). *"Dambreak flood analisis-Review and recommendations"*.

DSO (july1998). *"Prediction of Embankment Dam Breach Parameters-A Literature Review and Needs Assessment"*. Water Resources Research Laboratory. DSO-98-004.

D.C. Froehlich (2008). *"Embankment Dam Breach Parameters and Their Uncentainties"*. Journal of Hydraulic Engineering. (134, 1708-1721).

D.M. Gee. *"Comparison of Dam Breach Parameter Estimators"*. Hydrology Engineering Center, US Army Corps of Engineers, Davis, CA.

K.P. Singh, A. Snorrason (1982). *"Sensitivity of outflow peaks and flood stages to the selection of dam breach parameters and simulation models"*. Journal of Hydrology (68, 295-310).

W. Wu (2011). *"Earthen Embankment Breaching"*. Journal of Hydraulic Engineering. (137, 1549-1564).

D.C. Froehlich (1995). *"Peak Outflow from Breached embankment Dam"*. Journal of Water Resources Planning and Managament. (121, 90-97).

F. Macchione, A. Rino (2008). *"Model for Predicting Floods due to Earthen Dam Breanching. II: Comparison with Other Methods and Predictive Use"*. Journal of Hydraulic Engineering. (134, 1697-1707).

L. Li, M.Cargnelutti, C. Mosca (1991). *"Dam-break flood forecasting in Piemonte Region, northwest Italy"*. Water Resources Managament. (5, 261-270).

V.M. Ponce, A. Taher-shamsi, A.V. Shetty (2003). *"Dam-Breach Flood Wave Propagation Using Dimensionless Parameters"*. Journal of Hydraulic Engineering. (129, 777-782).

M.W. Pierce, C.I. Thornton, S.R. Abt (June 2010). *"Predicting Peak Outflow from Breached Embankment Dams"*. National Dam Safety Review Board Streering Committee on Dam Breach Equations.

Onda di rottura della diga: trasporto solido e potenziali colate detritiche

Gli invasi montani d'alta quota sovrastano generalmente versanti a forte pendenza. In caso di cedimento dell'opera, è possibile che vengano liberati in breve tempo grandi volumi d'acqua, dando luogo a deflussi liquidi transitori e con notevoli picchi di portata.
Tali flussi, che si verificano su un versante o in un canale già esistente, possono caricarsi di abbondante materiale solido per erosione. Ne conseguono fenomeni di propagazione con proprietà specifiche non assimilabili a scorrimenti puramente liquidi. Tali fenomeni, di natura torrentizia, sono di due tipi: trasporto solido di fondo e colate detritiche.
Il trasporto solido di fondo torrentizio assomiglia, quanto a meccanismi fisici, al trasporto di sedimenti nei fiumi ma con concentrazioni molto più elevate e con conseguenze ben più violente in termini di cambiamenti morfologici (depositi che riducono la sezione idraulica disponibile e aumentano il rischio di esondazione, erosione del fondo alveo o delle sponde che possono destabilizzare gli edifici e le infrastrutture situate in prossimità del canale) e di rischi connessi.
In condizioni di grande disponibilità di materiale erodibile e di versante a forte pendenza, rimane alta la probabilità che si formi una colata detritica (flusso estremamente

L'onde de rupture d'un barrage : transport solide et potentielles laves torrentielles

Les retenues d'altitude surplombent généralement des versants montagneux à forte pente. En cas de rupture de l'ouvrage, des volumes d'eau importants sont susceptibles d'être libérés rapidement, donnant naissance à des écoulements liquides très transitoires et présentant de fort débit de pointe. De tels écoulements, qu'ils se produisent sur un versant ou dans un chenal existant, sont susceptibles de se charger très fortement en matériau solide par érosion. Il en résulte des phénomènes de propagation aux propriétés spécifiques qui ne peuvent être assimilés à des écoulements purement liquides. Ces phénomènes, de nature torrentielle, sont de deux types : le charriage torrentiel et les laves torrentielles.
Le charriage torrentiel s'apparente, en termes de mécanismes physiques, au transport de sédiment en rivière mais avec des concentrations bien supérieures et des conséquences bien plus violentes en termes de changements morphologiques (engravements qui réduisent la section hydraulique disponible et aggravent le risque de débordement, incision du lit ou des berges qui peuvent déstabiliser les bâtiments et infrastructures situés à proximité du chenal) et de risques associés.
Dans certaines conditions de forte disponibilité en matériau érodable et de pente forte, la

concentrato di una miscela di acqua e materiale solido altresì denominato "*debris flow*"), fenomeno di cui tenere conto poiché il suo potere distruttivo è estremamente elevato. Tale fenomeno può essere affrontato solo con l'ausilio di metodologie e tools specifici.

Studio dell'onda di rottura di un invaso

Sulla problematica dell'onda di rottura, un obiettivo primario dell'*Azione 3.2* del progetto RISBA era di sviluppare un modello sia per il calcolo idraulico della propagazione dell'onda sia per il calcolo del trasporto solido correlato, compresi i cambiamenti morfologici (deposito, erosione) dovuti a quest'ultimo. Si tratta di un modello monodimensionale nel quale il canale viene fotografato geometricamente nell'istante iniziale, sotto forma di tratti sui quali si raccolgono informazioni relative alla lunghezza, alla pendenza e alle sezioni trasversali a monte e a valle. Questo canale costituito da diversi tronchi viene poi discretizzato in griglie di calcolo, sulle quali poggerano gli schemi di risoluzione numerica della propagazione idraulica da una parte e del trasporto solido dall'altra.
Per elaborare i dati della propagazione dell'onda di rottura utilizziamo le equazioni di Saint-Venant, scritte in forma conservativa. Il vantaggio principale di questo approccio è di verificare la relazione di Rankine-Hugoniot (relazione di bilancio fra il tratto a monte e quello a valle di una discontinuità come un dislivello per una corrente a superficie libera). In combinazione con uno schema numerico adeguato, a sua volta qualificato come conservativo, questa formulazione permette di costruire un modello numerico in grado di affrontare una discontinuità (come ad esempio un fronte), come un qualsiasi punto di corrente di deflusso e di determinarne la posizione in ogni momento. Tale tecnica consente di gestire completamente qualsiasi flusso transitorio avente un fronte di pro-

formation d'une lave torrentielle (écoulement extrêmement concentré d'un mélange d'eau et de matériau solide aussi appelé « coulée de boue ») reste un phénomène plausible qu'il convient de considérer car son pouvoir destructeur est extrêmement important. Un tel phénomène ne peut être abordé qu'à l'aide d'outils et de méthodes tout-à-fait spécifiques.

Étude de l'onde de rupture d'une retenue

*Sur cette problématique de l'onde de rupture, un premier objectif de l'*Action 3.2 *du projet RISBA était de développer un modèle permettant à la fois le calcul hydraulique de la propagation de l'onde et le calcul du transport solide associé en incluant les modifications morphologiques (engravement, incision) dues à ce dernier. Il s'agit d'un modèle monodimensionnel pour lequel le chenal est saisi géométriquement à l'instant initial sous forme de biefs dont on renseigne la longueur, la pente et les sections en travers amont et aval. Ce chenal constitué de plusieurs biefs est ensuite discrétisé en mailles de calcul sur lesquelles vont s'appuyer les schémas de résolution numérique de la propagation hydraulique d'une part et du transport solide d'autre part.*
Pour traiter la propagation de l'onde de rupture, nous utilisons les équations de Saint-Venant, écrites sous forme conservative. L'avantage essentiel de cette forme est de vérifier la relation de Rankine-Hugoniot (relation de bilan entre l'amont et l'aval d'une discontinuité telle qu'un ressaut pour un écoulement à surface libre). Associée à un schéma numérique approprié, lui-même qualifié de conservatif, cette formulation permet de construire un modèle numérique capable de traiter une discontinuité, telle qu'un front, comme n'importe quel point courant d'écoulement et d'en déterminer la position à chaque instant. Une telle technique permet un traitement global de tout

pagazione con un grado di complessità e delle tempistiche di calcolo ragionevoli. Come ogni formulazione di tipo Saint-Venant, il sistema di equazioni è completo solo dopo l'adozione di un'equazione di chiusura che definisce la tensione tangenziale al fondo in funzione delle variabili principali, che in questo caso sono la sezione trasversale e la portata di deflusso. Noi abbiamo adottato una formulazione classica di tipo Manning-Strickler. Le equazioni di Saint-Venant a forte pendenza da noi utilizzate (Berger, 1994) sono espresse come segue:

$$\frac{\partial}{\partial t}\begin{pmatrix} S \\ Q \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial x}\begin{pmatrix} Q \\ \delta \frac{Q^2}{S} + P(S,x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ gS\sin(\theta) - \frac{\tau_p}{\rho} P_e \end{pmatrix}$$

dove S indica la sezione trasversale di deflusso, Q la portata, θ l'angolo di pendenza, g la gravità, ρ la massa specifica dell'acqua, P_e il perimetro bagnato, τ_p la tensione tangenziale al fondo, h l'altezza del flusso e L la sua larghezza. La pressione è definita da:

$$P(S,x) = \int_0^h g(h-y)\cos(\theta)L(y,x)dy$$

La loro risoluzione viene effettuata utilizzando uno schema numerico ai volumi finiti implicito di tipo Muscl-Hancock (Leveque, 2002). La legge di Manning-Strickler, che permette il calcolo della tensione al fondo, è espressa come segue:

écoulement transitoire présentant un front de propagation avec un degré de complexité et des temps de calcul raisonnables. Comme toute formulation de type Saint-Venant, le système d'équations n'est complet qu'après l'adoption d'une équation de fermeture traduisant la contrainte de cisaillement au fond en fonction des variables principales, qui dans ce cas sont la section en travers et le débit d'écoulement. Nous avons adopté une formulation classique de type Manning-Strickler. Les équations de Saint-Venant à forte pente (Berger 1994) que nous utilisons s'expriment de la façon suivante :

$$\frac{\partial}{\partial t}\begin{pmatrix} S \\ Q \end{pmatrix} + \frac{\partial}{\partial x}\begin{pmatrix} Q \\ \delta \frac{Q^2}{S} + P(S,x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ gS\sin(\theta) - \frac{\tau_p}{\rho} P_e \end{pmatrix}$$

où S *est la section d'écoulement,* Q *le débit,* θ *l'angle de la pente,* g *la gravité,* ρ *la masse volumique de l'eau,* P_e *la périmètre mouillé,* τ_p *la contrainte de cisaillement au fond,* h *l'épaisseur d'écoulement et* L *sa largeur. La pression est définie par :*

$$P(S,x) = \int_0^h g(h-y)\cos(\theta)L(y,x)dy$$

Leur résolution est effectuée en utilisant un schéma numérique aux volumes finis implicite de type Muscl-Hancock (Leveque, 2002). La loi de Manning-Strickler permettant le calcul de la contrainte au fond s'exprime de la façon suivante :

$$\tau_p = \frac{\rho g U^2}{K^2 R_H^{1/3}}$$

dove U indica la velocità di scorrimento ($U = Q/S$), R_H è il raggio idraulico e K è un coefficiente di dissipazione che dipende dalla scabrezza di superficie.
Il coefficiente di attrito K collegato a questa legge fa parte dei dati di input del modello. Il suo valore è preso costante per tronco. Viene applicato un idrogramma (portata liquida in relazione al tempo) come condizione al limite di monte.
Per il trasporto solido vengono risolte due equazioni. La prima è un bilancio di massa. Si tratta dell'equazione di Exner che permette di calcolare l'evoluzione del livello del fondo alveo in ogni punto del canale in funzione della portata solida che transita da monte e di quella che transita verso valle. Quest'equazione ipotizza un adattamento istantaneo del livello del fondo (per erosione o deposito) alle condizioni del trasporto solido. L'equazione di Exner è data da:

$$(1-p)\frac{\partial z_s}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0$$

dove z_s indica la quota del fondo alveo, p è la porosità dei sedimenti del fondo e q_s è la portata solida per unità di larghezza dell'alveo.
La seconda equazione riguarda la portata solida in un determinato punto, calcolata mediante quattro formule a scelta che afferiscono alla portata liquida, alla pendenza ed eventualmente alla granulometria. Queste quattro formule sono:

$$\tau_p = \frac{\rho g U^2}{K^2 R_H^{1/3}}$$

où U est la vitesse d'écoulement (U = Q/S), R_H est le rayon hydraulique et K est un coefficient de dissipation dépendant de la rugosité de surface.
Le coefficient de frottement K associé à cette loi fait partie des données d'entrée du modèle. Sa valeur est prise constante par bief. Un hydrogramme (débit liquide en fonction du temps) est imposé comme condition à la limite amont.
Pour le transport solide, deux équations sont résolues. La première est un bilan de masse. Il s'agit de l'équation d'Exner qui permet un calcul de l'évolution du niveau du fond en chaque point du chenal et cela en fonction du débit solide transitant depuis l'amont et du débit solide transitant vers l'aval. Cette équation fait l'hypothèse d'un ajustement instantané du niveau du fond (par érosion ou engravement) aux conditions du transport solide. L'équation d'Exner est donnée par :

$$(1-p)\frac{\partial z_s}{\partial t} + \frac{\partial q_s}{\partial x} = 0$$

où z_s *est l'altitude du fond,* p *est la porosité du matériau du fond et* q_s *est le débit solide par unité de largeur du lit.*
La deuxième équation concerne le débit solide en un point donné. Il est calculé par l'intermédiaire de quatre formules au choix qui font intervenir le débit liquide, la pente et éventuellement la granulométrie. Ces quatre formules sont :

La formula di *Rickenmann* (1990)

La portata solida per unità di larghezza è data da:

$$q_s = 12{,}6 \cdot \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0{,}2} \cdot \frac{I^2}{(s-1)^{1{,}6}} \cdot (q - q_{cr})$$

La portata liquida (per unità di larghezza) limite di trasporto è espressa da:

$$q_{cr} = 0{,}065 \cdot (s-1)^{1{,}67} \cdot \sqrt{g} \cdot {d_{50}}^{1{,}5} \cdot I^{-1{,}12}$$

dove s indica il rapporto tra la massa specifica del sedimento e la massa specifica dell'acqua, q è la portata liquida per unità di larghezza, I è la pendenza (m/m) del canale, d_{90}, d_{50} e d_{30} sono parametri rappresentativi della granulometria della superficie di fondo alveo.

La formula di *Meunier* (1991)

La portata solida totale Q_s è calcolata come:

$$\frac{Q_s}{Q} = 6{,}3\, I^2$$

dove Q è la portata liquida totale e I la pendenza.

La formule de Rickenmann *(1990)*

Le débit solide par unité de largeur est donné par :

$$q_s = 12{,}6 \cdot \left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0{,}2} \cdot \frac{I^2}{(s-1)^{1{,}6}} \cdot (q - q_{cr})$$

Le débit liquide (par unité de largeur) critique de début de transport est donné par :

$$q_{cr} = 0{,}065 \cdot (s-1)^{1{,}67} \cdot \sqrt{g} \cdot {d_{50}}^{1{,}5} \cdot I^{-1{,}12}$$

où s *est le rapport de la masse volumique du sédiment à la masse volumique de l'eau,* q *est le débit liquide par unité de largeur,* I *est la pente (m/m) du chenal,* d_{90}, d_{50} *et* d_{30} *sont des paramètres représentatifs de la granulométrie de surface du lit.*

La formule de Meunier *(1991)*

Le débit solide total Q_s *est donné par :*

$$\frac{Q_s}{Q} = 6{,}3\, I^2$$

où Q *est le débit liquide total et* I *la pente.*

La formula di *Lefort* (1991)

La portata solida totale Q_s (correlata al volume apparente delle erosioni e dei depositi generati) è data da:

$$\frac{Q_s}{Q} = 4{,}45\left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0,2}\frac{I^{1,5}}{s-1}\left(1-\left(\frac{Q_0}{Q}\right)^{0,375}\right)$$

La portata liquida limite di trasporto è espressa come:

$$Q_0 = 0{,}0776\cdot(s-1)^{8/3}\cdot\sqrt{g}\cdot d_m{}^{2,5}\cdot I^{-13/6}\cdot(1-1{,}2\cdot I)^{8/3}$$

dove s indica il rapporto tra la massa specifica del sedimento e la massa specifica dell'acqua, Q è la portata liquida, I è la pendenza (m/m) del canale, d_{90}, d_m e d_{30} sono parametri rappresentativi della granulometria della superficie di fondo alveo. Quest'equazione presuppone una larghezza di zona attiva (larghezza condizionata dal trasporto solido) soggetta alle condizioni idrauliche. Inoltre fornisce un calcolo diretto dei volumi d'erosione e di deposito, ipotizzando un valore fisso di porosità integrato alla formula (la porosità p nell'equazione di Exner deve allora essere presa uguale a 0).

La formule de Lefort *(1991)*

Le débit solide total Q_s (relié au volume apparent des dépôts et érosions générés) est donné par :

$$\frac{Q_s}{Q} = 4{,}45\left(\frac{d_{90}}{d_{30}}\right)^{0,2}\frac{I^{1,5}}{s-1}\left(1-\left(\frac{Q_0}{Q}\right)^{0,375}\right)$$

Le débit liquide critique de début de transport est donné par :

$$Q_0 = 0{,}0776\cdot(s-1)^{8/3}\cdot\sqrt{g}\cdot d_m{}^{2,5}\cdot I^{-13/6}\cdot(1-1{,}2\cdot I)^{8/3}$$

où s *est le rapport de la masse volumique du sédiment à la masse volumique de l'eau, Q est le débit liquide, I est la pente (m/m) du chenal,* d_{90}, d_m *et* d_{30} *sont des paramètres représentatifs de la granulométrie de surface du lit. Cette formule fait l'hypothèse d'une largeur de bande active (largeur affectée par le transport solide) dépendante des conditions hydrauliques. De plus, elle donne un calcul direct des volumes d'érosion et de dépôt en faisant l'hypothèse d'une valeur fixée de porosité intégrée à la formule (la porosité* p *dans l'équation d'Exner doit alors être prise égale à 0).*

La formula di *Recking* (2013)

La portata solida per unità di larghezza è data da:

$$q_s = \sqrt{g(s-1)d_{84}^3}\Phi$$

con:

$$\Phi = \frac{14\tau_{84}^{*2,5}}{\left[1+\left(\tau_m^*/\tau_{84}^*\right)^4\right]} \qquad \tau_{84}^* = \frac{R_H I}{(s-1)d_{84}}$$

e:

$$\tau_m^* = (5I+0{,}06)\left(\frac{d_{84}}{d_{50}}\right)^{4{,}4\sqrt{I}-1{,}5}$$

dove s indica il rapporto tra la massa specifica del sedimento e la massa specifica dell'acqua, R_H è il raggio idraulico, I è la pendenza (m/m) del canale, d_{84} e d_{50} sono parametri rappresentativi della granulometria di superficie dell'alveo.
Il sistema di equazioni alla base del trasporto solido è risolto secondo uno schema implicito alle differenze finite, che si poggia sulle stesse griglie di calcolo della risoluzione idraulica. Le condizioni ai limiti utilizzate sono da una parte un punto fisso a valle del

La formule de Recking *(2013)*

Le débit solide par unité de largeur est donné par :

$$q_s = \sqrt{g(s-1)d_{84}^3}\Phi$$

avec :

$$\Phi = \frac{14\tau_{84}^{*2,5}}{\left[1+\left(\tau_m^*/\tau_{84}^*\right)^4\right]} \qquad \tau_{84}^* = \frac{R_H I}{(s-1)d_{84}}$$

et :

$$\tau_m^* = (5I+0{,}06)\left(\frac{d_{84}}{d_{50}}\right)^{4{,}4\sqrt{I}-1{,}5}$$

où s *est le rapport de la masse volumique du sédiment à la masse volumique de l'eau,* R_H *est le rayon hydraulique, I est la pente (m/m) du chenal,* d_{84} *et* d_{50} *sont des paramètres représentatifs de la granulométrie de surface du lit.*
Le système d'équations régissant le transport solide est résolu selon un schéma implicite aux différences finies s'appuyant sur le même maillage de calcul que la résolution hydraulique. Les conditions aux limites utilisées sont d'une part un point fixe à l'aval du domaine de calcul et d'autre part un sédimentogramme (débit solide en fonction du

dominio computazionale e dall'altra un sedimentogramma (portata solida in funzione del tempo) a monte del dominio. Quest'ultimo può essere impostato in condizioni di equilibrio con la portata liquida a monte.
I risultati di calcolo vengono archiviati sotto forma di file per permettere ulteriori visualizzazioni delle principali variabili idrauliche (velocità, altezza del flusso) o del trasporto solido (livello del fondo, portata solida, pendenza locale). Una consultazione agevole di questi risultati è possibile grazie all'interfaccia di cui dispone il codice di calcolo, che permette anche di attingere dati d'inserimento del modello (profili longitudinali e trasversali, granulometria, portate entranti, ecc.). In quest'interfaccia, i risultati possono essere visualizzati sotto forma di profili in un determinato momento (Figura 1) oppure sotto forma di evoluzione temporale in un determinato punto del profilo longitudinale.

Collaborazioni RISBA

Dopo lo stadio di sviluppo del modello, lo strumento torna in fase di test per convalidarne la conformità di utilizzo sul campo. In un primo momento sarà sottoposto a un'applicazione su un caso di studio che è stato peraltro analizzato dai tecnici della Regione Piemonte con l'ausilio del Politecnico di Torino. Successivamente il modello con la sua interfaccia sarà trasferito presso il Politecnico di Torino, in una apposita «ricerca» che

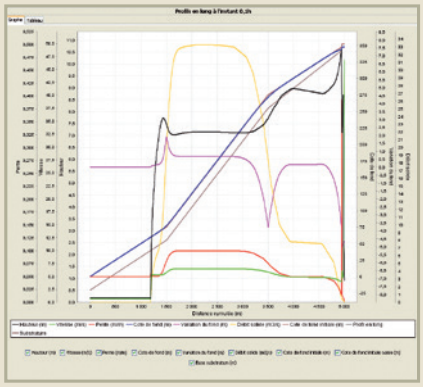


FIGURA 1
Presentazione dei risultati sotto forma di profili nell'interfaccia del modello.

FIGURE 1
Écran d'affichage des résultats sous forme de profils dans l'interface du modèle.

temps) à l'amont du domaine. Ce dernier peut être fixé en conditions d'équilibre avec le débit liquide amont.
Les résultats de calcul sont stockés sous forme de fichiers permettant ultérieurement une visualisation des principales variables hydrauliques (vitesse, épaisseur d'écoulement) ou du transport solide (niveau du fond, débit solide, pente locale). Une visualisation aisée de ces résultats est possible grâce à l'interface dont dispose le code de calcul et qui permet également la saisie des données d'entrée du modèle (profils en long et en travers, granulométrie, débits d'entrée, etc.). Dans cette interface, les résultats peuvent être affichés soit sous forme de profils à un instant donné (Figure 1), soit sous forme d'évolution temporelle en un point donné du profil en long.

Collaborations RISBA

Après la phase de développement du modèle, l'outil rentre en phase de test afin de valider la pertinence de son utilisation au terrain. Il va ainsi dans un premier temps faire l'objet d'une application sur un cas d'étude qui a par ailleurs été étudié par les équipes de la Région Piémont avec l'appui de Polytechnique de Turin. Dans un deuxième temps, le modèle avec son interface va être transféré dans une logique « recherche »,

punta a testare le sue capacità. Verrà stabilito un accordo di trasferimento e di collaborazione con questo partner.
Inoltre, entro il termine del progetto, il modello verrà utilizzato per simulare la propagazione dell'onda di rottura dell'invaso di località La Coche nel comune di Cesana Torinese (Regione Piemonte) tenendo conto del trasporto di materiale solido. I dati alla base di questa simulazione sono stati trasmessi a Irstea dai partner italiani del progetto RISBA. Poiché quest'invaso è stato sottoposto a una modellizzazione effettuata dalla Regione Piemonte, verrà realizzato un confronto tra i risultati dei diversi modelli.

Considerazioni e sviluppi

Il progetto RISBA ha permesso di costruire una prima versione del modello di calcolo dell'onda di rottura tenendo conto del trasporto di materiale solido. Tuttavia questa prima versione sarà sottoposta a un lavoro di convalida prima di poter essere considerata uno strumento operativo utilizzabile dai tecnici professionisti. Rileviamo inoltre che le leggi sul trasporto di materiale solido implementate nel modello sono state tutte stabilite in regime permanente. Peraltro la bibliografia scientifica sul trasporto solido derivante da un deflusso transitorio rimane al momento molto carente. Due strade si delineano quindi in termini di sviluppi futuri: la prima è quella di concentrare lo studio in particolare sul trasporto di materiale solido a livello di un fronte di scorrimento transitorio. Per affrontare questo problema è preferibile affidarsi a un metodo di laboratorio. La seconda riguarda la convalida del modello in generale. Pertanto si effettuerà un primo confronto con dati sperimentali di laboratorio e in seguito un confronto sul campo in siti dotati di sufficiente strumentazione.

visant à tester ses capacités, à Polytechnique de Turin. Une convention de transfert et de partenariat sera établie avec ce partenaire.
Par ailleurs, d'ici à la fin du projet, le modèle sera utilisé pour simuler la propagation de l'onde de rupture de la retenue de La Coche sur la commune de Cesana Torinese (Région Piémont) avec prise en compte du transport solide. Les données permettant cette simulation ont été transmises à Irstea par les partenaires italiens du projet RISBA. Cette retenue ayant fait l'objet d'une modélisation par la Région Piémont, une confrontation entre les résultats des différents modèles sera réalisée.

Perspectives

Le projet RISBA a permis de construire une première version du modèle de calcul de l'onde de rupture avec prise en compte du transport solide. Toutefois, cette première version devra faire l'objet d'un travail de validation avant qu'il puisse être considéré comme un outil opérationnel utilisable par les praticiens de terrain. On notera également que les lois de transport solide implémentées dans le modèle ont toutes été établies en régime permanent. Par ailleurs, la bibliographie scientifique sur le transport solide résultant d'un écoulement transitoire demeure à ce jour très pauvre. Deux axes se dégagent donc en termes de pistes futures d'investigation. Une première voie consistera à étudier tout particulièrement le transport solide au niveau d'un front d'écoulement transitoire. Une approche de laboratoire est privilégiée pour aborder ce problème. La deuxième voie concerne la validation du modèle de façon générale. Sur ce point, nous envisageons une première approche par confrontation à des expériences de laboratoire, puis une confrontation au terrain sur des sites suffisamment instrumentés.

Predisposizione alla formazione di colate detritiche

Il secondo obiettivo del progetto RISBA rispetto all'onda di rottura, affrontato nell'*Azione 3.2*, è di valutare la predisposizione alla formazione di colate detritiche. Si noti da una parte che il picco di portata di un dam-break può essere di gran lunga superiore alla portata idrologica del bacino imbrifero in cui quest'ultimo è localizzato. L'intensità dei fenomeni erosivi può essere molto superiore a quella generalmente osservata e potenzialmente può portare alla formazione di colate detritiche, anche nei bacini imbriferi in cui questo fenomeno non è stato storicamente riscontrato. D'altra parte la formazione di una colata detritica a partire da un determinato volume d'acqua modifica radicalmente la natura del deflusso, che può avere un volume molto superiore a quello dell'acqua che l'ha generato (Schuster, 2000). Le sue proprietà meccaniche sono quelle di un miscuglio fangoso molto concentrato di granulometria estesa, che può includere blocchi di dimensione metrica, conferendo loro un'elevata capacità distruttiva. In compenso l'influsso spaziale di una colata detritica rimane più limitato rispetto a un deflusso liquido. Infine, la valutazione dei rischi relativi a una colata detritica richiede strumenti e metodologie specifici per questo fenomeno. È quindi necessario determinare in quali casi farvi ricorso. Ogni sito presenta le sue peculiarità, pertanto la metodologia proposta rimane previsionale. I tools presentati possono essere considerati attualmente soltanto come un supporto alle scelte tecniche dell'esperto che dovrà valutare la predisposizione alla formazione di colata detritica a valle di un invaso in caso di rottura. Viene presentata quindi nel seguito una serie di criteri che, allo stato attuale delle conoscenze, appaiono i più appropriati. Questi criteri sono stati stabiliti grazie alla bibliografia esistente e ai recenti lavori riguardanti la predisposizione alla formazione di colate detritiche di origine idrologica.

Susceptibilité à la formation de laves torrentielles

Un second objectif du projet RISBA en relation avec l'onde de rupture est l'évaluation de la susceptibilité à la formation de laves torrentielles (cf. Action 3.2*). On notera d'une part que le débit de pointe d'une rupture de barrage peut être très supérieur au débit hydrologique du bassin versant dans lequel est implanté ce dernier. L'intensité des phénomènes érosifs peut donc être bien supérieure à celle généralement observée et peut potentiellement mener à la formation de laves torrentielles y compris dans des bassins versants où ce phénomène n'a pas été observé historiquement. D'autre part, la formation d'une lave torrentielle à partir d'un volume d'eau donné modifie radicalement la nature de l'écoulement. Ce dernier peut avoir un volume bien supérieur au volume d'eau qui l'a généré (Schuster, 2000). Ses propriétés mécaniques sont celles d'un mélange boueux très concentré de granulométrie étendue pouvant inclure des blocs de taille métrique ce qui lui confère une très grande capacité destructrice. En revanche, l'emprise spatiale d'une lave torrentielle reste plus limitée que celle d'un écoulement liquide. Enfin dernier point, l'évaluation des risques inhérents à une lave torrentielle nécessite des outils et méthodes spécifiques à ce phénomène. Il s'agit donc de déterminer dans quels cas on doit y faire appel.*

Chaque site présente des particularités et la méthodologie proposée reste prospective. Les outils présentés ne peuvent être considérés en l'état que comme une aide à la formalisation du raisonnement de l'expert qui sera amené à évaluer la susceptibilité à la formation de lave torrentielle en aval d'une retenue dans l'hypothèse d'une rupture. On présente donc ci-après une série de critères qui, en l'état actuel des connaissances, apparaissent comme les plus pertinents. Ces critères ont été établis en capitalisant sur la bibliographie existante et sur des travaux récents concernant la susceptibilité à la formation de laves

Il principale apporto dell'*Azione 3.2* del progetto RISBA è stato quello di identificare tecnicamente i principali fattori di rischio d'innesco e di propagazione di colate detritiche correlate alla rottura di sbarramenti montani e di ordinarli gerarchicamente sotto forma di sintesi. Inoltre si è voluto proporre un quadro formale di analisi che permetta una gerarchizzazione dei criteri su ogni sito di studio. Tale ambito corrisponde a quello dell'analisi multicriterio, per la quale abbiamo preso in considerazione il metodo AHP (Analytic Hierarchy Process) che è una tecnica strutturata per organizzare e analizzare una decisione complessa. Consente di combinare un certo numero di criteri di base, per fornire un criterio globale che permetta di prendere una decisione. Una fase d'analisi del problema da trattare porta a stabilire una lista di criteri di base (Figura 2). Tali criteri vengono poi confrontati a coppie (Figura 3) in maniera tecnica e la loro importanza relativa è esplicitata sotto forma di una matrice di preferenze (Figura 4). Sulla base di questa matrice, una normalizzazione consente di dedurre il peso assegnato a ciascun criterio durante l'aggregazione, permettendo il calcolo dell'indicatore sintetico sommando i criteri ponderati (Figura 2).
I criteri di predisposizione di un determinato bacino imbrifero nel produrre colate detritiche di origine idrologica non sono trasferibili alla problematica della formazione in

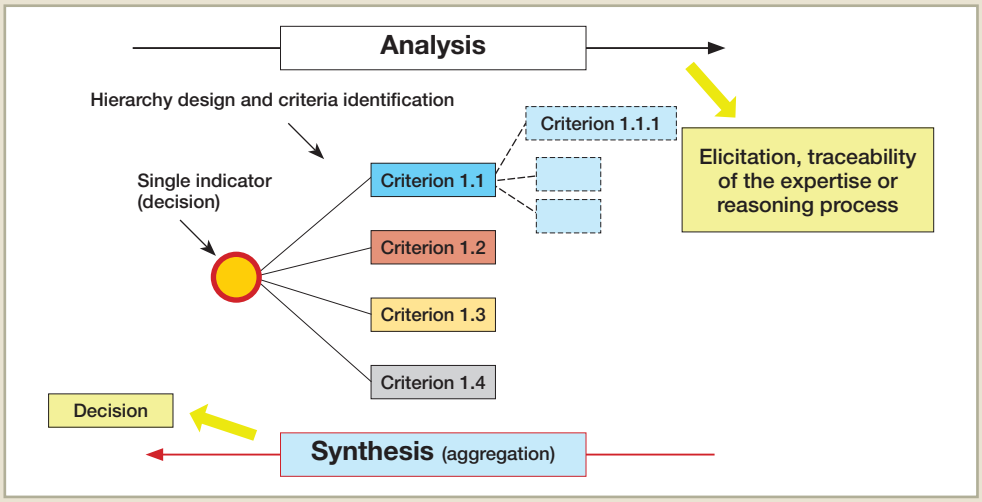


FIGURA 2
Schema di principio della messa in opera del metodo AHP (secondo Tacnet et al., 2010).

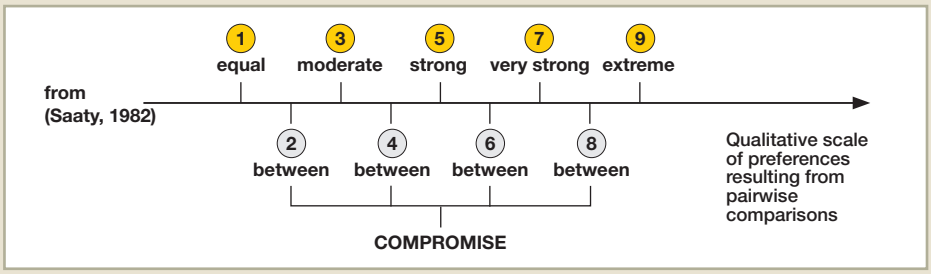
FIGURE 2
Schéma de principe de la mise en œuvre de la méthode AHP (d'après Tacnet et al., 2010).

*torrentielles d'origine hydrologique. Le principal apport de l'*Action 3.2 *du projet RISBA a été d'identifier de façon experte les principaux facteurs de risque de déclenchement et de propagation de laves torrentielles associés à la rupture de barrages d'altitude et de hiérarchiser sous forme d'une synthèse. Par ailleurs, on a souhaité proposer un cadre formel d'analyse permettant une hiérarchisation des critères sur chaque site d'étude. Ce cadre est celui de l'analyse multicritère et nous avons retenu la méthode AHP (Analytic Hierarchy Process) qui est une technique structurée pour organiser et analyser une décision complexe. Elle permet d'agréger un certain nombre de critères élémentaires pour fournir un critère global permettant la prise de décision. Une phase d'analyse du problème à traiter amène à établir une liste de critères élémentaires (Figure 2). Les critères élémentaires sont alors comparés deux à deux (Figure 3) de façon experte et leur importance relative est explicitée sous forme d'une matrice de préférences (Figure 4). Sur la base de cette matrice, une étape de normalisation permet de déduire le poids affecté à chaque critère lors de l'étape d'agrégation qui permet le calcul de l'indicateur synthétique par sommation des critères pondérés (Figure 2).*
Les critères de susceptibilité d'un bassin versant donné à produire des laves torrentielles hydrologiques ne sont pas tous transposables à la problématique de la formation en

caso di liberazione improvvisa d'acqua dovuta alla rottura di uno sbarramento. Alcuni di questi criteri, come evidenziato da Bertrand (2014), si basano sulla morfologia del bacino imbrifero e sono quindi il risultato della storia passata del modellamento dovuto alle colate detritiche. D'altra parte si può ammettere che un bacino imbrifero che produce colate detritiche idrologiche presenti anche una tendenza a produrre questi fenomeni in caso di liberazione improvvisa d'acqua per collasso di sbarramento. È comunque necessario identificare le aree di formazione dei fenomeni di origine idrologica e confrontare la loro posizione col sito dell'invaso. In caso di collasso di quest'ultimo, la formazione di colate detritiche dev'essere esaminata anche considerando i bacini imbriferi in cui la formazione di colate detritiche di origine idrologica non è mai stata riscontrata né sospettata. La modalità di formazione delle colate detritiche da tener presente in caso di rottura di un invaso è principalmente un'erosione intensa di un canale preesistente o di un pendio situato a valle dell'invaso. Un'analisi dettagliata dei meccanismi attivati durante la formazione di una colata detritica, tramite questa tecnica, è proposta in particolare da Takahashi (2007). Il caso di un deflusso che non raggiunga un canale può essere considerato meno favorevole alla propagazione della colata detritica su lunga distanza. La presenza di un canale, concentrando i deflussi e riducendo l'esondazione laterale può, invece, essere considerata sfavorevole rispetto al rischio generato a valle. In questo caso tre fattori sembrano determinanti e costituiscono i criteri principali per la valutazione della predisposizione: la pendenza, la disponibilità di materiale erodibile e la natura di tale materiale.

FIGURA 3
Scala qualitativa di confronto delle preferenze per coppie di criteri.

FIGURE 3
Échelle qualitative de comparaison des préférences par paires de critères.



cas de libération brutale d'eau par une rupture de barrage. Certains de ces critères, tels que mis en évidence par Bertrand (2014), reposent sur la morphologie du bassin versant et résultent donc de l'histoire passée de celui-ci qui a été façonné par les laves torrentielles. On peut par contre admettre qu'un bassin versant qui produit des laves torrentielles hydrologiques présente également une susceptibilité à produire de tels phénomènes en cas de libération brutale d'eau par rupture de barrage. Il est toutefois nécessaire d'identifier les zones de formation des phénomènes d'origine hydrologique et de comparer leur position avec le point d'implantation de la retenue. En cas de rupture d'une retenue, la formation de laves torrentielles doit être envisagée y compris dans des bassins versants où la formation de laves torrentielles d'origine hydrologique n'a jamais été observée ou même suspectée. Le mode de formation des laves torrentielles que l'on peut envisager en cas de rupture d'une retenue est essentiellement une érosion intense d'un chenal préexistant ou d'un versant situé en aval de la retenue. Une analyse détaillée des mécanismes à l'œuvre lors d'une formation de lave torrentielle par ce mécanisme est notamment proposée par Takahashi (2007). Le cas d'un écoulement qui ne rejoindrait pas un chenal peut être considéré comme moins propice à une propagation sur une longue distance de la lave torrentielle. La présence d'un chenal, en concentrant les écoulements et en réduisant leur dissipation par étalement latéral peut, en revanche, être considéré comme défavorable vis-à-vis du risque généré à l'aval. Dans ce cas de figure d'un déclenchement par érosion, trois facteurs apparaissent comme déterminants et constituent les critères principaux d'une évaluation de la susceptibilité. Il s'agit

È comunemente accettato che l'innesco delle colate detritiche di origine idrologica richieda una pendenza superiore al 30% circa (0,3 m/m). Tenendo conto dell'elevata portata liquida al colmo che una rottura d'invaso può generare, anche se la pendenza a valle dell'invaso risulta uguale o inferiore al 30%, si dovrà in ogni caso approfondire l'analisi dei fattori di predisposizione.
Tuttavia se a valle dell'invaso è presente una pendenza di quest'ordine di grandezza o superiore, essa non potrà essere considerata come un fattore limitante e l'analisi dei fattori di predisposizione dovrà essere rimandata.
Un altro fattore che coinvolge la pendenza riguarda la capacità della colata detritica a propagarsi. È generalmente riconosciuto che le colate detritiche di origine idrologica cominciano a depositarsi quando incontrano una zona di pendenza compresa tra 10% (0,1 m/m) e 13% (0,13 m/m), a seconda della natura del materiale. Quando si riscontra una pendenza inferiore al 10% sulla zona potenziale di percorso della colata detritica, si può considerare che la distanza residua che la colata percorrerà in fase di arresto è limitata (nell'ordine di alcune centinaia di metri). L'analisi s'incentrerà quindi non sulla predisposizione alla formazione di colate detritiche, ma piuttosto sulla loro capacità di raggiungere delle zone in cui sono presenti opere antropiche. Questo primo approccio sarà

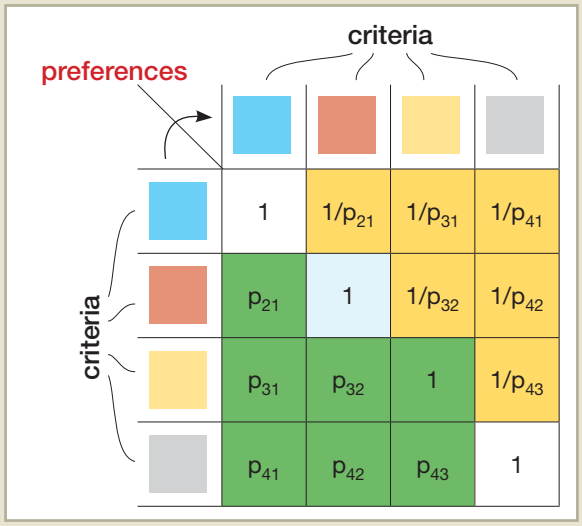


FIGURA 4
Matrice delle preferenze.

FIGURE 4
Matrice des préférences.

de la pente, de la disponibilité en matériau érodable et de la nature de ce matériau. Il est communément admis que le déclenchement des laves torrentielles d'origine hydrologique requiert une pente supérieure à environ 30% (0,3 m/m). Compte tenu du très fort débit liquide de pointe que peut générer une rupture de retenue, ce chiffre ne peut, en l'état actuel des connaissances, être retenu sans précaution supplémentaire. Toutefois, si une pente de cet ordre de grandeur ou supérieure est présente en aval de la retenue, celle-ci ne pourra être considérée comme un facteur limitant et l'analyse des facteurs de prédisposition devrait être poussée plus avant.
Un autre facteur faisant intervenir la pente concerne la capacité de la lave torrentielle à se propager. Il est généralement admis pour les laves torrentielles d'origine hydrologique qu'elles commencent à se déposer lorsqu'elles rencontrent une zone de pente comprise entre 10% (0,1 m/m) et 13% (0,13 m/m) selon la nature du matériau. Lorsqu'une pente inférieure à 10% est rencontrée sur la zone de parcours potentiel de la lave torrentielle, on peut considérer que la distance résiduelle qu'elle parcourra en phase d'arrêt est limitée (de l'ordre de quelques centaines de mètres). L'analyse portera donc ici non pas sur la susceptibilité à la formation de laves torrentielles mais plutôt sur leur capacité à atteindre des zones où des enjeux humains sont présents. Cette première approche

fondamentale per valutare l'utilità di uno studio più approfondito della formazione dei fenomeni in relazione all'analisi dei rischi, che costituisce l'obiettivo finale del tecnico. Tuttavia necessita ricordare che il deposito, e quindi l'arresto delle colate detritiche, non significano necessariamente arresto di tutto il flusso. Quest'ultimo può continuare verso valle in una forma più liquida, includendo probabilmente trasporto solido di fondo.
La quantità di materiale mobilizzabile per erosione costituisce un fattore importante della predisposizione alla formazione di colate detritiche. Nelle colate detritiche di origine idrologica, il rapporto fra volume di materiale solido e volume d'acqua oscilla tra 2 e 5, con un valore solitamente intorno a 4. Se il volume di materiale solido erodibile è notevole, è possibile che la totalità del volume d'acqua dell'invaso prenda parte alla formazione di una colata detritica. Il volume di colata generato può allora superare dalle 4 alle 5 volte il volume d'acqua. Questi valori sono a prima vista confermati da esperimenti realizzati in Unione Sovietica e citati da Meunier (1991) o da alcuni esempi citati da Schuster (2000). In compenso, se il volume erodibile non permette un carico della totalità del volume stoccato nell'invaso all'interno della colata detritica, si può pensare che un determinato volume di colata detritica venga innescato e cominci a fluire. È difficile conoscere l'effetto dell'acqua residua dell'invaso, quindi del volume che non può caricarsi in colata detritica per mancanza di materiale solido disponibile. Il suo potenziale effetto di diluizione è difficile da valutare quantitativamente e da localizzare nella zona di percorso del deflusso. Per prudenza converrà non tenerne conto allo stato attuale, in assenza di conoscenze scientifiche sufficienti. La stima del volume di materiale solido erodibile è quindi un fattore molto importante dell'intensità delle colate detritiche che può derivare dalla rottura di un invaso. A oggi esistono pochi strumenti in grado di valutare tale volume. Il miglior strumento a disposizione dei tecnici, pur restando parecchio impreciso e

sera déterminante pour évaluer si une étude plus approfondie de la formation des phénomènes est utile à l'analyse des risques qui constitue l'objectif final du praticien. On gardera toutefois en mémoire que le dépôt, et donc l'arrêt des laves torrentielles, ne signifie pas forcément arrêt de tout écoulement. Celui-ci peut se poursuivre vers l'aval sous une forme plus liquide incluant probablement du transport solide par charriage.
La quantité de matériau mobilisable par érosion est un facteur important de la susceptibilité à la formation de laves torrentielles. Dans les laves torrentielles d'origine hydrologique, le rapport entre volume de matériau solide et volume d'eau varie dans une gamme allant de 2 à 5 avec une valeur le plus souvent aux alentours de 4. Si le volume de matériau solide érodable est très important, l'hypothèse que la totalité du volume d'eau de la retenue participe à la formation d'une lave torrentielle ne peut être écartée. Le volume de lave généré peut alors atteindre 4 à 5 fois le volume d'eau. Ces chiffres sont apparemment confirmés par des expériences réalisées en Union Soviétique et citées par Meunier (1991) ou par un certain nombre d'exemples cités par Schuster (2000). En revanche, si le volume érodable ne permet pas un chargement en lave torrentielle de la totalité du volume stocké dans la retenue, on peut penser qu'un certain volume de lave torrentielle est déclenché et commence à s'écouler. L'effet de l'eau résiduelle de la retenue, donc le volume qui ne peut se charger en lave torrentielle par faute de matériau solide disponible, est difficile à appréhender. Son potentiel effet de dilution est difficile à évaluer quantitativement et à localiser spatialement dans la zone de parcours de l'écoulement. La prudence requiert donc de le négliger dans un premier temps faute de connaissance scientifique actuelle suffisante. L'évaluation du volume de matériau solide érodable est donc un facteur très important de l'intensité des laves torrentielles pouvant résulter de la rupture d'une retenue. A ce jour, il n'existe que peu d'outils permettant d'évaluer un

condizionato dall'interpretazione dell'esperto che lo utilizza, è probabilmente il metodo proposto da Hungr et al. (1984). Gli elementi chiave di questo metodo sono riassunti nella Tabella 1. A seconda dei terreni potenzialmente attraversati dal deflusso, tale metodo fornisce un supporto all'esperto nella stima dei volumi mobilizzabili che dovranno essere analizzati per sezioni sufficientemente omogenee. Tuttavia si terrà presente che questo metodo è stato predisposto per le colate detritiche di origine idrologica e che l'elevatissima portata liquida derivante dal cedimento di un invaso può generare delle portate liquide di gran lunga superiori alle portate idrologiche dello stesso sito e, di conseguenza, anche un'erosione più forte.
Infine, come si può osservare nella Tabella 1, la natura dei terreni attraversati non è neutra. Le colate detritiche sono costituite generalmente da una miscela di acqua e di

Pendenza (gradi) / *Pente (degrés)*	**Materiale di fondo / *Matériau du lit***	**Sponde / *Berges***	**Condizioni di stabilità (prima dell'evento) / *Conditions de stabilité (avant évènement)***	**Tasso d'erodibilità (m^3/m) / *Taux d'érodabilité (m^3/m)***
20 – 35	Roccia madre / *Roche-mère*	Non erodibile / *Non-érodable*	Stabile (assenza quasi totale di materiali mobilizzabili) / *Stable (quasi-absence de matériaux mobilisables)*	0 – 5
10 – 20	Strato sottile di sedimenti o di suolo mobile sulla roccia madre / *Fine couche de sédiments ou de sol meuble sur la roche-mère*	Non erodibile (roccia madre) / *Non-érodable (roche-mère)*	Stabile / *Stable*	5 – 10
10 – 20	Strato mobile compatto o morenico / *Couche meuble épaisse ou moraine*	Altezza superiore a 5 m / *Plus de 5 m de haut*	Stabile / *Stable*	10 – 15
10 – 20	Strato mobile compatto o morenico / *Couche meuble épaisse ou moraine*	Altezza superiore a 5 m / *Plus de 5 m de haut*	Pendenze laterali stabili / *Pentes latérales stables*	15 – 30
10 – 20	Strato mobile compatto o morenico / *Couche meuble épaisse ou moraine*	Altezza superiore a 20 m / *Plus de 20 m de haut*	Pendenze laterali potenzialmente instabili (frane spondali) / *Pentes latérales potentiellement instables (glissements de berge)*	Fino a 200 (da considerarsi come sorgente puntiforme) / *Jusqu'à 200 (à considérer comme une source ponctuelle)*

TABELLA 1
Metodo empirico per la stima del volume di materiale fornito dal canale durante il deflusso di una colata detritica, secondo Hungr et al. (1984).

TABLEAU 1
Méthode empirique pour l'estimation du volume de matériau fourni par le chenal lors de l'écoulement d'une lave torrentielle, d'après Hungr et al. (1984).

tel volume. Le meilleur outil à la disposition du praticien, même s'il reste assez imprécis et dépendant de l'interprétation de l'expert qui l'utilise, est sans doute la méthode proposée par Hungr et al. (1984). Les éléments clés de cette méthode sont synthétisés dans le Tableau 1. En fonction des terrains potentiellement traversés par l'écoulement, cette méthode apporte un appui à l'expert dans l'évaluation des volumes mobilisables qui devront être effectués par tronçons suffisamment homogènes. On gardera toutefois en mémoire que cette méthode a été mise au point pour des laves torrentielles d'origine hydrologique et que le très fort débit liquide résultant de la rupture d'une retenue peut engendrer des débits liquides bien supérieurs aux débits hydrologiques du même site et donc une érosion elle-aussi plus importante.
Enfin, comme on peut le remarquer dans le Tableau 1, la nature des terrains traversés n'est pas neutre. Les laves torrentielles sont constituées généralement d'un mélange d'eau et de matériau solide présentant une large étendue granulométrique. Ainsi, l'absence d'éléments fins dans le matériau solide érodable semble être un facteur limitant la probabilité de déclenchement. A contrario, *certains types de terrains, tels que*

materiale solido che presenta un ampio assortimento granulometrico. Pertanto l'assenza di elementi fini del materiale solido erodibile sembra essere un fattore di limitazione alla probabilità d'innesco. Al contrario, alcuni tipi di terreno come quelli dei depositi morenici sono particolarmente favorevoli all'innesco di colate detritiche, poiché sono generalmente spessi, poco coesivi e il loro ampio assortimento granulometrico è favorevole alla cattura dell'acqua all'interno della massa solida.

Collaborazioni RISBA

Una prima versione di documento di sintesi sui criteri di predisposizione e sul sistema di supporto alla presa di decisione sarà discussa da Irstea. Verrà poi comunicata ai colleghi italiani per discussioni, commenti e correzioni, in modo da integrare il testo con le loro conoscenze tecniche sulla materia. L'obiettivo è quello di arrivare, a fine progetto, a un documento affidabile che possa essere considerato lo stato dell'arte sull'argomento. In considerazione delle scarse conoscenze scientifiche disponibili in merito, questo documento avrà essenzialmente un obiettivo prospettico ma dovrebbe anche fornire un quadro di riflessione accessibile agli operatori di campo che si confrontano con questa problematica.

Considerazioni e sviluppi

Al di là dello studio sviluppato nell'ambito del progetto RISBA, nei prossimi anni non si prevedono significativi progressi scientifici sull'innesco delle colate detritiche per scorrimento liquido improvviso, in grado di avere ricadute operative dirette. Di conseguenza,

---

les dépôts morainiques par exemple, sont particulièrement propices au déclenchement de laves torrentielles car ils sont généralement épais, peu cohésifs et leur large étendue granulométrique est favorable au piégeage de l'eau à l'intérieur de la masse solide.

Collaborations RISBA

Une première version de document de synthèse sur les critères de susceptibilité et sur le système d'aide à la décision va être discutée au sein d'Irstea. Elle sera ensuite communiquée aux collègues italiens pour discussion, commentaires et amendements afin d'intégrer pleinement leur connaissance experte en la matière. L'objectif est d'aboutir, en fin de projet, à un document stabilisé pouvant être considéré comme l'état de l'art sur ce sujet. Compte tenu du peu de connaissance scientifique disponible sur le sujet, ce document aura essentiellement une visée prospective mais devrait néanmoins fournir un cadre de réflexion accessible aux praticiens de terrain confrontés à cette problématique.

Perspectives

Au-delà du travail prospectif développé dans le cadre du projet RISBA, des avancées scientifiques significatives sur le déclenchement des laves torrentielles par un écoulement liquide brutal, susceptibles de produire des retombées opérationnelles directes, ne verront probablement pas le jour avant quelques années. En conséquence, du point de vue des applications au terrain, la stratégie qui semble la plus abordable actuellement consiste à entreprendre une confrontation de la méthode proposée ici à un nombre le plus large possible de cas de terrain répertoriés. Une telle étude pourra être menée à bien si l'on

dal punto di vista delle applicazioni di campo, la strategia che sembra attualmente più proficua consiste nell'intraprendere un confronto del metodo qui proposto col maggior numero possibile di casi reali osservati. Tale studio potrà essere concluso positivamente se comprenderà tutti i tipi di fenomeni calamitosi di breve durata in aree montane come il cedimento di dighe naturali (conseguenti a smottamenti o frane) o di laghi glaciali, che costituiscono a loro volta una problematica importante per tutta la regione alpina.

Riferimenti bibliografici / *Références*

Berger R. C. (1994). *Strengths and Weaknesses of Shallow Water Equations in Steep Open Channel Flow.* Proceedings of the 1994 Conference on Hydraulic Engineering, G. V. Cotroneo & R. R. Rumer (Eds.): 1257-1261.

Bertrand M. (2014). *Approches régionales de la susceptibilité torrentielle dans les Alpes du Sud. Thèse de l'Ecole Normale Supérieure de Lyon.*

Hungr O., Morgan G. & Kellerhals R. (1984). *Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remedial measures.* Canadian Geotechnical Journal 21: 663-677.

Lefort P. (1991). *Trasporto solido dans le lit des cours d'eau. Dynamique fluviale.* SOGREAH – ENSHMG – INPG.

Leveque R. J. (2002). *Finite volume methods for hyperbolic problems*. Cambridge University Press.

Meunier M. (1991). *Eléments d'hydraulique torrentielle*. Série Etudes du Cemagref, N°1 Montagne.

Recking A. (2013). *Simple method for calculating reach-averaged bed-load transport*. Journal of hydraulic engineering, 139(1), 70-75.

RICKENMANN D. (1990). *Bed load transport capacity of slurry flows at steep slopes*. Versuchanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH, Zurich. 249 p.

Schuster R. L. (2000). *Outburst debris-flows from failure of natural dams*. In: G. F. Wieczorek & N. D. Naeser (eds.) *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, Proceedings of the 2nd International DFHM Conference, Taipei, Taiwan. BALKEMA: 29-42.

Tacnet J. M., November V., Richard D. et Batton-Hubert M. (2010). *Jusqu'où une approche interdisciplinaire est-elle possible dans le cadre de la gestion intégrée des risques naturels en montagne* ? Colloque OPDE 2010, 25-26 octobre 2010, Montpellier, France, « Aide à la décision et gouvernance ».

Takahashi T. (2007). *Debris flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures*. CRC press. 448 p.

inclut tous les types de phénomènes de débâcles rapides en zone de montagne tels que les ruptures de barrages naturels (résultant de glissements de terrain ou d'éboulements) ou de lacs glaciaires, par exemple, qui constituent également une problématique importante au niveau de tout l'arc alpin

Informatizzazione dei dati esistenti

Il Catasto sbarramenti della Regione Piemonte, disponibile sul sito web della Regione Piemonte, all'URL http://www.sistemapiemonte.it/cms/privati/territorio/servizi/517-catasto-sbarramenti, per i privati e http://www.sistemapiemonte.it/cms/pa/territorio-edilizia-e-opere-pubbliche/servizi/718-catasto-sbarramenti-pa, per la pubblica amministrazione, rappresenta già attualmente un utile strumento per i cittadini e i professionisti.
Il Catasto raccoglie e cataloga le informazioni relative attualmente a circa 760 invasi artificiali di competenza regionale, nonché 56 dighe di competenza nazionale. Oltre ai dati tecnici relativi alla diga, sono presenti i dati amministrativi (proprietari, gestori, ecc.).
Inoltre su tale strumento sono visibili, per i soli amministratori pubblici, le aree di dam-break delle dighe di competenza nazionale.
Al fine di implementare questa banca dati, per costruire uno strumento utile anche alla cittadinanza e alle amministrazioni locali nella prevenzione dei rischi attraverso questa Azione, si sono presi in considerazione circa 170 invasi di competenza regionale nell'area transfrontaliera, cercando di definire le aree di allagamento conseguenti al dam-break per poi successivamente riversarle nel Catasto sbarramenti.
Uno dei temi del progetto è quello di sviluppare azioni comuni per promuovere e condividere una maggiore conoscenza dei territori a rischio di allagamento causato dalla rottu-

Informatisation des données existantes

Le Catasto sbarramenti (Cadastre des barrages) de la Région Piémont, disponible sur le site web de la Région Piémont à l'adresse http://www.sistemapiemonte.it/cms/privati/territorio/servizi/517-catasto-sbarramenti pour le secteur privé et http://www.sistemapiemonte.it/cms/pa/territorio-edilizia-e-opere-pubbliche/servizi/718-catasto-sbarramenti-pa pour l'administration publique, représente à l'heure actuelle un instrument utile pour les citoyens et les professionnels.
Le Cadastre collecte et répertorie les informations concernant actuellement environ 760 bassins de retenue artificiels de compétence régionale, ainsi que 56 digues de compétence nationale. Il rassemble non seulement les données techniques concernant la digue, mais aussi des données administratives (propriétaires, exploitants, etc.). En même temps, cet outil offre à l'administration publique un accès exclusif aux informations sur les zones de rupture des digues de compétence nationale. Afin cette base de données et produire un instrument utile aux citoyens et aux administrations locales pour la prévention des risques, environ 170 retenues de compétence régionale ont été prises en compte dans la zone transfrontalière; les zones d'inondation dues à une rupture ont été considérées et reportées dans le Cadastre des barrages.
L'un des thèmes du projet est de développer des actions communes afin de promouvoir et de

ra degli sbarramenti artificiali per l'accumulo idrico, e delle metodologie di progettazione di nuovi invasi, di monitoraggio di invasi esistenti, di valutazione delle resistenze residue delle strutture e della durabilità dei materiali.
Per la Regione Piemonte, l'azione del progetto sarà finalizzata a ottenere uno strumento fondamentale di prima valutazione di rischio, a valle del quale la Regione Piemonte potrà pianificare le strategie di manutenzione, messa in sicurezza o adeguamento sismico degli sbarramenti di competenza regionale in maniera coerente e sostenibile (in termini probabilistici e di scenario associato al dam-break).
Alcuni dei 170 invasi di competenza regionale scelti nell'ambito del progetto hanno già cartografie di aree di dam-break, e sono presenti all'interno dell'archivio cartaceo della Regione Piemonte che ne ha autorizzato l'esercizio.
L'attività è stata svolta secondo le fasi di seguito descritte:

1. raccolta di dati cartografici presenti negli archivi degli uffici regionali relativi alle aree di dam-break degli invasi di competenza regionale per le opere localizzate nella zona transfrontaliera. Dei 170 invasi di competenza regionale scelti da progetto, è stato raccolto materiale per 58 invasi, di cui sono state fatte delle scansioni e trasformato il cartaceo in un file formato TIFF o JPEG; le tipologie delle cartografie presenti in archivio sono per lo più studi tecnici eseguiti da professionisti (Figura 1) e in pochi casi cartografie derivanti dal Piano Regolatore Generale Comunale (PRGC, Figura 2);
2. successivamente i file TIFF sono stati georiferiti e informatizzati sul programma Open Source QGIS/GRASS. In totale, dei 58 invasi di cui si avevano le cartografie, sono risultate disponibili 63 aree di dam-break (Figura 3 e 4), poiché alcuni invasi, presentano più scenari di rischio.

partager une meilleure connaissance des territoires qui risquent d'être inondés à cause de la rupture des retenues artificielles due à l'accumulation d'eau, ainsi que des méthodologies de conception de nouvelles retenues, de surveillance des retenues déjà existantes, de l'évaluation des résistances résiduelles des structures et de la durabilité des matériaux.
Pour la Région Piémont, l'action du projet a pour but d'obtenir un instrument fondamental pour la première évaluation des risques; sur cette base la Région Piémont pourra planifier les stratégies de mesures d'entretien, de protection et d'adaptation au risque sismique des retenues de compétence régionale de façon cohérente et durable (en termes de probabilités et de scénario associé à la rupture). Certaines des 170 retenues de compétence régionale choisies dans le cadre du projet des cartographies des zones de rupture sont déjà disponibles pour ces cartographies sont dans les archives papier de la Région Piémont qui en a autorisé l'utilisation.
L'activité a été effectuée selon les phases décrites ci-dessous :

1. *collecte des données cartographiques contenues dans les archives régionales relatives aux zones de rupture des retenues de compétence régionale pour les ouvrages situés dans la zone transfrontalière. Sur les 170 retenues de compétence régionale, le matériel de 58 retenues a été collecté puis scanné et transformé en fichiers de format TIFF ou JPEG ; les cartographies contenues dans les archives sont pour la plupart des études techniques effectuées par des professionnels (Figure 1), et dans quelques cas il s'agit de cartographies tirées du Plan Régulateur Général Communal (PRGC, Figure 2) ;*
2. *les fichiers TIFF ont été ensuite géoréférencés et informatisés sur le programme* Open Source *QGIS/GRASS. Au total, sur les 58 retenues dont on avait la cartographie, 63 zones de rupture sont disponibles (Figures 3 et 4), en considerant que certaines retenues présentent plusieurs scénarios de risque.*

Le aree di dam-break informatizzate hanno consentito gli sviluppi di alcune azioni del progetto:

a. l'*Azione 3.1* "Valutazione dell'onda di dam-break a valle della diga" che tra i 170 invasi scelti ha tracciato aree di dam-break su alcuni invasi attraverso studi idraulici;
b. l'*Azione 3.3b* "Sviluppo del sistema informativo", che amplierà il Catasto sbarramenti con l'inserimento delle aree di dam-break sviluppate e studiate durante il progetto;
c. l'*Azione 3.4* "Valutazione del rischio nelle aree di dam-break a valle della diga", che tramite modellistica ha definito le zone interessate in caso di rottura / collasso dell'invaso.

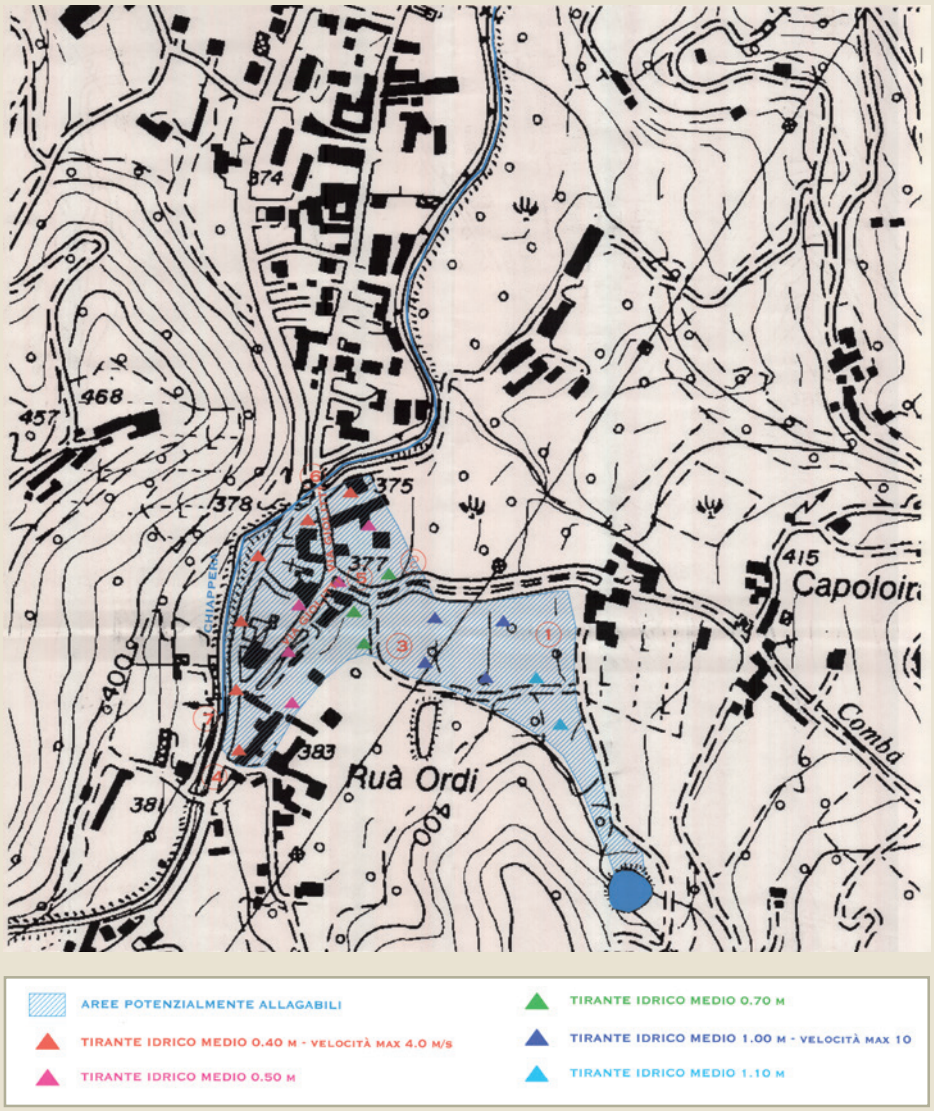


FIGURA 1
Esempio di cartografia di dam-break derivante da studio tecnico.

FIGURE 1
Exemple de cartographie que result d'un etude technique.

L'informatisation des zones de rupture a permis de développer certaines actions du projet :

a. *l'*Action 3.1 *«Évaluation de l'onde de rupture en aval de la digue» qui, parmi les 170 retenues, ont permis de tracer des zones de rupture sur certaines retenues à travers des études hydrauliques ;*
b. *l'*Action 3.3b *«Développement du système d'information» qui enrichira le Cadastre des barrages grâce à la saisie des zones de rupture développées et étudiées au cours du projet ;*
c. *l'*Action 3.4 *«Évaluation du risque dans les zones de rupture en aval de la digue» qui, à travers des modèles, ont permis de définir les zones concernées en cas de rupture / effondrement de la retenue.*

Attraverso l'*Azione 3.3a*, vengono rese quindi disponibili nel Catasto sbarramenti le aree di dam-break relative alla rottura degli invasi di competenza regionale presenti in area transfrontaliera. Ciò permetterà alle amministrazioni competenti abilitate all'accesso al Catasto con il profilo assegnato di rendersi conto personalmente, tramite un semplice accesso internet al sistema informativo territoriale, dei rischi presenti sul proprio territorio. Viene proposto in tal modo un utile strumento di lavoro per le eventuali operazioni di protezione civile (Figura 4, caso studio).

FIGURA 2
Esempio di cartografia derivante da PRGC.

FIGURE 2
Exemple de cartographie tirée d'un PRGC.

*À travers l'*Action 3.3a, *les zones de rupture des retenues de compétence régionale dans la zone transfrontalière sont donc mises à disposition dans le Cadastre des barrages. Cela permettra aux administrations locales de se rendre compte directement des risques présents sur leur territoire en accédant au système d'information territoriale sur l'Internet. On offre ainsi un instrument de travail utile pour des éventuelles opérations de protection civile (Figure 4, cas d'étude de la protection civile).*

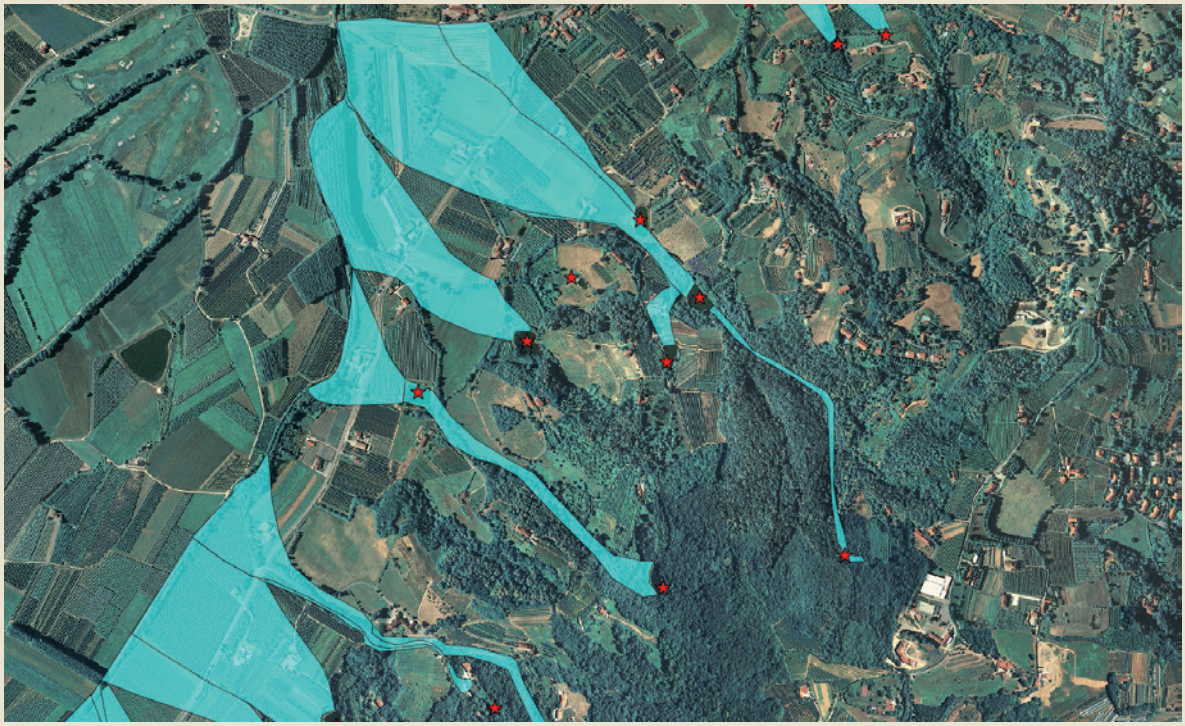


FIGURA 3
Esempio di informatizzazione aree di dam-break.

FIGURE 3
Exemple d'informatisation des zones de rupture.

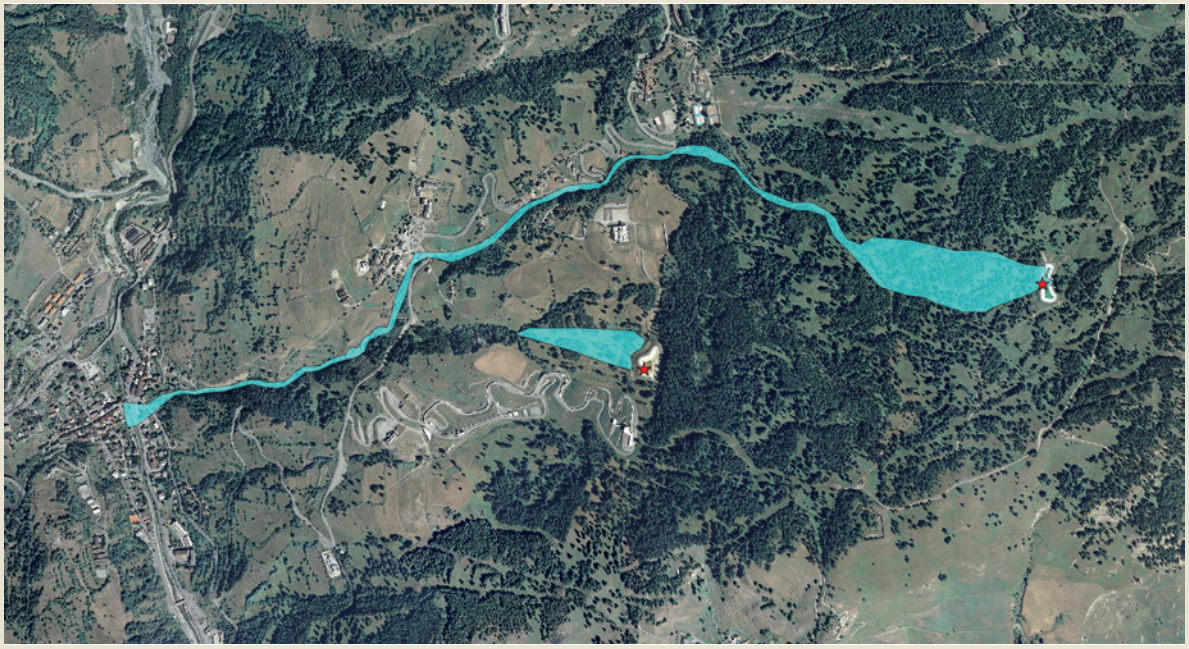


FIGURA 4
Esempio di informatizzazione aree di dam-break. (Invaso caso di studio protezione civile).

FIGURE 4
Exemple d'informatisation des zones de rupture. (Cas d'étude de la protection civile).

Sviluppo del sistema informativo

Il Catasto Sbarramenti della Regione Piemonte è uno strumento di organizzazione completa delle informazioni relative agli sbarramenti di competenza regionale; le informazioni raccolte dagli uffici tecnici regionali e soprattutto dal settore regionale competente in materia, al fine di gestire in maniera integrata sia la componente descrittiva di tipo generale, tecnico e amministrativo, sia la componente geografica relativa alla localizzazione degli impianti.
Le opere inserite nel Catasto, sulle quali vi è una competenza regionale diretta relativamente alla vigilanza e controllo sulla gestione delle stesse, con particolare riferimento alla pubblica incolumità, sono le dighe, le traverse, i bacini di accumulo, ma anche le dighe di competenza statale.
Il sistema informativo è accessibile dal portale di "Sistema Piemonte"; nasce nel 2009 come evoluzione dei catasti dighe e invasi già predisposti a partire dal 1998 per organizzare i dati raccolti con i censimenti delle opere.
Attualmente sono state raccolte e sono in fase di continuo aggiornamento informazioni per circa 900 opere. Le informazioni consistono in:

a. dati tecnici sulle strutture;
b. dati amministrativi per i procedimenti correlati alle leggi regionali di settore (autorizzazioni, concessioni…);

Développement du système informatique

Le Cadastre des Barrages de la Région Piémont est un instrument servant à l'organisation complète des informations relatives aux barrages de compétence régionale ; des informations sont collectées par les structures techniques décentrées ou par le secteur régional compétent en la matière, afin de gérer en mode intégré à la fois la composante descriptive de type général, technique et administratif, et la composante géographique relative à la localisation des installations.
Les ouvrages recensés dans le Cadastre, pour lesquels il existe une compétence régionale directe relative à la vigilance et au contrôle ainsi qu'à leur gestion avec une référence particulière à la sécurité publique, sont les digues, les barrages, les bassins d'accumulation, mais aussi les digues de compétence nationale.
L'accès au Cadastre se fait depuis le portail du "Sistema Piemonte". Il créé en 2009 en tant qu'évolution des cadastres de digues et retenues déjà mis en place dès 1998 afin d'organiser les données collectées suite aux recensements des ouvrages.
Actuellement les informations collectées et mises à jour en continu concernent 900 ouvrages environ. Les informations consistent en :

a. *données techniques sur les structures ;*

c. dati dei soggetti proprietari, gestori, professionisti incaricati delle perizie tecniche e dei collaudi;
d. documenti quali istruttorie, relazioni di sopralluogo, valutazioni di rischio potenziale, verbali di accertamento violazioni, ordinanze sindacali, elaborati progettuali, determinazioni, disciplinari di esercizio;
e. documentazione fotografica.

Il Catasto Sbarramenti di competenza regionale è disponibile sul "Sistema Piemonte" (http://www.sistemapiemonte.it/cms/privati/territorio/servizi/517-catasto-sbarramenti per i privati e http://www.sistemapiemonte.it/cms/pa/territorio-edilizia-e-opere-pubbliche/servizi/718-catasto-sbarramenti-pa per la Pubblica Amministrazione) per le tipologie di utenza previste: professionisti, cittadini e funzionari della Pubblica Amministrazione (province, comuni, comunità montane e collinari, Parchi, A.R.P.A., Agenzia Interregionale del fiume Po, Autorità di Bacino del fiume Po, Corpo Forestale dello Stato, Vigili del Fuoco, Volontari Antincendi Boschivi).
L'obiettivo che sta alla base del suddetto interesse è lo sviluppo di azioni comuni per promuovere e condividere una maggiore conoscenza dei territori a rischio di allagamento causato dalla rottura degli sbarramenti artificiali per l'accumulo idrico e delle migliori metodologie di progettazione di nuovi invasi, di monitoraggio degli impianti esistenti, di valutazione delle resistenze residue delle strutture e della durabilità dei materiali.
L'evoluzione del Catasto Sbarramenti di competenza regionale proposta in questo progetto riguarda altresì l'integrazione della delimitazione delle aree a rischio a valle degli sbarramenti per ipotesi di rottura degli stessi, con particolare attenzione alla correlazione dei rischi di origine naturale (oggetto di altre azioni progettuali) e quelli artificiali che

---

b. *données administratives pour les procédures corrélées aux lois de secteur (autorisations, concessions…) ;*
c. *données des sujets propriétaires, exploitants, professionnels chargés des expertises techniques et des essais ;*
d. *documents tels que informations, relations d'inspection, évaluations de risque potentiel, procès-verbaux de constatation des infractions, ordonnances syndicales, documents de projet, déterminations, cahiers d'exercice ;*
e. *documentation photographique.*

Le Cadastre des Barrages de compétence régionale est disponible sur le "Sistema Piemonte" (http://www.sistemapiemonte.it/cms/privati/territorio/servizi/517-catasto-sbarramenti pour le secteur privé et http://www.sistemapiemonte.it/cms/pa/territorio-edilizia-e-opere-pubbliche/servizi/718-catasto-sbarramenti-pa pour l'administration publique) pour les typologies d'utilisateurs prévues : professionnels, particuliers et fonctionnaires de l'administration publique (provinces, communes, communautés de montagnes et de collines, parcs, A.R.P.A., Agence interrégionale du fleuve Pô, Autorité de bassin du fleuve Pô, corps forestier de l'Etat, pompiers, pompiers-forestiers volontaires).
L'objectif à la base de l'intérêt susmentionné est le développement d'actions communes pour promouvoir et partager une plus grande connaissance des territoires à risque d'inondation provoquée par la rupture des retenues artificielles due à l'accumulation d'eau, ainsi que de meilleures méthodologies de conception de nouvelles retenues, de surveillance des installations existantes, d'évaluation des résistances résiduelles des structures et de la durabilité des matériels.
L'évolution du Cadastre des Barrages de compétence régionale proposée dans ce projet

potrebbero derivare da un'interazione tra fenomeni naturali e infrastrutture di origine antropica.
Il fine principale è di poter continuare ad alimentare il Catasto con le informazioni che si raccolgono nel tempo e di gestire in futuro uno scambio di dati strutturato e multi-direzionale con altri enti provinciali e comunali, per arrivare alla redazione dei piani di emergenza comunali per la protezione civile.
Le attività svolte hanno interessato l'aggiornamento delle componenti applicative più obsolete. In tal maniera é stato predisposto uno strumento che integra una nuova componente applicativa di gestione e rappresentazione delle aree di dam-break, per gli sbarramenti di competenza regionale della fascia alpina e prealpina occidentale del Piemonte con i relativi servizi, per loro visualizzazione e gestione geo-cartografica nel sistema informativo Dighe e Invasi.
La predisposizione del servizio di gestione delle informazioni attuata permette il carica-

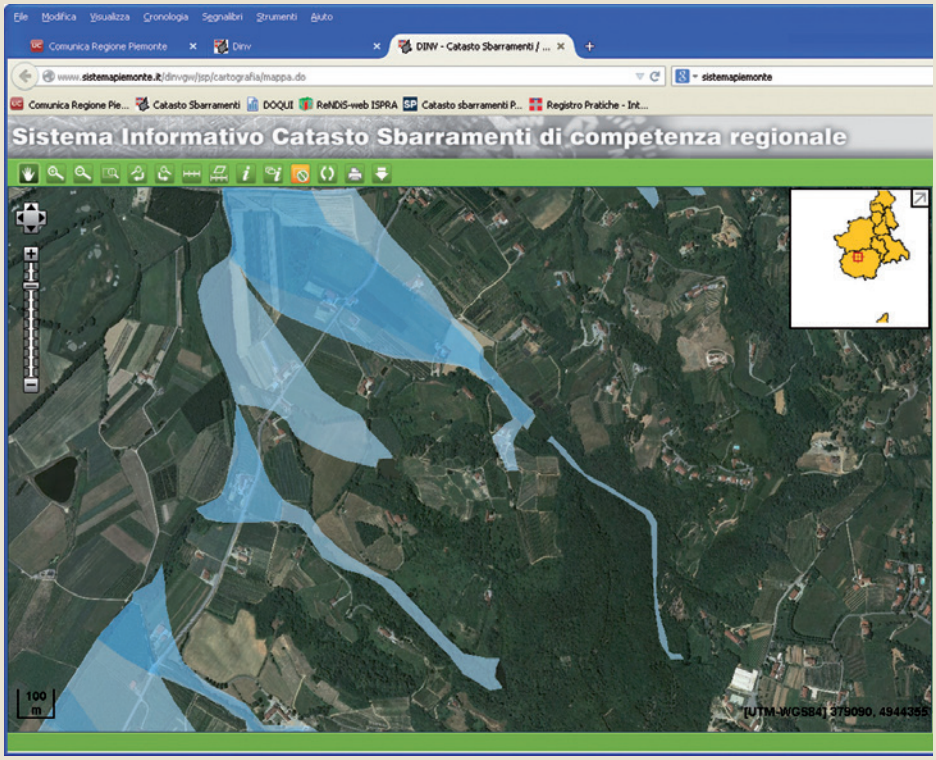


FIGURA 1
Risultato dell'Azione progettuale 3.3a nel Catasto Sbarramenti.

FIGURE 1
Résultat du projet d'Action 3.3a dans le Cadastre des barrages.

concerne également l'intégration de la délimitation du risque en aval des barrages par hypothèse de rupture de ces derniers, avec une attention particulière accordée à la corrélation entre les risques d'origine naturelle (objet d'autres actions du projet) et les risques dus à une interaction entre phénomènes naturels et infrastructures d'origine anthropique.
L'objectif principal est de pouvoir continuer à alimenter le Cadastre avec les informations qui sont recueillies et gérer à l'avenir un échange de données structuré et multidirectionnel avec d'autres organismes provinciaux et communaux pour arriver à la rédaction de plans d'urgence communaux pour la protection civile.
Les activités menées ont porté sur la mise à jour des composantes d'application les plus obsolètes. On dispose ainsi d'un un instrument intégrant une nouvelle composante d'application de gestion et de représentation des zones de rupture pour les barrages de compétence régionale des Préalpes et Alpes occidentales piémontaises permettant la

mento di tutte le aree di rottura presenti nel catasto cartaceo degli archivi della Regione Piemonte, che verranno acquisite anche successivamente.
Parte di tale materiale, che é stato già informatizzato nell'ambito di altre Azioni del Progetto RISBA, è già stata caricata nella parte geografica del Catasto Sbarramenti come risulta nella Figura 1.
Relativamente all'accesso remoto su territorio in caso di sopralluogo, si stanno sperimentando, grazie agli strumenti ottenuti con il Progetto RISBA, metodi veloci di collegamento e caricamento dati (relazioni, verbali, immagini ecc.) dal tablet del funzionario tecnico direttamente dal sito di sopralluogo.
Le immagini riportate nel seguito (Figure 2 e 3) rappresentano degli esempi di visualizzazione della parte alfanumerica e geografica del Catasto attualmente disponibile online.

visualisation et la gestion géo-cartographique dans le système d'information Digues et Retenues.
La mise à disposition du service de gestion des informations permet de charger toutes les zones de rupture présentes dans le cadastre papier des archives de la Région Piémont qui seront acquises par la suite.
Une partie de ce matériel, déjà informatisé dans le cadre d'autres Actions du projet RISBA, a déjà été chargée dans la partie géographique du Cadastre des Barrages comme l'indique la Figure 1 ci-après.
En ce qui concerne l'accès à distance sur le territoire en cas de visite technique, grâce aux instruments obtenus avec le projet RISBA, des méthodes rapides de liaison et de chargement des données (relations, comptes rendus, images, etc.) de la tablette du fonctionnaire technique directement depuis le site de la visite sont en cours d'expérimentation.
Les images reportées ci-dessous (Figures 2 et 3) représentent des exemples de visualisation depuis la partie alphanumérique et géographique du Cadastre actuellement en ligne.

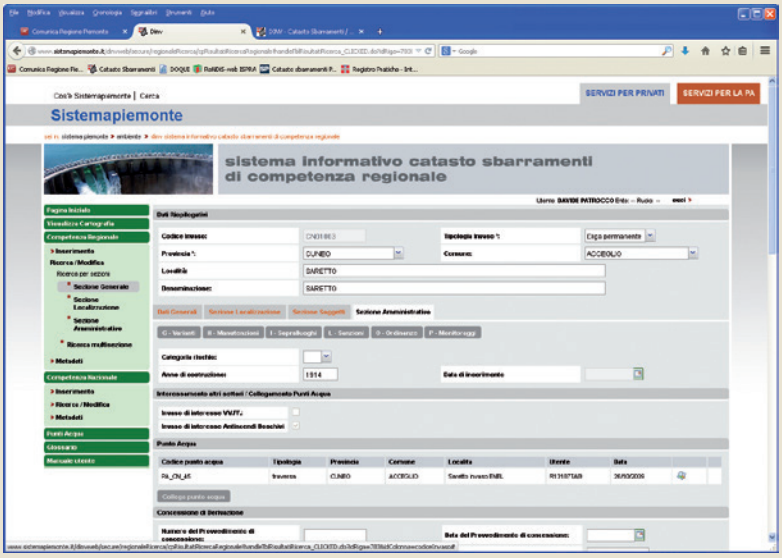


FIGURA 2
Esempio di visualizzazione dei dati alfanumerici nel Catasto Sbarramenti della Regione Piemonte.

FIGURE 2
Exemple de visualisation des données alphanumériques dans le Cadastre des barrages de la Région Piémont.

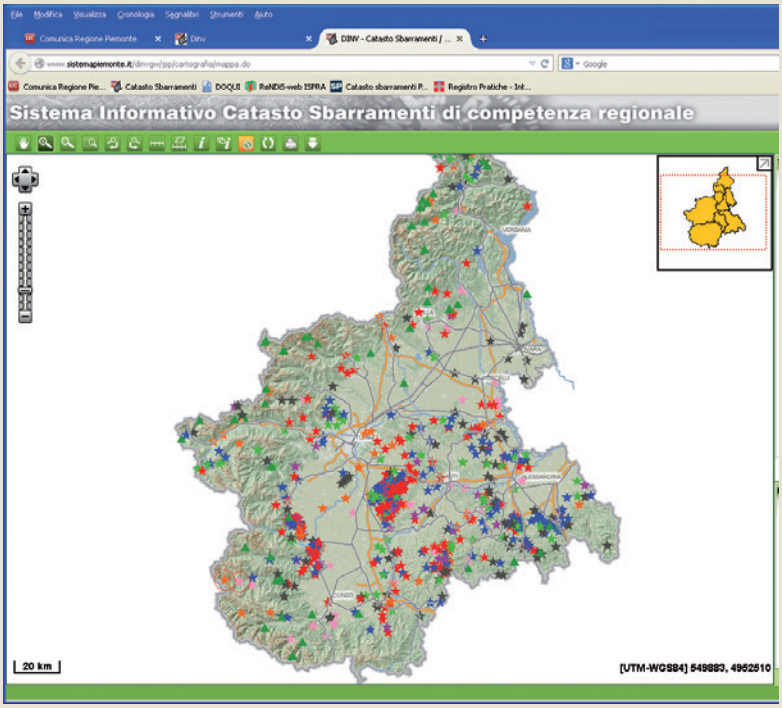


FIGURA 3
Esempio di visualizzazione della parte geografica nel Catasto Sbarramenti (Vista della Regione Piemonte).

FIGURE 3
Exemple de visualisation de la partie géographique dns le Cadastre des barrages (Vue del Règion Piémont).

Valutazione del rischio nelle aree di dam-break a valle della diga

Le attività di valutazione del rischio in caso di dam-break prevedono l'utilizzo di tecniche e strumenti GIS partendo dalla definizione del territorio posto a valle della diga eventualmente interessato in caso di crollo.
I dati così generati permettono di definire possibili azioni di protezione del territorio e delle popolazioni interessate, di testare molteplici scenari provenienti da differenti algoritmi di modellazione e di giungere a definire il grado di priorità d'intervento sugli invasi.
Queste valutazioni si basano su due specifiche fonti informative:

1. le aree che saranno interessate in caso di dam-break, aree eventualmente differenziate per grado di pericolosità;
2. uno o più strati informativi che rappresentano i potenziali bersagli.

La formula diffusamente applicata per definire il rischio:

Rischio = Pericolosità * Vulnerabilità * Valore Esposto

prevede un ulteriore strato informativo relativo alle vulnerabilità dei beni esposti; nelle elaborazioni realizzate in questa azione del progetto RISBA il grado di vulnerabilità è stato posto a 1 - il valore massimo ammesso - per giungere a scenari di estremo impatto, quindi di massima cautela.

Évaluation des risques dans les zones de rupture en aval de la digue

Les activités d'évaluation des risques en cas de rupture prévoient l'utilisation de techniques et d'instruments SIG qui se developpent à partir de la definition du territoire en aval du barrage éventuellement concerné en cas de rupture.
Les données ainsi créées permettent de définir les actions de protection du territoire et des populations concernées, de tester les multiples scénarios découlant des différents algorithmes de modélisation et de définir le degré de priorité d'intervention sur les bassins de retenue.
Ces évaluations sont fondées sur deux sources d'information spécifiques :

1. *les zones affectées en cas de rupture, zones éventuellement différenciées par niveau de danger ;*
2. *une ou plusieurs couches de données qui représentent les cibles potentielles.*

La formule la plus largement appliquée pour définir le risque :

*Risque = Danger * Vulnérabilité * Valeur Exposée*

prévoit une couche de données supplémentaire relative à la vulnérabilité des biens exposés. Dans l'élaboration réalisée, le degré de vulnérabilité a été indiqué à 1 - la valeur maximale consentie - pour arriver à des scénarios d'impact extrême et donc d'extrême précaution.

Per raggiungere questi obiettivi si è operato su due percorsi paralleli:

a. predisposizione di una base dati orientata all'analisi dei territori circostanti gli invasi;
b. realizzazione di strumenti che permettessero questo tipo di analisi.

Le basi dati territoriali

Le informazioni territoriali raccolte provengono da differenti fonti interne alla Pubblica Amministrazione Regionale piemontese affiancate a una serie di dati derivati da siti internet delle forze dell'ordine: Carabinieri e Vigili del Fuoco.
Si tratta di strati informativi geografici eterogenei per genesi, scala e scopo di acquisizione e aggiornamento temporale che tendono a descrivere il territorio con il maggior dettaglio possibile (Tabella 1).
In particolare lo strato informativo dell'uso del suolo descrive con maggior dettaglio e continuità il territorio piemontese con 74 differenti classi secondo lo schema CORINE Land Cover (Tabella 3).
Tutti i dati raccolti sono stati analizzati e organizzati in un *geodatabase* gestito su piattaforma PostgreSQL/Postgis (http://www.postgresql.org/ e http://postgis.net/) che permette la fruizione di dati descrittivi congiuntamente alla relativa componente spaziale.

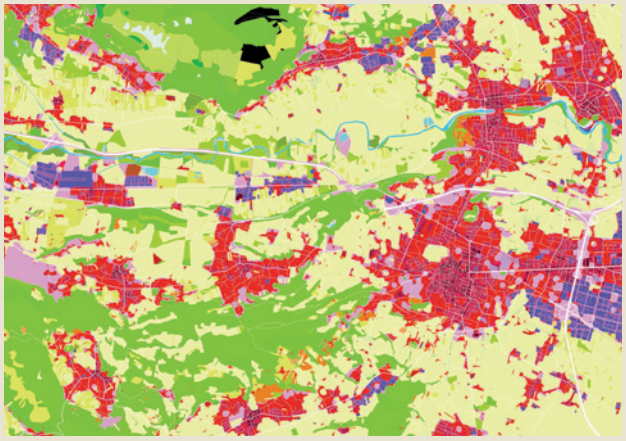


FIGURA 1
Esempio di uso del suolo.

FIGURE 1
Exemple d'utilisation du sol.

Pour atteindre ces objectifs, on a opéré sur deux parcours parallèles :

a. *prédisposition d'une base de données orientée à l'analyse des territoires autour des retenues ;*
b. *réalisation d'instruments permettant ce type d'analyse.*

Les bases de données territoriales

Les informations territoriales collectées proviennent de différentes sources internes de l'Administration publique régionale du Piémont, ajoutées à une série de données dérivées de sites Internet des Forces de l'ordre : Carabinieri et pompiers.
Il s'agit de couches de données géographiques hétérogènes par leur création, échelle, but d'acquisition et mise à jour temporelle dont l'objectif est de décrire le territoire de façon la plus détaillée possible (Tableau 1).
En particulier, la couche de données de l'utilisation du sol décrit plus en détail et en continu le territoire du Piémont suivant 74 classes différentes selon le schéma CORINE Land Cover (Tableau 3).
Toutes les données collectées ont été analysées et organisées dans une base de données géoréférenciée (géodatabase) gérée sur plate-forme PostgreSQL/Postgis (http://www.

TABELLA 1
Strati informativi geografici utilizzati.

TABLEAU 1
Couches de données géographiques utilisées.

Strato informativo / *Couche de données*	**Fonte / *Source***	**Aggiornamento / *Mise à jour***	**Topologia / *Topologie***
Beni culturali / *Biens culturels*	Regione Piemonte – Direzione Programmazione strategica, politiche territoriali ed edilizia / *Région Piémont – Direction de la Programmation stratégique, des politiques territoriales et du bâtiment*	2009	Puntuale / *Point*
Campeggi e strutture turistico-ricreative / *Campings, structures touristiques et centres de loisirs*	Regione Piemonte – Protezione Civile e Sistema Anti Incendi Boschivi (AIB) / *Région Piémont – Protection civile et Système de protection contre les incendies de forêts (AIB)*	2002	Puntuale / *Point*
Centri commerciali e luoghi di aggregazione / *Centres commerciaux et lieux de regroupement*	Regione Piemonte - Osservatorio del commercio / *Région Piémont - Observatoire du commerce*	2010	Puntuale / *Point*
Depuratori / *Épurateurs*	Regione Piemonte – Direzione Agricoltura / *Région Piémont – Direction Agriculture*	2009	Puntuale / *Point*
Discariche / *Décharges*	Regione Piemonte – Direzione Ambiente / *Région Piémont – Direzione Environnement*	2012	Puntuale / *Point*
Forze dell'Ordine, strutture di controllo / *Forces de l'Ordre, structures de contrôle*	Sito internet VVFF Sito internet Carabinieri / *Site Internet VVFF (pompiers)* *Site Internet Carabinieri*	2013	Puntuale / *Point*
Impianti Individuati nell'allegato del D.L. 59/2005 / *Installations définies dans l'annexe du D.L. 59/2005*	Regione Piemonte – Direzione Ambiente / *Région Piémont – Direction Environnement*	2012	Puntuale / *Point*
Insediamenti ospedalieri / *Etablissements hospitaliers*	AReSS Piemonte – Agenzia Regionale per i Servizi Sanitari / *AReSS Piémont – Agence Régionale des Services de Santé*	2010	Puntuale / *Point*
Scuole / *Écoles*	Regione Piemonte – Edilizia Scolastica ed Osservatorio sull'Edilizia Scolastica e sulla Scuola / *Région Piémont – Construction d'écoles et Observatoire de la Construction d'écoles et des écoles*	2014	Puntuale / *Point*
Università / *Universités*	Regione Piemonte – Protezione Civile e Sistema Anti Incendi Boschivi (AIB) / *Région Piémont – Protection civile et Système de protection contre les incendies de forêts (AIB)*	2013	Puntuale / *Point*
Grafo viabilità / *Graphe de viabilité*	Regione Piemonte – Direzione Trasporti / *Région Piémont – Direction Transports*	2013	Lineare / *Ligne*
Grafo ferroviario / *Graphe ferroviaire*	Regione Piemonte – Direzione Trasporti / *Région Piémont – Direction Transports*	2013	Lineare / *Ligne*
Land Cover Piemonte / *Land Cover Piémont*	Regione Piemonte – Direzione Programmazione strategica, politiche territoriali ed edilizia / *Région Piémont – Direction de la Programmation stratégique, des politiques territoriales et du bâtiment*	2010	Poligonale / *Polygone*

Il *geodatabase* spaziale gestisce, oltre alle strutture dati, gli strumenti di analisi delle due componenti: alfanumerica e geografico-geometrica.
Questa gestione dei dati, oltre a migliorare le prestazioni e le politiche di accesso, permette la definizione di viste logiche e di creazione di *query* di interrogazione ripetibili in serie.

La tecnica utilizzata

In analogia a quanto realizzato per la Direttiva Europea 2007/60, le 74 classi dell'uso del suolo sono stati accorpate in quattro classi di danno: D1, D2, D3 e D4.

D1	D2	D3	D4
Corpi Idrici Territori agricoli Territori boscati e ambienti semi-naturali Zone umide	Territori agricoli	Territori agricoli specializzati Territori modellati artificialmente	Territori modellati artificialmente Attività antropiche, residenziali, produttive

La combinazione delle quattro classi di danno e delle tre classi di pericolosità genera la carta del rischio secondo le combinazioni della Tabella 2.

Classi di pericolosità / *Classes de danger*	Classi di danno / *Classes de dommages*			
	D1	D2	D3	D4
L	R1	R1	R2	R2
M	R1	R2	R3	R4
H	R1	R3	R4	R4

TABELLA 2
Tabella pericolosità / danno.

TABLEAU 2
Tableau danger / dommages.

postgresql.org/ et http://postgis.net/) qui permet de bénéficier des données descriptives et de la composante spatiale. La géodatabase spatiale gère, outre les structures de données, les instruments d'analyse des deux composantes alphanumérique et géographique-géométrique. Cette gestion des données, outre à améliorer les prestations et les politiques d'accès, permet de définir les vues logiques et de créer des requêtes d'interrogation récupérables en série.

La technique utilisée

En analogie à ce qui a été réalisé par la Directive Européenne 2007/60, les 74 classes de l'utilisation du sol ont été regroupées en quatre classes de dommages : D1, D2, D3 et D4.

D1	D2	D3	D4
Eaux Territoires agricoles Territoires boisés et environnements semi-naturels Zones humides	Territoires agricoles	Territoires agricoles spécialisés Territoires modelés artificiellement	Territoires modelés artificiellement Activités anthropiques, résidentielles, de production

La combinaison des quatre classes de dommages et des trois classes de danger crée la carte des risques suivant les combinaisons du Tableau 2.

Dalle intersezioni geografiche tra le aree a differente pericolosità con l'uso del suolo oppure il grafo stradale e ferroviario o con gli altri strati informativi puntuali di Tabella 1, è possibile ricavare una classe di rischio secondo quanto descritto in Tabella 2.
Nell'ambito del progetto RISBA è stata scelta l'impostazione del metodo Direttiva Alluvioni, così da arrivare a produrre strati informativi e cartografie omogenee ad altre informazioni realizzate in altri contesti da Regione Piemonte.
Il metodo può essere considerato unico a livello di Autorità di Bacino del Fiume Po, a livello nazionale e, come principi di base, a livello europeo.

I prodotti realizzati

Le elaborazioni hanno portato alla definizione di strati informativi che sono stati successivamente rappresentati in quattro serie cartografiche a scala 1:50.000:

a. carte delle pericolosità da esondazione dovute a rottura degli sbarramenti;
b. carte del rischio per esondazione dovuta a rottura degli sbarramenti: proveniente dall'uso del suolo regionale;
c. carte del rischio per esondazione dovuta a rottura degli sbarramenti: proveniente dal grafo della viabilità e ferroviario e dei bersagli in forma puntuale;
d. carte della distribuzione della popolazione secondo gli scenari di esondazione dovuta a rottura degli sbarramenti.

Nelle immagini di dettaglio è possibile osservare la distribuzione sul territorio dei differenti beni esposti derivati dall'uso del suolo, la viabilità e gli edifici di interesse pubblico e la stima della distribuzione della popolazione (Dati censimento ISTAT 2001).

D'après les intersections géographiques entre les zones de différent danger et l'utilisation du sol, les graphes de viabilité et ferroviaire ou les autres couches de données en point du Tableau 1, on peut déduire une classe de risques selon les descriptions de la Tableau 2.
Dans le cadre du projet RISBA, on a choisi d'appliquer la méthode Directive Inondations pour réaliser des couches de données et des cartographies homogènes, ainsi que d'autres informations à réaliser dans d'autres contextes de la Région Piémont.
La méthode peut être considérée unique au niveau de l'Autorité du Bassin du Fleuve Pô, au niveau national et comme principes de base au niveau européen.

Les produits réalisés

Les élaborations ont abouti à la définition de couches de données successivement représentées en quatre séries cartographiques à une échelle de 1:50 000 :

a. *cartes du danger de crues soudaines dues à la rupture de barrages ;*
b. *cartes des risques de crues soudaines dues à la rupture de barrages provenant de l'utilisation du sol régional ;*
c. *cartes des risques de crues soudaines dues à la rupture de barrages provenant des graphes de viabilité et ferroviaire et des cibles en forme de point ;*
d. *cartes de la distribution de la population suivant les scénarios de crues soudaines dues à la rupture de barrages.*

Dans les images détaillées, on peut observer la distribution sur le territoire des différents biens exposés provenant de l'utilisation du sol, les infrastructures routières et les bâtiments d'intérêt public ainsi que l'estimation de la distribution de la population (Données recensement ISTAT 2001).

Gli strumenti realizzati

La base dati raccolta è già utilizzabile dagli utenti ammessi al geodatabase, ma per facilitare ulteriormente le operazioni di analisi è stato predisposto un *plugin* per *open source* QGIS (http://www.qgis.org/it/site/) che permette:

- di definire gli strati informativi coinvolti;
- il tipo di interazione spaziale che lega gli strati informativi: intersezione, contenimento e contatto;
- formato di output dei risultati.

Le impostazioni dell'utente possono essere salvate in un file di parametri che permetteranno una successiva ripetizione delle operazioni.
La ripetibilità delle funzioni di analisi si rende necessaria al variare dei dati in input: le aree interessate in caso di crollo, la variazione della classe di pericolosità o nuovi e più affidabili dati sulla popolazione o gli usi del suolo.
Oltre allo strumento di analisi e produzione di report, è in fase di realizzazione uno strumento per la raccolta e la validazione di dati geografici e descrittivi in campagna, basato su tecnologia Intramaps ROAM (http://mapsolutions.com.au/mobile-mapping/intramaps-roam.aspx) che permette la creazione di maschere di inserimento e consultazione personalizzate.
Entrambi gli strumenti sono sviluppati secondo il paradigma open source e rilasciati con licenza GPL2.

Les instruments utilisés

La base de données collectées est déjà utilisable par les usagers admis à la géodatabase mais pour faciliter davantage les opérations d'analyse un plugin pour open source QGIS (http://www.qgis.org/it/site/) a été mis en place afin de :

- *définir les couches de données impliquées ;*
- *le type d'interaction spatiale reliant les couches de données : intersection, confinement et contact ;*
- *format en sortie des résultats.*

Les paramètres de l'usager peuvent être enregistrés dans un document de paramètres qui permettront de répéter les opérations successivement.
La répétabilité des fonctions d'analyse est nécessaire chaque fois que les données en entrée changent : les zones intéressées en cas d'effondrement, la variation de la classe de danger, de nouvelles données plus fiables sur la population ou les utilisations du sol.
Outre l'instrument d'analyse et la production de compte rendu, un instrument pour la collecte et la validation de données géographiques et descriptives à la campagne est en cours de réalisation.
Instrument basé sur la technologie Intramaps ROAM (http://mapsolutions.com.au/mobile-mapping/intramaps-roam.aspx) qui permet la création d'écrans d'insertion et une consultation personnalisée.
Les deux instruments sont développés suivant le paradigme open source et délivrés sur licence GPL2.

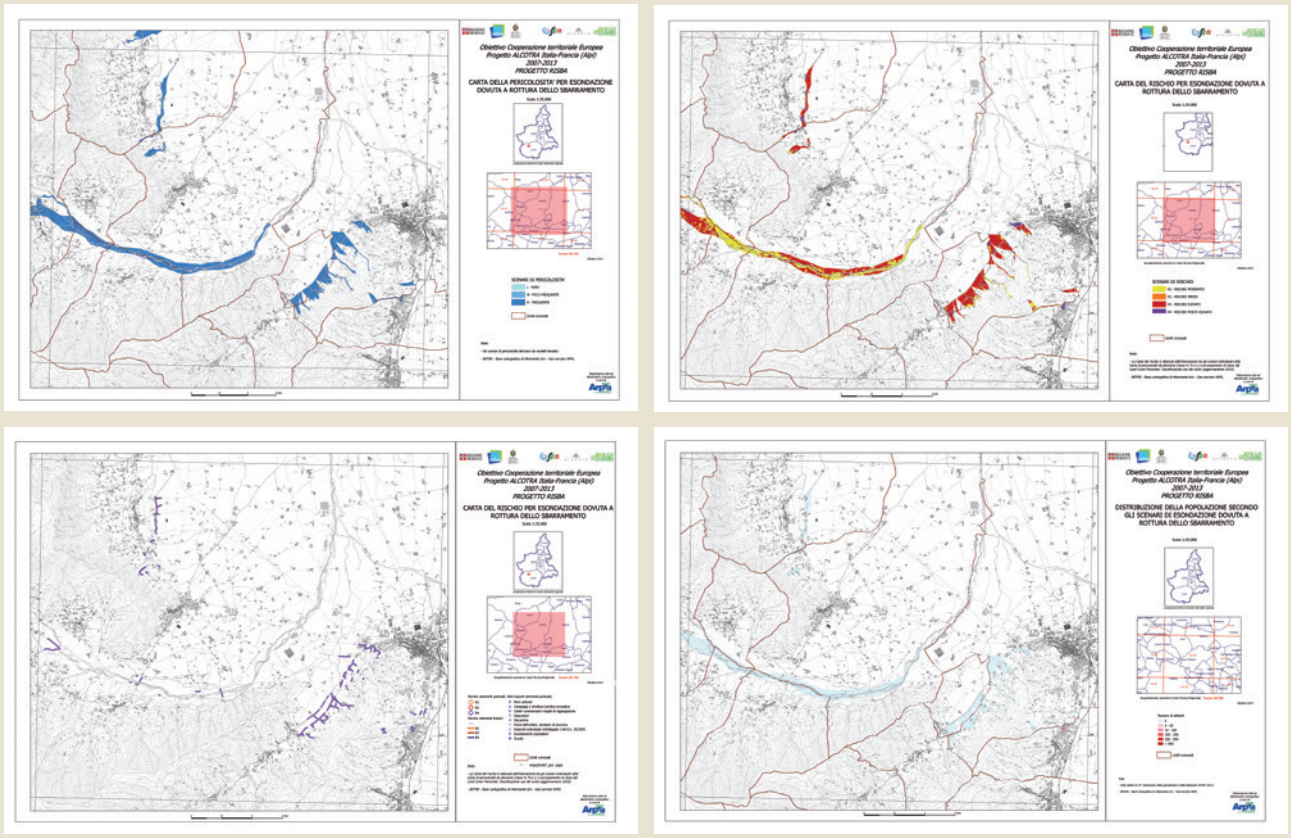


FIGURA 3
Esempio di cartografie realizzate.

FIGURE 3
Example des cartographies effectuées de la feuille 190SE.

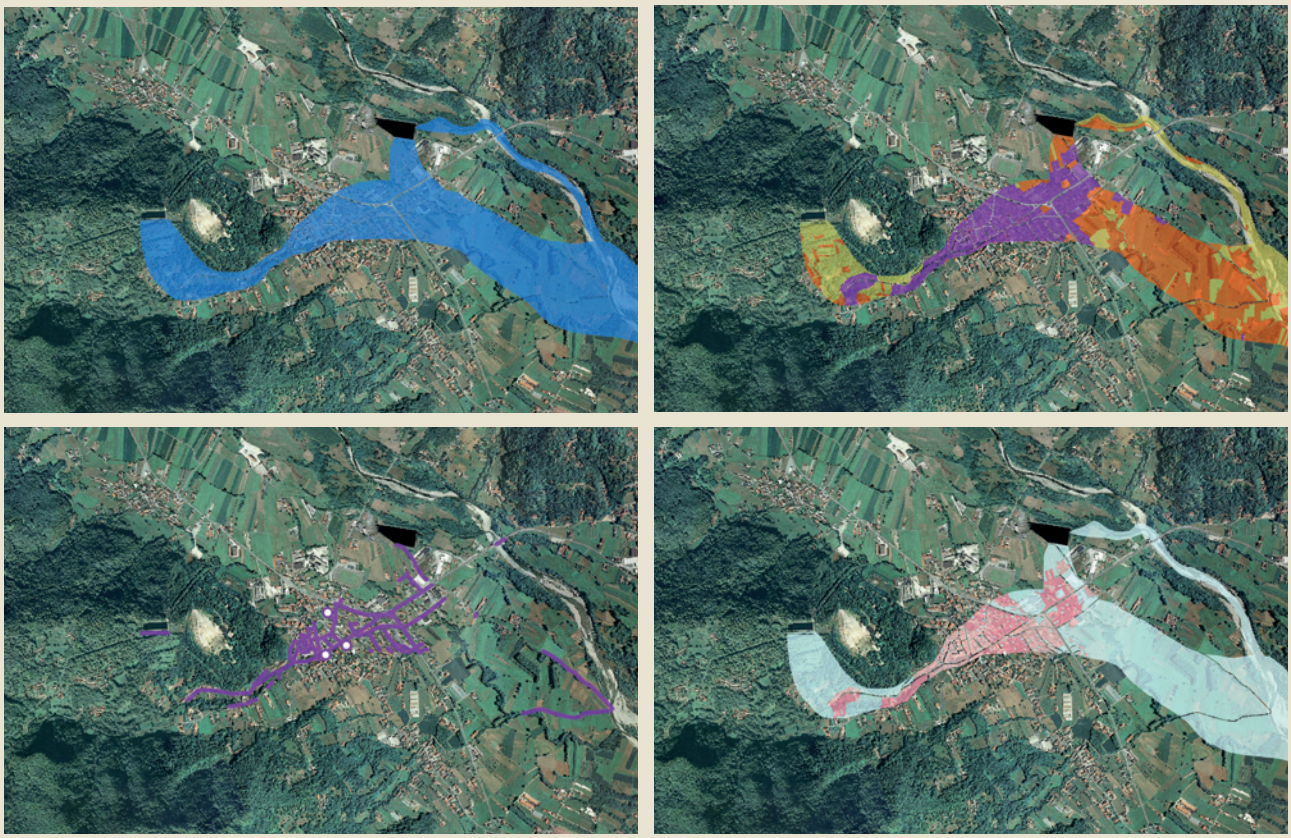
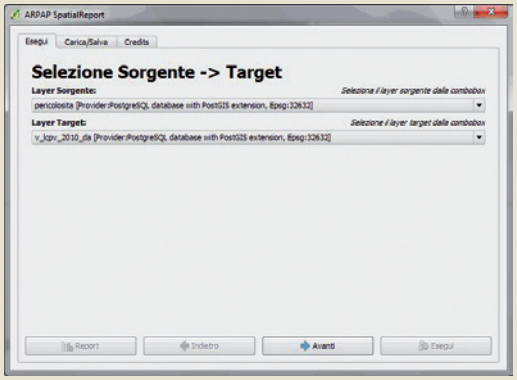
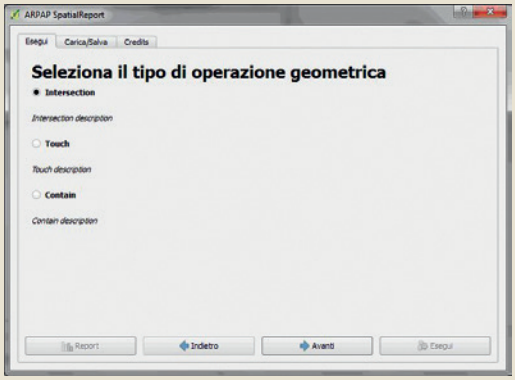


FIGURA 4
Dettagli di una diga.

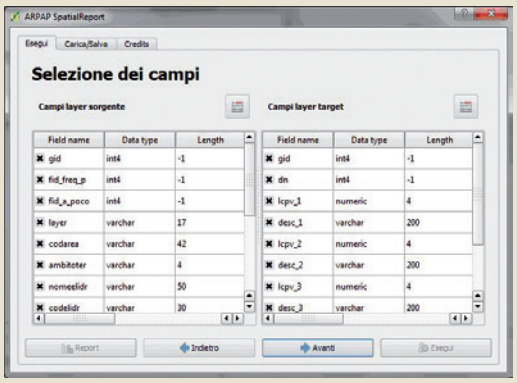
FIGURE 4
Détails d'une digue en province de Cuneo.



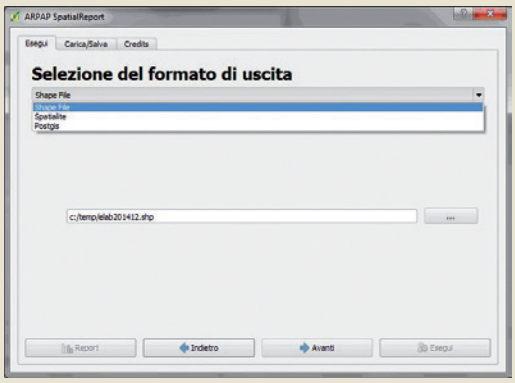
Definizione layer in input / *Définition layer en entrée*



Definizione del tipo di operazione geometrica / *Définition du type d'opération géométrique*



Selezione dei campi desiderati / *Sélection des domaines souhaités*

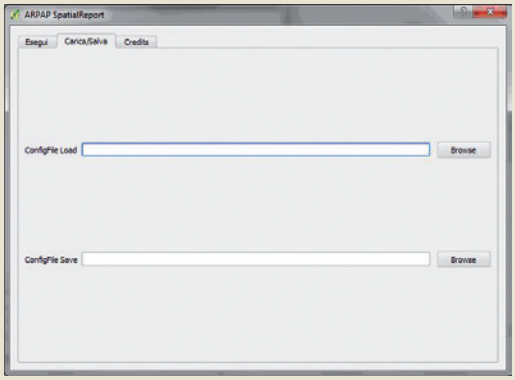


Definizione del formato e del file di output / *Définition du format et du document de sortie*

FIGURA 5
Schermate dello strumento di analisi territoriale. Versione 0.1

FIGURE 5
Ecrans de l'instrument d'analyse territoriale. Version 0.1.

Riepilogo delle impostazioni e esecuzione comandi / *Résumé des paramètres et exécution des commandes*



Salvataggio o recupero delle impostazioni per una successiva elaborazione / *Enregistrement ou récupération pour une élaboration successive*

Riferimenti di progetto / *Références de projet.*

TABELLA 3
Classi di uso del suolo.

CORINE livello				Descrizione			
1	2	3	4	1	2	3	4
1	11	111	1111 1112 1113 1114	Territori modellati artificialmente	Zone urbanizzate	Tessuto urbano continuo	Tessuto urbano continuo e denso, Edifici del Tessuto urbano continuo e denso Tessuto urbano continuo e mediamente denso Edifici del Tessuto urbano continuo e mediamente denso
		112	1121 1122 1123 1124			Tessuto urbano discontinuo	Tessuto urbano discontinuo Edifici del Tessuto urbano discontinuo Tessuto urbano rado Edifici del Tessuto urbano rado (case sparse)
	12	121	1211 1212 1213 1214		Insediamenti produttivi; commerciali; dei servizi pubblici e privati; delle reti e delle aree infrastrutturali	Insediamenti industriali; commerciali; artigianali dei grandi impianti e di servizi pubblici e privati	Zone industriali; commerciali e reti di comunicazione continue e dense Edifci delle Zone industriali; commerciali e reti di comunicazione continue e dense Zone industriali; commerciali e reti di comunicazione discontinue Edifici delle Zone industriali; commerciali e reti di comunicazione discontinue
		122	1221 1222			Reti stradali e ferroviarie e spazi accessori	Reti stradali e spazi accessori Reti ferroviarie e spazi accessori
		124	1240			Aeroporti	Aeroporti
	13	130	1300		Zone estrattive; discariche e cantieri	Aree estrattive; discariche e cantieri indifferenziati	Aree estrattive; discariche e cantieri indifferenziati
		131	1310			Aree estrattive	Aree estrattive
		132	1321			Discariche e depositi di rottami	Discariche e depositi di cave; miniere e industrie
	14	140	1400		Zone verdi artificiali non agricole	Zone verdi artificiali non agricole indifferenziate	Aree verdi artificiali non agricole indifferenziate
		141	1413			Aree verdi urbane	Cimiteri
		142	1422			Aree ricreative e sportive	Impianti sportivi (calcio; atletica; tennis; sci)
2	20	200	2000	Territori agricoli	Seminativi	Territori agricoli indifferenziati	Territori agricoli indifferenziati
	21	210	2101 2102 2103 2104	Territori agricoli	Seminativi	Seminativi indifferenziati	Seminativi semplici in aree indifferenziate Vivai in aree indifferenziate Colture orticole a pieno campo in aree indifferenziate Serre e tunnel in aree indifferenziate
		211	2111			Seminativi in aree non irrigue	Seminativi semplici in aree non irrigue
		212	2121			Seminativi in aree irrigue	Seminativi semplici in aree irrigue
		213	2130			Risaie	Risaie
	22	220	2200		Colture permanenti	Colture permanenti indifferenziate	Colture permanenti indifferenziate
		221	2210			Vigneti	Vigneti
		222	2220 2221 2222 2223 2224 2225			Frutteti e frutti minori	Frutteti e frutti minori indifferenziati Noccioleti Castagneti da frutto Meleti Pescheti Actinidieti
		223	2230			Oliveti	Oliveti
		224	2240 2241			Arboricoltura da legno	Arboricoltura da legno indifferenziata Pioppeti
	23	231	2310		Prati stabili	Prati stabili e pascoli	Prati stabili e pascoli
	24	243	2430		Zone agricole eterogenee		Aree prevalentemente occupate da colture agrarie con presenza di spazi naturali importanti
		244	2440			Aree agroforestali	Aree agroforestali

CORINE niveau				Description			
1	2	3	4	1	2	3	4
1	11	111	1111 1112 1113 1114	Territoires modelés artificiellement	Zones urbanisées	Tissu urbain continu	Tissu urbain continu et dense Bâtiments du tissu urbain continu et dense Tissu urbain continu et moyennement dense Bâtiments du tissu urbain continu et moyennement dense
		112	1121 1122 1123 1124			Tissu urbain discontinu	Tissu urbain discontinu Bâtiments du tissu urbain discontinu Tissu urbain clair Bâtiments du tissu urbain clair (maisons dispersées)
	12	121	1211 1212 1213 1214		Sites de production ; commerciaux ; de services publics et privés ; de réseaux et de secteurs d'infrastructures	Sites industriels, commerciaux, artisanaux des grandes installations et des services publics et privés	Zones industrielles, commerciales et réseaux de communication continus et denses Bâtiments des zones industrielles, commerciales et réseaux de communication continus et denses Zones industrielles, commerciales et réseaux de communication discontinus Bâtiments des zones industrielles, commerciales et réseaux de communication discontinus
		122	1221 1222			Réseaux routiers et ferroviaires et espaces accessoires	Réseaux routiers et espaces accessoires Réseaux ferroviaires et espaces accessoires
		124	1240			Aéroports	Aéroports
	13	130	1300		Zones d'extraction ; décharges et chantiers	Zones d'extraction ; décharges et chantiers indifférenciés	Zones d'extraction ; décharges et chantiers indifférenciés
		131	1310			Zones d'extraction	Zones d'extraction
		132	1321			Décharges et parcs à ferrailles	Décharges et dépôts de carrières ; mines et industries
	14	140	1400		Espaces verts artificiels non agricoles	Espaces verts artificiels non agricoles indifférenciés	Espaces verts artificiels non agricoles indifférenciés
		141	1413			Espaces verts urbains	Cimetières
		142	1422			Espaces de loisirs et sportifs	Installations sportives (football, athlétisme, tennis, ski)
2	20	200	2000	Territoires agricoles	Terres arables	Territoires agricoles indifférenciés	Territoires agricoles indifférenciés
	21	210	2101 2102 2103 2104	Territoires agricoles	Terres arables	Terres arables indifférenciées	Terres arables simples en zones indifférenciées Pépinières en zones indifférenciées Cultures maraîchères de plein champ en zones indifférenciées Serres et tunnels en zones indifférenciées
		211	2111			Terres arables en zones non irriguées	Terres arables simples en zones non irriguées
		212	2121			Terres arables en zones irriguées	Terres arables simples en zones irriguées
		213	2130			Risières	Risières
	22	220	2200		Cultures permanentes	Cultures permanentes indifférenciées	Cultures permanentes indifférenciées
		221	2210			Vignes	Vignes
		222	2220 2221 2222 2223 2224 2225			Vergers et fruits mineurs	Vergers et fruits mineurs indifférenciés Noisetiers Châtaigneraies à vocation fruitière Pommiers Pêchers Kiwis
		223	2230			Oliveraies	Oliveraies
		224	2240 2241			Arboriculture à bois	Arboriculture à bois indifférenciée Peupleraies
	23	231	2310		Prairies permanentes	Prairies permanentes et pâturages	Prairies permanentes et pâturages
	24	243	2430		Zones agricoles hétérogènes		Zones majoritairement occupées par des cultures avec des espaces naturels importants
		244	2440			Zones agroforestières	Zones agroforestières

TABLEAU 3
Classes d'utilisation du sol.

TABELLA 3
Classi di uso del suolo.

CORINE livello				Descrizione			
1	2	3	4	1	2	3	4
3	31	311	3110 3111 3112 3113 3114 3115 3116 3117 3118 3119	Territori boscati e ambienti semi-naturali	Aree boscate	Boschi a prevalenza di latifoglie	Boschi a prevalenza di latifoglie indifferenziati Acero-tiglio-frassinieti Castagneti Robinieti Querco-carpineti Querceti di rovere Querceti di roverella Ostrieti Faggete Formazioni legnose riparie
		312	3120 3121 3122 3123 3124			Boschi a prevalenza di conifere	Boschi a prevalenza di conifere indifferenziati Abetine Pinete Peccete Lariceti e cembrete
		313	3130			Boschi misti di conifere e latifoglie	Boschi misti di conifere e latifoglie
	32	321	3210		Zone caratterizzate da vegetazione arbustiva e/o erbacea	Praterie e brughiere di alta quota	Praterie e brughiere di alta quota
		322	3220			Cespuglieti e arbusteti	Cespuglieti e arbusteti
		324	3240			Aree a vegetazione boschiva e arbustiva in evoluzione	Aree a vegetazione boschiva e arbustiva in evoluzione naturale
	33	330	3300		Zone aperte con vegetazione rada o assente	Zone aperte con vegetazione rada o assente indifferenziate	Zone aperte con vegetazione rada o assente indifferenziate
		331	3310			Spiagge; dune e sabbie; isole fluviali; greti	Spiagge; dune e sabbie; isole fluviali; greti
		332	3320			Rocce nude; falesie; rupi affioramenti	Rocce nude; falesie; rupi affioramenti
		333	3330			Aree con vegetazione rada.	Aree con vegetazione rada
		334	3340			Aree percorse da incendi.	Aree percorse da incendi
4	41	411	4110	Zone umide	Zone umide interne	Paludi	Paludi
		412	4120			Torbiere	Torbiere
5	51	511	5111 5112	Corpi idrici	Acque continentali	Corsi d'acqua	Corpi idrici attivi (fiumi e torrenti) Canali e idrovie
		512	5120 5121			Bacini d'acqua	Bacini d'acqua indifferenziati Bacini d'acqua naturali
			5122				Bacini d'acqua artificiali a destinazione produttiva

CORINE niveau				Description			
1	2	3	4	1	2	3	4
3	31	311	3110 3111 3112 3113 3114 3115 3116 3117 3118 3119	Territoires boisés et milieux semi-naturels	Zones boisées	Forêts où prédominent les feuillus	Forêts où prédominent les feuillus indifférenciés Erables-tilleuls-frênes Châtaigneraies Robiniers Chênes-charmes Chênes Chênes pubescents Charmes-houblons Hêtres Boisés des rives
		312	3120 3121 3122 3123 3124			Forêts où prédominent les conifères	Forêts où prédominent les conifères indifférenciés Sapinières Pinèdes Epicéas Mélèzes et pins cembro
		313	3130			Forêts mixtes de conifères et de feuillus	Forêts mixtes de conifères et de feuillus
	32	321	3210		Zones caractérisées par une végétation arbustive et/ou herbacée	Prairies et landes de haute altitude	Prairies et landes de haute altitude
		322	3220			Arbustes et arbrisseaux	Arbustes et arbrisseaux
		324	3240			Zones à végétation boisée et arbustive en évolution	Zones à végétation boisée et arbustive en évolution naturelle
	33	330	3300		Zones ouvertes avec végétation clairsemée ou absente	Zones ouvertes avec végétation clairsemée ou absente indifférenciées	Zones ouvertes avec végétation clairsemée ou absente indifférenciées
		331	3310			Plages ; dunes et sables ; îles fluviales ; grèves	Plages ; dunes et sables ; îles fluviales ; grèves
		332	3320			Roches nues ; falaises ; affleurements rocheux	Roches nues ; falaises ; affleurements rocheux
		333	3330			Zones avec végétation clairsemée.	Zones avec végétation clairsemée
		334	3340			Zones parcourues d'incendies.	Zones parcourues d'incendies
4	41	411	4110	Zones humides	Zones humide internes	Marais	Marais
		412	4120			Tourbières	Tourbières
5	51	511	5111 5112	Masses d'eau	Eaux continentales	Cours d'eau	Masses d'eau actives (fleuves et torrents) Canaux et voies navigables
		512	5120 5121			Bassins d'eau	Bassins d'eau indifférenciés Bassins d'eau naturels
			5122				Bassins d'eau artificiels destinés à la production

TABLEAU 3
Classes d'utilisation du sol.

CONCLUSIONI / *CONCLUSIONS*

Conclusioni e sviluppi futuri

Il progetto RISBA ha affrontato le problematiche di valutazione, monitoraggio e prevenzione dei rischi correlati agli accumuli idrici nell'area transfrontaliera italo-francese, la prevenzione di eventi calamitosi e la gestione delle emergenze a essi collegati. Il progetto ha permesso di mettere in comunicazione differenti realtà con differenti metodi di lavoro e di approccio. Anche se a pochi chilometri di distanza, con la catena alpina di separazione, i metodi tecnici, di analisi e le differenti esperienze, nonché naturalmente gli apparati legislativi e amministrativi, non risultano uguali. Il progetto RISBA ha permesso di condividere una cultura comune e di unire queste pratiche. La volontà del partenariato del progetto RISBA è stata quella di applicare in modo pragmatico i risultati di tutte le azioni progettuali a invasi di ritenuta idrica nei due Paesi, al fine di valorizzare gli sviluppi tecnici e sfruttarli dal punto di vista operativo. Ogni azione progettuale ha portato a conclusioni e raccomandazioni tecniche utili ai tecnici professionisti (progettisti, collaudatori, ingegneri, geologi, architetti, ecc.), ai tecnici delle Amministrazioni Pubbliche a cui è affidato il compito di autorizzare progetti, controllare le opere e gestire il territorio limitrofo agli invasi di ritenuta. La pubblicità e condivisione al pubblico dei risultati delle differenti azioni progettuali risulta prioritaria in un progetto così fortemente finalizzato alla salvaguardia del territorio. In particolare, la pubblicazione finale è resa disponibile gratuitamente sul sito internet del

Conclusions et développements futurs

Le projet RISBA s'est intéressé à l'analyse, à l'évaluation, à la prévention et à la gestion des risques liés aux barrages dans la zone transfrontalière italo-française. Le projet a permis la mise en commun de bonnes pratiques et de différentes méthodes de travail. Très proches et reliées par la chaîne Alpine, les démarches techniques de gestion des barrages et de leurs risques, les retours d'expérience ainsi que les réglementations et la gestion administrative du contrôle des ouvrages ne sont pas identiques en France et en Italie. Le projet RISBA a permis de partager une culture commune et de mixer ces pratiques. La volonté du partenariat du projet RISBA a été d'appliquer de façon pragmatique les résultats des actions du projet aux barrages dans les deux pays, de manière à mieux apprécier l'intérêt des développements techniques et à mieux les mettre en œuvre ensuite de façon opérationnelle. Chaque action du projet a abouti à des conclusions et des recommandations techniques utiles pour les gestionnaires d'ouvrages, les bureaux d'études et les administrations publiques auxquelles sont confiées les missions d'autoriser les projets, de contrôler les ouvrages et de gérer les territoires sur lesquels les barrages sont implantés. La diffusion auprès du public et le partage des résultats des différentes actions de RISBA apparaissent prioritaires dans un projet ayant la sécurité et le

progetto (http://www.regione.piemonte.it/difesasuolo/risba/progetto.htm) insieme a tutti i rapporti finali di ogni azione progettuale, completi di tutti gli allegati cartografici e tecnici, anch'essi scaricabili gratuitamente all'indirizzo suddetto. Inoltre alcuni risultati di RISBA saranno presentati al convegno ICOLD (International Commission on Large Dams) che si terrà in Norvegia dal 13 al 20 Giugno 2015. Per ciascuna azione del progetto RISBA saranno realizzate numerose pubblicazioni specifiche (manuali e articoli su riviste specializzate, ecc). I due eventi finali del progetto, il Convegno di Torino il 19 febbraio 2015 e quello successivo di Grenoble il 10 marzo 2015, puntano ad ottenere la maggiore pubblicizzazione possibile a tutti coloro che, in differente misura, possono essere interessati da opere idrauliche di ritenuta, sia collinari che in territorio montano. Oltre che risultati tecnici di altissimo livello, necessita ricordare che questo progetto ha consentito di poter creare occupazione, impiegando, oltre che personale tecnico-amministrativo già dipendente di Amministrazioni Pubbliche o Enti di supporto tecnico, anche professionisti del settore tecnico, fornitori di beni e servizi, università e aziende private. In particolare, nel campo della ricerca è stato possibile finanziare dei dipartimenti scientifici, sovvenzionando contratti di ricerca universitaria con tesi di dottorato, nonché stage e tesi di laurea. A tal proposito si desidera ringraziare tutti coloro che a vario titolo (tecnico, scientifico e amministrativo) hanno permesso la realizzazione del progetto, il suo sviluppo e la sua pubblicizzazione. Il progetto RISBA ha permesso infine di costruire tra Francia e Italia un partenariato unito, efficace e operativo, che aspira a proseguire l'ottima esperienza di RISBA in futuri sviluppi che ogni azione progettuale potrebbe avere, nonché in nuove proposte per azioni tecniche diverse, da intraprendere in prospettiva in un futuro progetto europeo.

---

développement du territoire pour objectif principal. À ce titre, la publication finale est disponible sur le site internet du projet, ainsi que les comptes rendus finaux de chaque action et toutes leurs annexes cartographiques et techniques. L'ensemble est téléchargeable gratuitement à l'adresse suivante : http://www.regione.piemonte.it/difesasuolo/risba/progetto.htm. Par ailleurs, certains résultats du projet RISBA seront présentés lors du congrès ICOLD (International Commission on Large Dams) qui se tiendra en Norvège du 13 au 20 juin 2015. Plusieurs publications spécifiques aux actions du projet RISBA seront réalisées dans des ouvrages, des chapitres ouvrages et des revues scientifiques et techniques. Les deux événements finaux du projet, la Conférence de Turin le 19 février 2015 puis la Conférence de Grenoble le 10 mars 2015, visent à informer ceux qui, à des degrés divers, peuvent être concernés par les barrages collinaires et d'altitude. Outre les résultats scientifiques et techniques de haut niveau obtenus, il est nécessaire de rappeler que le projet RISBA a permis de créer des emplois, recrutant du personnel technique et administratif, mais aussi faisant appel aux professionnels du secteur technique, à des prestataires de services et à des entreprises privées. Dans le domaine de la recherche, il a été possible de financer des études scientifiques grâce à la subvention de contrats doctoraux, de stages et de mémoires de master. À ce propos, nous désirons remercier tous ceux qui, à différents titres (technicien, scientifique et administratif) ont contribué à la réalisation du projet, à son développement et à sa diffusion. Enfin, le projet RISBA a permis de construire un partenariat solide, efficace et opérationnel entre la France et l'Italie. Ce partenariat a vocation de poursuivre la formidable synergie mise en œuvre au cours du projet RISBA dans de futurs développements du projet, ainsi que dans de nouvelles actions scientifiques et techniques à entreprendre dans le cadre de prochains programmes européens.

REGIONE PIEMONTE

Région Autonome Vallée d'Aoste
Regione Autonoma Valle d'Aosta

irstea

Il progetto RISBA si integra nel territorio alpino e prealpino e ha consentito di approfondire la conoscenza, la valutazione e la gestione dei rischi legati alla presenza di sbarramenti artificiali in alta quota o collinari. Le esperienze tecniche, le ricerche e gli studi sviluppati rispettivamente dai tre partner sono stati valorizzati attraverso il progetto RISBA, per ottenere la condivisione delle migliori pratiche di progettazione, costruzione, gestione e controllo dei laghi artificiali, ma anche per migliorare la prevenzione dei rischi d'esondazione nei territori a valle degli stessi.

Le projet RISBA s'est intégré dans le contexte du territoire alpin et préalpin. Il a permis d'améliorer la connaissance, l'évaluation et la gestion des risques liés aux barrages collinaires et aux retenues d'altitude. Les expériences techniques, les études et les recherches développées respectivement par les trois partenaires ont été mises à profit à travers le projet RISBA pour proposer des méthodes et des outils destinés à améliorer les pratiques de conception, de réalisation, de gestion et de surveillance des barrages, mais aussi pour améliorer la prévention des risques dans les territoires situés en aval de ces ouvrages.

ISBN 9788894069501