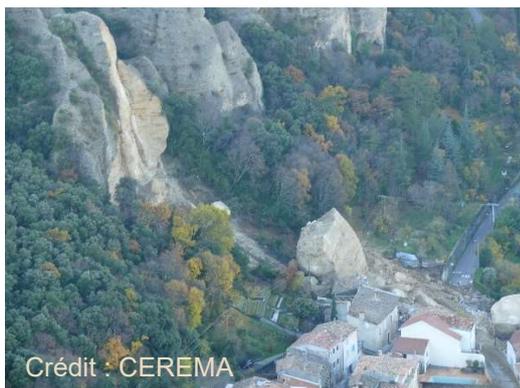


Projet National C2ROP – Edition 2



Chutes de Blocs
Risques Rocheux
Ouvrages de Protection



**Dossier de candidature
au dispositif Projet National**

Période 2022-2025

CONTRIBUTEURS A LA REDACTION

Jean-Pierre Rossetti, Alp'Géorisques
Bastien Colas, BRGM
Clara Levy, BRGM
Clément Galandrin, Can
Pierre Azemard, CEREMA
Nathalie Bérenger, CEREMA
Marianne Chahine, CEREMA
Marie-Aurélié Chanut, CEREMA
Muriel Gasc, CEREMA
Valentin Le Bidan, Département de l'Isère
Anne Lescurier, Département de la Savoie
Roland Mistral, Département de la Savoie
Philippe Gotteland, FNTF
Lucas Meignan, Géolithe
Christophe Delaunay, GINGER CEBTP
Ali Rafiee, GINGER CEBTP
Franck Bourrier, INRAE
Guillaume Chambon, INRAE
Nicolas Eckert, INRAE
Firmin Fontaine, INRAE
Stéphane Lambert, INRAE
François Nicot, INRAE
Isabelle Ousset, INRAE
Eric Larose, ISTerre, Université Grenoble Alpes
Ignacio Olmedo, NGE Fondations
Phillipe Robit, NGE Fondations
Carine Peisser, PARN
Ombelin Brenguier, SAGE
Anne-Gaëlle Ruiz, SNCF Réseau
Yassine Bennani, Terre Armée
Marion Bost, Université Gustave Eiffel
Anne-Sophie Colas, Université Gustave Eiffel
Yannick Fargier, Université Gustave Eiffel
Patrick Joffrin, Université Gustave Eiffel

Cette liste ne recense que les personnes que les personnes ayant participé aux COPILs de montage. De nombreuses autres personnes ont été impliquées dans la rédaction du programme de chaque action, en relation avec les personnes chargées de la structuration des programmes de ces actions. Les organismes impliqués plus largement dans la rédaction et présentés comme partenaires du projet sont présentés au paragraphe 1.3.

AVANT PROPOS

MOT DE ROLAND MISTRAL, PRÉSIDENT DE C2ROP

« En tant que maître d'ouvrage, je doutais de la capacité de production d'un collectif si nombreux et varié dans le cadre du PN C2ROP : nous sommes allés beaucoup plus loin que je ne l'avais imaginé. » C'est par cette phrase que j'ai ouvert l'Assemblée générale de clôture du PN C2ROP, saluant les résultats de terrain et de recherche, et les livrables produits sur l'ensemble des domaines : identification et caractérisation de l'aléa, gestion des risques et aide à la décision, et évaluation des paradés existantes.

Plus de 80% des objectifs initiaux ont été atteints ; 20% ont évolué au cours du projet pour donner autant de livrables non prévus initialement. Ce projet national est considéré comme un succès par ses parties prenantes.

Il a été fondateur d'une dynamique de groupe beaucoup plus large et puissante que celle escomptée. Celle-ci se traduit par la réalisation de nombreux projets collaboratifs développés en parallèle du PN C2ROP. Nous pouvons mentionner en particulier le FUI PRYDIN, le FUI ROCDRO, l'IRICE I-RISK, le R&D Booster SMART PROTECT, le projet FEREC RINA. Le tout représente un équivalent budgétaire d'environ 12 M€, soit un effet levier facteur 2,5 par rapport au Projet National C2ROP doté de quasiment 5 M€. Ce Projet National a su être structurant au-delà des contextes normatifs et réglementaires qui lui sont dévolus.

Mais nous sommes encore au milieu du gué et l'attente de la communauté du risque rocheux est encore forte sur de nombreux sujets, peu ou pas explorés pour l'instant ou restant à consolider.

MOT DE FRANÇOIS NICOT, DIRECTEUR SCIENTIFIQUE DE C2ROP

Il est rare de construire et participer à l'animation d'un projet rassemblant près de 50 partenaires, de provenances aussi diverses.

Mais il est encore plus rare et satisfaisant d'observer de quelle manière est né de cette complexité, qui aurait pu apparaître comme un obstacle, un réseau fort, enthousiaste et entreprenant.

Sans faille, cette impérieuse nécessité de produire une recherche qui soit au service des grandes questions sociétales contemporaines, aura été placée au fronton de ce projet, guidant les actions menées et les arbitrages inévitables qui ont été opérés.

C'est avec fierté qu'on peut évaluer le produit de cette recherche, qui se mesure non seulement en termes de communications scientifiques standard, nombreuses et de premier plan international, mais aussi en termes de livrables opérationnels au service désormais de toute la profession.

Anticiper les risques naturels, dans un contexte de bouleversements climatiques majeurs et d'occupation toujours plus forte du territoire, est un défi de premier plan que seule une communauté structurée et complémentaire dans ses aptitudes et savoir-faire est en capacité de relever. C'est bien cela la force exemplaire de C2ROP.

Parce que ce défi n'est pas celui d'un instant mais s'inscrit dans une démarche au long cours, la dynamique de ce réseau doit être poursuivie durablement, afin d'être toujours en mesure de produire des réponses adaptées et innovantes face aux problématiques sans cesse renouvelées qui caractérisent le champ du risque rocheux dans le contexte climatique que notre société traverse.

En tant que Directeur scientifique, je suis heureux d'ouvrir ce document de présentation, conjointement avec mon collègue Roland Mistral, Président de C2ROP. Il contient la trame des travaux qui seront entrepris, ambitieux et innovants, et servira tout au long des prochaines années comme le fil directeur de notre projet.

Plus que jamais, notre engagement pour accompagner ce projet dans ses champs de compétences est total. De cette aventure humaine dont toute la force est son collectif, il ressortira, nous en sommes certains, les solutions de demain pour une meilleure maîtrise de notre environnement.

Avis du Conseil Scientifique et Technique (CST) réuni le 10 mars 2020

Nous vous relayons un extrait du compte rendu du dernier CST, donnant un avis sur C2ROP – édition 2.

Étaient présents au titre du CST : B. Cambou (EC Lyon), F. Darve (Pdt, INP Grenoble), J.-L. Durville (CGEDD), V. Labiouse (HEIA-FR).

Programme prévisionnel de C2ROP – Edition 2

« Les premières réflexions présentées ont montré un vrai renouvellement thématique comme par exemple avec l'introduction de la transition solide-fluide, de la question du permafrost, ... ou la mise en place d'un observatoire « risques rocheux ». L'ouverture sur de nouveaux laboratoires des départements INSU et INEE du CNRS est également un point essentiel. Naturellement, il faudra conserver et renforcer la richesse du partenariat actuel, regroupant maîtres d'ouvrages, entreprises, bureaux d'études et laboratoires publics et privés. La question – centrale – du financement des recherches tant en interne par les partenaires du Projet National qu'en externe par des sources identifiées ne devra pas être occultée.

Ce programme devrait répondre à trois objectifs, classés ici par ordre d'importance croissante :

- Compléter les travaux sur des thématiques qui n'ont pas abouti dans le cadre de C2ROP, comme par exemple le dimensionnement des merlons et des filets plaqués.
- Elargir à d'autres risques naturels, par un « transfert de technologie », les logiciels de modélisation numérique de même que les approches de conception et de dimensionnement des ouvrages et des structures de protection. Par exemple, les boues et laves torrentielles présentent un degré de complexité supplémentaire par la transition solide-fluide à décrire, des interactions très importantes avec les conditions aux limites et la grande hétérogénéité de la masse en mouvement.
- Prendre en compte les développements très dynamiques en cours sur le plan de la métrologie (nouvelles générations de capteurs, ...) et des techniques d'intelligence artificielle à appliquer (i) au grand nombre de données (les « big data » très présents en risques naturels) et (ii) aux ouvrages et structures de protection (par le machine learning et les clones numériques) »

TABLE DES MATIERES

Table des matières	5
1. La création de C2ROP – édition 2, en synthèse	6
1.1. Problématiques et enjeux.....	6
1.2. Verrous scientifiques et techniques de C2ROP – 2ième édition.....	7
1.3. Partenariat pressenti	8
2. Contexte national et européen de la recherche	10
2.1. Un écosystème en évolution	10
2.2. Les orientations de la recherche depuis 2014.....	11
2.3. L'écosystème projets	13
3. Le programme détaillé de C2ROP – Edition 2	15
3.1. Axe Aléas dans un contexte de changement climatique.....	15
3.2. Axe Risque, acceptabilité et gestion du risque	26
3.3. Axe Ouvrages de protection	37
3.4. Axe Surveillance.....	49
3.5. Mode de fonctionnement, gouvernance et valorisation.....	63
3.5.1. Périmètre du partenariat.....	63
3.5.2. Eléments de Gouvernance et de fonctionnement	63
3.5.3. Analyse de risque, forces et faiblesses	64
3.5.4. Valorisation	65
3.6. Eléments budgétaires.....	66
3.6.1. Coût du projet.....	66
3.6.2. Recettes.....	67
ANNEXE : Synthèse de C2ROP – 1ère édition	68

1. LA CREATION DE C2ROP – EDITION 2, EN SYNTHÈSE

1.1. Problématiques et enjeux

Le programme proposé ci-après met les connaissances et savoir-faire de la recherche au service de l'optimisation de la gestion du risque rocheux. **La collaboration effective entre les sphères académiques et opérationnelles se retrouve dans toutes les actions proposées.**

Les partenaires du projet se sont aussi accordés sur la définition de nouveaux objectifs collectifs qui prennent en compte les problématiques actuelles exprimées dans des contextes évolutifs :

- le besoin de compréhension des bouleversements attendus avec le changement climatique,
- l'accélération exponentielle de la numérisation de la société,
- la volonté croissante de tendre vers un risque minimal et une société résiliente face aux aléas de diverses natures.

Différentes études ont établi ces dernières années un lien entre réchauffement du climat et déstabilisation accélérée des versants. On peut notamment se référer au XIII^{ème} International Symposium on Landslides (22-26 février 2021, Cartagena, Colombie), qui a abordé très largement ce thème. Citons également les nombreuses publications scientifiques établissant sans ambiguïté le lien entre le réchauffement du climat et le retrait du permafrost¹ en lien direct avec la déstabilisation des versants rocheux d'altitude². Cependant, les aléas en termes de nature, fréquence et volume de mouvements de terrains sont encore assez mal évalués par rapport à cette nouvelle donnée. Le programme décrit ci-après se propose d'étudier et quantifier les **effets du changement climatique sur les aléas rocheux et plus largement sur les mouvements de versants.**

Le recul de falaise en zones côtières sera aussi considéré. Le travail effectué permettra de déterminer une méthode globale de qualification et quantification du **recul de trait de côte** en zones de falaises rocheuses.

Au plan numérique, les dernières années ont été marquées par la multiplication de **données** recueillies pour la gestion du risque et des infrastructures. La provenance et le type des données est multiple : études (aléas, géotechniques, structurelles, ...), rapports d'inspection sur l'état des ouvrages, mesures instrumentales de terrain, données annexes (météorologiques, transport, ...), etc.

D'autre part, les gestionnaires font état de leurs difficultés à stocker ces données, à les traiter, à les utiliser de manière croisée pour différents objectifs, voire à les interpréter pour une meilleure gestion du risque rocheux et donc une meilleure résilience des sociétés face aux risques naturels.

De nombreuses actions proposées via le programme ci-après permettront d'avancer sur **la mise en commun de données et leur interfaçage** afin de permettre une **collaboration** effective de l'ensemble de la communauté des risques gravitaires via par exemple l'établissement d'un **observatoire des risques rocheux** ou l'appui au développement de plateformes collaboratives.

Cet axe de travail est aussi complété par l'utilisation de données pour **améliorer la connaissance de l'état de vulnérabilité des structures** face aux risques gravitaires ainsi que pour apporter des éléments permettant de détecter des signes précurseurs de rupture gravitaire.

Dans cette optique de traitement des données, un groupement composé de partenaires de C2ROP travaille à la construction d'un démonstrateur de l'utilisation de l'Intelligence Artificielle pour une

¹ M. Marcer, A. Cicoira, D. Cusicanqui, X. Bodin, T. Echelard, R. Obregon, and P. Schoeneich (2021): Rock glaciers throughout the French Alps accelerated and destabilised since 1990 as air temperatures increased. *Communications Earth & Environment*, Vol. 2(81). doi.org/10.1038/s43247-021-00150-6.

² Ravanel L., Deline P. (2011). Climate influence on rockfalls in high-Alpine steep rockwalls: the North side of the Aiguilles de Chamonix (Mont Blanc massif) since the end of the Little Ice Age. *The Holocene*, 21: 357-365.

Programme

gestion opérationnelle des risques naturels d'origine géologique dans le cadre du projet RINA subventionné par la fondation FEREC. Ce premier travail commun entre la communauté Risques Rocheux et la communauté IA devra permettre de déposer une proposition de projet ANR supportant C2ROP-édition 2 sur le sujet de l'utilisation d'outils basés sur **l'intelligence artificielle au service de la gestion des risques rocheux**.

La digitalisation des approches nécessite également **l'assurance de capter des données fiables** ; ce programme prévoit ainsi **l'analyse de nouvelles méthodes de surveillance**. Les outils et les méthodes associées (nouvelles technologies de capteurs, surveillance satellitaire, nouveaux instruments de mesures, ...) doivent encore être qualifiés afin de déterminer les bonnes pratiques d'utilisation. L'instrumentation, en lien avec l'utilisation et le traitement des données, permettra de renforcer la possibilité de **détecter les signes précurseurs de rupture**.

Pour la gestion du risque rocheux par l'ensemble des maîtres d'ouvrages, collectivités et gestionnaires, le travail de **mise en commun des bonnes pratiques** continuera tout en avançant sur des problématiques importantes pour les gestionnaires telles que la définition et l'utilisation du concept de **risque acceptable** et aussi la quantification économique des **effets indirects des événements sur les infrastructures de transport**. La gestion du risque par l'utilisation des **solutions fondées sur la nature** sera aussi étudiée via la prise en compte du potentiel du couvert forestier. Le réseau sera étendu aux collectivités de zones bâties via l'évaluation des vulnérabilités matérielles et fonctionnelles sur zones bâties.

C2ROP – 2ième édition se structure autour de quatre axes :

- Aléas, dans un contexte de changement climatique
- Risques, acceptabilité et gestion de crises
- Ouvrages de protection, fiabilité et durabilité
- Surveillance, nouvelles technologies et signes précurseurs

1.2. Verrous scientifiques et techniques de C2ROP – 2ième édition

Les enjeux et problématiques sociétaux identifiés au paragraphe 1.2 impliquent la levée de verrous scientifiques et techniques regroupés ci-dessous en catégories :

- **Evolutions temporelles des aléas et enjeux en lien avec les changements climatiques et sociétaux** : l'urbanisation croissante dans des zones à forts aléas liés au changement climatique, associée à une exigence sociétale marquée en matière d'accessibilité, obligent les gestionnaires à anticiper cette évolution en vue d'une meilleure résilience.

Le changement climatique va aussi impacter les peuplements forestiers faisant évoluer leurs fonctions bénéfiques ou pénalisantes. La résilience des peuplements face à cette évolution devra aussi être étudiée.

- **Big data** : recueil et analyse de données, mise en commun et harmonisation des données (quelles qu'elles soient) sont des verrous à lever pour mener à bien les actions.

Pour illustration, la connaissance de la réponse des aléas de versants au changement climatique s'obtiendra en évaluant l'ensemble des données recueillies sur le sujet. Le recueil et l'harmonisation de ces bases de données est une étape indispensable pour mener l'action.

Programme

L'interopérabilité des données dans l'écosystème des risques naturels devra aussi permettre une meilleure gestion intégrée du risque.

- Faire bénéficier au champ des risques naturels le front des connaissances en matière d'**analyse et de modélisation**.

Des analyses statistiques avancées sont nécessaires pour étudier la réponse des aléas au changement climatique dans différents contextes topo-climatiques (altitude vs latitude).

Les modélisations doivent aussi pouvoir atteindre des capacités prédictives dans le cas de propagation des éboulements rocheux de grande ampleur. Cette capacité prédictive est en lien avec les outils de surveillance qui devront être capables de détecter des signes précurseurs de rupture.

Les outils développés devront aussi permettre de coupler des modèles de type aléas, vulnérabilité et coûts, afin d'optimiser à terme la résilience des bâtis et des infrastructures de communication.

- **Connaissance des mécanismes** : la connaissance des mécanismes régissant les aléas et la réponse des ouvrages de protection doit encore être améliorée. La caractérisation de la durabilité des ouvrages, leur vieillissement et leur comportement en conditions opérationnelles sont encore mal cernés.

Aussi, les mécanismes régissant l'aléa de recul en falaise sont aujourd'hui méconnus et leur connaissance permettra d'améliorer significativement la cartographie de l'aléa pour le recul de tête de falaise.

- **Harmonisation des pratiques** : les études trajectographiques en sont un exemple. Avec des paramètres prérequis actuellement différents pour chaque pratique, les Maîtres d'Ouvrages ne peuvent que se reposer sur l'expertise des bureaux d'études et non sur une pratique bien établie.
- **Exploitation des nouvelles techniques de surveillance** : leur utilisation reste peu cadrée actuellement. Il est important pour les utilisateurs d'avoir une connaissance fine de leurs caractéristiques d'utilisation en fonction des contraintes et des objectifs. Notre attention se portera notamment sur les solutions agiles de surveillance et la télédétection spatiale.

Le programme est détaillé dans les prochains paragraphes en fiches-actions. Elles permettent de présenter sous un format-cadre un descriptif du travail qui sera mené, son phasage dans le temps et les résultats (livrables) attendus.

1.3. Partenariat pressenti

Le travail de construction du programme de C2ROP-édition 2 s'est fait collégalement. De nombreuses réunions se sont tenues pour amender et harmoniser les propositions d'actions et prendre en compte les participations de chacun des partenaires pressentis, autant d'occasions d'associer de nouveaux participants et contributeurs.

Dans ce programme, les actions sont regroupées par axes de travail qui sont animées par un binôme, une personne en provenance de la sphère de la recherche et une personne en provenance de la sphère opérationnelle.

Programme

Le programme de travail, tout au long de son élaboration, a été communiqué largement à l'ensemble de la communauté du risque rocheux, via des newsletters C2ROP, le site internet de C2ROP, et de nombreux échanges par mails afin d'associer une communauté large d'acteurs

Partenariat pressenti	<p>3SR, Laboratoire Sols, Solides, Structures, Risques ADRGT, Association pour le Développement des Recherches sur les Glissements de Terrain Afitexinov Alpes Ingé Alp'Géorisques Antea APRR, Autoroutes Paris-Rhin-Rhône Arias Montagne ATMB, Autoroutes et tunnel du Mont-Blanc Aurigami Avaroc BG Ingénieurs Conseils BRGM, Bureau de recherches géologiques et minières Can Cerema CNRS-INSU, Institut National des Sciences de l'Univers Département des Alpes Maritimes Département de l'Isère Département des Hautes Alpes Département de la Savoie Département de la Haute-Savoie EDF, Electricité de France Edytem Egis FNTF, Fédération Nationale des Travaux Publics Fondasol Geolab, Laboratoire de Géographie Physique et Environnementale Géolithe Géop GIA Ingénierie GINGER CEBTP Grenoble Alpes Métropole Hydrokarst INDURA Inexence Ingérop INRAE, Institut national de recherche pour l'agriculture, l'alimentation et l'environnement INRIA, Institut national de recherche en informatique et en automatique INSA Lyon, Institut national des sciences appliquées de Lyon IREX, Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en génie civil ISTerre, Institut des Sciences de la Terre NGE Fondations Métropole Nice Cote d'Azur Mines Paris Tech Myotis Nexeya Ouest Acro PARN, Pôle alpin d'études et de recherche pour la prévention des risques naturels Protection civile Savoie Réseau SNCF Rivalent Alpes SAGE Ingénierie, Société alpine de géotechnique Sercel SFTEH, Syndicat Français des Entreprises de Travail en Hauteur SFTRF, Société Française du Tunnel Routier du Fréjus SITES Systra Terre Armée Université de Franche Comté Université Grenoble Alpes Université Gustave Eiffel Université Savoie Mont Blanc</p>
Espace numérique de construction du projet	<p>https://www.omnispace.fr/pnc2rop/</p>

2. CONTEXTE NATIONAL ET EUROPEEN DE LA RECHERCHE

2.1. Un écosystème en évolution

Les infrastructures routières et ferroviaires, et plus largement les équipements urbains, ont de tout temps représenté un intérêt stratégique vital pour l'essor du pays. En zones escarpées, ces voies de communication sont exposées à des risques gravitaires qui peuvent entraîner leur fermeture occasionnelle ainsi que des dommages significatifs aux biens et aux personnes, avec des répercussions importantes sur les économies locales ou nationales. En effet, la position des massifs montagneux, souvent aux frontières nationales, ainsi que l'augmentation des échanges internationaux par rail et route y induisent la présence d'axes de communications de première importance, empruntés par des milliers de wagons ou camions chaque jour de l'année et par des centaines de milliers d'automobilistes lors des grandes migrations des vacances. L'attrait des zones montagneuses pour l'industrie des loisirs, hivernale, estivale et thermale, ainsi qu'une pression foncière de plus en plus soutenue tendent à accroître les risques encourus par les populations et infrastructures locales. De nombreux enjeux de notre société sont donc désormais installés dans des zones dites « à risque », l'aléa en montagne étant lié aux phénomènes gravitaires rapides, par exemple les avalanches de neige et chutes de blocs. Face aux risques rocheux, les pouvoirs publics sont encore insuffisamment armés en matière de prévision, de prévention et de gestion de ces phénomènes naturels. A ceci s'ajoute la notion de vulnérabilité des structures et réseaux, face à laquelle les gestionnaires et décideurs attendent des outils encore plus performants.

Dans un contexte durable et avéré de changement climatique, on peut craindre une recrudescence des événements de chutes de blocs, effondrements, éboulements, glissements de terrain (XIII International Symposium on Landslides, 22-26 février 2021, Cartagena, Colombie). D'une part, la limite pluie-neige est remontée en moyenne de 300 mètres au cours des dernières décennies ; et d'autre part la quantité des précipitations est restée constante, se caractérisant par une recrudescence d'événements souvent violents marqués par un impluvium important et intense.

Par conséquent, il est impératif aujourd'hui d'intégrer **l'ensemble des acteurs du domaine** des risques rocheux dans le travail de recherche, afin de poursuivre et renforcer ce qui a été initié dans le cadre de C2ROP – 1^{ère} édition : proposer un cadre de travail et une plateforme de ressources opérationnelles intégrées, traitant à la fois de l'aléa dans un contexte de changement climatique (quantification, détection, prévision), de la vulnérabilité des enjeux (structures, ouvrages), et de la gestion du risque au travers notamment d'ouvrages spécifiques de protection, permanents ou temporaires (dimensionnement, efficacité, sureté, vieillissement). Des travaux dans ces domaines ont déjà été menés dans le cadre de C2ROP – 1^{ère} édition (voir en annexe), mais ils ne constituent qu'une couverture parcellaire du champ et le programme soumis propose de les compléter. Aujourd'hui, on remarque au niveau national et notamment en milieu alpin, une forte mobilisation des ingénieurs, des politiques et des gestionnaires, face au phénomène de chutes de blocs. Les questionnements qui demeurent, pour les Maîtres d'Ouvrages, les gestionnaires, les praticiens en charge de la gestion des risques rocheux, sont fondamentalement les mêmes indépendamment du territoire montagneux considéré. Actuellement, il ressort très nettement que les collectivités locales appellent à plus d'homogénéité dans les méthodes d'analyse et de diagnostic de l'aléa. De plus, la question de la gestion du patrimoine existant en termes de surveillance, d'entretien, de durée de vie et de réhabilitation reste au cœur des préoccupations de nombreuses collectivités locales.

Rappelons également que la gestion et la protection des infrastructures routières et ferroviaires ont un impact économique au niveau national mais aussi international. L'attribution d'une reconnaissance d'intérêt national offre ainsi la perspective d'ouverture de marchés sur le plan international.

2.2. Les orientations de la recherche depuis 2014

2.2.1. Acquis de C2ROP - 1ère édition

Une synthèse complète du Projet National C2ROP-1^{ère} édition est jointe en annexe à ce document.

Le Projet National C2ROP a participé plus spécifiquement à engager des travaux de recherche opérationnelle sur les points suivants :

- Modélisation multi-échelle et multi-physique du comportement d'escarpements rocheux sous sollicitations climatiques.
- Prise en compte de la nature du sol et de l'existence de peuplements forestiers dans l'analyse trajectographique des chutes de blocs.
- Comportement des structures sous sollicitation multi impacts, capacité résiduelle en termes de tenue et d'énergie absorbée.
- Méthode de dimensionnement analytique simplifiée des ouvrages en complément et/ou en alternative de la modélisation numérique fine.
- Pathologies, durabilité, diagnostic, solutions de réparations.
- Optimisation de la capacité dissipatrice d'énergie des ouvrages.
- Quantification du risque résiduel et évolution sur le cycle de vie des structures de protection.
- Vulnérabilité des infrastructures, physique d'une part et socio-économique et environnementale d'autre part.
- Management du risque rocheux et concepts nouveaux d'analyse.

Dans chacune de ces rubriques, ce discours complémentaire entre l'investigation expérimentale et l'analyse numérique, décliné dans une logique multi-échelle, a été systématiquement mis en œuvre. L'investigation expérimentale a constitué un maillon fondamental et structurant du projet.

L'ancrage très fort du projet national auprès de l'ensemble de la communauté opérationnelle (gestionnaires, maîtres d'ouvrages, maîtres d'œuvre, bureaux d'études, entreprises) a garanti son exigence et sa crédibilité, et sa capacité à supporter des actions de recherche permettant de lever les principaux verrous et donner accès à des outils, méthodes, guides et référentiels techniques, attendus par toute la Profession.

Le caractère opérationnel des travaux menés a trouvé son reflet dans la publication de 10 guides et recommandations, aux éditions du Cerema. Ces guides et recommandations s'articulent autour des trois axes du projet de la manière suivante :

Axe Aléas

- Glossaire du risque rocheux
- Etat de l'art : Caractérisation de l'aléa éboulement

Axe Risques

- Prise en compte des risques rocheux par les Maîtres d'Ouvrage gestionnaires d'infrastructures : Recommandations
- Cahier des charges type pour l'étude de l'aléa éboulement rocheux et la définition des travaux
- Cahier des charges type pour les travaux de protection contre les éboulements rocheux
- Mémento des ouvrages de protection contre les éboulements rocheux : Maintenance et Coûts
- Aide à la formalisation de retours d'expérience à la suite d'un événement rocheux sur infrastructures de transport : Note méthodologique

Axe Parades

- Recommandations pour la conception, le suivi de réalisation et la maintenance des merlons pare blocs
- Guide technique pour les ouvrages déflecteurs
- Guide technique pour la surveillance instrumentale pour la gestion du risque rocheux

2.2.2. La stratégie nationale

En France, la Stratégie nationale de recherche (SNR) « France-Europe 2020 », fortement inspirée de la programmation H2020, insiste sur l'importance d'une recherche-action au service de la réduction des catastrophes par une meilleure gestion des risques naturels. Ce thème apparaît dans 3 des 40 orientations prioritaires retenues : « l'évaluation et la maîtrise du risque climatique et environnemental », « l'intégration et la résilience des infrastructures et des réseaux urbains » et « l'approche intégrée de la gestion de crise et le traitement en temps réel de données hybrides et multi-sources ».

Les thèmes émergents identifiés par les recommandations pour la recherche à l'horizon 2030 sont regroupés en sept grandes orientations, sur lesquelles le programme C2ROP - 2^{nde} édition s'est clairement positionné :

- Les approches multirisques prenant en compte les effets induits et les concomitances ;
C2ROP-édition 2 s'ouvre à la prise en compte des aléas multiples sur les ouvrages de protection mais aussi leur évolution avec le changement climatique dans différents contextes topo-climatiques et la surveillance globale des mouvements de versants. Le travail de la notion d'acceptabilité du risque sera aussi une approche multirisque.
- La gestion intégrée des risques naturels via une approche inter- et transdisciplinaire permettant la capitalisation des connaissances et des approches, et leur mobilisation pour l'action ;
Le programme prévoit l'expérimentation de plateformes collaboratives de gestion du risque et la mise en place d'un observatoire du risque rocheux. Ces deux actions inter et transdisciplinaires permettront d'accélérer la capitalisation des connaissances et des méthodes pour une gestion intégrée du risque rocheux et plus généralement des risques naturels gravitaires.
- La caractérisation des phénomènes extrêmes et des risques : métrique, formalisme et paradigme décisionnel associé au choix des mesures de mitigation ;
De nombreuses actions proposées dans le programme s'attachent à caractériser plus finement des phénomènes liés aux risques gravitaires. Cette caractérisation est toujours associée à un objectif opérationnel (choix des mesures de mitigation, connaissance de la vulnérabilité d'un site ou d'une voie de communication, amélioration de la résilience).
- Les dimensions participatives, collaboratives ou transverses de la recherche, et les questions de partage des connaissances en lien avec les « politiques fondées sur les faits » (evidence-based policy) ;
L'ensemble des actions du programme proposé ont pour base la réalité du terrain et des observations. De même l'ensemble des actions est réalisé avec l'apport d'opérateurs de terrain et de chercheurs dans leur domaine de compétences afin d'améliorer le partage des connaissances.
- Les représentations et comportements face aux risques ;
Cet objectif est plus largement abordé dans l'axe risque et gestion de crise avec des échanges de bonnes pratiques entre Maîtres d'Ouvrages et un travail sur la notion d'acceptabilité du risque et son utilisation.
- L'intégration des données provenant de nouveaux types de capteurs, comme les capteurs citoyens, de même que des archives non conventionnelles (proxies, sources historiques, etc.)
L'axe surveillance prévoit la caractérisation des nouvelles technologies et une action en particulier est centrée sur la détection d'événements par la technique d'edge computing.

Programme

- La capitalisation des résultats de la recherche, et le rôle des retours d'expérience.
La majorité des actions du programme ont pour base des résultats de recherche qu'il s'agit de valoriser de manière opérationnelle. Les Maîtres d'Ouvrages basent aussi leur travail d'échanges de bonnes pratiques sur des retours d'expérience.

Les sujets suivants sont également mis en avant comme recommandations pour la recherche à l'horizon 2030 : la massification des données dans le domaine des risques naturels (**big data**) et l'adaptation d'outils de l'intelligence artificielle de type **machine learning** font émerger des défis en termes de méthodes (traitement des données en temps réel, validation et interopérabilité des bases de données, valeurs extrêmes, descente d'échelle, etc.) et d'infrastructures (stockage à long terme, maintenance, temps de calcul, outils mathématiques adaptés).

Comme indiqué précédemment, un groupement composé de partenaires de C2ROP travaille à la construction d'un démonstrateur de l'utilisation de l'Intelligence Artificielle pour une gestion opérationnelle des risques naturels d'origine géologique dans le cadre du projet RINA subventionné par la fondation FERED. Ce premier travail commun entre la communauté Risques Rocheux et la communauté IA devra permettre de déposer une proposition de projet ANR supportant C2ROP-édition 2 sur le sujet de l'utilisation d'outils basés sur l'intelligence artificielle au service de la gestion des risques rocheux.

Ainsi, nous voyons que l'ensemble du programme de C2ROP-édition 2 a été construit de manière à répondre aux objectifs et thématiques mis en avant pour la recherche nationale en vue d'une meilleure gestion des risques naturels.

2.3. L'écosystème projets

Depuis la création de C2ROP-1^{ère} édition, des projets interreg ont permis d'agréments la connaissance ayant trait à la gestion des risques naturels.

En voici un panorama :

- Alcotra - AD-VITAM : analyse de la vulnérabilité des territoires alpins méditerranéens aux risques naturels (mouvements de terrain) (2017-2020) ; dans lequel est impliqué le BRGM, partenaire de C2ROP
- Alcotra - AdaPT Mont-Blanc, Adaptation de la planification territoriale aux changements climatiques de l'Espace Mont-Blanc (2017-2020) ; dans lequel est impliqué le laboratoire EDYTEM, partenaire du programme à venir de C2ROP
- Alcotra - ART_UP_WEB : Augmenter la résilience de territoire Alcotra en utilisant une plateforme WEB (2016-2017) ; dans lequel est impliqué INRAE, partenaire de C2ROP
- Alcotra - ARTACLIM : Adaptation et Résilience des Territoires Alpains face au Changement Climatique (2017-2020) ; dans lequel est impliqué le PARN, partenaire de C2ROP
- Alcotra – URAMET (2016-2019), Union des radars météorologiques ; ce projet permettra d'abonder les données du travail sur les impacts du changement climatique prévu pour le programme à venir de C2ROP
- Alpine Space - CHEERS: Cultural HEritagE. Risks and Securing activities ; dans lequel est impliqué le BRGM, partenaire de C2ROP
- Alpine Space - GreenRisk4Alps: Development of ecosystem-based approaches for the support of risk management activities in connection with natural hazards and climate change ; dans lequel sont impliqués INRAE et le PARN, partenaires de C2ROP
- Alpine Space - RockTheAlps: Harmonized ROCKfall natural risk and protection forest mapping in the ALPine Space ; dans lequel sont impliqués INRAE, le BRGM et Alp'Géorisques, partenaires de C2ROP
- Poctefa – MOMPA : Monitoring Of land Movements and Protocol Action dans lequel est impliqué le Cerema,

Programme

- Sudoe – RISKCOAST : Développement d'outils de prévention et de gestion des risques géologiques sur le littoral liés au changement climatique dans lequel est impliqué le BRGM et le Cerema

3. LE PROGRAMME DETAILLE DE C2ROP – EDITION 2

3.1. Axe Aléas dans un contexte de changement climatique

L'objectif de l'axe aléa est de pérenniser et mutualiser les résultats obtenus lors de travaux antérieurs par la formalisation de règles de bonnes pratiques dans le cadre de groupes de travail, notamment concernant les études trajectographiques, la quantification et la cartographie de l'aléa résultant. De manière complémentaire, plusieurs enjeux essentiels seront abordés, tels que la construction d'observatoires de l'aléa rocheux, l'étude de l'influence du changement climatique sur l'aléa et la quantification des éboulements rocheux de moyenne et grande ampleur.

3.1.1. Influence du changement climatique sur les aléas

ACC 01: Réponse des chutes de blocs, laves torrentielles et glissements de terrain au changement climatique : évaluation statistique et recommandations pour la pratique dans différents contextes topo-climatiques

Verrous scientifiques et techniques	TRL	Position vis-à-vis de C2ROP	Actions
<ul style="list-style-type: none"> - Mise en commun des données et des REX - Approche multi-aléas - Analyses stat. avancées 	3-6		<ul style="list-style-type: none"> - Nouvelles connaissances dans différents contextes topo-clim. - Recommandations valorisables dans « facteurs clim. aggravants »

Partenaires identifiés : INRAE centre de Grenoble, CNRS INSU, INEE (Isterre, LGP, Géolab, Edytem), Cerema, Membres du club risque-MOAs contributeurs à la BD événementielle C2ROP-INRAE construite durant C2ROP.

Résumé : Sur la base des travaux effectués dans C2ROP, de retours d'expérience européens, de nouvelles analyses statistiques et de groupes de travail, cette action vise à mieux appréhender la réponse des mouvements de versant (chutes de blocs, glissements de terrain, laves torrentielles) au changement climatique. Il en résultera de nouvelles connaissances de même que des recommandations concrètes pour la pratique de l'ingénierie.

Principe/contexte : Différentes études ont établi un lien entre réchauffement du climat et déstabilisation accélérée des versants. Les travaux réalisés dans le massif du Mont-Blanc prouvent ainsi le lien entre la fréquence accrue des écroulements et la fonte accélérée du permafrost. Différentes limites ont cependant été identifiées dans la majorité des études réalisées jusqu'ici : (i) des recherches concentrées sur les parois de haute altitude caractérisées par la présence de permafrost. Les connaissances restent parcellaires à plus basse altitude dans des secteurs où sont situés la majorité des éléments vulnérables, de même que dans les zones de plaine ; (ii) la rareté et le caractère lacunaire des chroniques historiques pluri-centenaires, ce qui ne permet pas de comparer des périodes distinctes d'un point de vue climatique (PAG et période actuelle, par exemple) (iii) une prise en compte insuffisante des complexités induites par les facteurs de contrôle a-climatiques, notamment les évolutions sociétales et écosystémiques des derniers siècles, iv) une compréhension insuffisante des mécanismes physiques en jeu ce qui ne permet pas d'appréhender les évolutions potentielles dans le futur en fonction des évolutions attendues du climat. Approfondir l'évaluation statistique des évolutions des chutes de blocs et autres aléas de versants et de leurs liens avec les évolutions climatiques constitue donc un prérequis indispensable à l'action.

Programme

Confronté à ces évolutions potentiellement rapides mais incertaines du risque lié aux chutes de blocs et plus largement à la déstabilisation des versants, les gestionnaires du risque sont dans une situation difficile pour la prise de décision. C'est d'autant plus vrai que ces évolutions sont potentiellement différentes dans différents contextes topographiques et climatiques, et que leurs conséquences varient en fonction de la nature des enjeux exposés : zones urbanisées, infrastructures routières et ferroviaires, etc. De façon pragmatique, il est donc urgent de pouvoir appréhender, par typologie de mouvement et par contexte (lithologique, hydrologique, morphologique, climatique – montagne ou plaine, ...) les facteurs climatiques prépondérants à considérer.

Le projet C2ROP a initié une analyse de la réponse des chutes de blocs rares au changement climatique, en la distinguant des évolutions induites par d'autres causes, évolutions sociétales interagissant avec l'évolution naturelle des écosystèmes en particulier. L'objectif était la quantification des possibles non-stationnarités en intensité/fréquence afin d'améliorer la cartographie de l'aléa, ce qui a impliqué en premier lieu la constitution de chronologies aussi longues et homogènes que possible. Deux axes de travail ont été menés :

- Le développement d'une base de données à l'échelle alpine de près de 8000 événements avec le concours de l'ensemble des MOAs et son analyse descriptive ;
- Des échantillonnages dendrogéomorphologiques exhaustifs sur deux sites et l'étude approfondie de leurs liens avec la météorologie et la climatologie locale (thèse Robin Mainieri).

Evaluation statistique des liens aléas/climat : Afin de mieux quantifier les évolutions des aléas et leurs liens avec les évolutions climatiques, seront entrepris :

- le croisement des informations fournies par les deux jeux de données rassemblés dans C2ROP et possédant chacun des forces et des faiblesses complémentaires en termes de couverture spatiale et de biais liés aux sources. Il s'agira d'arriver à la meilleure caractérisation possible des liens aléas-climat. Ce travail impliquera notamment de poursuivre la capitalisation de la donnée événementielle au cours de C2ROP-2nde édition. Les données disponibles pour les Alpes Françaises seront enrichies par les données disponibles plus largement sur l'ensemble du territoire français, voire au-delà (données européennes issues du projet RockTheAlps) ;
- L'extension aux laves torrentielles et au glissements de terrain de la démarche de mise à jour des liens aléas/climat et de combinaison entre données grande échelle et dendrogéomorphologie. Afin de conserver un coût raisonnable à l'action on se basera a priori sur les (rares) chronologies déjà existantes et sur l'information riche capitalisée au sein de la BD RTM.

Analyse des mécanismes conduisant aux instabilités dans différents contextes topo-climatiques : En parallèle, afin de mieux pouvoir appréhender les évolutions potentielles des aléas et d'en tirer des conclusions pour la pratique, on cherchera à cerner sur la base de retours d'expériences, par typologie de mouvement et par contexte (lithologique, hydrologique, morphologique, climatique – montagne ou plaine, ...) les facteurs climatiques prépondérants.

Au vu de la multitude de configurations potentielles, il sera convenu au préalable, entre les partenaires, de retenir un certain nombre de typologies jugées les plus représentatives, et/ou les mieux cadrées en termes de connaissances sur les facteurs climatiques induisant le déclenchement des phénomènes. Dans un second temps, en relation avec les scénarios prédictifs de plus en plus affinés et localisés relatifs au changement climatique, il sera estimé l'évolution dans le temps de ces paramètres clés et ainsi les typologies de sites qui seront potentiellement les plus affectées. Il en

Programme

résultera des recommandations pratiques, à usage du Maître d’Ouvrage confronté à son site ponctuel ou linéaire, à risque avéré ou potentiel, afin qu’il puisse connaître voire, le cas échéant, mettre en place des mesures d’adaptation ou de mitigation.

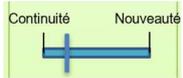
Cet axe du travail sera mené sous la forme de groupes de travail associant les animateurs des actions de REX européen et les acteurs de l’observation.

Résultats scientifiques ou techniques escomptés :

- Liens entre évolution de l’activité des chutes de blocs, des laves torrentielles et des glissements de terrain et l’évolution du climat dans le territoire français avec distinction possible de sous-zones et/ou de bandes d’altitude.
- Recommandations techniques valorisables dans le cadre de l’action « facteurs climatiques aggravants ».

3.1.2. Propagation

APropag_01 : Pratiques communes pour les études trajectographiques et l’exploitation de leurs résultats

Verrous scientifiques et techniques	TRL	Position vis-à-vis de C2ROP	Actions
<ul style="list-style-type: none">- Etat des pratiques- Définition de pratiques communes	7-8		<ul style="list-style-type: none">- Analyses conjointes d’études- Rédaction de recommandations

Partenaires identifiés : INRAE centre de Grenoble, Cerema, Géolithe, Alp Ingé, GINGER-IMSRN, SAGE, BRGM, 3SR, MOA Associés (CD 73, CD38)

Programme de travail : Le benchmark des outils trajectographiques mené dans le cadre de C2ROP a mis en évidence d’importantes disparités en termes d’utilisation des logiciels trajectographiques, de présentation et de justification des résultats de simulation.

Ces disparités sont un obstacle majeur à l’évaluation de la pertinence des études trajectographiques et à l’exploitation de leurs résultats. En 2019, Cerema et RTM ont travaillé à la rédaction d’une première version de recommandations pour la réalisation de simulations trajectographiques à la demande de la DGPR. Il s’agira donc de partager et d’amender ce premier document qui sera une base de travail et de le décliner de façon plus opérationnelle.

Par ailleurs, l’exploitation raisonnée des données issues des simulations trajectographiques aux fins de dimensionnement et de conception des ouvrages de protection, par exemple, se heurte à des difficultés liées aux capacités actuelles des outils de simulation trajectographique.

La détermination des hauteurs et énergies de passage implique le recours à des méthodes non partagées et dont la fiabilité n’est pas démontrée.

A titre d’exemple, on peut citer la définition de ces valeurs entre deux profils lorsque des modèles 2D sont utilisés, ou encore la pertinence des descripteurs statistiques issus de modélisations en 2D ou en 3D (cf. annexe 7 du CCTP études issu de C2ROP). Également, les modèles 3D présentent des limites au voisinage des merlons pare-blocs (cf. Lambert et Bourrier, 2013),

Cette action est ainsi dédiée à l’établissement de bonnes pratiques pour la réalisation d’études trajectographiques et pour l’exploitation des résultats de simulation. Elle est structurée en 3 phases distinctes, avec possible recouvrement partiel.

Phase 1 : Identification des limites et difficultés et état des pratiques

Cette phase est structurée en deux tâches, menées successivement :

1.1 Identification et formalisation de tous les verrous et difficultés rencontrées avec les différentes approches de modélisation (2D/3D, déterministe/stochastique, point matériel/forme réelle...) lors de la production des résultats, de la présentation de l’étude et de l’exploitation des résultats.

1.2 Etablissement de l'état des pratiques actuelles et des solutions mises en œuvre par les BE face à ces difficultés et verrous.

Pour cette phase, il est envisagé d'organiser les travaux à partir d'analyses conjointes d'études de cas divers et représentatifs de la diversité des configurations et des objets des études (cartographie réglementaire, définition de l'aléa, dimensionnement de protection...).

Phase 2 : Evaluation et améliorations des pratiques

2.1 Synthèse et analyse

Cette première tâche vise, sur la base de la synthèse de la phase 1, à évaluer objectivement les différentes solutions mises en œuvre, pour identifier leurs avantages et limitations.

2.2 Améliorations

Cette seconde tâche amènera à proposer une ou des méthodes pertinentes pour chaque limite ou difficulté, en retenant une méthode particulière existante ou en en proposant une nouvelle.

Cette tâche sera menée collectivement en s'appuyant sur l'analyse conduite en tâche 2.1, et dont les résultats seront discutés.

Un temps important sera dédié à cette tâche.

Phase 3 : Rédaction des recommandations

La rédaction des recommandations sera abordée en distinguant les deux volets : 1) conduite et présentation des études, 2) exploitation des résultats. Elles contiendront un état de l'art mentionnant en particulier les limites des outils de simulation, une présentation détaillée des recommandations, et quelques cas d'étude illustratifs.

3.1. Recommandations relatives à la conduite et à la présentation des études

Ces recommandations porteront sur la définition commune et détaillée des éléments devant être présents dans chaque étude. Ces éléments sont liés à :

- la présentation détaillée mais compréhensible des outils trajectographiques utilisés,
- la présentation de preuves de la pertinence des outils pour le cas d'étude (preuves de calibration, par exemple),
- la présentation des données d'entrée, des hypothèses, des limites et des incertitudes associées,
- la présentation des résultats de simulation,
- la présentation d'études de sensibilité des résultats de simulation,
- l'intégration des études trajectographiques dans le cadre général des normes géotechniques, et des éléments de mission de Moe.

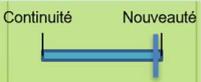
3.2 Recommandations relatives à l'exploitation des résultats

Ces recommandations porteront sur la définition, sur une base technique fondée, des méthodes permettant d'exploiter de façon fiable les données issues de simulations trajectographiques en vue de la conception, du dimensionnement et de la vérification de l'efficacité des ouvrages de protection. Elles concerneront en particulier les merlons et les filets pare-blocs.

D'un point de vue pratique, cette action sera rythmée par des réunions de travail collectif, en particulier pour les tâches 1.1, 1.2 et 2.2. Il est également envisagé d'organiser 2 séminaires de rédaction de 2 jours pour mener à bien la phase 3.

Résultats scientifiques ou techniques escomptés : Recommandations de « bonnes pratiques » pour la réalisation d'études trajectographiques et l'exploitation de leurs résultats

APropag_02 : Outils numériques pour la modélisation des éboulements rocheux de grande ampleur

Verrous scientifiques et techniques	TRL	Position vis-à-vis de C2ROP	Actions
<ul style="list-style-type: none"> - Recensement des modèles et approches - Capacités prédictives 	6-7		<ul style="list-style-type: none"> - Rédaction d'un état de l'art - Modélisation de cas d'études types

Partenaires identifiés : INRAE centre de Grenoble, BRGM, Cerema

Contexte : Cette action s'intéresse à la modélisation de la propagation des éboulements rocheux de volume typiquement supérieur à 1000 m³, à des fins de prédétermination de l'aléa, de conception d'ouvrages de protection, ou de zonage. Sont concernés à la fois les éboulements en masse, mais aussi les évènements de taille intermédiaire mobilisant quelques dizaines de blocs. On s'intéressera également aux phénomènes induits et processus en cascade, comme lorsqu'un éboulement initialement sec se charge en fluide et se transforme en coulée de boue ou en lave torrentielle (cf. par exemple le cas de l'éboulement de Bondo en 2018).

Dans ces différents phénomènes, l'hypothèse de blocs isolés n'est plus valable, et les interactions entre constituants jouent un rôle prépondérant dans la dynamique. D'un point de vue physique, ces interactions peuvent être de nature très variées, en s'opérant de manière directe (friction, collisions) ou à travers un fluide interstitiel (air, eau, boue). En conséquence, le comportement mécanique effectif, ou rhéologie, du matériau peut lui-aussi varier dans une gamme très large selon la teneur en eau, la distribution des tailles des particules, etc. Une même coulée peut également être caractérisée par une forte hétérogénéité spatiale, et/ou connaître des transitions de comportement au cours de sa propagation du fait de processus d'érosion – dépôt ou d'apports en eau.

Face à cette complexité, le développement et la validation d'outils permettant de prédéterminer les caractéristiques des éboulements en masse et des coulées induites (épaisseurs, vitesses, distances de propagation, pressions, etc.) représente un réel défi. La communauté académique est très active sur le sujet, avec de nombreux travaux en cours fondés sur des approches variées (continues, discrètes, couplages continus-discrets). Dans un contexte opérationnel, des approches très simples, reposant notamment sur le concept de ligne d'énergie, restent encore largement usitées. Ces approches peuvent être couplées à des outils SIG pour fournir des prédictions spatialisées. Récemment, on peut également noter une montée en puissance de l'emploi de certains logiciels de modélisation mécanique, suite notamment à des politiques volontaristes de diffusion auprès des acteurs opérationnels (cas notamment de RAMMS). Ces outils, fondés sur des approches continues moyennées dans l'épaisseur et des rhéologies de type granulaire (Coulomb, Voellmy), sont très prometteurs car ils permettent de calculer les caractéristiques de l'écoulement en tous points de topographies complexes. De nombreuses questions restent toutefois posées quant à leurs réelles capacités prédictives, à l'influence des hypothèses de modélisation (hypothèse de couche mince, critères d'arrêt, ...), aux incertitudes associées, et à l'estimation des paramètres d'entrée.

Objectifs : Cette action vise à réaliser un état de l'art des pratiques et des outils en matière de modélisation des éboulements en masse et des phénomènes associés. On mettra en regard les besoins et les attentes opérationnelles, d'une part, et les outils et modèles existants d'autre part. On s'intéressera en particulier à (1) évaluer la capacité des outils à prendre en compte la complexité des processus naturels, et (2) à préciser les limites et conditions d'utilisation des outils en termes de type de phénomènes représentés, de données d'entrées nécessaires, d'informations fournies, etc.

Programme

Si pertinente et techniquement possible, une analyse détaillée des capacités prédictives de quelques outils choisis sera également conduite, par confrontation avec des cas d'étude bien documentés. On privilégiera ici les approches suffisamment validées et susceptibles d'être employées dans les applications opérationnelles.

Ces travaux déboucheront sur la production d'une note méthodologique visant à fournir aux acteurs opérationnels une aide technique dans l'utilisation des outils de modélisation disponibles.

Phasage des travaux : En cohérence avec les objectifs susmentionnés, le programme de travail prévu se déclinera en trois tâches. Les tâches 1 et 2 pourront être menées en parallèle. La tâche 3 est plus prospective et sera menée dans une deuxième phase, en fonction des conclusions des tâches 1 et 2.

Tâche 1 : Recensement des pratiques opérationnelles

Des rencontres et réunions seront organisées avec un certain nombre d'acteurs opérationnels concernés par le domaine afin de recenser leurs pratiques actuelles, les problèmes qu'ils rencontrent dans l'utilisation des outils, et leurs attentes prioritaires en fonction des applications (zonage, dimensionnement d'ouvrages, etc.).

Tâche 2 : Analyse bibliographique

On exploitera la littérature scientifique et technique pour conduire une analyse comparée des différents outils de modélisation actuellement disponibles. Pour chacun d'eux, on rassemblera les éléments permettant d'identifier les approches employées, les domaines d'application, l'existence éventuelle de validations par rapport à des expériences ou à des événements réels, et les procédures de calage des paramètres.

Tâche 3 : Analyse des capacités prédictives des modèles

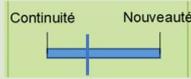
Cette tâche, optionnelle, permettra d'affiner les conclusions de l'état de l'art grâce à la mise en application de quelques outils sur des cas d'étude documentés. On cherchera à évaluer non seulement la fiabilité des prédictions fournies, mais aussi la possibilité d'utiliser ces prédictions en contexte d'applications opérationnelles. Cette tâche pourra nécessiter l'acquisition de certains logiciels (notamment RAMMS) si ceux-ci ne sont pas disponibles chez les partenaires impliqués dans l'action.

Résultats scientifiques ou techniques escomptés : La note méthodologique à destination des acteurs opérationnels (bureaux d'étude, MOA) permettra de synthétiser, à date, un ensemble de recommandations et bonnes pratiques concernant les aspects suivants :

- limites des différents outils existants
- choix de l'outil le plus adapté en fonction du phénomène considéré, des données disponibles, et du compromis coût de calcul versus qualité des résultats
- explicitation des hypothèses sous-jacentes
- stratégies de calage des paramètres et de définition de scénarios en fonction du type d'application
- évaluation des incertitudes associées aux résultats des modèles et prise en compte dans les décisions

3.1.3. Aléa résultant

ARes 01 : Groupe de travail sur la qualification et quantification de l'aléa résultant

Verrous scientifiques et techniques	TRL	Position vis-à-vis de C2ROP	Actions
<ul style="list-style-type: none"> Etat des pratiques actuelles Méconnaissance des pratiques mises en œuvre 	6-8		<ul style="list-style-type: none"> Typologie des objectifs / méthodes d'étude sur la base de REX MOA Rédaction de recommandations sur l'évaluation de l'aléa résultant selon besoins

Partenaires identifiés : Cerema, BRGM, SAGE, INRAE

Objectif :

L'objectif de l'action est d'aboutir à des recommandations sur le type d'étude d'aléa résultant à entreprendre en fonction de l'objectif recherché.

Programme de travail :

Pour mémoire, un plan du futur guide de recommandations avait été proposé en septembre 2018. A la lumière des livrables de C2ROP, il s'agit de refondre partiellement ce plan et de l'adapter à l'objectif fixé.

Des travaux menés à l'international permettent de cadrer le type d'étude à engager et les méthodes envisagées en fonction d'une part de l'échelle de restitution (depuis une échelle régionale à l'échelle de site) et de la destination des études (de l'information au dimensionnement d'ouvrages de protection). Ces travaux proposent également un cadrage des moyens à déployer et données à acquérir / valoriser pour permettre d'aboutir aux objectifs fixés de résultats.

La présente action s'inscrit dans cette logique en s'attachant à :

- ✓ Dresser une typologie des objectifs d'étude sur la base des REX des MOA notamment
- ✓ Proposer et si possible hiérarchiser les préférences de méthodes adaptées aux différents cas référencés.

Il est à noter que différentes approches peuvent être valorisées pour répondre à un même objectif. Le choix retenu peut se faire en fonction des données effectivement disponibles (historique des événements, morphologie, surveillance existante, etc...).

Les approches d'évaluation de l'aléa admises reposent sur une modélisation qualitative / quantitative pour des phénomènes localisés / diffus en prenant en compte les aspects rupture / propagation, en gardant en tête que ces caractérisations ne sont pas exclusives.

Le guide LCPC insiste dans son chapitre introductif (chap. 2) sur la formalisation de la commande pour des études liées aux éboulements rocheux et décrit les indicateurs influençant celle-ci : i) objectifs et niveau d'étude (zonage, parade, surveillance, etc...) ; ii) périmètre de travail ; iii) période d'étude (liée à l'intervention) ; iv) teneur de l'étude (caractérisation d'aléa, dimensionnement d'ouvrage, AMO, etc...).

Organisation des tâches

Le projet se développe autour de 3 grandes tâches :

- T1) Typologie des objectifs de cartographie
- T2) Plan du guide
- T3) Rédaction des recommandations

Contenu des tâches

T1) Typologie des objectifs de qualification de l'aléa rocheux

Cette tâche essentielle s'attachera à décliner les attentes relatives aux études d'aléa rocheux selon différents MOA (gestionnaires, collectivités, services de l'état, etc...) et selon les circonstances. Seront pointées en particulier les valorisations attendues : aménagement, sécurisation, prévention, protection, gestion de crise, etc...

Programme

En fonction de cette typologie les résultats attendus seront présentés de façon la plus exhaustive possible. Ces « résultats » feront l'objet au sein de la tâche T3 de mise en œuvre de « moyens » déclinés suivant différentes approches, conditionnées par des données d'entrée, des méthodes, etc...

T2) Plan du guide

Le plan du guide sera établi par le GT en concertation au travers de réunions associant MOA, BE et organismes publics. Il s'inspirera du guide LCPC, de la proposition réalisée en 2008 dans le cadre de C2ROP par le GT et de développements à venir.

T3) Recommandations

Ce volet insistera sur les méthodes à utiliser de façon préférentielle, en fonction du type d'étude (PPRN, itinéraire, dimensionnement d'ouvrage...). Dans la mesure du possible, un organigramme fonctionnel pourra être proposé pour répondre aux attentes du MOA.

En préalable et en référence à l'état de l'art réalisé dans C2ROP, un rappel des méthodes sera formalisé à l'usage des MOA (aléa diffus localisé, approche quantitative / qualitative).

Ces recommandations s'attacheront en particulier à décrire de façon explicite la qualification de l'aléa résultant à partir de dépôts isolés ou diffus après rupture et propagation et ce en un point isolé (enjeu ponctuel), d'une zone continue ou à l'échelle de tout un territoire.

Les outils et moyens à déployer pour répondre aux objectifs, y compris financiers, pourront être définis et pris en compte dans l'analyse.

Résultats scientifiques ou techniques escomptés : Recommandations sur le type d'étude d'aléa résultant à entreprendre en fonction de l'objectif recherché.

ARes 02 : Cartographie de l'aléa pour le recul de tête de falaise en contexte classique

Verrous scientifiques et techniques	TRL	Position vis-à-vis de C2ROP	Actions
<ul style="list-style-type: none"> Mécanismes régissant l'aléa de recul en falaise 	4-6		<ul style="list-style-type: none"> Etat de l'art, Constitution d'une base de données Analyse des relations en production d'éboulements / taux de recul de falaises note méthodologique sur l'évaluation de l'aléa de recul

Partenaires identifiés : BRGM, Cerema, MOA, BE, Geolithe, ISTERre

Contexte : La caractérisation de l'aléa recul de falaise rocheuse est appréhendée en référence au guide des PPR littoraux, à partir d'une analyse permettant notamment de déterminer le taux moyen annuel de recul. Cependant, pour les falaises rocheuses des méthodes comparant les surfaces entre deux limites amont sont souvent plus pertinentes que des méthodes comparant uniquement les positions de lignes de crête successives, l'évolution se faisant parfois par effondrements très locaux. En outre ces analyses globales ne prennent en général pas en compte les contextes géologiques et géotechniques.

Objectif : L'objectif est de proposer une méthode globale de qualification / quantification de l'aléa recul de falaise en :

Programme

- 1) Analysant par REX les mécanismes régissant les reculs de falaises rocheuses dans des contextes géologiques et morphologiques variés
- 2) Etudiant la quantification du recul à l'échelle de linéaires homogènes, en particulier à partir des taux de production d'éboulements rocheux et des lois fréquence / volumes généralisées à l'échelle des parements (cf. travaux de D. Hantz et thèse Prémaillon, 2018)

La variation de fréquence d'occurrence peut être décrite par une loi puissance de la forme : $n(V) = \alpha V^{-b}$, où V est le volume, $n(V)$ est le nombre d'éboulement par an d'un volume plus grand que V , et α et b sont des constantes. Ces paramètres α et b sont caractéristiques du taux de production d'éboulements d'une zone homogène d'un point de vue de la géologie et de l'héritage tectonique. Pour une comparaison de la valeur de ces coefficients selon différents contextes, voir bibliographie (dont Hantz, RSS2018).

Pour les MOA gestionnaires de réseaux, dont les enjeux sont majoritairement situés en aval de barres rocheuses, ces approches contribueront essentiellement à améliorer la quantification des ruptures en amont des zones circlées. En revanche, d'autres MOA (collectivités notamment) sont très fréquemment confrontés à la prise en compte du recul dans l'aménagement et cette action vise à fournir les clés pour une meilleure prise en compte du risque.

L'étude des facteurs de forçage sera menée en parallèle à ces approches avec en particulier les effets liés à l'anthropisation des secteurs amont avec modifications des contextes hydrogéologiques, avec un "temps de réponse" variable selon les caractéristiques sous-sol et des perturbations du milieu (fuite des réseaux d'eau et d'assainissement, modification des écoulements du sol et du sous-sol). De même une analyse sommaire du rôle des ouvrages de protection pouvant limiter dans une certaine mesure le recul sera proposée.

Même si les plus gros éboulements sont les événements les plus rares, ce sont eux qui contribuent significativement au volume total éboulé et au recul significatif de la tête de falaise, des reculs ponctuels et fréquents peuvent engendrer des dangers (cas des falaises de la côte basque par exemple).

L'évaluation finale de l'aléa de recul peut être basée également sur des méthodes dites de scoring tel que réalisé en Norvège notamment (NGU). Même si ce système de cotation est plus qualitatif que quantitatif et qu'il contient une part de subjectivité (celle de l'expert) ces outils sont valorisés pour proposer des mesures graduées de gestion du risque, le cas échéant associé à des systèmes d'alerte.

Organisation des tâches :

Tâche 1. Etat de l'art / Bibliographie

Revue scientifique sur la problématique et REX pratiques de prise en compte de l'aléa de recul à l'échelle nationale et internationale

Tâche 2. Analyse des mécanismes régissant l'aléa de recul en falaise

A partir des analyses des mécanismes régissant les éboulements rocheux en falaise, l'accent sera porté sur les conséquences en termes de recul des têtes de parement par rapport aux taux de production de chute de blocs. Ce travail impliquera en préalable la définition du recul : distance de recul, tête de falaise, distance de recul. L'analyse portera sur des REX dans des contextes géologiques et morphologiques variés (craies en Normandie, calcarénites en Corse, faciès volcaniques à la Réunion ou aux Antilles, carbonates en contexte alpin notamment, etc...).

Dans ce contexte, la généralisation d'approche quantifiée de type lois de fréquence / magnitude d'évènement sera favorisée. Cependant en parallèle, des méthodes qualitatives (type scoring) pourront être développées.

Tâche 3. Proposition méthodologique

Sur la base des travaux de T1 et T2, il s’agira de proposer une (des) méthode(s) d’évaluation de l’aléa de recul. Cette méthode devra a priori être adaptable et reproductible spatialement et potentiellement déclinable à différentes échelles. D’approche pragmatiques ou élaborées ces méthodes auront pour vocation de préciser les distances probables de recul dans le temps en fonction le cas échéant de facteurs de forçage externes (environnementaux ou anthropiques).

Résultats scientifiques ou techniques escomptés : Les résultats scientifiques escomptés sont en particulier :

- La constitution d’une BDD « recul » actuellement inexistante à l’échelle du territoire national.
- L’établissement de relations en production d’éboulements rocheux et taux de recul de falaises dans des contextes variés
- L’établissement de note méthodologique sur l’évaluation de l’aléa de recul

3.1.4. Observatoire

AObs_01 : Observatoire du risque rocheux

Verrous scientifiques et techniques	TRL	Position vis-à-vis de C2ROP	Actions
<ul style="list-style-type: none"> • Défaut d’harmonisation et d’enrichissement des BDD évènements • Manque de partage de données (évènementielle & instrumentale) 	5-7		<ul style="list-style-type: none"> • Structuration de BDD évènementielle adaptée • Fédération d’acteurs autour de l’observatoire & création d’une plate-forme dédiée • Réflexion sur la création d’un groupe d’intervention post-évènementiel

Partenaires identifiés : BRGM, Cerema, ISTERre, INRAe, MOAs, BE, PARN

Contexte : Le projet national C2ROP a mis en évidence que la prise en compte du risque rocheux (décision) relève de pratiques adaptées aux end-users (gestionnaires de réseaux MOA) alors même que la caractérisation des aléas et des vulnérabilités des enjeux peut être appréhendée de manières homogènes. Le grand nombre d’évènements rocheux, historiques ou non, leur description (tant des ruptures ou des propagations que des impacts) apparaît comme sous valorisée pour développer la connaissance sur le risque, notamment dans la tendance actuelle de quantification des phénomènes. L’action proposée a pour vocation de constituer un véritable observatoire du risque rocheux en fédérant les initiatives développées à différentes échelles par différents acteurs, qu’ils soient institutionnels, issus de la communauté académique (universités, organismes publics de recherche) ou opérationnels (gestionnaires, Maîtres d’ouvrages, Maîtres d’œuvre, bureaux d’ingénierie, entreprises).

Objectifs : Les objectifs principaux de l’observatoire du risque rocheux « ORRoc » sont :

- ✓ D’améliorer et capitaliser la connaissance sur le risque rocheux notamment sur :
 - Les processus de rupture (contexte / déclencheurs, notamment météo) et de propagation
 - Les impacts engendrés qu’ils soient directs (physiques) ou indirects (fonctionnels ou économiques)
- ✓ Développer la mise en réseau d’acteurs membres de la gestion du risque
- ✓ Favoriser la mise à disposition et l’accès aux données évènementielles au travers du partage des données scientifiques ou opérationnelles

Programme

Contenu : L'action C2ROP n'a pas vocation à « faire vivre » l'observatoire mais à l'initier et à le structurer. Le contenu de l'action est structuré en 4 tâches :

T1) Structuration d'une base de données événementielle valorisant, développant et capitalisant les BDD existantes

T2) Fédération d'acteurs de l'observatoire par mise en place d'un réseau de contributeurs et création d'une plate-forme de partage et de mise à disposition des données événementielles

T3) Développement d'un site de partage de suivis instrumentaux sur des sites de référence en concertation étroite avec l'atelier-falaise de l'OMIV

T4) Réflexion sur la création d'un groupe d'intervention post-événementiel garantissant l'acquisition et le partage de données complètes en cas d'évènement rocheux

Organisation des tâches :

T1 visera à la structuration d'une base de données événementielle des phénomènes rocheux. Seront successivement réalisés :

- ✓ Le recensement des données accessibles / disponibles / structurées à différentes échelles (nationales / régionales / locales) à partir notamment de : i) la BDMVT (pm 14500 évènements dont 4300 datés à la journée par ex.) ; ii) la BD-RTM ; iii) les BD de questionnaires MOA ; iv) la BDD RTA compilée dans le cadre de C2ROP ;
- ✓ La réalisation d'une typologie d'éboulements rocheux (prenant en compte les définitions existantes) ;
- ✓ La définition d'une structure SIG de BDD définissant le type de données à consolider (enveloppes et/ou points) ainsi que les champs de BDD communs avec identification de champs de référence (type / localisation zone de départ / propagation / volume total / volume unitaire / date / impacts / etc...) et le cas échéant de champs complémentaires (fragmentation / lithologie / fracturation / hydrogéologie / etc...).

T2 visera à la fédération d'acteurs de l'observatoire avec mise en place d'un réseau de contributeurs autour d'une plate-forme de partage et de mise à disposition des données événementielles :

- ✓ Constitution du réseau partenaire, proposition d'une charte d'adhésion ;
- ✓ Développement d'une plate-forme interactive (web service) pour : i) l'enrichissement et la consolidation de données ; ii) l'interrogation des données via des requêtes spécifiques ;

T3 visera au développement d'un site de partage de suivis instrumentaux sur sites de référence en concertation étroite avec l'atelier-falaise de l'Observatoire Multi-disciplinaire des instabilités de Versants (OMIV. <http://www.ano-omiv.cnrs.fr/>) dont les acquisitions sont à l'heure actuelle focalisées sur le site pilote des falaises du Saint-Eynard (38) pour lequel des mesures de morphologie, d'érosion et de détection sismologique sont associées. Les mesures de l'observatoire seront mises à disposition d'une large communauté scientifique dont les recherches se basent sur la morphologie des falaises (géomécanciens, géologues, géographes, aménageurs, gestionnaires du risque) par le biais de la plateforme développée en T2. Ces mesures doivent permettre de mieux appréhender à l'échelle de sites les facteurs régissant l'aléa rocheux et en particulier les facteurs que sont la température et les apports hydriques.

T4 vise à engager une réflexion sur la création d'un groupe d'intervention post-événementiel rocheux (GIR) garantissant l'acquisition et le partage de données complètes en cas d'évènement rocheux notable. La tâche comprendra en particulier :

- ✓ La définition d'évènement justifiant a priori le déploiement du GIR et les modalités de déploiement du GIR : i) à chaud en appui à la gestion de crise pour une aide à l'évaluation des

Programme

aléas résiduels ; ii) à froid pour la qualification a posteriori des évènements rocheux (ruptures / propagations notamment)

- ✓ Les conditions de mise en commun de moyens et en particulier : i) acquisition in-situ : drone / photogrammétrie / lidar / terrain / etc... et ii) post-traitement des données
- ✓ Partage des acquisitions et des résultats au travers de la plateforme (T3) et de la BDD (T1)

End-users (et acteurs potentiels de l'observatoire)

Acteurs de la gestion des risques rocheux dont en particulier (partenaires C2ROP) :

- ✓ Gestionnaires de réseaux (CD / Métropoles / SNCF / autoroutiers)
- ✓ Collectivités et services de l'Etat en charge de l'aménagement du territoire (Comm Com. / agglo / Métropoles + DDT(M) DREAL METS)
- ✓ Monde académique (universités / INSU / INEE + organismes publics de recherche)
- ✓ BE opérationnels
- ✓ Nécessaire interaction avec les observatoires existants : OMIV (par essence via l'atelier-falaises) mais également l'Observatoire National des Risques Naturels (ONRN) et les observatoires régionaux existants : OCA, ORNM-PACA, etc...)

Résultats scientifiques ou techniques escomptés : Rapport de synthèse. Charte d'observatoire du risque rocheux. Structure de BDD. PF d'échange et partage de données. Protocole d'intervention post-événementiel.

3.2. Axe Risque, acceptabilité et gestion du risque

Cet axe vise à apporter aux maîtres d'ouvrages des outils et/ou documents pratiques pour les assister dans la gestion du risque rocheux, que ce soit pour des infrastructures de transport ou des enjeux bâtis. S'appuyant notamment sur le réseau des maîtres d'ouvrage construit dans le cadre du premier programme C2ROP (une action spécifique sera dédiée à la poursuite de leurs travaux), les travaux de l'axe risque porteront sur :

- l'évaluation de la vulnérabilité des enjeux, tant sur les plans physique et fonctionnel que financier (coûts directs et indirects causés par les chutes de blocs) ;
- l'évaluation quantitative du risque, dans l'objectif d'optimiser les mesures de protection ;
- l'évaluation de la pertinence à intégrer les couverts forestiers dans la panoplie des mesures de gestion du risque ;
- la réflexion sur la notion de risque acceptable par un gestionnaire, un maître d'ouvrage ;
- la gestion collaborative du risque rocheux, par le biais d'une action prospective visant à terme à développer une plateforme internet partagée de capitalisation, mutualisation et modélisation des informations disponibles.

3.2.1. Evaluation des vulnérabilités et analyses coût-bénéfice

RVul_01 : Evaluation des vulnérabilités matérielles et fonctionnelles sur les zones bâties

Verrous scientifiques et techniques	TRL	Position vis-à-vis de C2ROP	Actions
<ul style="list-style-type: none"> • Etablissement de courbes de vulnérabilité / fragilité 	4-5		<ul style="list-style-type: none"> • Synthèse bibliographique • Développements méthodologiques • Outil d'évaluation des vulnérabilités • Recommandations

Programme

Partenaires identifiés : INRAE, BRGM, Grenoble Alpes Métropole, Métropole Nice Côte d'Azur, PARN, CD73, CD38, SNCF-Réseau, Cerema

Contexte, cadre et objectifs : Les résultats des travaux de l'axe Risque du premier programme de C2ROP ont montré que l'évaluation des vulnérabilités est encore très peu traitée dans le domaine des risques gravitaires, ce qui constitue un frein majeur dans le processus d'évaluation des risques.

L'objectif est d'étudier la vulnérabilité à la fois physique et fonctionnelle des enjeux sollicités par des chutes de blocs, y compris au sein de laves torrentielles.

L'objet principal d'étude sera le bâti / les zones bâties, mais l'étude pourra être élargie :

- aux ouvrages de protection béton (type galerie pare-bloc)
- aux infrastructures linéaires (rail/routes), en lien notamment avec l'action « Evaluation économique des coûts directs et indirects causés par un évènement rocheux sur une voie de circulation routière » pour alimenter les données sur les dommages directs.

Une méthodologie d'établissement de courbes de vulnérabilité sera dans un premier temps proposée. Des recommandations en matière de dispositions constructives du bâti et d'aménagement du territoire suivront.

2 axes de travail majeurs seront distingués (avec une priorité de travail sur l'axe 1) :

Axe 1 : vulnérabilité physique (dommages directs)

Travail sur des courbes d'endommagement, évaluation des intensités d'aléa à partir des volumes/vitesses des blocs, en s'appuyant par exemple sur les travaux existants en Suisse ainsi que sur les travaux d'INRAE sur la vulnérabilité du bâti et des ouvrages de protection en béton sollicités par des avalanches ou des crues torrentielles. Il est à noter qu'un groupe de travail, dont fait partie INRAE, est actuellement engagé spécifiquement sur la vulnérabilité du bâti dû aux crues torrentielles (dans le cadre des analyses coûts-bénéfices).

Il est proposé d'établir des courbes de vulnérabilité et/ou de fragilité à l'aide de modèles mécano-fiabilistes. Des modèles numériques de type masse-ressort calés sur des modèles éléments finis pourront être utilisés afin de modéliser le comportement des bâtiments et ouvrages étudiés. Des simulations Monte-Carlo basées sur la propagation des incertitudes liées par exemple aux caractéristiques des matériaux, aux dimensions des structures... permettront ensuite d'obtenir diverses courbes de fragilité pour différentes intensités d'aléa. D'autres méthodes fiabilistes proposées dans le cadre avalancheux par INRAE pourront également être envisagées.

Les modèles développés pourront servir à alimenter l'action R2 (quantification du risque pour le bâti).

Axe 2 : vulnérabilité fonctionnelle / structurelle des zones bâties (dommages indirects) : impact d'un évènement rocheux (respectivement torrentiel) sur l'organisation d'une zone bâtie ; ce travail se fera en lien avec l'action sur l'évaluation économique des dommages indirects, avec traduction en termes de planification / aménagement du territoire.

Tâche 1 : synthèse bibliographique approfondie sur les travaux existants, en France et à l'international (Suisse notamment), sur le risque rocheux (peu de choses) mais d'abord plus largement sur les risques sismiques, avalancheux et torrentiels ; définition plus précise du périmètre de l'action.

Tâche 2 : développements méthodologiques, en parallèle sur les 2 axes

Tâche 3 : recommandations

RVul 02 : Evaluation économique des coûts indirects causés par un évènement rocheux sur une voie de circulation routière

Verrous scientifiques et techniques	TRL	Position vis-à-vis de C2ROP	Actions
<ul style="list-style-type: none"> • Modélisation des flux de circulation • Analyse de vulnérabilité économique 	4-5		<ul style="list-style-type: none"> • Synthèse bibliographique • Rétro-analyse événements • Modélisation flux de circulation • Enquêtes flux biens /personnes • Analyse vulnérabilité activités • Calcul économique coûts indirects • Développement méthodologie

Partenaires identifiés : BRGM, INRAE, Equipe modélisation flux de circulation, MOA, CD38, CD73, Cerema

Objectif : La chute de blocs peut causer des coûts directs (dommages aux biens) et indirects (perturbations économiques sur les territoires). L'optimisation des mesures de protection repose sur la mise en balance des montant d'investissement et d'exploitation des mesures de protection, avec les bénéfices apportés par ces ouvrages en termes de réduction des coûts directs et indirects potentiellement subits par la collectivité en l'absence de protection. Dans ces évaluations économiques du risque, l'estimation des coûts indirects fait souvent défaut, alors même que les montants en jeu peuvent être plus importants que les coûts directs.

L'objectif de l'action proposée est de développer et d'appliquer une méthodologie d'évaluation des coûts indirects causés par la chute de bloc sur les voies de circulation routière.

Le chiffrage des conséquences économiques pour les territoires impactés par une interruption de voirie suite à une chute de bloc suppose de considérer une multitude d'impacts potentiels : pertes de temps pour les usagers, défaut d'approvisionnement des commerces, difficultés de distribution des productions locales, dégradation de l'économie touristique, problèmes d'accès aux services de santé... Il est proposé de développer une méthode participative dans laquelle les acteurs locaux seront mobilisés pour participer à des ateliers d'évaluation globaux (à l'échelle des territoires connectés) et thématiques (à l'échelle des secteurs d'activité impactés).

Il est envisagé d'utiliser le retour d'expérience local de la « crise COVID-19 » concernant le chiffrage des conséquences du confinement pour estimer les conséquences d'un blocage temporaire causé par une chute de bloc. Les analogies entre ces deux phénomènes seront discutées avec les acteurs locaux pour estimer l'opportunité d'utiliser ce REX dans le cadre de l'évaluation des coûts indirects des chutes de bloc.

Tâche 1. Revue de la littérature : La revue de la littérature se focalisera sur les méthodologies existantes pour l'évaluation économique des interruptions de voiries.

Tâche 2. Analyse des REX d'évènements en contexte similaire au cas d'étude : A définir conjointement avec des MOA. Une revue d'évènements historiques permettra de définir des scénarios de perturbation de la circulation

Tâche 3 : modélisation des modifications de flux de circulation des biens et personnes sous différents scénarios de perturbation

Tâche 4 : enquête sur les flux de biens et de personnes (origine, destination, motif)

Programme

Tâche 5 : Identification et caractérisation des activités économiques impactées par la perturbation des flux de circulations

Tâche 6 : Analyse de la vulnérabilité des activités : Il s'agira dans cette tâche de préciser les conséquences des perturbations des flux de biens et de personnes précédemment modélisées sur la création de valeur ajoutée des entreprises. Cette analyse sera réalisée à travers des ateliers avec des représentants des principales typologies d'activités économiques. Les résultats de ces travaux seront extrapolés au reste des territoires concernés.

Tâche 7 : Calcul économique des coûts indirects : Un chiffrage des coûts indirects sera réalisé sur la base des données sectorielles récupérées et des conséquences estimées par les acteurs locaux dans le cadre de la tâche 6.

Tâche 8 : Analyse des résultats : Au-delà du coût de la perturbation économique, l'analyse des résultats se portera sur une distinction de la nature des perturbations et des acteurs impactés. Les résultats seront également mis en perspective d'une approche plus globale type analyse coût-bénéfice qui inclue également les coûts directs de l'inaction et les met en balance avec les coûts de la mise en sécurité.

Tâche 9 : Analyse rétrospective de la méthode et pistes d'amélioration : L'objectif de cette tâche est de porter un regard critique sur la méthode mise en œuvre pour l'améliorer en vue d'une nouvelle application.

Résultats scientifiques ou techniques escomptés : L'approche proposée offrira un cadre méthodologique pour l'évaluation des coûts indirects causés par une interruption de voirie causée par une chute de bloc sur des axes de circulation.

RVul 03 : Modélisation quantitative du risque rocheux pour l'optimisation des mesures de protection

Verrous scientifiques et techniques	TRL	Position vis-à-vis de C2ROP	Actions
<ul style="list-style-type: none"> Couplage modèles aléas / vulnérabilités-coûts Evolution temporelle du risque avec le climat, le couvert forestier, et les enjeux (urbanisation-protection) Optimisation du dimensionnement des ouvrages protection 	2-5		<ul style="list-style-type: none"> Capitalisation données événementielles Formalisation de mesures de risques non-stationnaires Traitement cas concrets Echanges avec réseau MOA

Partenaires identifiés : INRAE centre de Grenoble, Membres du club risque-MOAs contributeurs à la BD événementielle C2ROP-INRAE construite durant C2ROP, Cerema, Geolithe

Résumé : Sur la base des travaux effectués dans C2ROP et dans d'autres projets, cette action vise à développer une approche méthodologique permettant l'optimisation des mesures de protection face au risque rocheux. Pour ce faire, on intégrera dans l'évaluation quantitative du risque l'effet des ouvrages et le niveau de risque acceptable sera choisi par minimisation du coût total. Un effort particulier sera effectué pour prendre en compte les évolutions au cours du temps des différentes composantes du risque (aléa, enjeux, vulnérabilité).

Programme de travail détaillé : Le risque est souvent évalué sur la base de scénarii. Une telle pratique peut avoir des effets indésirables si, par exemple, la vulnérabilité est très forte pour un aléa juste

Programme

supérieur au scénario de référence et/ou si l'incertitude autour du scénario de référence est forte. De tels désagréments peuvent être minorés si le risque, conformément à son expression mathématique, est évalué sur la distribution complète des aléas potentiels plutôt que sur la base d'un (ou quelques) scénarii. La cartographie et le zonage du risque rocheux peut ainsi être conduite de manière robuste via le couplage entre modèles d'aléa et modèles de vulnérabilité/couts.

Dans le cadre de C2ROP, une méthodologie d'évaluation quantitative du risque rocheux pour un cadastre réel et un ensemble d'enjeux linéaires (routes, véhicules, trains, etc.) a été développée (thèse de Manon Farvacque récemment soutenue en janvier 2020). En parallèle ont été traités les cas des zones non encore urbanisées sur la base d'un risque individuel et des mesures de risques alternatives à la moyenne des dommages espérés ont été proposées.

Sur cette base, les objectifs de cette action sont :

- De poursuivre les travaux sur le risque pour le bâti et ses occupants de même que sur les linéaires en y intégrant l'effet des ouvrages et leur optimisation par minimisation des couts ;
- De prendre en compte de façon explicite les changements paysagers et climatiques dans le risque afin de proposer des évaluations du risque intégrant les évolutions au cours du temps des différentes composantes du risque ;

Pour le traitement de cas concrets, ce travail impliquera de poursuivre la capitalisation de la donnée événementielle construite avec le concours des MOAs au cours de C2ROP en lien étroit avec l'action « Réponse des chutes de blocs et des laves torrentielles au changement climatique » que cette base alimente directement.

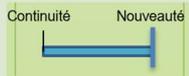
Enfin, bien qu'il s'agisse d'une action à vocation essentiellement méthodologique, des temps d'échange avec le réseau risque MOA permettra des interactions à bénéfice mutuel avec la pratique de l'ingénierie.

Résultats scientifiques ou techniques escomptés :

- Procédures de dimensionnement optimal d'ouvrages de protection pour le risque rocheux ;
- Intégration de différents types de non-stationnarités (évolution dans le temps de différentes composantes du risque) ;
- Conseils aux gestionnaires du risque pour le choix d'un niveau de risque acceptable.

3.2.2. Le couvert forestier en protection

RFor 01 : Prise en compte du potentiel du couvert forestier dans la protection contre les aléas chutes de blocs des infrastructures routières

Verrous scientifiques et techniques	TRL	Position vis-à-vis de C2ROP	Actions
<ul style="list-style-type: none">• Identification des fonctions bénéfiques ou pénalisantes• Analyse résilience peuplements• Analyse dispositifs protection mixtes	7-8		<ul style="list-style-type: none">• Retour d'expériences chantiers / événements• Cartographie départementale forêts de protection

Partenaires identifiés : INRAE, CD73, CD74

Constats :

- La prise en compte du couvert forestier comme contributeur à la maîtrise des aléas a fait débat par le passé dans les démarches de zonages des risques. Si elle a pu se traduire par des zonages

Programme

spécifiques (zones vertes) dans certains PPRN, cette approche n'est à ce jour pas généralisée, quand bien même le code forestier offre cette possibilité.

- Par ailleurs, la fonction de protection jouée par la forêt vis-à-vis des aléas naturels, dont chute de pierres, n'empêche pas encore l'adhésion de tous, généralement par méconnaissances. Pourtant, « la gestion forestière de protection en complémentarité de mesures de génie civil en cas de forts enjeux conduit à une diminution des dépenses totales engendrées » (2011 – projet Interreg forêts de protection »
- Dans le monde entier, et en particulier dans l'espace alpin, les forêts sont ainsi considérées comme des éléments naturels de protection pouvant offrir, en fonction de la nature et de l'intensité des risques générés par les aléas gravitaires, une protection équivalente à celles des techniques et ouvrages de l'ingénierie et du génie civil. Sur les pentes où les forêts sont présentes, la mise en œuvre des mesures techniques pour la réduction des risques naturels est souvent moins chère et peut s'avérer redondante.
- De nombreux chantiers de protection pare-pierre ont été réalisés à l'amont d'enjeux routiers, sans que leur efficacité n'ait fait l'objet de suivi a posteriori. C'est le cas notamment des chantiers réalisés dans le cadre des mesures 8.52 du FEADER.
- Dans un certain nombre de cas, le couvert forestier soumis à des épisodes sanitaires, un abandon de gestion de la part de propriétaires ou les effets du changement climatique, peut avoir des effets négatifs et aggraver, dans une certaine proportion, l'aléa chute de pierres ; ces situations doivent pouvoir être identifiées
- Les aléas naturels (tempête, sécheresse, attaques parasitaires, incendies, avalanches) peuvent mettre à mal les peuplements forestiers. En ce sens, la forêt ne peut être considérée comme un ouvrage de protection mais un élément de protection. Et des précautions sont à prendre pour garantir une continuité de la protection des enjeux.

Propositions :

Sur la base d'un échantillon représentatif de chantiers réalisés ces dernières années aux fins de maîtrise de l'aléa chutes de pierres (dont chantiers pilotes du projet IFP 2010-2012), chantiers purement sylvicoles et/ou d'installation de protections passives (ouvrages souples) à l'amont/aval/dans les peuplements forestiers, et à l'aplomb d'infrastructures routières, un retour d'expériences sera produit aux fins d'illustrer des cas de figures caractéristiques. Seront notamment relevés :

- Sur les peuplements forestiers travaillés comme sur des peuplements voisins non travaillés (témoins) : les caractéristiques dendrométriques des peuplements forestiers avant et après chantiers, les indices silencieux d'une activité de chutes de pierres dans les peuplements, une appréciation de l'efficacité des peuplements dans la maîtrise de l'aléa, ... (démarche GSM)
- Sur les dispositifs : les indices de sollicitations, les travaux de maintenance/réparation, ...
- Concernant les infrastructures routières : les événements ayant atteints les infrastructures, leurs caractéristiques, les dégâts occasionnés, ...

Objectifs :

- Identifier des situations caractéristiques où le couvert forestier va avoir une fonction bénéfique ou, au contraire, pénalisante, dans la maîtrise de l'aléa, à l'aplomb d'infrastructures routières ;
- Intégrer cette fonction dans les choix de gestion des infrastructures routières, de méthodologie de zonage, etc.
- Expertiser la possibilité de dispositifs de protection mixte (ouvrages souples ancrés sur des arbres, ...)
- S'interroger sur les structurations des peuplements et choix d'essences optimales dans un objectif de résilience des peuplements à fonction de protection ;

Programme

- Réaliser une analyse comparative des coûts de protection, par la forêt vs les ouvrages, des infrastructures routières ;
- Comparer le niveau de la fonction de protection entre un peuplement « travaillé » et un peuplement « non travaillé » pour justifier ou non les pratiques développées ces dernières années et valider ou amender les mesures de financement des politiques publiques.
- Réaliser une cartographie départementale indicative des forêts en mesure d'avoir un service écosystémique de protection pare risques-rocheux pour les infrastructures routières.

Résultats scientifiques ou techniques escomptés :

- Approche de la résilience du potentiel du couvert forestier.
- Justifier ou non l'interventionnisme dans ces peuplements.
- Aide à la décision dans les stratégies de protection des infrastructures routières.

3.2.3. Gestion du risque par les maîtres d'ouvrages

RMOA_01 : Réseau Maîtres d'Ouvrages

Verrous scientifiques et techniques	TRL	Position vis-à-vis de C2ROP	Actions
<ul style="list-style-type: none"> • Elargissement géographique • Elargissement thématique • Partage d'expériences et outils • Evolution des pratiques 	6-7		<ul style="list-style-type: none"> • 2 rencontres / an • Approfondissement thématique d'événements

Partenaires identifiés : PARN, Cerema, CD73, CD38, CD06, CD74, EDF, Grenoble Alpes Métropole, Métropole Nice Côte d'Azur, SNCF-RESEAU, BRGM

Programme de travail : Un cycle de travail collaboratif, entre Maîtres d'Ouvrage (MOA) gestionnaires d'infrastructures soumises au risque rocheux, a été initié et renforcé au cours des 4 tranches du PN C2ROP, avec notamment la tenue de rencontres régulières de la communauté.

Forts de la richesse de ces rencontres, les MOA souhaitent poursuivre et renforcer la dynamique engagée, en élargissant progressivement le réseau et en programmant de nouvelles Rencontres MOA. L'élargissement du réseau se fera à la fois en termes i) géographique (objectif de toucher des MOA de tout le territoire), ii) thématique (élargissement aux laves torrentielles / coulées de boue, dans la mesure où la concomitance d'événements impacte souvent les MOA, avec malgré tout un focus privilégié sur le risque rocheux pour approfondir les thématiques abordées lors de C2ROP), iii) de type de MOA (DRIRE, gestionnaire de bâti...)

Ces rencontres seront une occasion privilégiée pour la communauté « Risques naturels », d'une part d'apprendre à se connaître et de partager des expériences et des outils spécifiques, d'autre part de discuter collectivement de problèmes rencontrés, de manques spécifiques identifiés, pour faire évoluer les pratiques. Elles permettront aussi aux MOA de s'approprier des notions et des outils en rapport avec la gestion de risque, encore peu utilisés sur le terrain. Elles seront en particulier l'occasion de réaliser des retours d'expérience sur les guides et recommandations déployés dans le cadre de C2ROP, afin de s'assurer que ces derniers ont trouvé leur public.

Elles devront toucher largement la communauté nationale, et permettre d'asseoir et d'élargir la dynamique fructueuse d'échange et de partage initiée depuis 2016.

Les thèmes à aborder de façon spécifique pourront être :

Programme

- La formalisation des retours d'expérience (sur événements, sur chantiers...) : à chaque rencontre, des MOA présentent des cas traités par leur service, qui sont discutés collectivement pour en faire ressortir les bonnes pratiques et les points à faire évoluer, qui auront vocation à alimenter les réflexions méthodologiques nationales à venir (ex. Surveillance et entretien des ouvrages de protection) ;
- Le concept de risque acceptable : une des premières rencontres pourra être consacrée à un tour d'horizon des pratiques des participants en matière de définition des niveaux de risque acceptable, afin d'alimenter le benchmark de l'action RMOA 02 « risque acceptable » ;
- La prise en compte des vulnérabilités dans l'évaluation du risque : en s'appuyant sur des interventions d'experts ciblés présentant des méthodes d'évaluation qualitatives et quantitatives de la vulnérabilité et du risque identifiées au niveau national et transnational, les discussions entre MOA auront pour objectif de dessiner les grandes lignes d'un outil d'évaluation des vulnérabilités, adapté aux besoins et objectifs spécifiques des MOA, en lien avec les actions de l'axe risque.

Un couplage avec le Club Risque rocheux des Conférences Techniques Interdépartementales des Transports et de l'Aménagement (CoTITA) Méditerranée sera recherché dans la mesure du possible : organisation de rencontres communes, partage des listes de diffusion pour l'envoi des invitations et comptes-rendus...

2 rencontres sont prévues pour chacune des tranches, sur une journée complète, thématiques et lieu à définir en fonction des participants.

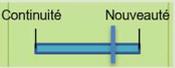
Approfondissement thématique sur les retours d'expérience : en tranche 1, finalisation et valorisation des résultats de l'action REX de C2ROP-1^{ère} édition (basculer l'outil sur un applicatif web, BRGM ou autre).

L'animation du réseau MOA en tranche 1 sera centrée sur les REX pour enrichir et capitaliser ce travail, en particulier avec le test de l'outil par les membres du réseau.

Résultats scientifiques ou techniques escomptés :

- Développement de la dynamique du réseau MOA.
- Livrables tels que décrits dans le programme de travail

RMOA_02 : Risque acceptable

Verrous scientifiques et techniques	TRL	Position vis-à-vis de C2ROP	Actions
<ul style="list-style-type: none"> • Définition d'un cadre d'analyse homogène et partagé • Définition des responsabilités 	1-3		<ul style="list-style-type: none"> • Benchmark • Evaluation seuils de risque acceptable • Analyse incidences des seuils • Formalisation cadre de REX

Partenaires identifiés : PARN, CD73, Géolithe, CD38, Cerema, SNCF-Réseau, Risques&Développement, EDF, UGA-ISTerre, BRGM, Grenoble Alpes Métropole, INRAE

Contexte et enjeux : Le risque acceptable est le niveau de risque qu'un organisme est prêt à supporter au regard de ses obligations légales et de sa propre politique. Pour un Maître d'ouvrage, il s'agit

concrètement du niveau de risque au-dessus duquel il engagera une démarche de mitigation. Le seuil du risque acceptable devrait être défini par les instances décisionnelles. Mais le plus souvent, ce niveau n'est pas clairement défini, aussi bien à l'échelle nationale que locale. Cette situation peut conduire à poursuivre un objectif inatteignable, le risque zéro ou l'absence d'objectif formalisé.

Dans les faits, certains maîtres d'ouvrage proposent, dans leur stratégie de gestion des risques, des niveaux de sécurité à atteindre, qui sont dépendants des aléas, des enjeux à protéger ainsi que des moyens disponibles, financiers et humains.

Il est donc nécessaire de s'accorder collectivement sur un cadre d'analyse avec des lignes directrices cohérentes et homogènes concernant les niveaux de risque acceptable.

Enfin, au regard de la jurisprudence existante, une analyse réglementaire est nécessaire pour traiter la question des responsabilités.

Objectifs : Explorer les différents aspects du risque acceptable :

- Définition du concept ;
- Typologie des enjeux et contextes (contraintes locales...) ;
- Critères d'acceptabilité des risques naturels gravitaires ;
- Principes d'évaluation de seuils, en fonction des types d'enjeux et de contextes ;
- Incidences possibles des critères et seuils.

Tâche 1. Etat de l'art et benchmark des pratiques

1.1. Etat de l'art

L'état de l'art national et international sur le concept de risque acceptable (versus tolérable), les critères d'acceptations et les méthodes de spécification d'un seuil de risque acceptable sera réalisé en explorant les domaines de la gestion des risques naturels (sismique, inondations...) mais également des risques technologiques, financiers, sanitaires...

1.2. Benchmark

Un benchmark des pratiques actuelles (ou retour d'expérience) sera réalisé dans le réseau des partenaires C2ROP (maîtres d'ouvrages, bureaux d'études), notamment via les rencontres du réseau MOA

Tâche 2. Cadre d'analyse du risque acceptable

2.1. Définition du concept

Sur la base de l'état de l'art et du benchmark, la définition du concept de risque acceptable sera adaptée au contexte spécifique des risques naturels gravitaires.

2.2. Critères d'acceptabilité adaptés aux risques gravitaires

Le groupe de travail proposera des critères d'acceptabilité propres au domaine des risques naturels gravitaires.

2.3. Principes d'évaluation de seuils de risque acceptable

Exploration de la méthode/principe ALARP « As low as reasonably possible » : applications possibles au contexte des risques naturels gravitaires.

Réflexion sur des seuils (= « valeurs cibles ») différenciés en fonction des différents types d'enjeux.

Ces réflexions se feront sur la base d'ateliers de concertation entre les différents acteurs (MOA, BE, décideurs), enrichis par des ressources extérieures (sciences humaines et sociales, risk managers...).

Pour le risque humain, des données statistiques récentes seront recherchées auprès de différents organismes (assureurs, INSERM...) concernant les probabilités de décès lié aux activités et accidents de la vie courante, aux risques naturels, aux risques technologiques... afin d'aborder la notion de "mortalité statistique acceptable".

2.4. Rédaction d'un document exploratoire

Ce document opérationnel posera les bases d'un cadre d'analyse pour l'utilisation du concept de risque acceptable, avec ses limites d'utilisation.

Tâche 3. Analyse des incidences

Réflexion opérationnelle sur les incidences techniques, financières, réglementaires... de la définition de critère et de seuils de risque acceptable.

3.1 Incidences techniques

En matière de capacité des ouvrages, de gestion des alertes...

3.2 Incidences financières

En matière d'engagement des MOA, d'assurance (régime CatNat) ...

3.3 Incidences réglementaires

Quelle responsabilité implique la définition de critères et de niveaux de risque acceptable : pour l'Etat, pour les Maîtres d'ouvrage, pour les Bureaux d'Etudes...

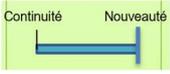
Des compétences spécifiques seront recherchées au-delà des sphères scientifiques et techniques des partenaires C2ROP : assureurs, domaine du droit...

Tâche 4. Evaluation du cadre d'analyse proposé

Il s'agira de formaliser un cadre de REX à destination des utilisateurs des bases méthodologiques (MOA, BE), afin d'en recueillir un bilan à échéance de quelques années et d'adapter au besoin le cadre proposé ultérieurement.

3.2.4. Gestion du risque collaborative

RCollab 01 : Plateforme collaborative de gestion du risque

Verrous scientifiques et techniques	TRL	Position vis-à-vis de C2ROP	Actions
<ul style="list-style-type: none"> Modélisation des informations Interopérabilités des données dans l'écosystème RN Transformation numérique 	4-5		<ul style="list-style-type: none"> Benchmark des solutions existantes Test de plateformes numériques dans le cadre des échanges de C2ROP RoadMap à long terme

Partenaires identifiés : Géolithe, CAN, CD73, INRAE

Contexte et enjeux : Les phénomènes naturels gravitaires se propagent dans les pentes et génèrent des risques au fur et à mesure de l'atteinte des différents types d'enjeux disposés soit dans la pente soit en son pied.

La gestion et la mitigation des risques naturels gravitaire est aujourd'hui réalisée par différents opérateurs (zones bâties, voies de communication...) qui coopèrent principalement dans le cadre de gestion de crise.

Les opérations de prévention, mitigation et protection des risques naturels gravitaires évoluent lentement vers de nouveaux outils numériques et notamment collaboratifs.

A ce jour très peu d'initiatives ont pour objet la capitalisation, la mutualisation et la modélisation des informations disponibles sur un territoire afin de permettre une gestion collaborative efficace (voire coopérative, voire intégrée...) des risques naturels gravitaires.

Des liens seront établis avec le projet national Minnd.

Objectifs : Dans les cas de différents enjeux menacés par les mêmes phénomènes, optimiser la connaissance et la gestion des risques naturels gravitaires en favorisant la coopération entre les gestionnaires des enjeux.

Programme

Stimuler et accompagner la transition numérique des métiers des risques naturels gravitaires par l'exploration, le développement et l'expérimentation d'outils et méthodes innovants.

Tâche 1. Etat de l'art : L'état de l'art international des usages, expérimentations et publications relatifs à cette thématique, sera réalisé. Il s'appuiera notamment sur les pratiques concernant d'autres types de risques (inondation, industriel...).

Tâche 2. Expression des besoins : L'identification des objectifs, des besoins et des contraintes opérationnelles sera réalisée auprès de différents types de gestionnaires de risques naturels gravitaires et de leurs assistants pour aboutir à l'expression des besoins sous forme d'un document générique.

Tâche 3. Benchmark des solutions existantes : Les solutions de plateforme collaboratives adaptées aux risques naturels gravitaires seront comparées suivant différents paramètres :

- Domaine d'application ;
- Limites d'usages
- Fiabilité et continuité de service de la plateforme,
- Expertises nécessaires ;
- Structures réseau
- Gestion des données,
- Souveraineté de la donnée,
- Sécurisation des données,
- Interopérabilité des données,
- Compatibilité avec les différents outils existants
- Capacités d'intégration d'API spécifiques aux différents métiers,
- Ergonomie et convivialité des interfaces (IHM),
- ...

Enfin, une stratégie de mobilisation de ces nouvelles méthodes sera proposée en associant différents gestionnaires...

Tâche 4. Expérimentation de portails collaboratifs de gestion des risques naturels gravitaires : Cette tâche intégrera les choix des expérimentations, l'adaptation et la mise en œuvre des outils et leur exploitation :

- Choix des "use cases",
- Choix de la plateforme expérimentée,
- Compilation et traitement des données,
- Test sur 2 années,

Analyse et synthèse faisant ressortir les bénéfices et inconvénients résultants.

Tâche 5. Expérimentation de portails collaboratifs de communication de C2ROP : L'objet de cette tâche est de proposer des moyens de communication internes et externes modernes.

Elle intégrera les choix des expérimentations, l'adaptation et la mise en œuvre des outils et leur exploitation :

- Choix des "use cases"
- Choix de la plateforme expérimentée
- Compilation et traitement des données
- Test sur 3 années
- Eventuellement pérennisation de la plateforme au-delà de C2ROP-2^{nde} édition, notamment pour publications des résultats C2ROP.

Analyse et synthèse faisant ressortir les bénéfices et inconvénients résultants.

Tâche 6. Synthèse et prospective : Rédaction de la synthèse des travaux et expérimentations réalisés. Rédaction d'un document de prospective et proposition de plan d'action pour le développement de ces outils et méthodes appliqués aux risques naturels gravitaires.

Résultats scientifiques ou techniques escomptés :

- Développement des outils et méthodes spécifiques au domaine des risques naturels gravitaires.
- Prospective pour l'accompagnement de la transition numérique des métiers en liens avec les risques naturels gravitaires.

3.3. Axe Ouvrages de protection

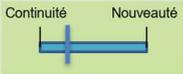
Ce programme de recherche propose d'étudier les ouvrages souples face à leurs pathologies naissantes (perforation, bloc en rotation) et face à des sollicitations concomitantes d'une autre nature (neige, coulée de boue, accumulation de végétaux...).

Le traitement des ancrages de fondation d'ouvrage pare-pierre et/ou paravalanche sera aussi étudié. Le programme prévoit d'étudier leur comportement réel sous sollicitation de cisaillement et de flexion en tête et définira des règles d'usage permettant d'encadrer les pratiques aujourd'hui trop disparates. Concernant les merlons, une approche de dimensionnement sous sollicitations dynamiques sera développée et des méthodes de diagnostic et solutions de réhabilitation seront proposées pour, in fine, produire un guide technique sur la base des recommandations issues de C2ROP.

Les protections d'urgence seront abordées dans le but de proposer un catalogue de concepts de solution, incluant ceux existants, précisant leur domaine d'utilisation et leurs conditions de déploiement.

3.3.1. Ecrans souples

OSouples_WP : Workpackage de travail sur les écrans souples

Verrous scientifiques et techniques	TRL	Position vis-à-vis de C2ROP	Actions
<ul style="list-style-type: none"> • Sensibilité des performances en fonction des positions d'impacts • Pathologie sous impactant en rotation et à hautes vitesses 	5-6		<ul style="list-style-type: none"> • Approche numérique statistique • Essai sur une technologie d'écran différente de C2ROP-1^{ère} édition • Essai sur nappes tendues • Proposition de coefficients de sécurité

Partenaires identifiés : Cerema, UGE, CAN, NGE Fondations, INRAE, GINGER-IMSRN, INSA de Lyon

Rappel des développements réalisés dans le cadre du Projet National C2ROP : Une large campagne d'essais a été conduite avec un écran souple dynamique conçu spécifiquement pour le projet. Des essais sous sollicitations quasi-statiques et dynamiques ont été réalisés sur les composants les plus critiques de ce type d'ouvrage (nappe de filet, dissipateur d'énergie) et sur un ouvrage complet selon différentes configurations. Une dizaine d'essais d'impact a ainsi été réalisée. Des méthodes d'acquisition de données spécifiques ont été mises en place, et une grande quantité de données a été recueillie puis exploitée. La force d'impact utile pour le dimensionnement des composants, le phasage de la déformation de l'ouvrage (de l'impact à l'arrêt du bloc), et la cinématique des dissipateurs d'énergie ont été plus particulièrement étudiés. Des configurations d'impact représentatives des conditions de sollicitation de l'ouvrage dans son contexte de mise en œuvre ont été choisies. Elles ont

Programme

permis de comparer le comportement de l'ouvrage à son comportement dans les configurations de certification prescrites par l'ETAG 027 (ex-EAD 340059-00-0106). Des indicateurs ont été proposés afin de quantifier l'endommagement de l'ouvrage par rapport à la configuration de certification en fonction du type d'impact. Les résultats obtenus mettent en évidence que la configuration définie par l'ETAG 027 n'est pas nécessairement la configuration la plus défavorable.

Sur le plan numérique, des modélisations ont été développées avec ce même ouvrage dans sa configuration théorique. Les données d'entrée concernant les propriétés mécaniques étaient issues de la littérature, des fabricants des matériaux, ou calées à partir des essais quasi-statiques réalisés sur éléments constitutifs (nappe de filet à anneaux, dissipateur d'énergie). Les résultats obtenus ne résultent donc ni d'un ajustement des paramètres d'entrée, ni d'une rétro-analyse. Les simulations réalisées se sont avérées robustes. On observe que la modélisation par éléments discrets permet de bien représenter le comportement dynamique global de l'ouvrage uniquement à partir de la calibration quasi-statique locale de chacun de ses constituants. Les résultats numériques permettent en effet d'appréhender la déformation lors de l'impact, l'allongement et la hauteur résiduels à 10-15 % près. A un niveau plus local, les chemins de diffusion des efforts sont mis en évidence et les temps de mise en tension ou de décharge sont bien reproduits. Au niveau de l'intensité des efforts dans les câbles, les valeurs sont bien estimées dans les câbles non freinés. Pour les câbles freinés, l'intensité des efforts est gouvernée par le seuil de déclenchement des dissipateurs d'énergie qui présente généralement une grande variabilité. La simulation numérique peut donc présenter des capacités prédictives. La variabilité du comportement de l'ouvrage observée expérimentalement lors de la répétition de l'essai MEL renforce l'intérêt d'une modélisation théorique en complément des essais et des approches paramétriques ou stochastiques.

Enfin, concernant les ouvrages pare-blocs de type « Ecrans souple déflecteur », un guide a été rédigé et a permis de proposer une méthode de dimensionnement. Une première campagne expérimentale a été réalisée à la fin du projet afin de préciser la méthode.

Les investigations menées ont donc permis de fortes avancées au niveau des connaissances et des outils. De nombreux travaux et pistes de recherche restent toutefois à investiguer, des limites sur les travaux menés ayant été identifiées :

- La grande quantité de données expérimentales produites a été en partie analysée. L'analyse des données doit être poursuivie et finalisée.
- Le comportement hors certification investigué ne concerne qu'une technologie d'écran souple dynamique avec une seule structure et une seule gamme de composants (nappe de filet, dissipateurs, ...)
- Des dysfonctionnements d'écrans souples dynamiques constatés récemment sur le terrain et dus à des défaillances locales ne sont pas reproductibles avec les modèles numériques actuels.

Programme envisagé dans le cadre du programme proposé : Dans le cadre du programme proposé, l'action consacrée aux ouvrages pare-blocs de type « Ecran souple » sera structurée selon trois Work Packages (WP) :

- WP1 : Etude de la sensibilité des performances évaluées des écrans souples dynamiques aux conditions d'impact
- WP2 : Intégration des aspects dynamiques spécifiques aux composants et leurs interactions pour rendre compte des pathologies des écrans souples dynamiques, constatées sur le terrain (perforation ...)

- WP3 : Ecrans souples Déflecteurs

WP1 Etude de la sensibilité des performances évaluées des écrans souples dynamiques aux conditions d'impact :

Dans le cadre du WP1, on s'intéresse au comportement dynamique global de l'ouvrage. Les ruptures localisées sont traitées dans le WP2.

Dans la suite des résultats obtenus lors du PN C2ROP, les travaux porteront sur :

- L'analyse complète des données des essais réalisés dans le cadre du PN C2ROP et leur interprétation vis-à-vis du comportement dynamique global des écrans souples dynamiques ;
- La réalisation d'une campagne expérimentale complémentaire :
 - Nouvel essai MEL type certification pour obtenir la décélération du bloc lors de l'impact et pouvoir analyser les essais hors certification déjà réalisés, l'accéléromètre utilisé ayant saturé lors des premiers essais,
 - Essai sur un ouvrage dont la dissipation d'énergie est assurée par des dissipateurs d'énergie positionnés aux extrémités de l'ouvrage, contrairement à l'ouvrage testé dans le PN C2ROP pour lequel les dissipateurs étaient répartis dans l'ouvrage,
 - Essai sur un ouvrage avec une nappe plus rigide, type filet haute limite élastique, que la nappe de filets à anneaux de l'ouvrage du PN C2ROP. Il existe en effet une différence significative de comportement à l'échelle du composant qui pourrait potentiellement influencer sur le comportement global de l'ouvrage,
 - Autres essais complémentaires suite à l'analyse des premiers essais (cf. WP2);
- L'utilisation intensive des modèles numériques développés dans le cadre du PN C2ROP au travers d'analyses paramétrique et stochastique. L'objectif est d'étudier le comportement des écrans souples dynamiques vis-à-vis de plusieurs conditions d'impact (position d'impact, vitesse d'impact, angle d'impact, taille du bloc, forme du bloc...) pour en étudier la sensibilité et alimenter le développement d'indicateurs d'endommagement et la définition de coefficients de sécurité vis-à-vis des performances évaluées lors des essais de certification normalisés.

WP2 Intégration des aspects dynamiques spécifiques aux composants et à leurs interactions pour rendre compte des pathologies des écrans souples dynamiques constatées sur le terrain :

Les modèles numériques actuels reproduisant le comportement des écrans souples dynamiques traitent actuellement la dynamique de l'impact via le schéma d'intégration temporelle lors des simulations. Néanmoins, ils ne prennent pas en compte le comportement dynamique propre de chacun des éléments constitutifs de l'ouvrage et leurs diverses interactions possibles. En l'état, les modèles ne permettent donc pas d'identifier ou de reproduire certains dysfonctionnements observés sur le terrain. On peut citer notamment la perforation des nappes de filet constatée lors d'impacts à haute vitesse avec une composante rotationnelle et sans activation des dissipateurs d'énergie. Les impacts à haute vitesse par des blocs de petite ou moyenne taille ou la rotation des blocs ne sont pas pris en compte dans les essais de certification. La diminution de la taille de l'impactant conduit à l'apparition de phénomènes de perforation, connus également sous le terme de « bullet effect ». Des publications sont disponibles dans la littérature [Spadari et al 2011, Hambleton et al 2013, Mentani et al 2016] mais elles sont focalisées sur des ouvrages de très petite énergie comportant des nappes de

Programme

faible résistance (grillages). Ainsi, des recherches sont nécessaires pour une caractérisation à différentes échelles de la perforation des nappes et leur impact sur le comportement global des écrans souples dynamiques.

A cette fin, il est proposé dans ce WorkPackage de développer des modèles dynamiques pour les composants identifiés comme les plus sensibles à la sollicitation dynamique afin de les intégrer aux modélisations globales de l'ouvrage existantes.

Dans le cadre du WP2, les travaux porteront sur :

- Une campagne d'essais dynamiques sur les composants critiques identifiés : par exemple, pour le composant « nappe », des essais d'impact sous conditions de fixation des échantillons très contraintes et conditions d'impact maîtrisées seront réalisés afin d'identifier les processus de perforation. Puis une analyse de la contribution des conditions limites et des géométries des nappes sera ensuite menée. L'étude de l'effet d'une sollicitation hors plan pourra également être envisagée.
- Une campagne d'essais d'impact sur ouvrage complet pour étudier l'influence des hautes vitesses d'impact, d'une composante rotationnelle du bloc lors de l'impact, de la forme du bloc sur le chemin de diffusion des efforts et les interactions entre composants. Cette campagne sera définie en accord avec les essais prévus dans le WP1. Ces derniers ainsi que les essais déjà réalisés dans le PN C2ROP seront également exploités pour étudier le comportement dynamique des composants et leurs interactions.
- Des développements de modèles numériques reproduisant le comportement en dynamique propre des composants étudiés.

WP3 Ecrans souples Déflecteurs :

Concernant les écrans souples déflecteurs, trois développements sont prévus dans le cadre du WP3 :

- L'analyse des essais réalisés sur les écrans souples déflecteurs à la fin du Projet National C2ROP et l'interprétation des résultats en vue de la validation de la méthode de dimensionnement proposée,
- Le retour d'expérience sur l'utilisation du « Guide sur les ouvrages déflecteurs » rédigé dans le cadre du Projet National C2ROP,
- L'étude de faisabilité de l'adaptation des modèles numériques développés pour les écrans souples dynamiques aux écrans souples déflecteurs.

Résultats scientifiques ou techniques escomptés :

Dans le cadre de cette action « Comportement dynamique des écrans souples », les résultats viseront à répondre à deux enjeux :

- Le dimensionnement des ouvrages : quelle utilisation des performances caractéristiques du produit issues des essais de certification CE pour le dimensionnement de l'ouvrage et l'écriture des cahiers des charges techniques dans le cadre des marchés de protection ? Ces travaux permettront de conclure si l'utilisation des performances des écrans pare-blocs à l'aide de coefficients de sécurité est pertinente et de définir ces coefficients.

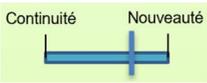
Programme

- La conception des produits : Comment prendre en compte, dans leur conception, la sollicitation réelle des produits *in situ* (haute vitesse de sollicitation, rotation du bloc, forme du bloc...)? Ces travaux permettront d'aider aux choix technologiques vis-à-vis de phénomènes dynamiques particuliers et d'optimiser les performances des produits dans les conditions réelles.

Du point de vue scientifique, les travaux permettront d'améliorer le caractère prédictif des modèles numériques existants en matière de comportement des écrans souples dynamiques à l'impact.

3.3.2. Merlons

OMerlons WP : Réparation, Modélisation, guide

Verrous scientifiques et techniques	TRL	Position vis-à-vis de C2ROP	Actions
<ul style="list-style-type: none"> • Modélisation de la réponse sous impact • Ouvrages endommagés : évaluation et réparation 	5-6		<ul style="list-style-type: none"> • Développement de modèles d'impact (num. et anal.) • Méthode de diagnostic et réingénierie • Essais dynamiques sur matériaux et ouvrages • Rédaction d'un guide technique

Partenaires identifiés : INRAE centre de Grenoble, Géolithe, Cerema, UGE, Terre Armée, 3SR

Programme de travail : Le projet national C2ROP s'est traduit par l'édition des « Recommandation pour la conception, le suivi de réalisation et l'exploitation des dispositifs de protection par merlons pare-blocs ». Il a également permis de réaliser des expérimentations et modélisation d'impacts sur parements de merlons.

Dans ces recommandations, les aspects relatifs au dimensionnement sous sollicitations dynamiques (définition et quantification des actions, combinaisons d'actions, coefficients de sécurité...), à la maintenance, à la réparation et à la réhabilitation ont été abordés très succinctement, de façon délibérée du fait des disponibilités.

Cette action vise à poursuivre ce travail et à combler les manques dans ces recommandations.

Elle est structurée en trois volets, ciblant trois objectifs différents :

- Maintenance et réparation des merlons pare-blocs, avec pour objectif d'aider les gestionnaires dans la maintenance, le diagnostic et la réparation des merlons pare-blocs.
- Modélisation de l'impact sur merlon, avec pour objectif de proposer une démarche de dimensionnement sous sollicitation dynamique, par différentes approches, analytiques ou numériques et de complexité variable, en fonction de la situation.
- Guide technique pour la conception, le suivi de réalisation, l'exploitation et la réhabilitation des dispositifs de protection par merlons pare-blocs, avec pour objectif de produire un document dans l'esprit des recommandations, pour capitaliser et synthétiser l'ensemble des connaissances et usages, en intégrant notamment les avancées issues des volets A et B.

Ces trois volets seront menés en synergie forte du fait de leur interdépendance (ex : recours à la modélisation pour évaluer l'efficacité des réparations, mise à jour de l'état de l'art profitant aux volets B et C, définition de modalités de prise en compte de l'action dynamique relevant des volets B et C, intégration au fil de l'eau des résultats des volets A et B dans le volet C...)

Ces trois volets seront structurés comme suit.

Volet A – Diagnostic des merlons endommagés par impact

Tâche 1. État des lieux des dommages observés et des méthodes d'évaluation et de réparation des merlons

Tâche 1a : établissement d'un catalogue des dommages et définition des besoins des MOA, par consultation des maîtres d'ouvrages impliqués dans C2ROP-2^{nde} édition, en s'appuyant sur la base de données du RTM et des sinistres récents, sur le retour d'expérience du Cerema et du CD 73 ainsi que sur la littérature internationale.

Ce catalogue permettra d'établir une catégorisation (typologie et gravité) des dommages.

Tâche 1b : établissement d'un état de l'art et des pratiques relatif aux méthodes d'évaluation, aux techniques de réparation et de maintenance, et à leur dimensionnement.

Ces techniques seront évaluées dans une analyse multicritère, au regard notamment de leurs (i) domaine d'application, (ii) limites d'usage opérationnelles, (iii) limites d'usages méthodologiques, (iv) fiabilité, (v) furtivité, (vi) compétences à mobiliser, (vii) moyens nécessaires et (viii) coût.

Tâche 2. Diagnostic des merlons soumis à des impacts

Tâche 2a. Auscultation

Une revue bibliographique permettra d'identifier les méthodes d'auscultation les plus adaptées. On s'intéressera notamment aux méthodes d'évaluation géophysiques, qui permettent de faire des mesures non-destructives.

Tâche 2b. Diagnostic

La démarche de diagnostic vise à vérifier la bonne tenue de l'ouvrage ou la nécessité d'un renforcement ou d'une réparation. Cette démarche, incluant l'auscultation (tâche 2a) et le recalcul (tâche 2c), sera alimentée par les retours sur la modélisation et les essais.

Tâche 2c. Réingénierie

Une gamme de méthodes, de performance croissante, sera proposée pour le recalcul des ouvrages existants. Cette tâche sera menée en interaction avec le volet B. On pourra avoir recours à des méthodes issues de la littérature pour les ouvrages courants et, pour les cas complexes (faible emprise au sol, impact à haute énergie, etc.), on s'appuiera sur les développements prévus pour la tâche 2 du volet B, pour mieux comprendre l'endommagement des merlons à l'impact et évaluer leur résistance résiduelle.

Tâche 3. Choix des solutions de réparation :

Des recommandations seront édictées afin de guider le maître d'ouvrage dans le choix de la solution de réhabilitation/réparation la plus adaptée à son ouvrage et son environnement. Les points de vigilances à prendre en compte seront identifiés, notamment en lien avec (i) le contexte de l'opération, (ii) les matériaux à employer, (iii) les méthodes d'accès et de mise en œuvre, (iv) les justifications à apporter si la réparation ne se fait pas à l'identique, (v) la sécurité des opérateurs en phase travaux et (vi) la sécurité des enjeux avant travaux et pendant les travaux.

Volet B – Modélisation de l'impact sur merlon

Les recommandations C2ROP ont marginalement abordé la question de la prise en compte de la sollicitation dynamique pour le dimensionnement structurel des merlons. En effet, aucune des

Programme

méthodes actuellement disponibles ne s'avère satisfaisante pour un usage généralisé en ingénierie, sur tous types de merlons. Ceci résulte du nombre limité de travaux de recherche réalisés à ce jour, sur un problème mécanique très complexe. Ce volet vise à combler ce manque en proposant une approche reposant sur des outils de modélisation analytiques ou numériques et de complexité variable selon la situation (en termes de conception, matériaux constitutifs, géométrie de l'ouvrage, énergie d'impact, inclinaison des trajectoires, fonctionnement en mode dégradé, enjeux exposés).

Compte tenu du contexte technique et scientifique et des besoins opérationnels d'optimisation, l'action sera menée en considérant 3 questions prioritaires :

QP1 : Dimensionnement des ouvrages à fort élancement,

QP2 : Dimensionnement des ouvrages soumis à des impacts à vitesse importante,

QP3 : Prise en compte de la variabilité des paramètres cinématiques pour le dimensionnement de l'ouvrage.

Tâche 1

(a) Analyse des méthodes de dimensionnement existantes, en termes de pertinence et de domaine d'application en fonction de la typologie d'ouvrage et des conditions d'impact.

(b) Etablissement d'un outil d'aide au choix des méthodes de dimensionnement, en adéquation avec la complexité de la méthode et le contexte de l'opération.

Tâche 2

Cette tâche vise à produire des modèles (analytiques ou numériques) à partir des connaissances et données actuellement disponibles, en ciblant notamment les questions prioritaires.

Pour les modèles numériques, on visera la définition de stratégies de modélisation, en abordant les matériaux (approche discrète ou homogénéisé, prise en compte des renforcements, valeurs attribuées aux paramètres du modèle...), les lois de comportement associées et la représentation de la charge d'impact.

Des études paramétriques seront réalisées avec les outils de simulation numériques pour évaluer la variabilité de la réponse de l'ouvrage aux paramètres décrivant l'ouvrage, en vue de contribuer à la définition de coefficients de sécurité (application des Eurocodes).

Tâche 3

Des campagnes d'essais seront réalisées pour répondre aux besoins spécifiques des travaux sur les modélisations (tâches 2c du volet A et tâche 2 du volet B). Les thématiques envisagées à ce stade portent sur la caractérisation en dynamique des matériaux, des éléments de structures et de leurs interfaces à différentes échelles. Ces campagnes d'essai seront réalisées en laboratoire et sur plateforme d'expérimentation par impacts.

Tâche 4

La tâche 4 vise à évaluer la sensibilité de la réponse du merlon aux conditions d'impact, comme par exemple l'inclinaison de la trajectoire du bloc et la position d'impact sur le merlon (QP3). Une des finalités est d'apporter des éléments factuels pour la définition des coefficients de sécurité relatifs au chargement sur l'ouvrage (application des Eurocodes). Cette étude sera menée par simulation numérique sur les modèles numériques utilisés dans cette action et en ayant recours aux données expérimentales disponibles dans la littérature.

Tâche 5

Programme

Rédaction du rapport de synthèse, fondant la méthode de dimensionnement proposée dans le guide (volet C).

Volet C - Guide technique

Tâche 1 : mise à jour de l'état de l'art

Tâche 2. Rédaction du guide. Sur la base des recommandations existantes :

- Expurgées des notions générales aux risques naturels gravitaires, non spécifiques aux merlons et digues, après intégrations et calages dans d'autres documents C2ROP-2^{nde} édition,
- Complétées et précisées concernant les dimensionnements par :
 - Les modalités d'application des Eurocodes,
 - les propositions des coefficients de sécurité adaptés,
 - la définition de différents cas de sollicitations dynamiques,
 - un benchmark des méthodes de dimensionnement,
 - des préconisations d'usages de méthodes pour différentes configurations.
- Complétées et précisées concernant les chapitres relatifs à :
 - La maintenance et la surveillance
 - Le diagnostic des ouvrages endommagés
 - La réparation des ouvrages endommagés
 - La réhabilitation des ouvrages.
- Complétées et précisées concernant tous les items pour répondre aux exigences d'un Guide technique.

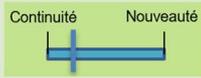
Résultats scientifiques ou techniques escomptés : Cette action vise principalement la production du Guide technique pour la conception, le suivi de réalisation, l'exploitation et la réhabilitation des dispositifs de protection par merlons pare-blocs.

Ce guide intégrera les recommandations pour la prise en compte de l'action dynamique d'impact dans le dimensionnement des merlons ainsi que celles relatives aux Stratégies de maintenance et démarche de diagnostic.

Parallèlement, le volet B permettra le développement de modèles numériques et la définition de méthodes analytiques pour la modélisation de l'action.

3.3.3. Ancrages

OAncrages WP : Workpackage de travail sur les ancrages : sollicitations non axiales, contrôles et recommandations

Verrous scientifiques et techniques	TRL	Position vis-à-vis de C2ROP	Actions
<ul style="list-style-type: none">• Comportement sous sollicitations non axiales• Durabilité sous déformation plastique• Comportement dynamique	4-5		<ul style="list-style-type: none">• Plan d'expérience• Vieillissement accéléré in situ• Contrôle vibratoire• Recommandations techniques

Partenaires identifiés : CAN, Cerema, UGE, NGE Fondations, Rincet Alpes, Geolithe

Programme de travail :

Programme

L'action « Ancrages » est structurée selon 2 WorkPackages (WP) :

- WP1 : comportement des ancrages soumis à des sollicitations non axiales en têtes ;
- WP2 : résilience et contrôles des ancrages d'ouvrages de protection.

Programme WP1 :

La plupart des ouvrages de protection contre les risques rocheux/gravitaires comportent des ancrages. Ils sont réalisés dans des terrains variés meubles ou indurés, et souvent avec un angle non nul vis-à-vis de la sollicitation. L'usage veut que pour dimensionner les ancrages, on ne considère que leur résistance à la traction, paramètre fourni par le constructeur. Il s'agit de s'intéresser à leur comportement réel, et dresser un catalogue de résistance des divers ancrages du marché vis-à-vis de l'effort en flexion, et sur cette base, une méthodologie de dimensionnement et des préconisations via des recommandations techniques.

Les travaux s'articuleront ainsi :

Tâche 1 – Constitution d'une base de données de ruptures d'ancrages intégrant également les caractéristiques des ancrages rompus, des ouvrages et des sollicitations. Cette base de données servira, en complément des essais sur ancrages réalisés dans C2ROP-1^{ère} édition, à guider les typologies d'essai à réaliser lors de la tâche 2.

Tâche 2 - Réalisation des campagnes expérimentales ;

- Définition des protocoles, des ancrages et des sollicitations ;
- Sélection de sites test
- Définition de l'instrumentation utilisée pour le suivi des essais (LVDT, capteur pression/force, jauges, Fibre optique...) et les moyens d'essai (banc NGE, stations CAN, UGE, ...) ;
- Réalisation des essais sur les sites test et en laboratoire.

Tâche 3 - Réalisation de modèles simplifiés en déformation permettant de reproduire les comportements observés et/ou confirmer les mécanismes de ruptures. Réalisation d'une analyse paramétrique, analyses des résultats au regard de la résistance à l'effort en flexion des ancrages, définitions d'essais complémentaires.

Tâche 4 - Campagnes complémentaires permettant l'étude de mécanismes identifiés lors de la Tâche 3. Les données issues de ces nouveaux essais compléteront la procédure d'analyse précédemment définie.

Tâche 5 - Rédaction de recommandations techniques.

Programme WP2 :

Les Maîtres d'Ouvrages sont rentrés dans la logique de contrôles périodiques des ouvrages de protection. Autant les parties visibles sont accessibles aux contrôles, autant les ancrages ne peuvent l'être. Les méthodologies de contrôle *in situ* actuelles (essais de traction) sollicitent les ancrages d'ouvrages avant leur mise en œuvre/sollicitation par le milieu encaissant.

Quels impacts ces contrôles ont-ils sur l'aptitude à l'usage des ancrages au cours de leur durée de vie ? A partir de quel niveau de sollicitation un ancrage n'est-il plus viable ? Quid des procédures d'essais sur ancrages câbles ? Peut-on envisager l'utilisation de méthodes de Contrôle Non Destructif (CND), pour les ancrages d'ouvrages de protection ? Telles sont les questions qui guideront ce WP2.

Les travaux s'articuleront ainsi :

Programme

Tâche1 - Définition des types d'essais à réaliser (destructifs à différents niveaux de sollicitations sur barres et câbles, non-destructifs) ;

Tâche 2 - Réalisation des campagnes expérimentales ;

Tâche 3 - Analyse des résultats ; Sera notamment étudié la complémentarité potentielle des méthodes destructives et non destructives pour le contrôle des ancrages.

Tâche 4 - Campagnes complémentaires permettant d'affiner les résultats obtenus lors de la Tache 3.

Tâche 5 - Rédaction de recommandations techniques (types de contrôles à réaliser, apport sur le dimensionnement des ancrages, ...).

Résultats scientifiques ou techniques escomptés :

- WP1

Ce WP vise à améliorer notre compréhension du comportement des ancrages sous sollicitations non axiales et dresser un catalogue de résistance des divers ancrages du marché vis-à-vis de l'effort en flexion. La finalité de ces travaux concerne la réalisation de recommandations portant sur la conception et le dimensionnement des ouvrages de protection contre le risque rocheux.

- WP2

Ce WP vise à alimenter la réflexion sur les contrôles des ancrages :

- En analysant le comportement des différents types d'ancrages sous sollicitation ;
- En évaluant leur capacité résiduelle après sollicitations ;
- En explorant les méthodes non destructives non utilisées à ce jour pour les contrôles d'ancrages d'ouvrages de protection.

Ce WP a pour objectif d'améliorer notre connaissance des capacités résiduelles des ancrages (résilience) et d'explorer les apports des différentes méthodes de contrôles (destructives ou non) afin de fournir des recommandations de contrôles des ancrages d'ouvrages.

3.3.4. Ouvrages souples soumis à d'autres aléas

OMultiAleas WP : Ouvrages souples soumis à des aléas multiples et variés

Verrous scientifiques et techniques	TRL	Position vis-à-vis de C2ROP	Actions
<ul style="list-style-type: none">• Comportement des ouvrages paravalanches soumis à chutes de blocs• Comportement des ouvrages pare-pierres soumis à la neige• Capacité des barrages souples sous lave et flottants	3		<ul style="list-style-type: none">• Modélisations numériques• Essais échelle 1/1• Etat des lieux des pratiques• Recommandations techniques pour le dimensionnement fonctionnel des ouvrages

Partenaires identifiés : CAN, Cerema, NGE Fondations, INRAE, CD73

Programme de travail :

Les ouvrages souples constitués d'éléments métalliques (câbles, poteaux...) sont à ce jour principalement utilisés pour intercepter des blocs rocheux, et dimensionnés en conséquence.

Pourtant, ils sont fréquemment exposés à d'autres aléas (multi-aléas) ou utilisés et dimensionnés vis-à-vis d'autres aléas. Ce sont par exemple, dans le premier cas, des écrans pare-blocs soumis à chargement par la neige et, dans le second cas, des ouvrages souples utilisés en torrent pour intercepter des laves torrentielles. Les chargements auxquels ces ouvrages souples peuvent être exposés sont ainsi divers et variés : impacts par blocs rocheux, chargement par la neige, laves torrentielles, flottants, coulées de boue, accumulation de végétation, accumulation de débris, gel...

Programme

Les sollicitations qui en résultent peuvent être quasi-statiques et/ou dynamiques.

A ce jour, aucune méthode de conception et de dimensionnement multi-aléas ne fait consensus au sein des prescripteurs et des concepteurs d'ouvrages de protection.

Par ailleurs, pour ce qui concerne les ouvrages en contexte torrentiel, leur emploi est encore marginal en France, contrairement à la tendance forte observée au niveau mondial. Ceci résulte de questionnements des ingénieurs autour (i) des contextes d'application de ces ouvrages, (ii) de leurs objectifs fonctionnels de protection, (iii) du dimensionnement fonctionnel et structurel associé, lequel n'est pas encadré au niveau national et (iv) de la durabilité et des conditions d'entretien après événements torrentiels. Également, leur comportement sous les sollicitations auxquelles ils sont exposés en contexte torrentiel est encore mal connu.

L'objectif final de la présente action est d'aboutir à des recommandations pour la conception des ouvrages souples exposés à des aléas multiples et aux ouvrages souples exposés aux aléas torrentiels. Elle doit améliorer les connaissances et la prise en compte des actions liées aux phénomènes torrentiels (laves, boues, flottants), aux avalanches et à la reptation de la neige, rappeler les actions à prendre en compte concernant les blocs rocheux pour, au final, proposer une approche qui intègre l'ensemble de ces aléas dans la démarche de conception.

Cette action vise ainsi 5 objectifs qui en constituent les étapes :

1. Identification des domaines d'application (ex. ouvrage souple pare-blocs soumis à la reptation de neige et/ou dans un couloir d'avalanche ; filets paravalanches soumis aux chutes de blocs, etc.), retours d'expériences en France et limites constatées sur les ouvrages. Plus particulièrement pour ce qui concerne les ouvrages souples en contexte torrentiel : qualification des contextes et événements contre lesquels les barrages souples peuvent apporter une alternative pertinente, notamment par rapport aux ouvrages de génie civil traditionnels. Evaluation en lien avec le dimensionnement fonctionnel de ces barrages.
2. Etablissement d'un état des connaissances et de l'art sur les pratiques et recommandations internationales pour la conception et la mise en œuvre d'ouvrages souples soumis à ces différents types de phénomènes. L'objectif est d'identifier comment la conception de ces ouvrages doit être adaptée pour tenir compte de l'exposition à plusieurs types de phénomènes, sans aller jusqu'à préciser la caractérisation des sollicitations spécifiques liées à chaque type de phénomène.
Cet état de l'art et des connaissances servira de base aux échanges entre les partenaires et contribuera à atteindre les objectifs 3 et 4. Il permettra également d'identifier les lacunes dans les connaissances actuelles et d'affiner les priorités et travaux prévus dans le cadre de cette action.
3. Caractérisation des actions exercées sur les ouvrages souples par la reptation de neige, par les avalanches, par les laves torrentielles et les écoulements chargés en flottants. Rappel des éléments en ce qui concerne les actions exercées par les chutes de blocs.
Concernant spécifiquement les ouvrages en contexte torrentiel, et compte tenu des lacunes, des expérimentations à échelle réduite seront réalisées au laboratoire sur les deux types d'écoulement. A cette fin, des équipements et matériels spécifiques seront acquis. Ces expérimentations seront menées en utilisant des filets de technologie générique, en respectant les critères de similitude de mécanique des fluides et de comportement mécanique des filets. Ces expérimentations visent à contribuer aux objectifs 3 et 4. En complément, il est envisagé de réaliser des simulations numériques des expérimentations impliquant des écoulements granulaires, afin de contribuer aux objectifs 3 à 5. Ces travaux expérimentaux et numériques mobiliseront des ressources humaines complémentaires (stagiaires, voire doctorants).
4. Prise en compte de ces actions pour le dimensionnement et recommandations de critères pour l'ingénierie.

Programme

5. Etablissement des principes et règles de conception des ouvrages soumis aux différentes sollicitations : on parlera de dimensionnement fonctionnel – un ouvrage devant respecter plusieurs critères dépendant de la problématique du site d’implantation pour assurer son rôle de protection des enjeux.

L’action sera rythmée par des réunions régulières d’échange, de concertation et de décision autour des 5 objectifs.

Résultats scientifiques ou techniques escomptés :

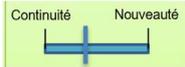
Cette action se traduira par un rapport sur l’état de l’art, des rapports d’avancement sur les expérimentations, et un rapport sur les actions et leur prise en compte dans le dimensionnement, prenant la forme de recommandations : « Aide à la conception et au dimensionnement des ouvrages souples soumis à différents aléas. »

Les résultats escomptés concernent les cinq objectifs décrits ci-avant.

Ces travaux seront aussi l’objet de publications scientifiques.

3.3.5. Protections d’urgence

OUrgence 01 : Protections d’urgence

Verrous scientifiques et techniques	TRL	Position vis-à-vis de C2ROP	Actions
<ul style="list-style-type: none">• Identification des contextes d’urgence• Etat des lieux des solutions	7-8		<ul style="list-style-type: none">• Définition des cas d’usages inhérents aux situations d’urgence• Constitution d’un catalogue de produits

Partenaires identifiés : UGE, CAN, NGE Fondations, Geolithe, FNTF

Programme de travail : Cette action s’inscrit dans la continuité des travaux initiés lors de C2ROP, dont le contexte est rappelé ci-après :

Lors d’événement affectant des infrastructures présentant des enjeux stratégiques importants, et afin de permettre, par exemple, le rétablissement d’une circulation totale ou partielle dans un délai très court, ou de permettre l’intervention d’équipes de travaux dans des conditions de sécurité acceptables, il est fréquemment fait usage d’ouvrages provisoires de toutes natures. Les interventions et les rétablissements de circulations sont opérés dans des conditions dégradées, souvent incertaines. Il apparaît pertinent de proposer de nouvelles solutions permettant d’améliorer sensiblement le niveau de sécurité.

Les travaux de C2ROP (Solutions agiles et kits d’urgence) engagés par les MOAs ont aboutis sur un cadre de cahier des charges en réponses aux besoins exprimés suite à divers événements (REX).

La première partie du travail du programme proposé, consistera à reprendre et compléter le cahier des charges initié et définir les cas d’usages inhérents aux situations d’urgence identifiées par les MOAs auxquelles les solutions proposées devront répondre.

Dans un second temps, les grands principes de solutions innovantes (concepts d’ouvrages, moyens de surveillances, organisation des opérations) permettant d’améliorer sensiblement la gestion de risques dans un contexte d’urgence seront esquissés.

S’en suivra, une caractérisation plus précise des solution(s), permettant de faire face à une ou plusieurs situations, en décrivant l’ensemble de la chaîne de processus à mettre en œuvre pour aboutir à un environnement sécurisé pour les enjeux, les usagers ou le personnel intervenant (travaux, études, ...).

L'objectif in fine est de proposer un catalogue de concepts de solutions pour chaque cas d'usages, en précisant leurs avantages, inconvénients ainsi que les perspectives de développement (pré-existante, nécessitant des tests, ...) et déploiement de ces solutions dans les marchés des MOAs.

Les travaux seront conclus par la rédaction d'un document de synthèse.

Résultats scientifiques ou techniques escomptés :

Synthèse des travaux :

- Cas d'usages ;
- Nouveaux concepts de solutions ;
- Processus de mise en œuvre des solutions ;
- Benchmark des solutions proposées.

3.4. Axe Surveillance

La surveillance des versants instables et des ouvrages de protection associés est en pleine mutation du fait du développement de solutions technologiques opérationnelles innovantes (drones, MEMs, RFID...) et du fait des méthodes d'analyse de données (IA, Edge computing, ...). L'axe surveillance de C2ROP a pour objectifs de faire émerger, de promouvoir et de structurer le développement des solutions de surveillance pour la mitigation des risques naturels gravitaires par les innovations technologiques, méthodologiques et d'usages. Les items de la surveillance pris en compte vont de la captation, au traitement, à l'analyse des données ainsi que la modélisation et la prédiction des phénomènes, aussi bien en ce qui concerne la rupture que la propagation des phénomènes. Les contextes d'usages considérés s'étendent des dispositifs durables à des dispositifs d'urgence et/ou agiles avec des focalisations sur la sûreté et la maintenance des dispositifs de surveillance et de protection.

3.4.1. Structuration de l'axe surveillance

SCom 01 : Mutualisation et optimisation des moyens et des tâches de l'axe surveillance

Partenaires identifiés : GEOLITHE, BRGM, Cerema, MYOTIS, CNRS/INSU – SNO OMIV, SNCF, CD 73, CD 38

Contexte : Les actions de l'axe surveillance nécessitent des moyens et ressources (capteurs, données, méthodes d'analyse, infrastructure de stockage et de dissémination) et compétences qui sont parfois similaires et redondantes.

L'organisation de l'axe surveillance a été choisie de façon à permettre l'optimisation des moyens et compétences.

Objectifs : Cette action a pour objet d'augmenter l'efficacité de l'axe par :

1. La promotion de l'intelligence collective ;
2. La coordination thématique coopérative des actions afin de définir les limites de chaque action ;
3. La coordination temporelle des actions afin de favoriser les transferts entre actions ;
4. La mutualisation de tâches transverses, et la définition du cahier des charges pour le choix des expérimentations sur sites ;
5. La mutualisation de moyens (instruments, données et entrepôts de données, codes d'analyse et leurs ressources calculatoires) spécifiques ;
6. La synthèse et la valorisation des travaux de l'axe.

Tâche 1 – Définir un mode de fonctionnement commun à l'axe

Tâche 2 – Animer et copiloter les travaux de l'axe

Tâche 3 – Favoriser la mutualisation des moyens instrumentaux

SCom 02 : Guide pour la surveillance des risques naturels gravitaires

Partenaires identifiés : GEOLITHE, Cerema, MYOTIS, SITES, ISTERRE, SNCF, CD 73, CD 38

Contexte :

Les systèmes de surveillance pour la gestion du risque rocheux, sont et seront de plus en plus utilisés.

De nombreuses publications et travaux scientifiques ont été réalisés au niveau national et international dans le domaine des risques rocheux.

Dans le cadre de C2ROP un guide technique à vocation opérationnelle a été réalisé.

Objectifs :

Cette action a pour objet de compléter le guide élaboré lors de C2ROP en synthétisant les résultats des actions de l'axe surveillance et en formalisant les évolutions des bonnes pratiques à l'issue du programme proposé.

Ces recommandations opérationnelles sont à destination des gestionnaires d'infrastructures, maîtres d'ouvrages et maîtres d'œuvres.

Tâche 1 – Etat de l'art et glossaire

L'état de l'art international des usages, expérimentations et publications relatifs à cette thématique, sera réalisé. Il s'appuiera notamment sur les pratiques concernant d'autres phénomènes (inondations, séisme...).

Tâche 2 – Benchmark

Les solutions de surveillance adaptées aux risques naturels gravitaires seront comparées suivant différents critères :

- Mesure distante et/ou rapprochée ;
- Mesure surfacique ou localisée ;
- Résolution et précision ;
- Limites d'utilisation ;
- Informations résultantes ;
- Autonomie énergétique ;
- Communication et alerte ;
- Coûts ;
- ...

Tâche 3 – Atelier prospectif

Identification des tendances d'évolution des usages de surveillance du risque rocheux.

Tâche 4 – Rédaction du guide technique

Le document « Guide - Surveillance des risques rocheux » paru en 2020 sera complété et précisé concernant les chapitres relatifs à :

- La prise en compte des signaux précurseurs,
- La prévision du déclenchement des événements,
- La prévision du danger et de l'atteinte du risque acceptable,
- un benchmark des méthodes de surveillance,
- des préconisations d'usages de méthodes pour différentes configurations,
- La réalisation des travaux,
- La maintenance dont le suivi et les réparations.
- La responsabilité des opérateurs.

Le sommaire prévisionnel serait le suivant :

Programme

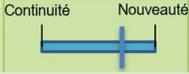
1	Résumé
2	Glossaire
3	Introduction
3.1	Limites d'emploi du document
3.2	Cadre d'utilisation de solution de surveillance
3.2.1	Comparaison de solutions de surveillances aux solutions de protection
3.2.2	Pertinence de solution de surveillance
4	Etats de l'art
4.1	Synthèse bibliographique
4.2	Etats de l'art - Systèmes de surveillance
4.2.1	Genèse de la surveillance
4.2.2	Etat de l'art - Systèmes de surveillance à détection de rupture
4.2.3	Etat de l'art - Systèmes de surveillance à détection de propagation
5	Structuration d'une opération de surveillance
5.1	Conception et réalisation
5.1.1	Intervenants et fonctions
5.1.2	Compétences
5.1.3	Responsabilité des opérateurs
5.2	Commission de sécurité pour arrêt de surveillance
6	Conception
6.1	Choix d'une solution de surveillance
6.1.1	Diagnostics
6.1.2	Niveaux de surveillance
6.1.3	Performances fonctionnelles
6.1.3	Benchmark des solutions existantes
6.1.4	Faisabilité
6.2	Architecture des systèmes
6.2.1	Généralités
6.2.2	Domaines d'application
6.3	Eléments
6.3.1	Dispositif de mesure
6.3.2	Exploitation
6.3.3	Alerte et alarme
6.3.4	Sécurisation
6.4	Cahier des charges
7	Mise en œuvre d'un système de surveillance
7.1	Préparation
7.2	Installation et travaux
7.3	Contrôle
7.4	Réception
8	Exploitation
8.1	Processus de décisions de sécurisation
8.2	Alertes et alarmes
8.2.1	Définition des types
8.2.2	Définition des conditions de déclenchement
8.2.2.1	Prise en compte des signaux précurseurs
8.2.2.2	Prévision du déclenchement des événements
8.2.2.3	Prévision du danger et de l'atteinte du niveau de risque acceptable
8.2.3	Information
8.2.4	Acquittement
8.3	Analyse des données
8.4	Maintenance
8.4.1	Maintenance préventive
8.4.2	Maintenance corrective
8.5	Evolution de l'efficacité de la surveillance
8.5.1	Evolution des conditions de déclenchement
8.5.2	Evolution du système
8.5.3	Arrêt de la surveillance
9	Annexes
9.1	Glossaire
9.2	Bibliographie

Résultats scientifiques ou techniques escomptés :

- Guide technique à destination de l'ensemble des métiers des risques naturels gravitaires.
- Développement de l'usage de la surveillance du risque rocheux

3.4.2. Détection d'événements et prédictions

SDetect 01 : Signes précurseurs et prédiction des événements rocheux "rapides"

Verrous scientifiques et techniques	TRL	Position vis-à-vis de C2ROP	Actions
<ul style="list-style-type: none"> • Etat des pratiques • Test de nouvelles solutions de surveillance • Capacités prédictives • Différentes solutions techniques 	5 – 6		<ul style="list-style-type: none"> • Rédaction d'un état de l'art • Instrumentation d'un site test • Comparaison des méthodes de traitement et d'analyse des données • Ajouts dans le guide surveillance des risques rocheux

Partenaires identifiés : Cerema, BRGM, Géolithe, INERIS, CNRS/INSU-SNO OMIV, SAGE

Objectif : Définir le cadre d'utilisation (acquisition et traitement/analyse) de nouvelles technologies d'instrumentation in-situ ou à distance pour la détection de signes précurseurs d'éboulement rocheux et la construction de modèles de prédiction des événements

Moyens : Identification des objectifs et des contraintes des acteurs opérationnels. Campagne expérimentale et benchmark.

Livrable : Rapport final de synthèse du benchmark des différentes technologies. Certains éléments de ce guide pourront être intégrés dans la poursuite du Guide Surveillance du risque rocheux.

Cette action vise à évaluer et à définir l'usage des nouvelles technologies d'instrumentation terrestres dans le cadre de mitigation des risques éboulements rocheux par systèmes de surveillance.

Différentes nouvelles technologies permettent l'acquisition de données spatialisées de résolution haute à très haute (lidar aérien, sol et drone; photogrammétrie, images satellitaires, radar interférométrique, caméra thermique, etc.), un suivi précis des conditions météorologiques (radar météo), une écoute sismologique continue (micro-sismicité, corrélation de bruit), etc.) ou des mesures plus locales et moins onéreuses (MEMs, RFID, RaspberryShake), avec possibilité d'acquisition en temps réel. L'utilisation des données issues de ces techniques, en contexte opérationnel et à des fins de suivi, surveillance, détection précoce se heurte, d'une part, au grand volume de données générées par chacune de ces techniques et, d'autre part, à la difficulté d'analyse de ces différentes données, comme support de la décision.

De plus, il s'opère à l'heure actuelle des mutations des méthodes d'analyse et de traitement des données (IA, data fusion, services de traitement en ligne automatique ou à la demande, ...) qui permettront, à terme, l'acquisition et l'analyse de données en contexte opérationnel et à des fins de surveillance.

Tâche 1. Etat de l'art sur les nouvelles techniques et méthodes de d'instrumentation des falaises ou compartiments rocheux depuis le sol. Identification des objectifs et des contraintes opérationnelles (cahier des charges)

L'état de l'art international des usages, expérimentations et publications relatifs à cette problématique, sera réalisé. Une étude préliminaire visant à identifier les besoins des opérateurs, ainsi que les contraintes opérationnelles, sera réalisée avant d'entreprendre la mise en œuvre de nouveaux dispositifs.

Tâche 2. Expérimentation sur un site à définir des différentes nouvelles techniques et technologies.

Il est prévu l'acquisition de données, avec différentes nouvelles techniques et méthodes de mesure mises à disposition par les partenaires afin de construire une base de données « observation ». Un effort sera fait pour tester le maximum de techniques et un site de mise en commun des données sera développé. Le Centre de Données et de Service CNRS/INSU OMIV pourrait être utilisé. Ces mesures par technologies innovantes seront complétées par des moyens plus conventionnels (tachéomètre, extensomètre...) permettront de fournir les données de référence.

Cette base de données pourra être complétée par d'autres mesures disponibles, inventoriées et répondant à des critères de qualité (Arly, Laprat, Chambon, site de falaise OMIV du St-Eynard...) nécessairement moins complètes. Cette base de données « observation » sera ensuite exploitée dans le cadre de la tâche 3.

Tâche 3. Benchmark des méthodes

Après la phase d'acquisition, l'exploitation des données pour chaque nouvelle technique sera investiguée de façon à :

- Identifier sa capacité à caractériser des signes précurseurs ;

Programme

- Identifier sa capacité à prédire l'évènement ; éventuellement en lien avec d'autres mesures (notamment température, météorologie, ...).

Ensuite, les techniques et méthodes de télédétection seront comparées suivant différents paramètres :

- Domaine d'application ;
- Limites d'usages opérationnelles ;
- Limites d'usages méthodologiques ;
- Fiabilité ;
- Précision ;
- Expertises nécessaires ;
- Gestion du volume de données.

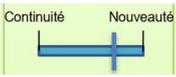
Enfin, une stratégie de mobilisation de ces nouvelles techniques pourra être proposée.

Tâche 4. Besoins prospectifs pour la prédiction des phénomènes naturels gravitaires (à développer si proposition de l'ANR)

Dans la tâche 3, aucun développement de nouvelles méthodes de traitement et d'analyse n'est envisagé. Dans cette tâche 4, il pourrait être envisagé 1) de mettre en oeuvre dans un contexte de surveillance opérationnelle des traitements en continu ou à la demande (web-services) issu directement des laboratoires de recherche, 2) de développer de nouveaux traitements des données massives notamment avec de l'intelligence artificielle ou de la fusion de données hétérogènes.

Résultats scientifiques ou techniques escomptés : L'approche proposée permettra de promouvoir et encadrer l'usage des nouvelles techniques de mesures des événements type « éboulements rocheux » pour améliorer la surveillance des sites et de rationaliser la gestion du risque.

SDetect_02 : Signes précurseurs et prédiction des événements rocheux "lents"

Verrous scientifiques et techniques	TRL	Position vis-à-vis de C2ROP	Actions
<ul style="list-style-type: none"> • Etat des pratiques • Test de nouvelles solutions de surveillance • Capacités prédictives • Différentes solutions techniques 	5 - 6		<ul style="list-style-type: none"> • Rédaction d'un état de l'art • Instrumentation d'un site test • Comparaison des méthodes de traitement et d'analyse des données

Partenaires identifiés : ISTERRE, Cerema, BRGM, Géolithe, INERIS, CNRS/INSU – SNO OMIV

Objectif : Définir le cadre d'utilisation (mise en oeuvre, acquisition et traitement/analyse) de nouvelles technologies d'instrumentation in-situ ou à distance pour la détection de signes précurseurs de glissement de terrain (phase d'initiation ou phase d'accélération) et la construction de modèles de prédiction des évènements.

Moyens : Identification des objectifs et des contraintes des acteurs opérationnels. Campagne expérimentale et benchmark

Livrable : Rapport final de synthèse du benchmark des différentes technologies. Certains éléments de ce guide pourront être intégrés dans la poursuite du Guide Surveillance du risque rocheux.

Programme

Cette action vise à évaluer et à définir l'usage des nouvelles technologies d'instrumentation terrestres dans le cadre de mitigation des risques de mouvements de terrain « lents » par systèmes de surveillance.

Différentes nouvelles technologies permettent l'acquisition de données spatialisées de résolution haute à très haute (lidar, photogrammétrie, images satellitaires, radar interférométrique, etc.), un suivi précis des conditions météo, ou des mesures plus locales et moins onéreuses (MEMs, RFID), ainsi que des mesures en profondeur (sismologie, résistivité électrique, inclinométrie, piézométrie) avec possibilité d'acquisition en temps réel. L'utilisation des données issues de ces techniques, en contexte opérationnel et à des fins de suivi, surveillance, détection précoce se heurte, d'une part, au grand volume de données générées par chacune de ces techniques et, d'autre part, à l'hétérogénéité des données, comme support de la décision.

De plus, il s'opère à l'heure actuelle des mutations des méthodes d'analyse et de traitement des données (IA, data fusion, services de traitement en ligne automatique ou à la demande, ...) qui permettront, à terme, l'acquisition et l'analyse de données en contexte opérationnel et à des fins de surveillance.

Tâche 1. Etat de l'art sur les nouvelles techniques et méthodes de d'instrumentation des versants instables en déformation lente depuis le sol. Identification des objectifs et des contraintes opérationnelles (cahier des charges)

L'état de l'art international des usages, expérimentations et publications relatifs à cette problématique, sera réalisé. Une étude préliminaire visant à identifier les besoins des opérateurs, ainsi que les contraintes opérationnelles, sera réalisée avant d'entreprendre la mise en œuvre de nouveaux dispositifs.

Tâche 2. Expérimentation multi-capteurs

Il est prévu l'acquisition de données, avec différentes nouvelles techniques et méthodes de mesure mises à disposition par les partenaires, afin de construire une base de données « observation ». Un effort sera fait pour tester le maximum de techniques et un site de mise en commun des données sera développé. Le Centre de Données et de Service CNRS/INSU OMIV pourrait être utilisé. Ces mesures par technologies innovantes seront complétées avec des moyens plus conventionnels (tachéomètre, extensomètre, GPS, capteurs hydrologiques, hydro géophysiques...) permettront de fournir les données de référence.

Cette base de données pourra être complétée par d'autres mesures disponibles, inventoriés et répondant à des critères de qualité (réseau des sites instrumentés CNRS/INSU OMIV par exemple).

Cette base de données « observation » sera ensuite exploitée dans le cadre de la tâche 3.

Tâche 3. Benchmark des méthodes

Après la phase d'acquisition, l'exploitation des données pour chaque nouvelle technique sera investiguée de façon à :

- Identifier sa capacité à caractériser des signes précurseurs (de rupture ou d'accélération) ;
- Identifier sa capacité à prédire l'évènement ; éventuellement en lien avec d'autres mesures (notamment température, météorologie, ...).

Ensuite, les techniques et méthodes de détection seront comparées suivant différents paramètres :

- Domaine d'application ;
- Limites d'usages opérationnels ;
- Limites d'usages méthodologiques ;
- Fiabilité ;
- Précision ;
- Expertises nécessaires ;
- Gestion du volume de données.

Programme

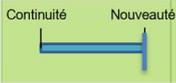
Enfin, une stratégie de mobilisation de ces nouvelles techniques pourra être proposée : en associant plusieurs ou suivant les phénomènes, avec ou sans calcul sur site...

Tâche 4. Besoins prospectifs pour la prédiction des phénomènes naturels gravitaires (à développer si proposition de l'ANR)

Dans la tâche 3, aucun développement de nouvelles méthodes de traitement et d'analyse n'est envisagé. Dans cette tâche 4, il pourrait être envisagé 1) de mettre en oeuvre dans un contexte de surveillance opérationnelle des traitements en continu ou à la demande (web-services) issu directement des laboratoires de recherche, 2) de développer de nouveaux traitements des données massives notamment avec de l'intelligence artificielle ou de la fusion de données hétérogènes.

Résultats scientifiques ou techniques escomptés : L'approche proposée permettra de promouvoir et encadrer l'usage des nouvelles techniques de mesures des événements type « mouvement lent de versant » pour améliorer la surveillance des sites et rationaliser la gestion du risque.

SDetect 03 : Télédétection spatiale pour la surveillance pour phénomènes de grande ampleur

Verrous scientifiques et techniques	TRL	Position vis-à-vis de C2ROP	Actions
<ul style="list-style-type: none"> Etat de l'art sur les données spatiales et méthodes de traitement des données Méthodes et configurations pour une utilisation opérationnelle 	3 – 4		<ul style="list-style-type: none"> Rédaction d'un état de l'art Collecte des données Mise en œuvre de méthodes de traitements pour une utilisation opérationnelle Guide des bonnes pratiques Ajouts dans le guide surveillance des risques rocheux

Partenaires identifiés : Cerema, BRGM, Géolithe, CNRS/INSU – SNO OMIV, SAGE

Objectif : Définir le cadre d'utilisation des images satellites pour la détection (cartographie) et/ou le suivi (mesure des champs de déplacement) de grandes instabilités gravitaires

Moyens : Utilisation d'images satellites gratuites (Copernicus Sentinel 1 et 2) ou payantes (Pléiades, Néo, CosmoSkymed, TSX)

Livrable : Synthèse de l'utilisation de l'imagerie satellitaire pour la détection (mise à jour de cartographie d'inventaire) et le suivi (champs de déplacement) des phénomènes gravitaires. Certains éléments pourront être intégrés dans la poursuite du Guide Surveillance du risque rocheux (action S1).

Le nombre de satellites d'observation de la Terre s'est fortement développé au cours des dernières années. Ils fournissent notamment des images optiques ou radar qui peuvent être utilisées pour la détection et ou le suivi des phénomènes. Des services de traitement orientés utilisateurs (MPIC-OPT, MPIC-SAR, TIO) sont mis en place progressivement dans le cadre de plateformes de traitement en ligne (GEP - Geohazard Exploitation Platform, web-services ForM@Ter/DataTerra) associés aux opérateurs du spatial (ESA, CNES). Des solutions non académiques par des opérateurs privés (en particulier en imagerie radar InSAR) sont également accessibles. De plus, le service Copernicus GMS (Ground Motion Service) devrait voir le jour à court terme pour fournir gratuitement aux européens les informations de déformation du sol sur toute l'Europe. Pour l'analyse des déplacements gravitaires, GMS n'offrira cependant qu'une vision dégradée en résolution. L'enjeu est donc de définir quelles données (radar ou optique, quelles longueurs d'onde, ...) et méthodes de traitement sont adaptés pour quels cas d'études et quelles échelles d'observation (spatiale et temporelle). Ces besoins sont actuellement

Programme

abordés au niveau international dans le cadre du groupe de travail inter-agence spatiale CEOS WGDIs - Landslide Pilot (2017-2020) et Landslide Demonstrator (2020-2023).

Tâche 1. Etat de l'art sur les données satellites et les traitements existants.

Un état de l'art international des usages, données, traitements et publications sera réalisé en distinguant les actions de détection de processus gravitaires (mise à jour d'inventaires et de cartographies) et d'estimation de champs de déplacement/vitesse par l'analyse de séries temporelles.

Tâche 2. Etude sur un territoire à définir et collecte des images satellites disponibles

Dans un premier temps, un territoire d'étude (type grand bassin versant) sera défini ; il devra être caractérisé par une variété de phénomènes gravitaires (dimensions, vitesses, mode de déformation, orientation de la pente par rapport aux orbites des satellites) et potentiellement la présence d'un historique d'images satellites disponibles. Dans un deuxième temps, un recensement et la collecte d'images satellites (radar et optiques) gratuites ou payantes seront réalisés.

Sur ce territoire, des données de référence seront mesurées à l'aide d'une instrumentation conventionnelle ce qui permettra de valider ou non les résultats de traitements des images satellites (voir fiches action C2ROP2 S3S5).

L'ensemble des images collectées sera traité dans le cadre de la tâche 3.

Tâche 3. Méthodes de traitements et résultats pour une utilisation opérationnelle

Divers traitements seront réalisés à partir des séries temporelles d'images satellites (corrélation d'images optiques et offset-tracking SAR, création d'interférogrammes en méthode SBAS et PSI, génération de modèles numériques de surface, ...). Les traitements pourront être réalisés à partir de web-services ForMATER/DataTerra et GEP, et/ou à partir de capacités de calcul des partenaires. Les résultats obtenus seront confrontés aux mesures in-situ et aux phénomènes observés.

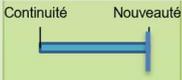
Pour chaque type d'image et mode de traitement, il s'agira de qualifier :

- les champs de déformation estimés (précision, résolution);
- les caractéristiques du traitement (algorithme, temps de traitement, coût);
- Les limites d'utilisation en termes de détection et de suivi (en fonction des contraintes du site, de la fréquence d'acquisition des images, de la vitesse et des dimensions des objets).

Le guide final présentera le cadre d'utilisation des images satellites vis-à-vis des grandes instabilités gravitaires.

Résultats scientifiques ou techniques escomptés : L'approche proposée permettra de promouvoir et encadrer l'usage des images satellites pour améliorer la surveillance des grandes instabilités gravitaires et pour la réalisation ou la mise à jour d'inventaires.

SDetect 04 : Détection d'évènements par edge computing, tous phénomènes gravitaires

Verrous scientifiques et techniques	TRL	Position vis-à-vis de C2ROP	Actions
<ul style="list-style-type: none">• État de l'art sur les moyens de mesure et traitement edge computing• Analyse IA et edge computing• Exploitation des résultats pour la prévision du risque	3 - 5		<ul style="list-style-type: none">• Rédaction d'un état de l'art• Réalisation d'un prototype embarqué de captation, traitement et analyse• Réalisation de jeux de données• Exploitation des résultats

- | | | | |
|--|--|--|---|
| | | | <ul style="list-style-type: none"> • Ajouts dans le guide surveillance des risques rocheux |
|--|--|--|---|

Partenaires identifiés : ISTerre, Geolithe, Cerema

Objectif : Etablir une preuve de concept de surveillance des RNG par dispositif edge-computing embarqué sur véhicule.

La détermination du risque et des aléas repose principalement sur la connaissance fine des phénomènes et événements. Dans le domaine opérationnel, la connaissance fine de très grande quantité d'informations et d'évènements "à bas bruits" est très peu développée et très peu exploitée pour les données actuellement captées.

Les techniciens et véhicules parcourant très régulièrement les voies de communication sont des vecteurs de surveillance des RNG qui sont très largement sous exploités.

L'objectif est d'établir une preuve de concept d'un système de surveillance embarqué sur un véhicule de service d'un exploitant permettant de détecter des anomalies et événements en augmentant très significativement les observations des techniciens.

Les informations résultantes seront capitalisées et mises à disposition des exploitants pour évaluation.

Moyens : Réalisation d'un dispositif de captation, traitement et analyse de données embarqué sur un véhicule. Analyse par IA des données, détections d'anomalies et capitalisation d'information.

Livrable : Synthèse de la preuve de concept. Recommandations pour le développement de la surveillance des RNG par edge-computing.

Certains éléments pourront être intégrés dans le Guide Surveillance du risque rocheux (action SCom 02).

Tâche 1. Etat de l'art sur les publications existantes et la réglementation.

L'état de l'art international des usages, traitements et publications relatifs à cette problématique, sera réalisé.

Un cahier des charges du dispositif et des expérimentations sera réalisé.

Tâche 2. Réalisation d'un prototype de dispositif d'acquisition embarqué

Dans un premier temps, un prototype de dispositif embarqué de captation, traitement et analyse de donnée sera réalisé.

Ce dispositif sera équipé de capteurs image et Lidar et d'une IHM de pilotage et d'augmentation des informations par les opérateurs du véhicule.

En complément, un système de collecte et d'analyse de l'ensemble des données acquises sera mis en œuvre afin de rejouer les données.

Tâche 3. Expérimentation sur un territoire à définir

Dans un premier temps, un territoire permettant de répondre au cahier des charges sera sélectionné.

Un protocole d'expérimentation sera établi avec des sessions de formation des opérateurs.

Sur ce territoire, des données de référence seront mesurées, traitées et analysées en situation de edge-computing.

Des jeux de l'ensemble des données seront réalisées afin d'affiner et de comparer les résultats des traitements et analyses.

Tâche 4. Recommandations

Les recommandations seront organisées en deux parties :

1. La synthèse de l'expérimentation et les résultats seront décrits et évalués.

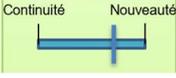
Programme

- Pour chaque jeu de données, il sera indiqué :
- les résultats fournis : type, précision, résolution ;
 - les capteurs utilisés ;
 - Le traitement : algorithme, logiciel, temps de traitement, coût ;
 - Les limites d'utilisation : orientation, végétation, contraintes météorologiques, mouvements à quantifier, cinématique, ,
2. Des recommandations pour le développement de la surveillance par edge-computing.

Résultats scientifiques ou techniques escomptés : L'approche proposée permettra de promouvoir et encadrer l'usage du edge-computing pour améliorer la surveillance et la gestion des risques naturels gravitaires.

3.4.3. Sécurisation

SSecu_01 : Alerte, alarme et sécurisation des enjeux mobiles

Verrous scientifiques et techniques	TRL	Position vis-à-vis de C2ROP	Actions
<ul style="list-style-type: none"> • État de l'art alerte, alarme et sécurisation • Identification des verrous réglementaires, techniques et d'usages • Propositions de pistes d'évolutions et d'innovations 	5 – 7		<ul style="list-style-type: none"> • Rédaction d'un état de l'art • Benchmark des usages • Proposition de principes adaptés aux RNG • Identification des verrous et pistes d'innovation • Etablissement d'un outil REX • Ajouts dans le guide surveillance des risques rocheux

Partenaires identifiés : Geolithe, PARN, CD73, CD38, SAGE, EDF, Grenoble Alpes Métropole

Objectif : L'efficacité des mesures de mitigation des risques naturels gravitaires par surveillance est conditionnée par la transmission d'information aux personnes menacées afin de leur permettre de se mettre en sécurité. L'objet de cette action est d'établir un benchmark des usages nationaux et internationaux dans différents domaines de gestion des risques (inondations, crues rapides, avalanches, séismes, mais aussi risques technologiques, sanitaires...) et de proposer des évolutions techniques, méthodologiques et réglementaires permettant l'augmentation significative de la sécurisation effective des personnes. Cette action pourrait permettre d'accroître fortement la place de la surveillance dans les stratégies de gestion des risques.

Tâche 1. Benchmark des usages

Benchmark des usages nationaux et internationaux dans différents domaines de gestion des risques : inondations, crues rapides, avalanches, séismes, mais aussi risques technologiques, sanitaires...
 Ex. application smartphone nationale "SAIP", "système d'alerte et d'information des populations", GALA (gestion de l'alerte locale automatisée), produit APIC – Alerte Pluie Inondations à l'échelle Communale, réseaux sociaux...

Tâche 2. Evolutions techniques et méthodologiques

Cette tâche vise proposer des évolutions aux usages et pratiques identifiées en tâche 1, adaptées au contexte de la surveillance des mouvements gravitaires.

Volet prospectif :

Il s'agit d'explorer les potentiels d'améliorations de la gestion des risques via la sécurisation des enjeux mobiles. Les besoins et contraintes seront établis en lien étroit avec les acteurs opérationnels afin de

Programme

permettre le développement ultérieur de méthodes et techniques innovantes. Ce volet sera réalisé par l'organisation d'ateliers ouverts permettant l'expression de l'intelligence collective. Il faudra répondre aux questions concernant la prise en compte des différents types « d'enjeux mobiles » :

- Usagers en transit
- Population locale
- Population touristique
- ...

Tâche 3. Gestion des risques et sécurisation des enjeux mobiles

Recommandations : il s'agit de proposer un cadre méthodologique d'intégration de ces outils dans la politique de gestion des risques.

Résultats scientifiques ou techniques escomptés : L'approche développée permettra de proposer de nouvelles méthodes de diffusion de l'alerte adaptées au cadre des risques gravitaires ainsi que des recommandations de bonnes pratiques pour optimiser la mise en sécurité des enjeux mobiles.

3.4.4. Surveillance spécifique

SSpe_01 : Surveillance des ouvrages de protection

Verrous scientifiques et techniques	TRL	Position vis-à-vis de C2ROP	Actions
<ul style="list-style-type: none">• Constitution de jeux de données• Comparaisons expérimentales de différentes méthodes• Propositions de pistes d'évolutions et d'innovations	5 - 9		<ul style="list-style-type: none">• Rédaction d'un état de l'art• Etablissement d'un outil REX• Constitution de jeux de données• Réalisation d'expérimentations comparatives• Benchmark des usages• Proposition de principes adaptés aux RNG• Identification des verrous et pistes d'innovation• Ajouts dans le guide surveillance des risques rocheux

Partenaires identifiés : Géolithe, INRAE, CAN, NGE Fondations, SNCF Réseau, EDF CIH, CD38, CD73, Autoroutiers, SITES, Rincet Alpes

Objectif : Développer l'usage de la surveillance des ouvrages de protection des risques naturels gravitaires pour augmenter leur efficacité en optimisant leur maintenance et contribuer à la connaissance des phénomènes par la captation d'informations.

Cette action profite de la conjonction de l'émergence de technologies innovantes opérationnelles dans le domaine des :

- capteurs surfaciques ou linéaires (photo, lidar, fibre optique...) positionnés sous des vecteurs variés (drones, véhicules...)
- MEMs pour collecter de grandes quantités de données à bas coût
- méthodes de traitement et d'analyse des données (IA, edge computing, IoT...).

Ces technologies permettront d'augmenter l'efficacité des systèmes et méthodes de surveillance et donc d'accroître fortement la place de la surveillance des ouvrages de protection risques naturels gravitaires dans les stratégies de mitigation des risques

Tâche 1. Etat de l'art sur la surveillance des ouvrages de protection contre les risques naturels gravitaires

L'état de l'art national et international sur le sujet sera réalisé en explorant les domaines de la surveillance des ouvrages de protection contre les risques naturels gravitaires, contre les risques d'inondations, et plus généralement les ouvrages de génie civil.

Tâche 2. REX sur la surveillance des ouvrages de protection contre les risques naturels gravitaires

L'objectif est de réaliser le retour d'expérience des exploitants de systèmes de surveillance des ouvrages de protection contre les risques naturels gravitaires.

Les éléments d'informations recherchés pourraient être :

- Détection d'événement
- Quantification et qualification des événements
- Localisation et qualification des endommagements
- Exploitation des résultats pour la maintenance des ouvrages de protection et la mitigation des risques.

Tâche 3. Constitution d'une base de données

Cette tâche vise à constituer une base de données issue de dispositifs de surveillance existants et d'expérimentations spécifiques.

Un cadre sera établi pour capitaliser les données existantes (principalement qualitatives issues d'observations naturalistes) et les données numériques issues de systèmes de surveillance. Un travail concernant la crédibilisation des données incertaines/hétérogènes sera réalisé.

Tâche 4. Expérimentations in situ

Cette tâche vise à tester les méthodes de surveillance d'ouvrages de protection existantes et à apporter des réponses aux besoins opérationnels complémentaires émergeant du REX.

Il est prévu d'acquérir des données avec des méthodes de mesures distantes et rapprochées. Les observations humaines et les mesures, traitements et analyses seront comparés.

Plusieurs méthodes d'analyse des données seront testées dans l'objectif de déduire un maximum d'informations sur :

- les modifications de la géométrie des ouvrages ;
- les modifications des états de surface (ex. fissures, corrosion...) ;
- les modifications des propriétés mécaniques des composants de l'ouvrage ;
- L'environnement de l'ouvrage (embroussaillement, événements...).

Des analyses des coûts bénéfiques seront réalisées pour comparer les méthodes de mesure et traitement des données d'une part, et comparer les méthodes d'analyse d'autre part.

Tâche 5. Surveillance des ouvrages risques naturels gravitaires

Volet prospectif

Il s'agit d'explorer les potentiels d'améliorations de la mitigation des risques via la surveillance des ouvrages de protection. Les besoins et contraintes prospectifs seront établis en lien étroit avec les acteurs opérationnels afin de permettre le développement ultérieur de méthodes et techniques innovantes. Ce volet sera réalisé par l'organisation d'ateliers ouverts permettant l'expression de l'intelligence collective.

Volet recommandations

Il s'agit de proposer un cadre méthodologique d'intégration de ces techniques et méthodes dans un cadre opérationnel à destination de tous les opérateurs (maîtres d'ouvrages, exploitants, maîtres d'œuvre, entreprises...).

Résultats scientifiques ou techniques escomptés : L'approche proposée permettra de proposer de nouvelles méthodes de surveillance des ouvrages de protection et des recommandations de bonnes pratiques pour rationaliser les opérations de maintenance sur ces ouvrages.

SSpe 02 : Solutions agiles de surveillance des risques naturels gravitaires

Verrous scientifiques et techniques	TRL	Position vis-à-vis de C2ROP	Actions
<ul style="list-style-type: none"> Comparaisons expérimentales de différentes méthodes 	4 - 7		<ul style="list-style-type: none"> Rédaction d'un état de l'art Benchmark des usages Réalisation d'expérimentations comparatives Recommandations adaptées aux RNG Ajouts dans le guide surveillance des risques rocheux

Partenaires identifiés : Géolithe, UGE, Myotis, SITES, SNCF Réseau, EDF, BRGM, Nexeya, Omiv

Contexte et enjeux : Pour satisfaire des besoins mitigation des risques et notamment de permettre le maintien ou le rétablissement de l'exploitation d'enjeux dans un délai très court, il est fait fréquemment usage de technologies agiles (flexibles et rapidement déployables), telles que 1) des systèmes itinérants (laser mobile, plateforme drone multi-spectraux et IR) de télésurveillance, 2) des systèmes de déploiement rapide de réseaux dense de capteurs bas-coût (GNSS bas-cout, RFID, appareils photographiques, etc) ainsi que l'apport des réseaux d'observation citoyens. Il est pertinent de développer l'usage de ces méthodes et de ces outils prêts à l'emploi, soit dans le cadre de surveillance de période de crise gravitaire, soit pour des opérations de suivi par campagne mais à haute fréquence.

Objectifs : Stimuler et accompagner l'usage des moyens de solutions "agiles" d'observation pour accroître la connaissance et la mitigation des risques naturels gravitaires par l'exploration, le développement et l'expérimentation d'outils et de méthodes innovants.

Tâche 1. Etat de l'art sur des équipements itinérants de télémessure

L'état de l'art international des usages, expérimentations et publications relatifs à cette thématique, sera réalisé. Il s'appuiera notamment sur les pratiques concernant d'autres domaines (ouvrages de génie civil, ouvrages industriels, volcans...).

Tâche 2. Benchmark

Les solutions itinérantes de surveillance adaptées aux risques naturels gravitaires seront comparées suivant différents paramètres :

- Résolution et précision
- Limites d'utilisation
- Ergonomie en itinérance
- Informations résultantes
- Coûts
- ...

Tâche 3. Expérimentations sur le site de Séchilienne

Cette tâche vise à tester certaines solutions itinérantes de surveillance par télémesure.

Il est prévu le test de solutions de télémesures choisies suite au benchmark. Les expérimentations seraient réalisées sur le site de Séchilienne. Ce site dispose de systèmes de télémesure fixes performants qui permettront de comparer les résultats obtenus.

Les performances des diverses solutions seront en particulier comparées selon les critères suivants :

- Répétabilité de la mesure après mobilisation du dispositif,
- Sensibilité des mesures aux conditions météorologiques (température, humidité, brouillard, pluie, jour, nuit),
- Sensibilité à l'état de surface de la cible (terrain nu, végétation, besoin de réflecteurs...),
- Limites des mesures (précision, distance mini, distance maxi, durée d'utilisation...),
- Facilité de mobilisation (encombrement, poids, installation, énergie, autonomie),
- Facilité d'exploitation (expertise de l'opérateur, traitement et analyse des données),
- Communications des informations
- Coûts d'investissement et de fonctionnement
- ...

Les méthodes de mesure d'une part, et les méthodes d'analyse d'autre part seront comparées de façon détaillée.

Des analyses coûts/bénéfices seront réalisées pour comparer les solutions globales.

Tâche 4. Recommandations

Il s'agit de proposer un cadre méthodologique d'intégration de ces solutions dans un cadre opérationnel à destination de tous les opérateurs (maîtres d'ouvrages, exploitants, maîtres d'œuvre, entreprises...).

Les recommandations aborderont les points suivants :

- Définition des concepts et solutions d'urgence,
- Définition des concepts et solutions itinérantes de surveillance par télémesure,
- Inventaire et adéquation des solutions de surveillance en fonction des contextes,
- Définition des limites d'emploi de chaque solution,
- Recommandations de gestion de situation d'urgence avec utilisation de solutions itinérante par surveillance.

Partage d'items avec l'action concernant le "guide de surveillance du risque rocheux".

Résultats scientifiques ou techniques escomptés :

Cette action a pour objectifs de stimuler et accompagner l'usage de ces moyens par l'exploration, l'expérimentation de solutions existantes ou innovantes, et leur combinaison. Des recommandations seront réalisées pour permettre l'usage opérationnel de ces solutions.

3.5. Mode de fonctionnement, gouvernance et valorisation

3.5.1. Périmètre du partenariat

La seconde édition du projet C2ROP s'appuie déjà sur un panel d'acteurs consolidé lors de la première session (2016-2021), et relevant des secteurs publics (laboratoires universitaires, Instituts de recherche) et privés (Bureaux d'étude, PME, Groupes TP, Industriels), représentants de collectivités territoriales (Communauté de Communes, Conseils Départementaux), et ensemble des Maîtres d'Ouvrages des domaines routiers, autoroutiers, ferroviaires, etc.

Ce panel évolutif est construit pour permettre à la fois de valider la pertinence des objectifs du projet, et lui fournir les moyens scientifiques, techniques et pratiques de répondre aux questions soulevées. Il veille à s'appuyer sur une base élargie du territoire français, afin de garantir la dimension nationale du projet ; toutefois, ce partenariat reste en évolution, et nous espérons, au cours des prochains mois, intéresser des partenaires de régions peu représentées lors de la première édition (notamment région pyrénéenne et Massif central).

3.5.2. Eléments de Gouvernance et de fonctionnement

La gouvernance du projet, dans la continuité du précédent modèle, va reposer essentiellement sur deux organes :

- Le Bureau Directeur
- Le Comité de Pilotage

Le Bureau Directeur sera désigné par l'Assemblée Générale. Il sera composé de 7 membres représentant :

- la présidence
- la direction de Projet
- la direction scientifique
- la direction technique
- la direction de la valorisation
- le mandat
- le secrétariat

Le Comité de Pilotage est l'organe décisionnel fondamental du projet. Nous prendrons soin à ce que l'ensemble des facettes des thématiques soit représenté, en particulier celles exprimant la demande sociétale (MOA). Il comprendra les membres du Bureau, ainsi qu'un représentant des principaux partenaires.

Le Comité de Pilotage se réunit 4 fois par an, sur une journée. Une des 4 réunions annuelles est dédiée à l'audition du projet et la rencontre avec un Comité d'Orientation dont le contour sera arrêté par l'Assemblée Générale. Les réunions du COPIL s'étalent sur une journée ; elles ont lieu en principe à la FRTP, sur Lyon. Dans le cadre de cette seconde édition, et s'appuyant sur les inflexions de fonctionnement acquises au cours de la crise sanitaire du COVID-19, le consortium s'engage à privilégier le plus possible un mode d'échange à distance par visio-conférences, notamment au sein des groupes de travail. En outre, au moins un des 4 COPIL annuels pourra être organisé en visio-conférence. Toutefois, parce que les interactions directes, support de la dimension humaine d'un projet, restent la pierre angulaire du consortium, l'organisation de rencontres physiques (COPIL avec

Programme

le COS, AG, autres événements à périmètre élargi) restera de mise sous réserve de toute autre recommandation par ailleurs.

En outre, le projet est en lien direct avec les syndicats ou groupes professionnels suivants :

- Clusters :
 - INDURA (Infrastructures Durables Rhône-Alpes) qui rassemble et accompagne les acteurs des Travaux Publics sur les enjeux de demain pour favoriser le développement de projets innovants dans le domaine des infrastructures de transport et de production d'énergie
 - Cluster Montagne qui accompagne et promeut, en France et dans le Monde, les acteurs français de l'aménagement en montagne
- Le PARN (Pôle Alpin des Risques Naturels), association de coordination d'études et de recherches pour la prévention des risques naturels en montagne
- La FNTP, Fédération Nationale des Travaux Publics
- Le Syndicat Français des Entreprises de Travail en Hauteur, SFETH
- Le Syntec-ingénierie, Fédération des professionnels de l'ingénierie et ses métiers
- L'Association Française de Génie Civil
- Sociétés savantes :
 - Comité Français de Mécanique des Roches
 - Comité Français de Géologie de l'Ingénieur
 - Comité Français de Mécanique des Sols

Notons également une mobilisation très forte des Maîtres d'Ouvrages, dont les services techniques se sont regroupés en réseau métier, afin d'une part de désigner un représentant au sein du Comité de Pilotage, et d'autre part disposer d'une plateforme professionnelle permettant de renforcer les synergies (analyse des besoins, partage des pratiques et retours d'expérience) entre les différents MOAs. Cet aspect a été un des points les plus marquants du projet lors de la première édition.

3.5.3. Analyse de risque, forces et faiblesses

Une force majeure du projet provient de sa dimension, d'ampleur nationale :

- Nombre élevé de partenaires
- Diversité dans la nature des partenaires (Maîtres d'Ouvrages, Collectivités publiques, Entreprises, Bureaux d'Etudes, Laboratoires universitaires, Instituts de recherche)
- Poursuite d'une initiative sans équivalent, avant C2ROP, dans le domaine des risques rocheux
- Ampleur des travaux proposés
- Diversité des travaux menés : investigations numériques (data mining et intelligence artificielle), expérimentales, à des échelles diverses (de l'organe à l'ouvrage, du joint rocheux au site)
- Juxtaposition de travaux de recherche amont (comportement mécanique d'organes spécifiques, modélisation numérique), et d'applications ouvertement destinées à l'ingénierie et aux gestionnaires.

Le mode de fonctionnement pyramidal, avec un découpage par Axes et une structuration du programme par Actions, permet de manipuler des collectifs plus légers, mieux recentrés, et donc plus efficaces et réactifs. En outre, la diffusion des connaissances entre les collectifs assurée par le biais d'une réunion annuelle générale, offrira un bilan des travaux réalisés au cours de l'année écoulée, et constituera une plateforme d'échange et de circulation de l'information.

La gestion technique du projet par le Cluster INDURA contribue significativement à l'ancrage territorial du projet, et facilite le lien entre les différents acteurs : MOA, entreprises, monde académique.

Enfin, dans la continuité de la première édition, et parce que ce projet relève d'une initiative inédite en France dans le monde du risque rocheux, l'ensemble du partenariat démontre résolument une volonté sans faille à avancer de concert, pour contribuer à l'analyse de cette thématique de manière unifiée, globale et intégrée.

La principale faiblesse du projet est liée à son modèle économique qui repose essentiellement sur un principe d'autofinancement assuré par les cotisations, la mise à disposition de ressources propres (temps personnel, moyens matériels et de calcul). Cette faiblesse a été très largement commentée lors des principales Assemblées Générales, imposant des contraintes très fortes de fonctionnement, et une recherche constante de financement externe (2 projets FUI, 2 projets régionaux et un projet FEREC ont été portés par des entreprises membres de C2ROP, sur des thématiques en lien direct avec le Projet National). Cette faiblesse, comme il a été souligné dans les conclusions du dernier rapport d'évaluation par le CST (mars 2020), est aussi une démonstration de la force de C2ROP, par ses capacités d'auto-organisation.

3.5.4. Valorisation

International Symposium Rock Slope Stability (RSS)

Le Projet National est en charge depuis 2015 de l'organisation et l'animation des Symposiums internationaux RSS (Rock Slope Stability), initiés par l'INERIS en novembre 2010. Il s'agit d'un cycle récurrent, s'appuyant sur une fréquence d'une conférence tous les deux à trois ans. Pourvu d'un Comité scientifique validé en Conseil d'Administration, ce forum international rassemble pendant trois journées près de 200 professionnels et chercheurs travaillant à l'évaluation et la prévention du risque rocheux. Cette rencontre est organisée par le Projet National C2ROP avec le support de l'IREX (Institut pour la recherche appliquée et l'expérimentation en Génie civil) et du cluster INDURA et avec le soutien des Comités Français de Géologie de l'Ingénieur (CFGI), de la Mécanique des Roches (CFMR), et des Mécaniques des Sols (CFMS), le cluster Montagne, et le Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire.

Une première édition a eu lieu à Lyon (12-14 novembre 2016), et une seconde édition à Chambéry (13-15 novembre 2018). La troisième édition, en cours de préparation, se déroulera à nouveau sur Chambéry, en novembre 2021.

En 2024 se tiendra l'International Symposium IS Landslide à Chambéry. En fusionnant avec RSS pour cette édition-là, ISL 2024 constitue pour le projet un espace de valorisation de niveau international permettant la diffusion des connaissances acquises à mi-parcours, avec l'ensemble des acteurs des différents continents dans le domaine des instabilités de versants.

Il convient de souligner qu'un des points originaux de ces conférences est l'agrégation des sphères académiques, techniques et professionnelles, en veillant à éviter tout cloisonnement.

Publications techniques et scientifiques

A l'initiative des acteurs du projet, les résultats des travaux menés par le collectif feront l'objet de publications scientifiques et techniques dans les principales revues internationales (volet scientifique) et de la profession (volet technique) avec référence au Projet National.

3.6. Eléments budgétaires

3.6.1. Coût du projet

Ci-dessous, le budget global estimé :

Axe	Section	Action potentielle	Budget global	
Aléas dans un contexte de changement climatique	Influence du changement climatique sur les aléas	Réponse des chutes de blocs, laves torrentielles et glissement de terrain au changement climatique : évaluation statistique et recommandations pour la pratique dans différents contextes topo-climatiques	239 200,00 €	
	Propagation	Pratiques communes pour les études trajectographiques et l'exploitation de leurs résultats	155 000,00 €	
		Outils numériques pour la modélisation des éboulements rocheux de grande ampleur	172 500,00 €	
	aléa résultant	Groupe de travail sur la qualification et quantification de l'aléa résultant	79 600,00 €	
		Cartographie de l'aléa pour le recul de tête de falaise en contexte classique	177 000,00 €	
Observatoire	Observatoire du risque rocheux	279 000,00 €		
TOTAL Aléas			1 102 300,00 €	
Risque, acceptabilité et gestion du risque	Evaluation des vulnérabilités et analyses coût-bénéfice	Évaluation des vulnérabilités matérielles et fonctionnelles sur les zones batiées	254 000,00 €	
		Évaluation économique des coûts indirects causés par un événement rocheux sur une voie de circulation routière	119 500,00 €	
		Modélisation quantitative du risque rocheux pour l'optimisation des mesures de protection	113 800,00 €	
	Le couvert forestier en protection	Prise en compte du potentiel du couvert forestier dans la protection contre les aléas chutes de blocs des infrastructures routières	28 800,00 €	
	Gestion du risque par les maîtres d'ouvrages	Réseau Maîtres d'Ouvrages	128 800,00 €	
		Risque acceptable	97 400,00 €	
Gestion du risque collaborative	Plateforme collaborative de gestion du risque	196 000,00 €		
TOTAL Risque			938 300,00 €	
Ouvrages de protection	Ecrans souples	Ecrans souples - Comportement général des ouvrages expérimental et numérique	455 400,00 €	
		Ecrans souples - Développement de modèles spécifiques par rapport aux sollicitations dynamiques		
		Ecrans souples - Guide déflecteurs		
	Merlons	Modélisation Merlons	587 000,00 €	
		Maintenance et réparation des merlons pare-blocs Guide merlons et digues		
	Ancrages	Détermination du comportement des différents types d'ancrages sous sollicitation non axiale en tête	380 150,00 €	
		Méthodologie de contrôle des ancrages d'ouvrages		
Ouvrages souples soumis à d'autres aléas	Dimensionnement fonctionnel des ouvrages souples soumis à des aléas multiples	222 000,00 €		
	Barrages souples en contexte torrentiel			
Protections d'urgence	Protections d'urgence	86 530,00 €		
TOTAL Ouvrages			1 731 080,00 €	
Surveillance	Structuration de l'axe surveillance	Mutualisation et optimisation des moyens et des tâches de l'axe surveillance	57 400,00 €	
		Guide pour la surveillance des risques naturels gravitaires	232 000,00 €	
	Détection d'événements et prédictions	Signes précurseurs et prédiction des événements rocheux "rapides"	117 000,00 €	
		Signes précurseurs et prédiction des événements géologiques "lents"	117 000,00 €	
		Téledétection spatiale pour la surveillance pour phénomènes de grande ampleur	178 500,00 €	
		Détection d'événements par edge computing, tous phénomènes gravitaires	203 500,00 €	
	Sécurisation	Alerte et sécurisation des enjeux mobiles	150 000,00 €	
Surveillance spécifique	Surveillance des ouvrages de protection	113 400,00 €		
	Solutions agiles de surveillance des risques naturels gravitaires	291 000,00 €		
TOTAL Surveillance			1 459 800,00 €	
			Valorisation	60 000,00 €
			Frais de coordination	420 918,40 €
TOTAL Projet			5 712 398,40 €	

3.6.2. Recettes

cotisations	690 000,00 €
subvention ministérielle	400 000,00 €
projets externes type ANR, régionaux, ademe, interrégionaux	2 400 000,00 €
apport en nature des partenaires	2 222 398,40 €
TOTAL	5 712 398,40 €

Nous prévoyons de déposer des projets en lien avec les actions du programme de recherche afin d'obtenir des financements annexes.

Axes	Coût (k€)	Part envisagée couverte par ressources externes (k€)	Nature des ressources externes
Aléas	1 102	500	De type régionaux / ademe
Risques	938	400	de type Interreg / ANR
Ouvrages	1731	800	de type régionaux
Surveillance	1460	700	De type régionaux / ANR

Un projet ANR sera soumis à l'automne 2021. Il portera essentiellement sur l'apport et développement d'outils basés sur l'Intelligence Artificielle pour l'analyse des données et mesures et la modélisation des processus afin de contribuer à la gestion opérationnelle des risques gravitaires. A ce titre, il concernera en premier lieu les axes Surveillance et Parades, et dans une moindre mesure l'axe Aléas en lien avec le changement climatique. Afin d'explorer la faisabilité de cette voie innovante, basée sur le recours à l'Intelligence Artificielle, le projet RINA (Démonstrateur de l'utilisation de l'Intelligence Artificielle pour une gestion opérationnelle des risques naturels d'origine géologique), déposé par un micro-consortium issu du partenariat C2ROP, a été lauréat de l'appel à projets FEREC fin 2020.

ANNEXE : SYNTHÈSE DE C2ROP – 1ÈRE ÉDITION