

# Retour sur 20 ans de conception d'écrans pare-pierres par NGE FONDATIONS 20 years of rockfall barrier design by NGE FONDATIONS

Philippe ROBIT premier auteur<sup>1\*</sup>, Loic DUGELAS deuxième auteur<sup>1</sup>

*1 NGE FONDATIONS, St Priest, France*

*\*probit@ngefondations.fr*

**RÉSUMÉ :** Depuis 1996, NGE FONDATIONS conçoit des écrans de protection contre les chutes de pierres. En 2006, une approche par modélisation est initiée afin d'anticiper les comportements des ouvrages lors de leurs tests de qualification en grandeur réelle. Nous proposons de retracer l'évolution sur 20 ans de ces approches numériques couplées à des essais statiques puis dynamiques. Au fil du temps, leur rôle est passé de modeste à stratégique dans les prises de décisions nécessaires à la conception de ces produits afin de les rendre non seulement efficaces mais aussi efficaces.

**ABSTRACT:** Since 1996, NGE FONDATIONS has been designing protective barriers against rockfalls. In 2006, a modelling approach was initiated to anticipate the behaviour of these structures during full-scale qualification tests. We propose to trace the evolution over 20 years of these numerical approaches, combined with static and then dynamic tests. Over time, their role has shifted from modest to strategic in the decision-making processes required for the design of these products, making them not only effective but also efficient.

**Mots-clés :** conception, modélisation, expérimentation, écran de filet, chute de pierres

## 1 INTRODUCTION AUX ECRANS PARE-PIERRES

Les écrans pare-pierres (ou « kit de protection » suivant l'Agrément Technique Européen ou « écran de filet » suivant la norme d'application française) ont la particularité de devoir supporter l'application non pas d'une force ou d'une pression mais d'une énergie. Cette particularité les différencie des ouvrages courants dont la justification régie par les Eurocode consiste souvent à opposer une résistance mécanique face à une sollicitation statique ou quasi-statique.



Figure 1. Écran pare-pierres de St Béat

Dissiper l'énergie d'un impact, c'est fournir un travail au sens mécanique soit une force multipliée par un

déplacement. Il faut donc ajouter à l'ouvrage une capacité de déformation qui doit en plus se combiner « stratégiquement » avec l'accroissement de la résistance pour être efficace. On peut en déduire que construire un mur en béton armé n'est pas la meilleure solution face à un éboulement rocheux.

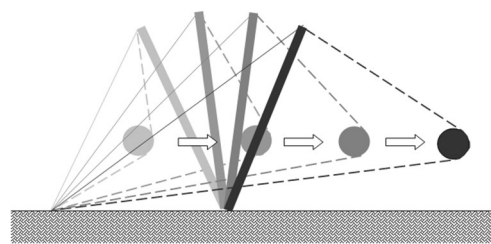


Figure 2. Schéma simplifié de fonctionnement

En 2008, un agrément technique européen (EAD 340059-00-0106) a imposé des crash-tests pour valider les capacités des produits du marché. Cette avancée a permis de mettre fin aux calculs parfois fantaisistes de justification d'ouvrages dont le rôle est de protéger les usagers. Mais ces essais en grandeur réelle coûtent chers et mieux vaut arriver préparé pour réussir l'agrément tout en conservant un produit concurrentiel. La modélisation combinée à des essais de caractérisation des constituants apparaît alors comme la bonne marche à suivre.

## 2 2001-2006 PREMIER PAS DANS L'EXPERIMENTAL ET LA MODELISATION

Avant de se lancer dans un programme de recherche long et coûteux, il est prudent de commencer par une démarche de type POC (proof of concept). Ce principe a pris la forme d'une campagne d'essai de traction sur les composants existants avec des moyens rudimentaires (un peson, un décimètre, une prise de note). Ces données ont permis d'établir des ordres de grandeurs de performances et de faire le tri dans les produits à disposition.



Figure 3. Essai quasi-statique sur un filet

Cette phase ne doit pas être négligée car elle conditionne les principales orientations technologiques des futurs développements : il sera de plus en plus difficile de revenir sur ces choix à mesure que l'investissement de développement s'accumule.

En parallèle, un apprentissage de la modélisation est mené, toujours avec des moyens modestes (un stagiaire, un tableur Excel), afin de cerner les principes généraux des calculs itératifs non analytiques.

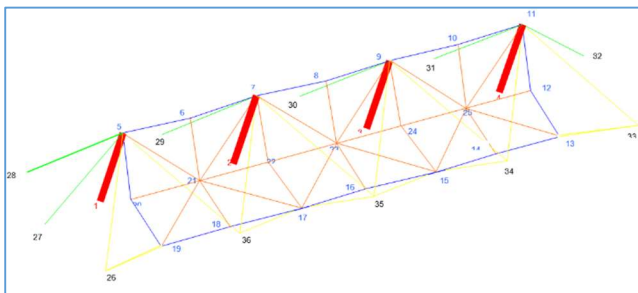


Figure 4. Modèle d'écran rudimentaire (36 nœuds)

Ce premier travail a permis d'appréhender les principaux verrous à venir et d'atteindre le niveau requis pour dialoguer avec des partenaires académiques dont la compétence s'est rapidement imposée pour mener à bien ce projet industriel.

## 3 2008-2011 – TRAVAUX AVEC L'INSA DE LYON

La collaboration engagée avec l'INSA de Lyon à travers une thèse CIFRE a comme objectif d'identifier, de comprendre et de sous-peser l'influence des principaux mécanismes qui gouvernent la réponse des écrans souples lors d'un impact.

Un large programme expérimental est réalisé à plusieurs échelles sur le filet spécifique de NGE, sur les dissipateurs d'énergie et même sur des composants plus secondaires comme les haubans afin de caractériser leurs lois de comportement (raideur, plasticité, glissement, limites de déformation).

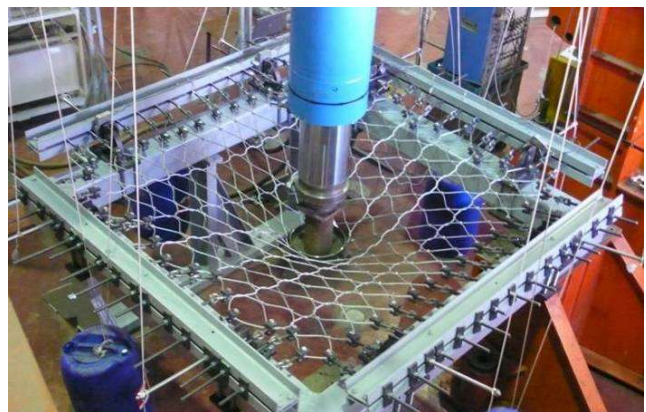


Figure 5. Essai du filet par poussé hors plan

Après des essais quasi-statiques conduits dans des configurations maîtrisées, les premières sollicitations dynamiques instrumentées sont mises en œuvre afin de reproduire les cinématiques aux vitesses de sollicitation réelles.



Figure 6. Dissipateur testé par sollicitation dynamique

En parallèle, des essais d'agrément d'écran de capacité 3000 kJ et 5000 kJ sont menés avec une instrumentation renforcée (caméra rapide, thermique, redondance de capteurs...) afin de disséquer les différentes phases de comportement.

Ces essais mettent en évidence plusieurs phénomènes jusque-là pressentis : comportement fortement non linéaire du maillage en torsion-traction, effet « rideau » (glissement progressif du filet sur les câbles de rive), redistribution des efforts au sein de la structure par paliers successifs et rôle fondamental de l'enchaînement des déclenchements de dissipateurs sur la forme de la courbe globale effort-déplacement.

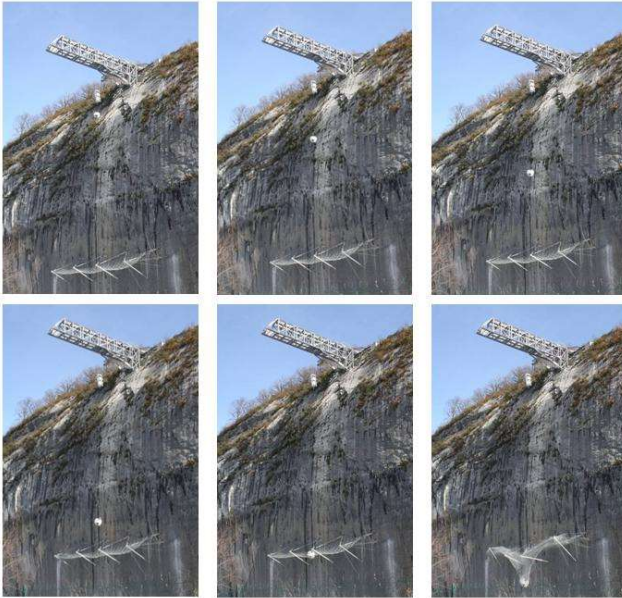


Figure 7. Essai de certification de l'écran ELITE 3000kJ

Cette banque de données expérimentales constitue la base du travail de modélisation. L'équipe s'est orientée vers des modèles capables de représenter explicitement les constituants clés que sont le filet à comportement orthotrope et les dissipateurs à comportement bilinéaire. Une attention particulière est portée à la calibration. Même simplifiées, les représentations numériques doivent conserver leurs caractéristiques essentielles.

Sur cette base, deux modèles globaux de l'ouvrage sont implémentés en explorant les approches des éléments finis et des éléments discrets.

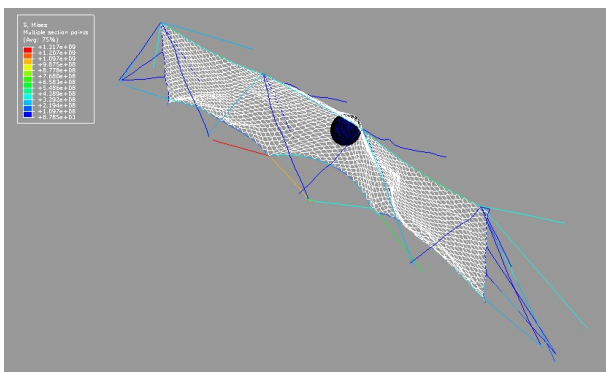


Figure 8. Modèle aux éléments finis

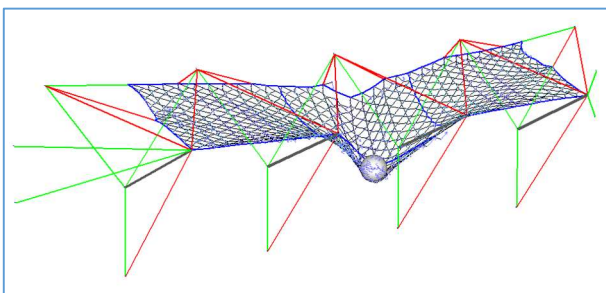


Figure 9. Modèle aux éléments discrets

Pour la première fois, il devient possible de comparer virtuellement différentes configurations d'écran en jouant par exemple sur l'élanement des filets, la position ou le seuil de déclenchement des dissipateurs. L'outil numérique, encore imparfait, permet de confirmer quelles sont les combinaisons les plus pertinentes mais sans réelle plus-value par rapport aux retours d'expériences déjà accumulés : le modèle n'est pas encore prédictif à ce stade. Il lui manque l'intégration de phénomènes physiques plus complexe comme les frottements entre éléments qui influencent fortement les redistributions de contraintes.

## 4 2016-2021 – LE PROJET PRIDYN

### 4.1 Présentation du projet

PRIDYN est un projet FUI (Fond Unique Interministériel) déposé auprès de la BPI par un consortium de 3 entreprises (NGE Fondations en mandataire, Texinov et Sites) et 2 laboratoires (INRAE et UGE). L'objectif est de développer diverses solutions innovantes de protection contre les risques naturels tels que :

- Les kits pare-pierres
- Les barrages souples contre les coulées
- Les écrans forestiers
- Les DCR (Détection de Chutes de Roches)

Comme souvent, le projet a évolué au fil des ans : tout n'a pas été développé (les DCR) et d'autres pistes ont été explorées (les écrans rigides d'urgence). Il est important de rester flexible dans la gestion de ce type de projet.

### 4.2 Développement de moyens expérimentaux

Deux bancs d'essai de traction sont développés en interne pour caractériser le comportement dans le plan et hors du plan d'échantillon de filet de 2,5 m × 2,5 m avec un effort maximal de 400 kN et une capacité de déformation de 700 mm.

Ces moyens permettent la compréhension des mécanismes fins de déformation et la création de données fiables pour la calibration des modèles numériques.



Figure 10 : banc d'essais dans le plan et hors plan

### 4.3 Les évolutions numériques

La méthode aux éléments discrets éprouvée lors des précédentes modélisations est réutilisée pour modéliser l'écran ELITE 5000 kJ. Un modèle est calibré indépendamment pour chaque composant de l'ouvrage. Ces briques sont ensuite assemblés pour obtenir le modèle de l'ouvrage complet.

#### 4.3.1 Modèles des composants

##### 4.3.1.1 Freins

Le comportement des freins est modélisé par une loi élastoplastique multilinéaire-linéaire à 4 paramètres : un module élastique, un module plastique, une limite élastique (effort de déclenchement), et une déformation maximale. Ces paramètres sont calibrés en utilisant les résultats des essais quasi-statiques expérimentaux (Figure 11).

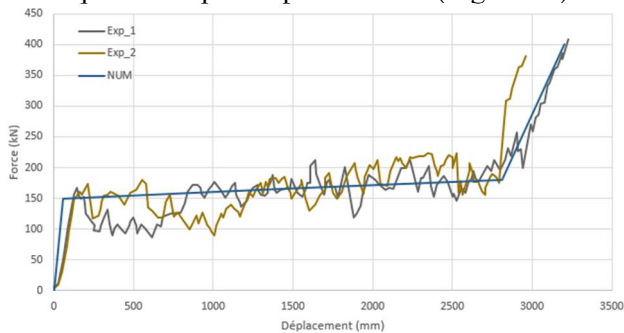


Figure 11 : courbe force déplacement utilisée pour la calibration du modèle des freins

##### 4.3.1.2 Filet

Un nouveau modèle numérique du filet ELITE est développé afin d'intégrer le glissement entre les boucles de la nappe. Deux lois de comportement sont associées au câble du filet (Figure 12). La première (interaction F), représentative de la section de câble entre deux agrafes, est associée à un modèle bilinéaire défini par 4 paramètres (deux modules et deux déformations). La seconde (interaction G), pour les autres sections de câble, est associée à une loi élastique linéaire à deux paramètres (un module et une déformation maximale). La formulation de ce modèle permet également d'intégrer un coefficient de frottement entre les brins du filet.

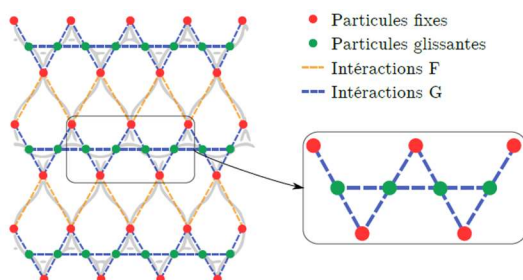


Figure 12 : Schéma représentatif du modèle de filet

Deux essais de traction, sur une ou deux rangées de maille, permettent de calibrer les paramètres des deux lois de comportement (Figure 13).

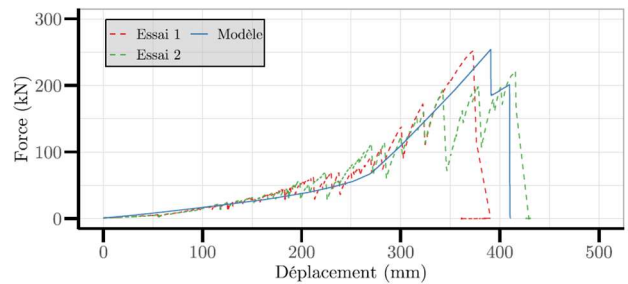


Figure 13 : Courbe force déplacement du filet utilisée pour la calibration du modèle

##### 4.3.1.3 Autres constituants

- Une loi de comportement élastique linéaire est associée aux câbles et poteaux, représentative de leur section et résistance réelle. Les câbles n'ont pas de résistance en compression.
- Les ancrages sont représentés par des points fixes fixant les conditions limites du modèle.
- Le bloc est un assemblage rigide de facettes auquel est associé la masse de l'impactant réel.

#### 4.3.2 Assemblage du modèle complet

Les câbles et freins sont rotulés aux poteaux. Entre le filet et les câbles, la liaison est faite à l'aide d'un élément rigide lié à la nappe et entourant le câble (Figure 14). Un coefficient de frottement peut être mis en place entre le câble et l'élément. Le modèle complet est illustré en Figure 15.

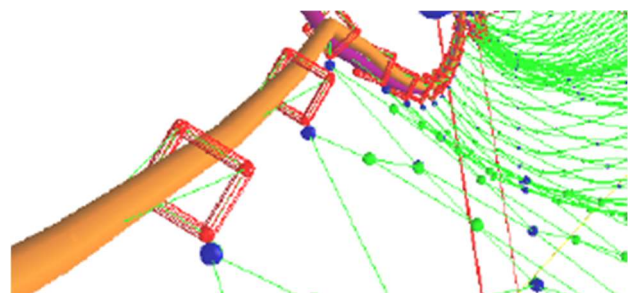


Figure 14 : Illustration de l'assemblage filet / câbles

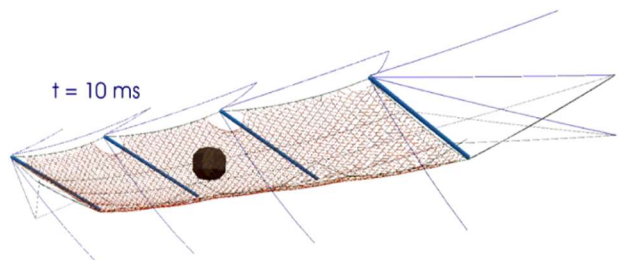


Figure 15 : Vue du modèle DEM complet

#### 4.4 La confrontation avec les essais

Le modèle numérique complet est confronté aux différents essais en grandeur réelle de la certification de l'écran 5000kJ : l'essai d'énergie maximale (MEL) et les deux essais successifs à l'énergie de service (SEL).

	MEL	SEL
Energie (kJ)	5000	1660
Masse bloc (kg)	12390	4790
Vitesse d'impact (m/s)	28.41	26.33
Nombre d'impact	1	2 successifs

La validation se fait en comparant les valeurs expérimentale et numérique du déplacement du bloc, de l'effort dans les ancrages et de l'allongement des freins. Il convient de garder en tête qu'un seul jeu d'essais sur l'ouvrage ne permet pas d'avoir un spectre complet du comportement pour une comparaison expérimentale et numérique.

##### 4.4.1 Essai MEL

Le déplacement maximal du bloc mesuré numériquement est de 8,78 m, contre 9,06 m expérimentalement, soit une différence de -3,1 %. Les efforts sont mesurés sur deux ancrages expérimentalement : les comportements observés sont retrouvés numériquement, à la fois sur l'intensité des efforts et leur évolution au cours du temps (Figure 16). Ces mesures permettent de confirmer la bonne prise en compte numérique du comportement des freins et de leur déclenchement.



Figure 16 : Courbes expérimentale et numérique de l'effort sur deux ancrages de l'ouvrage au cours de l'impact

Concernant les allongements de freins, bien que certaines différences notables soient relevées pour certains freins, les zones de dissipation sont bien représentées par le modèle.

##### 4.4.2 Essai SEL

L'essai SEL est plus difficile à modéliser car il faut conserver les déformations plastiques de l'ouvrage entre les deux essais successifs. Le déplacement maximal du bloc est bien retrouvé numériquement pour le premier impact (+2,3%), avec cependant une différence plus grande lors du second impact (+15,2%).

Les efforts dans les ancrages et l'allure des évolutions dans le temps sont majoritairement retrouvés numériquement pour les deux impacts bien que les pics d'efforts observés expérimentalement ne soient pas pleinement corrélés (Figure 17).

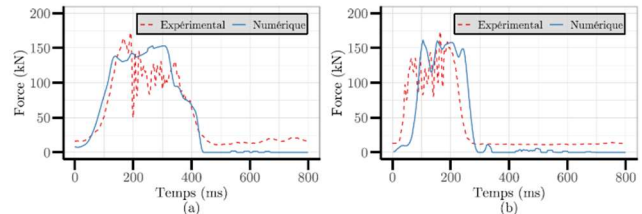


Figure 17 : Courbes expérimentales et numérique de l'effort dans un ancrage pour l'essai SEL 1 (a) et SEL 2 (b)

Concernant l'allongement des freins les observations sont identiques à l'essai MEL : les zones de dissipation sont retrouvées.

#### 4.4.3 Conclusions sur le modèle DEM

Le nouveau modèle de filet ELITE prend pour la première fois en compte le glissement entre les mailles. Bien qu'il y ait quelques écarts, notamment pour les résultats de l'essai SEL, la capacité prédictive du comportement des écrans s'en trouve grandement améliorée. Cependant, la comparaison expérimentale / numérique présente la limite de n'avoir qu'un seul jeu de données expérimentales ce qui ne traduit pas la variabilité de la réponse de l'ouvrage. Ce modèle peut aujourd'hui être utilisé pour étudier de nouvelle conception d'ouvrage.

#### 4.5 Etudes paramétriques par méta-modélisation

Le modèle d'écran DEM est un modèle lourd en temps de calcul : 3 h pour un essai d'impact MEL. Cette durée n'est pas compatible à la réalisation d'étude paramétriques poussées. Il est proposé d'utiliser des modèles de substitution, aussi appelé méta-modèles, pour résoudre ce problème. Les méta-modèles sont des outils mathématiques à l'exécution très rapide qui permettent de prédire une unique variable de sortie du modèle DEM (Figure 18). Ils nécessitent d'être calibrés via un jeu de données numérique fait à partir du modèle DEM.

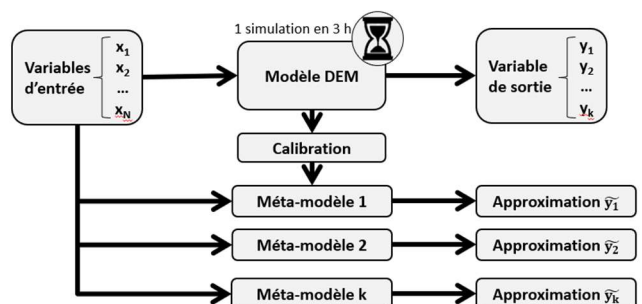


Figure 18 : Principe d'utilisation des méta-modèles

#### 4.5.1 Options choisies

Parmi les nombreuses méthodes de méta-modélisation existantes, deux sont retenues : les polynômes du chaos pour les variables continues (effort ancrage, allongement frein) et les « support vector machine » pour les variables discrètes (arrêt de bloc, freins le plus sollicité). Ces méthodes sont sélectionnées pour leur nombre réduit de données de calibration nécessaire et leur mise en œuvre facilitée par l'utilisation de package disponible.

#### 4.5.2 Validation

L'étude se concentre ici sur l'influence de l'effort de déclenchement des freins sur le comportement de l'ouvrage. Les 4 variables correspondent à l'effort de déclenchement de 4 groupes de freins répartis en fonction de leur position dans l'ouvrage. Un jeu de données de 250 résultats de simulations est utilisé pour la calibration des méta-modèles. La pertinence de la calibration est vérifiée avec un jeu de 100 résultats de simulation indépendants des données de calibration. La comparaison DEM et méta-modèle est faite pour les sorties continues (Figure 19.a) et discrètes (Figure 19.b). Elle permet de valider la cohérence des résultats des méta-modélisations.

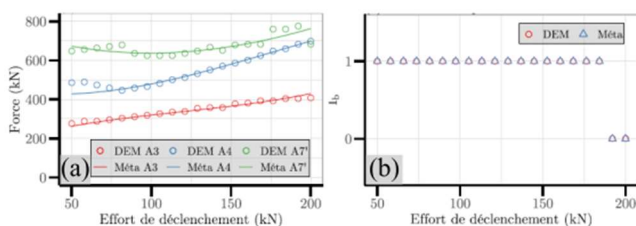


Figure 19 : Exemple de vérification des méta-modèles pour l'effort dans un ancrage (a) et l'arrêt du bloc (b)

#### 4.5.3 Etudes paramétriques

Les méta-modèles ainsi calibrés sont utilisés pour l'étude des variables de sortie sélectionnées. Un très grand nombre de simulation peuvent être réalisées en un temps très court (10000 en 10 min), suivant un plan d'expérience définis par l'utilisateur. L'enjeu est alors de traiter ce grand nombre de résultats pour définir une configuration d'ouvrage pertinente suivant le critère d'entrée, ici l'effort de déclenchement des freins.

Pour cela, des filtres sont appliqués sur les résultats, prenant en compte l'objectif premier (arrêt du bloc), les contraintes géométriques (limite sur la flèche) ou les limites techniques (allongement des freins, effort aux ancrages etc...). Avec cette approche de filtres entièrement modulaires, une nouvelle sélection peut être obtenue rapidement selon les besoins de l'étude. L'utilisateur retient ensuite les configurations passant l'ensemble des critères afin d'identifier les solutions

les plus pertinentes notamment en fonction du coût associé.

### 4.6 Conception du nouvel écran 8000 kJ

#### 4.6.1 Démarche suivie

Le nouveau modèle numérique est employé pour la conception d'un ouvrage utilisant les technologies existantes (freins, filet). La conception globale de l'écran demeure similaire, malgré quelques modifications (passage des câbles, filet en double nappe). La calibration du modèle n'est retravaillée que pour les quelques variantes de composants (nouveau filet en câble diam 10mm).

Pour l'écran de 8000 kJ, des simulations sont menées en prévision des essais de certification afin de valider le comportement global de l'ouvrage, les allongements des freins et le fonctionnement de la double nappe de filet.

#### 4.6.2 Essais et résultats

L'essai d'impact MEL est réalisé avec succès sur le site d'essai de Montagnole le 25/03/2021.

Le comportement global de l'écran est bien prédit : la répartition de la dissipation de l'énergie et l'intensité de l'effort dans les ancrages sont correctes. On note cependant plusieurs comportements de second ordre qui n'ont pas pu être anticipés (flambement des poteaux latéraux, rupture de certains freins secondaire).



Figure 20 : Visuel de la superposition de l'essai numérique à l'essai expérimental

Ce travail a permis d'obtenir le chantier d'ampleur de Ponserant où 1500 ml d'écran 8000 kJ est mis en œuvre.



Figure 21. Ecran 8000kJ de Ponserant 73



Figure 22. Test d'écran forestier

## 5 RESULTAT OPERATIONNEL : OUVRAGES DEVELOPPES

Au cours de ces 20 ans, NGE FONDATIONS a étendu sa gamme de produits jusqu'à atteindre 7 « kits de protection » de capacité comprise entre 100 kJ et 8000 kJ.

Il est intéressant de voir l'évolution du nombre d'essais nécessaire (2 minimum : SEL + MEL) ainsi que le temps nécessaire pour valider chaque déclinaison de produit. Il est indéniable que la modélisation a contribué à l'évitement de certains échecs. Sachant qu'un essai coûte entre 50k€ à 100k€, chacun pourra juger de l'intérêt de cet investissement dans le numérique.

Tableau 1. Produits agréés par NGE FONDATIONS

Année	Energie	Nombre d'essai
2010	3000kJ côté B	4
2011	5000kJ côté B	3
2015	5000kJ côté A	4
2021	8000kJ côté A	2
2022	3000kJ côté B	2
2023	2000kJ côté A	2
2023	100kJ côté A	2

Fruit de la dynamique de ces projets successifs, d'autres produits hybrides ont pu voir le jour :

- Les écrans forestiers amarrés sur les arbres en place pour une meilleure intégration paysagère et un bilan carbone réduit,
- Les galeries de protection pour maintenir l'exploitation des infrastructures en phase travaux
- Les écrans d'urgence déployables pour rétablir la circulation rapidement suite à un éboulement.



Figure 23. Galerie de protection sur voie TGV



Figure 24. Déploiement d'un écran d'urgence 500kJ

## 6 2012 A AUJOURD'HUI – LES PROJETS NATIONAUX C2ROP

Les essais de certification sont par essence stéréotypés donc non représentatif de toutes les configurations d'emploi. Dans notre cas, un bloc de forme normalisé impact le centre d'un écran de trois modules. Que se passe-t-il si l'impact est excentré sur un module de rive ou s'il concerne un bloc de même énergie mais plus petit et plus rapide ?

Le projet C2ROP rassemble les principaux acteurs de la profession afin d'amener des réponses à ces

problématiques. Un écran spécifique au projet utilisant les composants des divers industriels présents a été développé dans un unique but de recherche. Il a été soumis à des impacts très variés (MEL, SEL, sur poteau, sur module latéral, préchargé...) avec une instrumentation dense. Ces campagnes expérimentales, complétées par des essais sur les composants, ont permis de créer un jeu de données d'une envergure inédite.

En parallèle, l'exploration en profondeur du comportement de cet ouvrage se fait via les modélisations numériques des divers acteurs présents. Une fois calibrée avec les essais expérimentaux, la modélisation permet d'appréhender les incertitudes des capacités des écrans face à tous les paramètres aléatoires d'un impact naturel. Ce travail conduira bientôt à intégrer un coefficient de sécurité propre aux écrans de filets afin que leur préconisation suive la logique des coefficients partiels de l'Eurocode.

## 7 PERSPECTIVES : LES MODELES ET LEUR USAGES

Aujourd'hui, NGE s'autorise à utiliser les modèles numériques d'écran pare-pierres pour deux objectifs principaux :

- L'optimisation d'une nouvelle conception :

Dans un marché devenu très concurrentiel, il ne suffit pas de réussir le test de capacité pour vendre un écran. Encore faut-il qu'il soit compétitif. La modélisation devient un atout pour identifier les zones de sur-contraintes, les composants trop peu sollicités ou encore les déformations trop importantes vis-à-vis du cahier des charges. Mais le « juge de paix » que constitue la qualification par crash test imposera toujours une prise de risque : on continuera encore à se faire surprendre par des comportements aléatoires.

- L'adaptation des ouvrages au terrain :

Dans la norme d'application française, on distingue dorénavant :

- Les « kits » validés par des tests qui constituent la matière première des chantiers,
- Les ouvrages qui intègrent ces kits tout en devant s'adapter aux réalités du terrain ou à d'autres contraintes du Maître d'Ouvrage (couloir trop étroit pour accueillir les systèmes de rive, contraintes d'intégration paysagère ou environnementale etc).

En phase chantier, l'outil numérique apporte une aide à la décision pour réaliser les adaptations nécessaires à la transformation des kits en ouvrages

dans ces configurations particulières, sans sacrifier les exigences de performances attendues.

## REMERCIEMENTS

L'argent restant le nerf de la guerre de ces développements industriels, NGE FONDATIONS remercie par ordre de contribution :

- Le Crédit Impôt Recherche
- La Banque Public d'Investissement
- La Région Rhône Alpes Auvergne portant les fonds FEDER

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Bertrand, D., Trad, A., Limam, A., et Silvani, C. (2012). *Full-Scale Dynamic Analysis of an Innovative Rockfall Fence Under Impact Using the Discrete Element Method : from the Local Scale to the Structure Scale*. Rock Mechanics and Rock Engineering, Volume 45, Pages 885:900.
- Bourrier, F., Lambert, S., et Baroth, J. (2015). *A Reliability-Based Approach for the Design of Rockfall Protection Fences*. Rock Mechanics and Rock Engineering, Volume 48(1), Pages 247-259.
- Coulibaly, J.B. (2017). *Modélisation numérique discrète du comportement mécanique sous impact des structures d'écrans de filets pare-pierres*. Thèse de Doctorat, Université Grenoble Alpes, Grenoble (France).
- Dugelas, L. (2020). *Stratégies probabilistes appliquées à la modélisation numérique discrète : le cas des filets pare-pierres*. Thèse de doctorat, Université Grenoble Alpes. Disponible à l'adresse : <https://hal.science/tel-02498238/>
- Trad, A. (2011). *Analyse du Comportement et Modélisation de Structures Souples de Protection : le cas des Ecrans de Filets Pare-Pierres sous Sollicitations Statique et Dynamique*. Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Villeurbanne (France). Disponible à l'adresse : <https://theses.hal.science/tel-00690546v1>