

PROTOCOLE ET BANC D'ESSAI EN VUE DE TESTER DIFFERENTS TYPES DE FILETS PENDUS OU PLAQUES

Philippe BERTHET-RAMBAUD, Pierre GUILLEMIN
Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées (LRPC), Lyon, France

RÉSUMÉ – La route du Littoral constitue un axe majeur pour l'île de la Réunion et l'important aléa rocheux qui la menace nécessite le renforcement des mesures de protection. Or, avec la fin récente des stocks militaires de filets Anti-Sous-Marin reconvertis pour cet usage ces dernières décennies, un protocole d'essai a dû être mis en place dans un contexte opérationnel pour caractériser et tester les nouveaux produits proposés par les industriels.

1. Introduction

La mise en place de dispositifs de protection contre les chutes de rochers marque la concrétisation d'un cheminement complexe qui fait intervenir différents spécialistes. Après l'étape cruciale d'analyse géologique, il s'agit d'évaluer l'aléa en présence, à la fois en terme d'intensité et de probabilité d'occurrence dans un délai donné. L'analyse des enjeux et de leur vulnérabilité, croisée avec le niveau d'aléa, permet d'apprécier le niveau de risque et donc la nécessité ou non d'un traitement spécifique.

Sur l'aspect risque rocheux, la Route du Littoral (RN1) sur l'île de la Réunion cumule à la fois une vulnérabilité marquée due à son statut d'axe de circulation majeur de l'île et un niveau d'aléa très fort généré par des falaises très instables longues d'une dizaine de kilomètres. La mise en place de protections y est donc prioritaire et les accidents rappellent régulièrement cette nécessité.

Si différents types de protection sont *a priori* possibles, la phase d'évaluation technique et économique des solutions, ainsi que de leur adéquation au niveau d'aléa, apparaît comme cruciale. Ce sont ces derniers points qui vont particulièrement nous intéresser ici avec l'application d'un protocole d'essai visant à caractériser le comportement de différents types de filets métalliques destinés au confinement de masses rocheuses ou à la canalisation des éboulis, dans un contexte opérationnel devant déboucher sur le traitement de plus de 45 hectares de paroi.

2. La Route du Littoral – Contexte et enjeux

Avec un trafic de plus de 45 000 véhicules par jour, la Route du Littoral constitue l'axe majeur de circulation pour l'île de la Réunion, notamment entre la ville principale de Saint-Denis et la région balnéaire attractive de l'ouest ou les villes du sud. La densité de trafic y est particulièrement importante aux heures de pointe avec une infrastructure à la limite de la saturation, générant régulièrement des embouteillages. Or, cet axe incontournable présente la particularité de se trouver confiné sur plus de dix kilomètres entre l'océan d'un côté et des falaises hautes de cent à deux cents mètres de l'autre.

Ces falaises d'origine volcanique sont constituées d'une succession de coulées basaltiques massives d'épaisseurs métriques à plurimétriques, alternées avec des lits de scories. Ces niveaux très hétérogènes sont de gros pourvoyeurs de blocs isolés, voire de masses plus importantes. Le profil très variable des falaises résulte de la conjugaison de plusieurs phénomènes :

- le travail de sape de l'océan qui conduit à des parois en perpétuelle évolution ;
- l'érosion forte des thalwegs qui recoupent plus ou moins profondément les fronts de falaise;

- l'évolution propre des fronts, par érosion différentielle des niveaux scoriacés et mise en surplomb des coulées basaltiques, qui finit par provoquer des écroulements de pans de falaise par érosion régressive.

L'existence de coulées plus massives complique localement ce schéma en jouant un rôle hydrogéologique important.

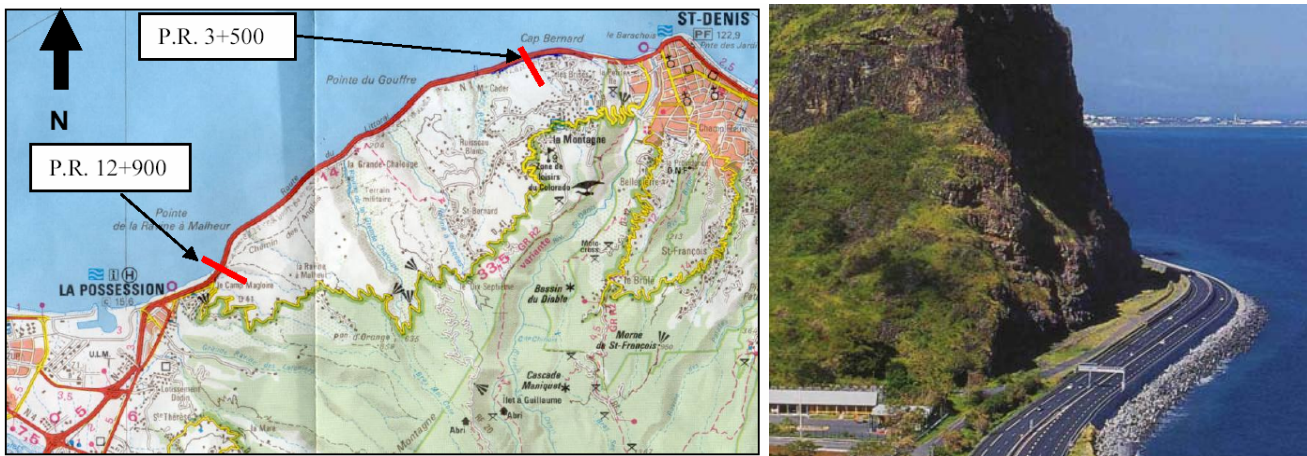


Figure 1. Plan de localisation (fond IGN) et vue de la RN1 à la Grande Chaloupe

Depuis sa création en 1976, cette Route du Littoral est exposée à un aléa rocheux important qui a malheureusement entraîné le décès de plusieurs dizaines de personnes dans des accidents causés par des chutes de rochers isolées ou en masse (jusqu'à plusieurs centaines de mètres cubes). Pour améliorer la sécurité de cet itinéraire stratégique, différentes campagnes de travaux de protection telles que fosses de réception, écrans de gabions, écrans dynamiques en pied de falaise ou écrans déflecteurs sur les parois elles-mêmes ont été menées par le passé.

En parallèle, les conditions météorologiques font l'objet d'une attention particulière en raison de leur influence directe sur l'activité des phénomènes rocheux. En cas de dépassement de seuils pluviométriques définis et affinés depuis 1976, le trafic des deux voies les plus proches de la falaise (sens normal La Possession → Saint-Denis) est reporté sur les deux voies côté océan qui passent donc à double sens pour supporter l'intégralité du trafic (Batista & al 2005).

Pour autant, cette situation ne peut être considérée comme satisfaisante et la Région Réunion s'est prononcée en faveur d'une nouvelle liaison littorale. L'orientation actuelle serait celle d'un itinéraire comprenant pour partie un ouvrage en tunnel et pour partie un ouvrage sur digue en mer, donc complètement à l'abri des chutes de rochers. Dans l'attente de cette nouvelle infrastructure qui ne verra pas le jour à court terme, il est important de continuer à améliorer la sécurité du tracé existant et la DDE locale, maître d'ouvrage de l'opération, a lancé de nouvelles études pour des travaux de mise en sécurité à partir de 2006 (Pauly & Maurin 2005).

Après un zonage préalable, trois zones jugées prioritaires ont été déterminées et seront équipées de lignes d'écrans 5000kJ, d'un mur en gabions de 4 mètres de haut sur tout le linéaire de la RN1 et, pour ce qui nous intéresse, 7 ouvrages de filets plaqués, 55 ouvrages de filets pendus et 96 écrans déflecteurs. Au total, ce sont donc près de 45 ha de filets qui sont prévus le long de cette Route du Littoral!

3. Cahier des charges et protocole d'essais

3.1. Des spécifications techniques "nouvelles"

Cette très importante demande de filets a aussi coïncidé avec la période de fin des stocks militaires de filets anti-sous-marins (ASM) issus de la fin de la Seconde Guerre Mondiale et de la Guerre Froide et qui, jusque là, avaient largement été reconvertis et utilisés avec succès dans le domaine de la protection contre les chutes de rochers. Cette situation a ainsi conduit à se poser de nouvelles questions, notamment pour définir les spécifications techniques et mécaniques des produits de remplacement à utiliser. En effet, hormis quelques exceptions, les principaux produits disponibles jusque là sur le marché, étaient des filets ASM récupérés notamment dans les pays de l'ancien bloc de l'Est. A part une vérification d'usage basée sur le test de résistance de quelques mailles, ces produits ont fini par s'imposer d'eux-mêmes grâce à leurs performances mais sans véritable justification ou optimisation mécanique.

Dans ces conditions et notamment pour rédiger un cahier des charges techniques permettant de lancer un appel d'offre sur des produits neufs, l'approche empirique n'était donc plus possible alors même qu'il s'agissait de traiter un chantier tout à fait exceptionnel. A la demande de la DDE de la Réunion et du CETE méditerranée, le groupe Mécanique des Roches du Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées de Lyon devait ainsi être missionné fin 2004 pour traiter l'ensemble de la question de la caractérisation mécanique des filets pour leur utilisation en filets pendus-défecteurs ou plaqués. Sa réponse devait aborder:

- la proposition de spécifications devant figurer dans les clauses techniques de l'appel d'offre de fourniture de ces produits
- la proposition de protocoles d'essai pour caractériser le comportement des filets proposés par les industriels
- la réalisation des moyens expérimentaux correspondants
- la réalisation des essais et leur exploitation dans le cadre du marché pour aboutir au classement des entreprises sur le critère "mécanique" de leur produit (ce critère devant ensuite être additionné à d'autres pour choisir le "mieux-disant" sur 3 lots distincts).

Comme l'illustrent ces différentes missions, une des difficultés était de devoir apporter une réponse directement opérationnelle dans un domaine finalement très mal connu. Certes, il existe bien quelques travaux scientifiques et techniques sur le comportement de ces filets. On peut notamment citer différentes campagnes expérimentales plus ou moins documentées (Duffy & Haller 1993), (Peila & al 1998)... mais qui se focalisent sur l'utilisation des filets au sein d'écrans dynamiques dans lesquels le filet ne représente qu'un des composants d'un dispositif complexe. De même, quelques approches plus théoriques (Nicot & al 2001) (Volkwein 2004) apportent des réponses sur différentes modélisations du filet au sein d'un écran. Mais là encore, les spécificités d'une utilisation en dispositif pendu, déflecteur ou plaqué ne sont pas abordées. De leur côté, (Bonati & Galimberti 2004) propose bien des essais statiques hors plans mais sur des filets qui sont eux-mêmes spécifiques (câbles croisés avec mailles carrés apportant peu de dissipation d'énergie) et sous des niveaux d'efforts a priori insuffisants pour la situation réunionnaise. Jamais les spécificités d'une utilisation en dispositif déflecteur ou plaqué ne sont pas abordées.

Par ailleurs, le fait de devoir apporter une réponse dans un cadre opérationnel impliquait aussi des conditions particulières avec des délais très courts : faute de mieux, l'expérience acquise pendant ces dernières années allait être la meilleure source d'inspiration pour résoudre ce problème.

3.2. Filets pendus ou plaqués: deux problématiques distinctes

Tout d'abord, il est important de noter que les filets plaqués entrent dans la catégorie des parades actives alors que les filets pendus constituent une parade passive.

Dans le premier cas, il s'agit de "nappes de filets plaquées contre le rocher et assurant la stabilité superficielle ou locale de la paroi rocheuse" (LCPC 2001). Le but ici est d'éviter tout départ de pierres ou de blocs. En général, la nappe est "plaquée" au plus près du terrain au moyen d'ancrages et/ou de câbles mis en tension et répartis sur le pourtour et sur la surface à traiter, de façon à maintenir les masses concernées. La nappe qui doit entrer en action dès le début du mouvement est donc sollicitée de manière quasi-statique.

Pour les filets pendus, le principe consiste en "une nappe amarrée en crête de falaise, suspendue contre la paroi et assurant ainsi le guidage des chutes de pierres jusqu'au pied" (LCPC 2001). L'objectif est de contrôler les trajectoires des blocs issus de la falaise et de les guider jusqu'à une zone de réception ou d'arrêt à la base du relief. Cette parade permet en particulier d'éviter les rebonds aériens et la prise de vitesse, mais contrairement au filet plaqué, n'empêche pas le départ des blocs. L'énergie cinétique est dissipée par frottement dans cet espace réduit. Dans le cas des parois de grande hauteur, comme à la Réunion, il est nécessaire de prévoir des câbles de suspension complémentaires destinés à limiter la déformation élastique verticale de la nappe, ainsi que des câbles de rappel pour améliorer le placage de la nappe et ainsi empêcher les masses de prendre de la vitesse. Analogues aux grillages pendus, les filets pendus sont utilisés dans le cas de volumes potentiels de blocs plus importants (des éboulements de plusieurs centaines de mètres cubes ont déjà pu être guidés avec succès). Le premier point crucial de ces dispositifs est le système d'ancrage en tête qui doit non seulement supporter l'ensemble de la nappe (plus d'une tonne par mètre linéaire pour une hauteur de 100 mètres) mais aussi les efforts supplémentaires engendrés par la chute des blocs. La seconde difficulté concerne l'évacuation des matériaux. En effet, avec des volumes en mouvement importants, il faut surtout éviter l'accumulation de matériaux dans une "poche" du filet, *a fortiori* en position aérienne. Pour éviter ce phénomène de rétention en pied de nappe, une marge de débattement (qui peut dépasser la dizaine de mètres sur des falaises de la hauteur de celles de la Réunion) est donc prévue. En contrepartie, le filet pendu doit être associé à une fosse de réception adaptée.

3.3. Protocoles d'essais

Comme l'implique la description précédente, les paramètres mécaniques intéressants du filet vont être différents selon le type d'utilisation. Dans un dispositif plaqué, il s'agit de privilégier une rigidité "optimale" dans le plan, tout en intégrant les contraintes de pose : réduction du poids pour optimiser les héliportages et autres manutentions, souplesse de nappe pour s'adapter au relief...

Pour les filets pendus, la réponse est plus délicate et plus nuancée. En effet, ces filets subissent principalement des efforts dans leur plan (poids propre, efforts dus aux frottements avec les blocs) mais aussi hors plan, à l'endroit du contact avec les blocs. De ce point de vue et notamment pour éviter la formation de poches et l'accumulation de matériaux, la rigidité paraît intéressante à privilégier. En contrepartie, si le filet ne contribue pas lui-même à dissiper une partie de l'énergie, les efforts vont se reporter directement et de manière très préjudiciable sur les ancrages. Il s'agit donc de trouver le juste équilibre entre une souplesse de filet qui permette de soulager et de préserver les ancrages, tout en évitant la formation de poche. En parallèle, un autre phénomène à prendre en compte est la capacité du filet à diffuser géométriquement les efforts. En effet et c'est bien un des intérêts d'une structure bidimensionnelle, un effort ponctuel doit pouvoir se diffuser et se répartir sur plusieurs points d'ancrage. *A contrario*, un excès de diffusion latérale peut conduire à un repli de la nappe sur elle-même par effet "taille de guêpe".

Comme on le voit, le filet à pendre idéal doit répondre à un équilibre entre différents critères qui sont difficiles à déterminer dans l'absolu: il faut une certaine rigidité dans le plan mais pas trop, une certaine diffusion mais pas trop non plus... A chaque fois, des besoins antagonistes doivent être satisfaits et, comme souvent, c'est un compromis qui peut apporter la meilleure réponse. Mais comment quantifier ce compromis en terme mécanique pour introduire les critères de jugement dans l'appel d'offre? Faute de connaissances suffisantes, la solution raisonnable pour les filets pendus a consisté à choisir le filet ASM historique comme référence et à juger les autres filets par rapport à son propre comportement qui a, par ailleurs, donné pleine satisfaction.

Sur cette base, les essais de caractérisation ont été définis en fonction de leur représentativité pour les applications concernées, mais aussi en fonction des capacités techniques et des contraintes opérationnelles pour les réaliser. Ainsi, la taille de l'échantillon devait être suffisante pour caractériser le comportement du filet en section courante, tout en

permettant la réalisation raisonnable d'un banc d'essai. Une taille de 4 mètres de côté a finalement été retenue. Concernant le type d'essai, l'intérêt d'essais dynamiques n'était ici pas flagrant, ni même le comportement hors plan. Finalement, le choix s'est porté sur des essais conventionnels de traction dans le plan du filet avec un niveau d'effort ultime de 500 kN et un déplacement maximal de 1 mètre. Initialement, deux types d'essais avec des conditions aux limites différentes ont été proposés :

- Un essai principal dit "confiné" où l'échantillon est fixé sur 3 côtés et mis en tension sur le dernier. Cet essai est exploité pour déterminer la "rigidité" du filet (filets pendus et plaqués) selon l'axe de traction qui représente la "verticale" sur la paroi mais aussi pour évaluer le report latéral (ou horizontal) de l'effort (filets pendus).
- Un essai dit "non confiné" pour lequel le filet n'est fixé que sur un côté et mis en traction au niveau du côté opposé. L'objectif de cet essai était d'évaluer la tendance au cintrage de l'échantillon (filets pendus).

Lors du premier appel d'offres, ces deux types d'essais ont été réalisés sur des échantillons neufs des filets proposés par les industriels. L'essai "non-confiné", en plus d'être relativement délicat à réaliser (peu d'efforts pour des déformations très importantes) et malgré un intérêt mécanique certain, s'est finalement révélé d'un apport limité pour classer techniquement les différents filets, notamment par rapport à l'évaluation du report latéral par l'essai "confiné". Lorsqu'il a fallu réaliser de nouveaux essais pour le second appel d'offre (le premier ayant été annulé par le tribunal administratif pour des raisons non techniques), cet essai "non-confiné" a finalement été abandonné et nous n'aborderons dans la suite que les essais "confinés".

4. Réalisation des essais et jugement des résultats

4.1. Le banc d'essai

La construction du banc de traction a été confiée à l'entreprise Temco de Bologne (Italie).



Figure 2. Vue du banc d'essai

Ce banc est composé de 3 poutres fixes et d'une poutre mobile activée par deux vérins de 1 mètre de course. Chaque poutre est équipée de 10 points de fixation mobiles latéralement, notamment pour suivre l'élongation et les déformations de l'échantillon. Les efforts sont mesurés grâce à des capteurs sur chaque point de fixation de la poutre mobile et sur ceux d'une des deux poutres latérales. Cette poutre latérale est également équipée au niveau de chacun de ces points d'un vérin secondaire permettant d'appliquer une pré-tension latérale à l'échantillon. Après mise en configuration initiale de l'échantillon (voir paragraphe suivant), l'essai est géré de manière automatique avec enregistrement de toutes les mesures d'efforts synchronisées avec le déplacement de la poutre mobile (près de 5000 mesures par essai).

4.2. Les essais

Une fois le principe de l'essai validé, un certain nombre de dispositions pratiques sont nécessaires pour aboutir à une base de mesures comparables et exploitables. Ainsi, les filets sont positionnés selon les consignes de pose du fabricant. Pour les produits à anneaux constituant une succession de vagues, le filet est positionné de telle façon que la houle formée par les anneaux soit parallèle à l'axe de traction (axe des vagues horizontal dans la réalité). Les échantillons testés sont de dimension approximative 4m x 4m, éventuellement retaillés pour approcher ce gabarit. Ceci se traduit, par exemple pour un filet ASM de référence, par 10 lignes de 12 anneaux en quinconce.

Pour limiter l'influence des conditions aux limites et bien tester le filet en section courante, le même principe d'accrochage a été retenu pour tous les produits, à savoir que les mailles qui sont reliées aux différents points de fixation du banc sont celles qui ont un nombre de connexions inférieur à celui d'une maille normale, en nappe courante, du produit testé.

Ensuite et de manière à pouvoir comparer les comportements obtenus, il est nécessaire de convenir d'une configuration initiale pour mettre en place l'échantillon: en effet, notamment pour les filets à anneaux, ceux-ci ont une tendance naturelle à se replier alors que les filets en câble sont directement au repos. Cette configuration initiale consiste à appliquer une pré-tension globale de 10 kN selon l'axe de traction principale puis de 20 kN sur la poutre latérale équipée des vérins secondaires. Ces valeurs sont issues de l'expérience.

Enfin et toujours pour rendre les mesures comparables, les données brutes enregistrées au cours des essais sont corrigées :

- L'origine des déplacements correspond à la configuration initiale
- Les efforts sont ramenés proportionnellement à ceux d'un échantillon de 4m x 4m en configuration initiale pour homogénéiser le résultat.

Finalement, au cours des deux campagnes d'essais menées pour les deux appels d'offre successifs (Janvier 2005 à Bologne et septembre 2005 à la Réunion où le banc qui doit aussi servir à du contrôle de chantier avait été transféré entre temps), ce sont une vingtaine de types de filets différents qui ont été testés en plus de plusieurs échantillons du filet de référence.

4.3. Les résultats et leur jugement

Les essais de référence réalisés ont permis de qualifier le comportement type du filet historique ASM et de montrer que ce comportement est homogène d'un échantillon à l'autre. Un comportement type a donc pu être obtenu en moyennant les valeurs mesurées et qui se caractérise par:

- un effort latéral global de 420 kN pour une traction principale de 500 kN
- un allongement de 66.3 cm sous cet effort de 500 kN

A partir de là, ces deux critères ont servi de référence pour juger et classer techniquement les autres filets selon les deux utilisations possibles, en dispositifs pendus ou plaqués:

- l'effort latéral n'a servi qu'au jugement des filets pendus. La note maximale a été affectée par rapport au filet ASM de référence, soit pour un niveau d'effort de 420 kN sous 500 kN de traction, sensé représenter le meilleur compromis dans l'état actuel des connaissances. De part et d'autre de cette valeur, la note décroît linéairement jusqu'à une valeur nulle au-delà d'une certaine marge ($\pm 15\%$ dans le cas du second appel d'offre)
- L'allongement sous 500 kN, qui représente indirectement la rigidité globale du filet, est utilisé à la fois pour les filets pendus et plaqués, mais de manière différente comme l'illustre la figure suivante: un allongement minimal est privilégié pour les filets plaqués, en affectant la note moyenne au filet ASM de référence et une note nulle au-delà d'un certain allongement L_{max} (75 cm dans le cas du second appel d'offre). En revanche, pour les filets pendus, la note maximale est affectée à un allongement de 66.3cm correspondant au filet ASM de référence et décroît de part et d'autre de cette valeur de

manière dissymétrique: les filets plus rigides ont au moins la moyenne (tendance a priori moins préjudiciable) alors que les filets avec plus d'allongement obtiennent une note nulle au-delà de L_{max} .

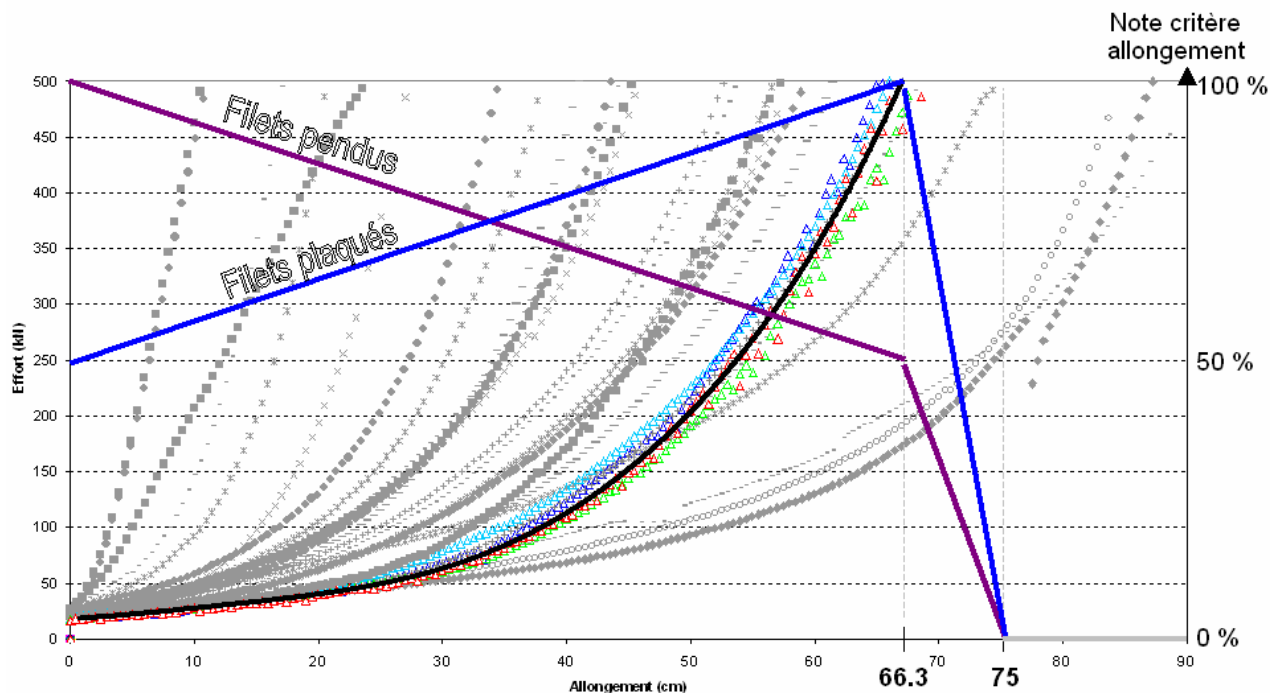


Figure 3. Diagramme de notation pour le critère allongement et ensemble des courbes effort-allongement en essais confinés (triangle=courbes échantillons ASM, courbe continue=comportement ASM moyen=référence, autres= produits industriels anonymisés)

En plus de ces notions de classement mises en œuvre dans le cadre spécifique d'appels d'offres, ces essais ont permis d'apporter une connaissance nouvelle sur le comportement des différents types de filets. Sans entrer dans le détail, plusieurs grandes tendances peuvent ainsi être notées:

- les filets à base d'anneaux, par l'imbrication de ces derniers, fournissent une structure complexe qui présente une phase particulière de mise en place correspondant globalement à la "mise à plat" des vagues. Cette phase est très consommatrice en allongement et doit pouvoir jouer un rôle intéressant de dissipation d'énergie (sous réserve de n'avoir pas déjà été totalement consommée sous poids propre par exemple pour des filets de dimensions réduites comme ceux des écrans dynamiques). Ce réagencement des anneaux dépend de la taille des mailles mais aussi de leur section et du type de matériaux: des anneaux à base de câbles semblent s'agencer plus difficilement en raison d'un plus fort frottement.
- Après cette phase de mise en place que l'on pourrait qualifier de géométrique, c'est la résistance intrinsèque du matériau qui intervient. Dans le cas des filets en câbles et sans anneaux, la première phase de mise en place n'existe pas. La phase de traction mécanique est immédiate, ce qui se traduit par un comportement globalement et immédiatement plus raide. Outre leur poids moindre, les filets en câbles fournissent a priori une solution idéale pour du filet plaqué, dans la mesure où les effets dynamiques ne sont pas à craindre.
- Si chaque anneau du filet ASM de référence est imbriqué avec 6 anneaux voisins, il existe aussi des filets à anneaux à 4 voisins. Ces filets apparaissent comme les plus souples de tous les produits testés, notamment par une phase de déformation géométrique plus importante. Pour les applications qui étaient visées ici, ils apparaissent comme les moins bien placés principalement par leur souplesse inadaptée aux dispositifs plaqués et potentiellement génératrice de poches délicates pour les dispositifs

de guidage. En revanche, ces filets peuvent a priori se révéler intéressants pour les écrans dynamiques.

5. Conclusions

L'intérêt de la démarche menée ici est multiple. Bien sûr, elle a permis de répondre aux enjeux dans le cadre d'un appel d'offre, à savoir classer et sélectionner d'un point de vue technique des filets aptes à remplir la fonction prévue pour la protection de la Route du Littoral. Mais surtout, cette démarche a permis d'aborder un sujet finalement mal connu, celui du comportement des filets pendus et, dans une moindre mesure, celui des filets plaqués. Aujourd'hui, nous disposons d'une base de données unique qui doit permettre de mieux comprendre le comportement de ces structures souples complexes pour, d'une part, approfondir les tendances évoquées précédemment mais aussi, à terme, mieux dimensionner ces ouvrages. Le matériau "filet" étant également utilisé pour d'autres applications telles que les écrans dynamiques, cette meilleure connaissance doit aussi apporter de nouvelles bases de conception à tous ces ouvrages de protection contre les chutes de rochers.

6. Références bibliographiques

- Batista D, Binet C, Rat M, Alfonsi P (2005) étude statistique de l'aléa chute de pierres sur la RN1 à la Réunion, *Géoline 2005 : Géologie et ouvrages linéaires*, Arnould & Ledru (eds), BRGM éditions, Orléans, France
- Bonati A, Galimberti V (2004), La valutazione sperimentale di sistemi di difesa attiva dalla caduta massi, *Bonifica di versanti rocciosi per la protezione del territorio*, GEAM Peila (ed) Atti, Trento
- Duffy J.D, Haller B (1993) Field tests of flexible rockfall barriers, *transportation facilities through difficult terrain*, Wu & Barret (eds) Balkema, Rotterdam, ISBN 9054103434
- LCPC (2001), *Parades contre les instabilités rocheuses*, ISBN 1151-1516
- Nicot F., Cambou B, Mazzoleni G (2001) Design of rockfall restraining nets from a discrete element modeling, *Rock Mech. Rock Engng.* 34(2),99-118
- Pauly J-C, Maurin P (2005), La Réunion, mise en sécurité de la RN1 entre les PR3+500 et 12+900, *Géoline 2005 : Géologie et ouvrages linéaires*, Arnould & Ledru (eds), BRGM éditions, Orléans, France.
- Peila D, Pelizza S, Sassudelli F (1998), Evaluation of behaviour of rockfall restraining nets by full scale tests, *Rock Mech. Rock Engng.* 31(1),1-24
- Volkwein A (2004), Numerische simulation von flexiblen Steinschlagschutzsystemen, *thèse de l'École Polytechnique Fédérale de Zurich n° 15641, Suisse.*