



HAL
open science

Thorough experimental study on flexible fences: behavior of structures outside the framework ETAG27

Ignacio Olmedo, Marie-Aurélié Chanut, Cyril Douthe, Mathieu Verdet,
Clément Galandrin, Loic Dugelas, David Bertrand

► To cite this version:

Ignacio Olmedo, Marie-Aurélié Chanut, Cyril Douthe, Mathieu Verdet, Clément Galandrin, et al.. Thorough experimental study on flexible fences: behavior of structures outside the framework ETAG27. *Revue française de Géotechnique*, 2020, Chutes de bloc, Risques Rocheux et Ouvrages de Protection (C2ROP), 163, pp.1-9. 10.1051/geotech/2020018 . hal-03442344

HAL Id: hal-03442344

<https://hal.science/hal-03442344v1>

Submitted on 11 Aug 2022

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etude expérimentale multi-échelle sur les écrans pare-blocs :
comportement des ouvrages hors cadre ETAG27

Thorough experimental study on flexible fences: behavior of
structures outside the framework ETAG27

Olmedo Ignacio

NGE Fondations, 6 rue de la Métallurgie, 38240 Domène, France

Chanut Marie-Aurélie

Cerema Centre-Est, Département Laboratoire de Lyon, 25 avenue François Mitterrand, Bron, France

Douthe Cyril

Laboratoire Navier, Ecole des Ponts, Univ Gustave Eiffel, CNRS, Champs sur Marne, France

Verdet Mathieu

CAN SA, 140 Chemin de Relut, 26270 Mirmande, France

Galandrin Clément

CAN SA, 140 Chemin de Relut, 26270 Mirmande, France

Dugelas Loic

Univ. Grenoble Alpes, INRAE, LESSEM, 38000 Grenoble, France

NGE Fondations, 6 rue de la Métallurgie, 38240 Domène, France

Bertrand David

Univ Lyon, INSA-LYON, GEOMAS, EA 7495, F69621 VILLEURBANNE cedex, France

Résumé

Dans le cadre du projet national C2ROP, une large campagne d'essais expérimentaux a été conduite. Des essais sous sollicitations quasi-statiques et dynamiques ont été réalisés sur les composants les plus critiques des écrans pare-blocs (filets, dissipateur d'énergie) et sur un ouvrage complet selon différentes configurations. Une dizaine d'essais d'impact a été réalisée sur un écran développé spécifiquement pour étudier expérimentalement le comportement de ce type d'ouvrage. 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 ainsi pu être étudiés. Des configurations d'impacts inhabituelles représentatives des conditions de sollicitation de l'ouvrage dans son contexte de mise en œuvre ont été réalisées et comparées aux configurations de certification prescrites par l'ETAG27. Des coefficients 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'ETAG27 n'est pas nécessairement la configuration la plus défavorable.

Mots clés

Ecran pare-blocs, comportement sous impact, approche multi-échelles, sollicitation ETAG 27 et hors ETAG 27, force d'impact, fonctionnement, endommagement

Abstract

As part of the national C2ROP project, a large campaign of experimental tests was carried out. Quasi-static and dynamic loading conditions were made on the most critical components of flexible fences (nets, energy dissipating devices) and on a complete structure in different configurations. Ten impact tests were carried out on a flexible fence specifically developed for the experimental study of the behavior of this type of structure. Specific data acquisition methods were implemented, and a large amount of data was collected and then used. The impact force used to define the components, the phasing of the deformation of the structure (from the impact to the stop of the block), and the kinematics of the energy dissipating devices were studied. Realistic impact configurations consistent with in situ loadings were tested and compared to the certification configurations prescribed by ETAG27. Coefficients were suggested to quantify the damage of the structure compared to the certification configuration according to the type of impact. Results show that the configuration defined by ETAG27 is not necessarily the most negative configuration.

Keywords

Flexible fences, behavior under impact, multi-scale approach, out of ETAG27 loadings, impact force, damage

1. Introduction

Les infrastructures des zones montagneuses peuvent être menacées par les risques de chutes de blocs. Pour y faire face, diverses structures de protection peuvent être implantées, tels les écrans souples de filets. Le but de ces structures passives est d'intercepter la trajectoire des blocs et de les arrêter avant qu'ils n'atteignent les enjeux (Lambert et Nicot, 2011). Afin de bien concevoir et dimensionner les écrans de filets, il est nécessaire de comprendre leur réponse mécanique. Lors des impacts, ces barrières présentent en effet un comportement dynamique complexe et non linéaire. La souplesse de ce type de structure entraîne de grands déplacements et des changements importants dans sa géométrie ; des mécanismes irréversibles permettent de dissiper l'énergie d'impact et peuvent générer des contraintes localisées.

Actuellement, la certification des kits de protection contre les chutes de blocs au niveau européen s'appuie sur le document ETAG27 *Guideline for european technical approval of falling rock protection kits* (EOTA, 2013), devenu document d'évaluation européen (EAD) en 2018. La méthode d'évaluation des kits se focalise sur une configuration d'essais standardisés pour apposer un marquage CE : le largage du bloc est effectué au centre d'un ouvrage composé de trois modules ; deux essais consécutifs à énergie de service et un essai à énergie ultime sont réalisés pour valider les performances et les critères de performances. Ces essais en grandeur réelle sur les kits de protection sont onéreux tant en moyens matériels qu'humains. Pour aider à la conception, des méthodes numériques sont développées parallèlement (Nicot, 2001 ; Bertrand, 2012 ; Coulibaly, 2019 ; Dugelas, 2019 ; Boulaud, 2020). L'intérêt premier des modélisations est de mieux comprendre le fonctionnement des ouvrages, et de pouvoir investiguer de nombreuses configurations à moindre coût en amont des essais en grandeur réelle. La validation des modèles est effectuée en confrontant les résultats numériques et expérimentaux.

Dans le cadre du projet de recherche national *Chutes de Blocs, Risques Rocheux et Ouvrages de Protection* (C2ROP, 2020), plusieurs campagnes expérimentales de grande ampleur ont été menées avec plusieurs finalités : la caractérisation de constituants pour alimenter les modèles, la validation des modèles à l'échelle de l'ouvrage et l'investigation de configurations d'essais hors champs ETAG27. Cet article présente uniquement les résultats des investigations expérimentales menées dans et hors champs ETAG27. Les éléments mis en évidence visent à mieux comprendre le comportement des ouvrages et alimentent les réflexions autour du dimensionnement (introduction de coefficients de sécurité) et de la mise en œuvre des ouvrages. N'étant pas homogène, l'analyse de la distribution et propagation des efforts au sein de la nappe ainsi que l'identification des points de concentration de contraintes et des modes de défaillance permettront à terme de mieux comprendre le comportement mécanique de l'ouvrage.

L'ouvrage C2ROP spécifiquement conçu pour l'expérimentation est présentée en partie 2. Dans la partie 3, la méthodologie suivie est décrite. Les résultats sont présentés dans la partie 4.

2. Ouvrage testé : écran pare-blocs C2ROP

Un écran de capacité estimée à 350 kJ représentatif des technologies actuelles a été conçu pour les études du projet national C2ROP. L'ouvrage est composé de 3 modules. Les modules ont une portée de 5 m et une hauteur nominale de 2.5 m. Les poteaux de longueur 2.75 m et de section circulaire $\varnothing 88.9$ mm et épaisseur 8 mm sont haubanés à l'amont et à l'aval à l'aide de câble $\varnothing 16$ mm tels que présentés sur la Figure 1. En pied des poteaux, sont disposées des platines articulées fixées en étaux sur des poutres HEB300 qui équipent le site d'essai de Rompon (Ardèche, site expérimental de l'entreprise CAN).

La nappe d'interception est constituée d'un assemblage de 3 modules de filets à anneaux ASM à 4 contacts (diamètre des anneaux : 275 mm, toron 7.5 mm) liaisonnés entre eux à l'aide de manilles. Elle

est supportée par des câbles de rive ($\varnothing 12$ mm) tressés dans les anneaux et fixés en tête et pied d'ouvrage (Figure 2). Les rives supérieures et inférieures sont symétriques. Sur ces rives, sont mis en œuvre des dissipateurs d'énergie de type « serpent » (NGE Fondations) avec un seuil de déclenchement de l'ordre de 25 kN et une course de 2.5 m. Aux deux extrémités, un câble de rive latérale équipé d'un dissipateur d'énergie est installé au droit du poteau de manière à bloquer de déplacement latéral de la nappe.

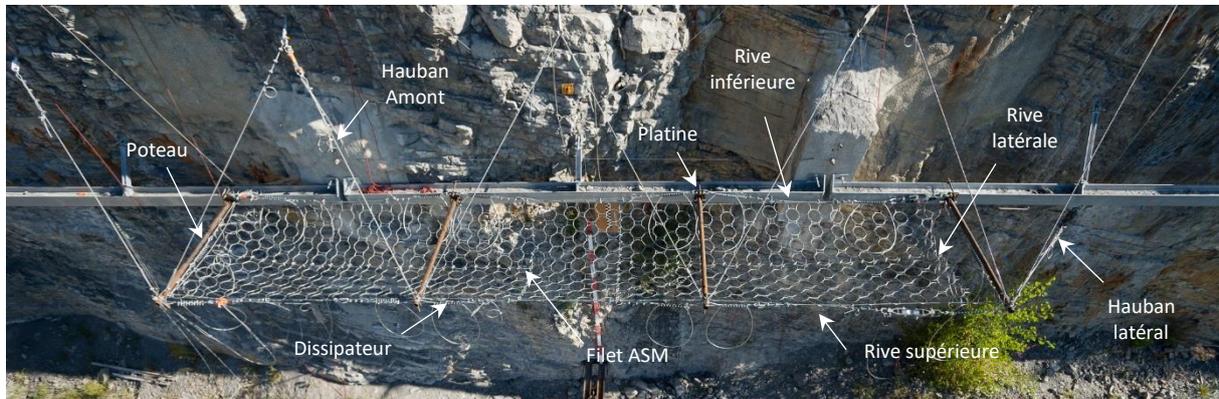


Figure 1 : Ecran pare-blocs C2ROP

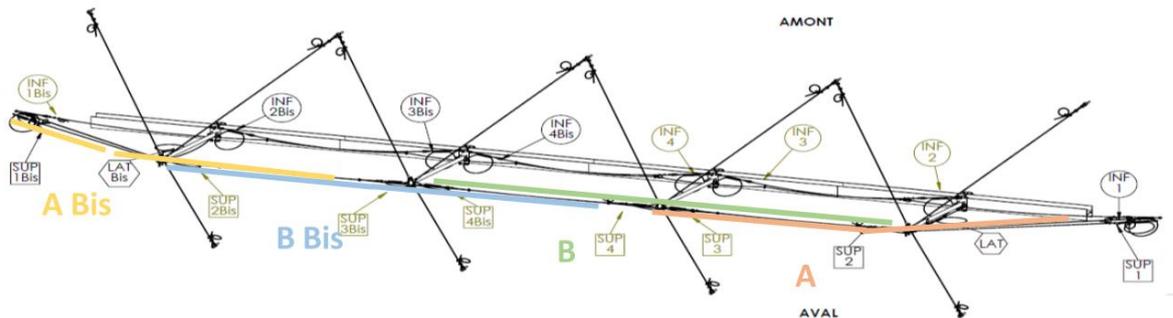


Figure 2 : Ecran pare-blocs C2ROP - Ossature – Nomenclature
(INF/SUP + n° pour les dissipateurs ; Lettre + position pour les rives)

3. Méthodologie

L'étude du comportement de l'ouvrage C2ROP a été réalisée à partir de plusieurs expérimentations. Dans un premier temps, les composants de l'ouvrage ont été testés. Puis une campagne d'essais à échelle réelle a été réalisée sur l'ouvrage complet. Des essais sous conditions de chargement quasi-statique (QS) et dynamique (Dyn) ont été effectués afin d'assurer une analyse complète et approfondie du comportement de cet ouvrage.

3.1. Essais sur composants

Les composants principaux d'un kit de protection souple sont les dissipateurs d'énergie, la nappe de filet ou grillage, les câbles métalliques et les poteaux (Volkwein et al., 2011). Dans la littérature, le comportement complexe et singulier des dissipateurs d'énergie a été peu investigué (Trad 2011). Dans cette étude, une attention particulière a été portée sur la caractérisation de la nappe de filet et des dissipateurs d'énergie.

Essais sur la nappe de filet

La nappe de filet à anneaux a été étudiée à plusieurs échelles. Des essais de traction sur des anneaux seuls ont tout d'abord été réalisés en deux points (un point d'attache fixe et un point d'attache mobile) et en 4 points d'attache (deux points d'attache fixes et deux points d'attache mobiles). Puis des essais de traction sur des échantillons de nappe de 3x3 anneaux ont été menés. Pour ces essais, le déplacement et la force au niveau des points d'attache mobiles ont été relevés (Dugelas, 2020).

Essais sur les dissipateurs d'énergie

Le comportement des dissipateurs d'énergie a été caractérisé par des essais de traction en conditions QS et Dyn. Les essais QS ont été réalisés sur le banc d'essais de NGE Fondations. Une campagne de tests (28 + 9 essais) a été effectuée afin de concevoir et caractériser les dissipateurs d'énergie. Pour les essais de traction QS, le dissipateur est sollicité en déplacement imposé où le déplacement et la force au niveau du point mobile sont enregistrés durant l'essai.

Les essais sous conditions dynamiques ont été réalisés sur le site d'essais de Rompon (CAN). Le dispositif d'essai était constitué d'une masse de 480 kg, reliée au dissipateur, pouvant chuter d'une hauteur de 5 m. L'énergie maximum ainsi mobilisée était de 24 kJ. Les efforts de sollicitation ainsi que l'allongement du dissipateur ont été enregistrés à l'aide d'un capteur de force et d'une caméra rapide (fréquence d'acquisition 500Hz) synchronisés.

3.2. Essais sur ouvrage

L'analyse de l'écran souple C2ROP a été réalisée au travers de deux campagnes. La première campagne portait sur l'étude du comportement des kits de protection sous conditions de chargement QS. La seconde était constituée d'essais d'impact sur différentes configurations d'ouvrages et de sollicitations (cadre ETAG27 et hors ETAG27). Pour les essais dynamiques, le protocole d'essais consistait au largage vertical d'un bloc de béton soumis à la pesanteur. L'énergie d'impact était établie en fonction de la masse du bloc et de la hauteur de chute libre avant contact avec la nappe.

Instrumentation

Le dispositif d'acquisition des données a été reproduit pour tous les essais réalisés sur l'ouvrage. Pour l'acquisition des efforts au sein de l'écran, 7 capteurs de force (force nominale 250 kN, INSA Lyon) ont été placés sur les différents câbles de rive et haubans (Dugelas, 2020). Deux caméras rapides (Fastcam Proton, fréquence d'acquisition de 500 Hz) ont permis de suivre le déplacement du bloc et l'allongement de certains composants. Un traitement *a posteriori* a permis d'extraire les évolutions temporelles des déplacements et des vitesses. Des accéléromètres triaxiaux du type MEMS (MIDE SlamStick X 200g, 3.6kHz) ont été utilisés pour mesurer les accélérations des blocs après largage, à l'impact dans l'ouvrage et jusqu'à l'arrêt. Les données obtenues par les caméras rapides et les capteurs de force ont été synchronisées. L'ensemble des données a permis d'estimer les efforts d'impact, les positions et l'état de déformation de l'écran souple. La géométrie initiale (avant essai) et la géométrie finale (après essai) ont été relevées à l'aide d'un scanner laser TRIMBLE SX10.

Essai quasi-statique (QS)

L'objectif de l'essai QS sur la structure était d'analyser le comportement de l'ouvrage en s'affranchissant des effets inertiels. Un mouflage relié à un treuil électrique (Huzech 5Tn) a été utilisé comme système de chargement du module central de l'ouvrage (Coulibaly, 2017).

Essais dynamiques (Dyn)

Deux campagnes d'essais d'impact distinctes ont été réalisées sur l'ouvrage C2ROP. La première a été basée sur la méthodologie préconisée par le guide d'agrément européen (EOTA, 2013). Les énergies d'impact ont été fixées à 270 kJ pour les impacts à énergie maximale et à 90 kJ pour les essais à énergie de service. Deux impacts à énergie maximale et trois impacts consécutifs à énergie de service ont été menés (Tableau 1).

Tableau 1 : Essais conformes ETAG27

Essai	MEL 1	MEL 2	SEL 1	SEL 2	SEL 3
Energie	270 kJ	270 kJ	90 kJ	90 kJ	90 kJ
Bloc	140 kg	140 kg	140 kg	140 kg	140 kg
Hauteur	37.15m	37.15m	12.4 m	12.4 m	12.4 m
Caractéristiques du largage	Nouvelle nappe	Nouvelle nappe	Nouvelle nappe	Consécutif SEL 1	Consécutif SEL 2

La deuxième campagne d'essais dynamiques a été consacrée au comportement des ouvrages soumis à des essais hors du cadre ETAG027 (Tableau 2). Ces essais visaient à reproduire des conditions d'impact représentatives de situations réelles (*in situ*) non prises en compte par les essais de certification. Les configurations suivantes ont été explorées :

- essai à énergie d'impact maximale sur ouvrage constitué d'un seul module (1 module seul),
- essai à énergie maximale sur un ouvrage préchargé, simulant un remplissage rocheux pré-existant avant impact (ouvrage préchargé),
- essai d'impacts consécutifs sur deux modules contigus à énergie de service (deux impacts consécutifs),
- essai à énergie maximale sur module latéral (module latéral),
- essai excentré à énergie maximale (impact excentré).

Tableau 2 : Essais hors champs ETAG27

Essai	1 Module seul	Ouvrage préchargé	2 impacts consécutifs	Module latéral	Impact excentré
Energie	270 kJ	270 kJ	I : 90 kJ ; II : 90 kJ	270 kJ	270 kJ
Bloc	710 kg	710kg	I : 710 kg ; II : 820 kg	820 kg	820 kg
Caractéristiques du largage	Essai MEL avec largage centré sur un module isolé	Ouvrage préchargé en pieds dans chacun des modules (995 kg) – Largage MEL type ETAG27	1 ^{er} largage SEL dans le module central, puis 2 nd largage SEL dans le module latéral	Largage MEL dans le module latéral	Largage MEL dans le coin supérieur du module central

4. Résultats

4.1. Comparaisons des forces d'impact

Durant les essais, les blocs sont soumis uniquement à la pesanteur et aux efforts de réaction appliqués par la nappe lors du contact. Ces efforts de réaction peuvent être évalués à l'aide de la décélération et du principe fondamental de la dynamique ; l'effort maximal transmis correspond à la décélération maximale. Lors des essais MEL 1 et MEL 2 des configurations type ETAG, l'accéléromètre a atteint un régime saturé (Tableau 3). L'effort maximal, bien qu'inconnu, est donc supérieur à 115 kN. Les essais SEL 1 et SEL 3 ont mis en évidence des efforts de l'ordre de 43 kN (pour l'essai SEL 2, les données étaient inexploitable). Cette différence s'explique en premier lieu par le niveau d'énergie 3 fois plus important pour les essais MEL que les essais SEL. Des écarts de plus de 150 % sont observés. Sans valeurs exactes obtenues lors des essais MEL, il est toutefois difficile de conclure sur la représentativité de ces écarts.

Pour les essais hors champs ETAG, l'évolution des forces transmises par le bloc au filet au cours de l'impact est présentée sur la figure 3. Un modèle différent d'accéléromètre a été employé, et aucune saturation n'est à déplorer lors de ces essais. Au moment de l'impact, un pic d'effort de courte durée (environ 20 ms) est observé. Par la suite, l'effort augmente progressivement au fur et à mesure que le bloc s'enfonce pour atteindre une valeur maximale. Pour l'essai latéral, l'hypothèse est émise que les pics visibles en seconde partie de chargement sont dus à la mise en rotation du bloc (visible sur les vidéos) et ne sont par conséquent pas représentatifs de l'effort transmis. Ainsi, une évolution semblable avec des efforts maximaux de l'ordre de 200 kN est relevée pour les essais isolés, préchargés et latéraux (avec un largage centré). La rupture des rives latérales au cours de l'essai sur un module isolé se traduit par une chute temporaire des efforts. Seule l'évolution et le niveau des efforts au cours de l'essai avec un impact excentré diffèrent des autres essais. Ceci peut s'expliquer par une raideur locale au point d'impact et une distribution différente des efforts. Cette hypothèse est renforcée par l'analyse des dissipateurs qui met en évidence des longueurs de défilement plus importantes de manière générale et notamment au niveau de la rive supérieure.

Des efforts semblables sont relevés entre les valeurs maximales des essais dynamiques (configurations hors champs ETAG avec largage au centre du module) et la réponse globale de l'ouvrage à une sollicitation QS. Pour un travail du bloc de 370 kJ, l'effort QS appliqué est en effet de l'ordre de 220 kN soit 10% d'écart avec les valeurs d'essais dynamiques.

Du point de vue de la conception, analyser les forces d'impact a un intérêt majeur en vue du choix des filets et du dimensionnement de certains constituants de l'ouvrage. L'étude des configurations testées met en évidence qu'un impact centré semble plus préjudiciable.

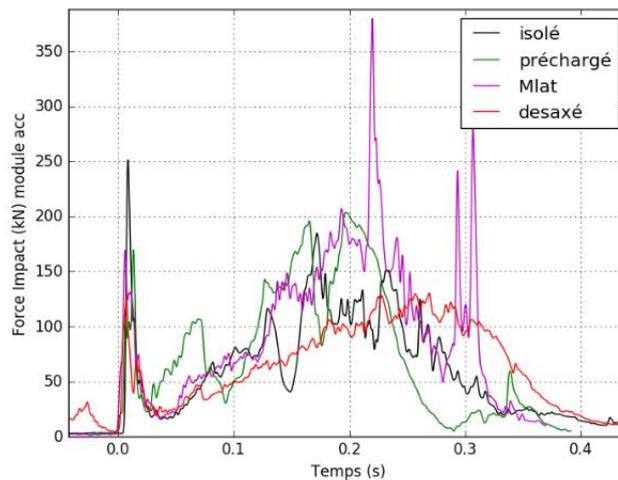


Figure 3 : Forces d'impact des essais hors champs ETAG

4.2. Comportement des rives et des dissipateurs

L'ensemble des essais a été filmé à l'aide de caméras rapides dont l'analyse des images successives permet la mesure de déplacements relatifs entre des points caractéristiques du filet. Ces images étant synchronisées avec les mesures des différents capteurs de force et de l'accéléromètre inséré dans le bloc, on peut construire une image des déformations du filet au cours du temps, en particulier on peut analyser la cinétique de l'« effet rideau » et le comportement *in situ* de certains freins.

L'« effet rideau » est un phénomène complexe qui décrit la réorganisation de la nappe lors de l'impact avec un glissement des anneaux le long des câbles de rive vers le centre du module (Coulibaly, 2017 ; Boulaud, 2020). Dans le filet C2ROP, ce glissement est favorisé par la disposition adoptée pour les câbles de rive qui sont dédoublés dans la partie centrale des modules (Figure 2). Les points où les câbles B et Bbis (en rouge sur la Figure 4) entrent et sortent de la nappe étant facilement identifiables sur les images des caméras, on peut reconstruire l'évolution de leur écartement en fonction du temps et ainsi avoir une estimation du glissement du filet au cours de l'impact. Il est également possible d'identifier sur les images le point le plus haut et le point le plus bas du filet dans le plan de symétrie de la structure et ainsi d'avoir une estimation de l'élongation hors plan du filet (en bleu sur la Figure 4). En mettant ces deux estimations en rapport avec l'enfoncement du bloc (également donné par l'analyse d'image), on obtient une synthèse des déformations du filet en fonction du temps. On retrouve Fig. 4, ces différentes informations dans le cas QS et de l'essai MEL1.

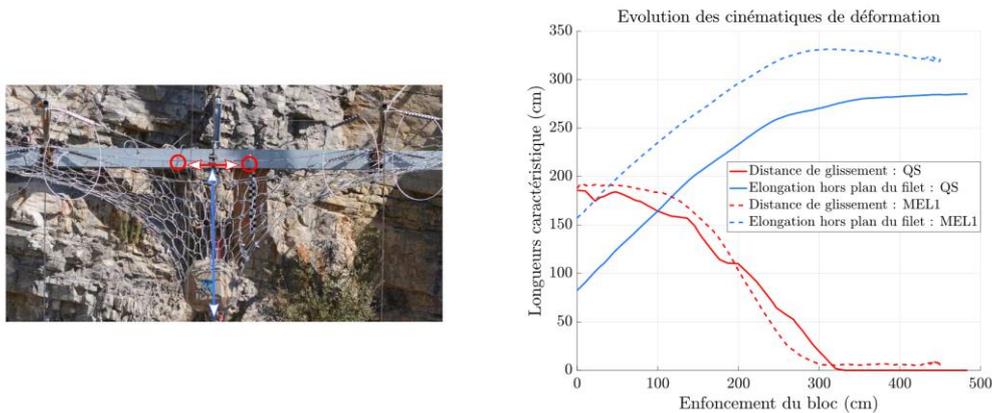


Figure 4 : Analyse des cinétiques de l'effet rideau et de l'enfoncement du filet

On observe ainsi pour les deux chargements, que la déformation hors plan du filet et l'effet rideau sont des événements concomitants qui s'achèvent en même temps, pour un enfoncement du bloc proche de 3 m. A ce stade, les déformations hors plan du filet n'augmentent plus et c'est l'ensemble du filet qui descend du fait de l'allongement des câbles de rives. En outre, l'analyse de l'évolution de la longueur des câbles de rive (Figure 5 gauche) montre que les déformations du câble sont négligeables jusqu'à environ 2.8 m et donc que l'effet rideau précède le déclenchement des dissipateurs. C'est à ce moment-là seulement que la décélération du bloc commence et que le comportement du bloc s'éloigne de celui de la chute libre (Figure 5 droite).

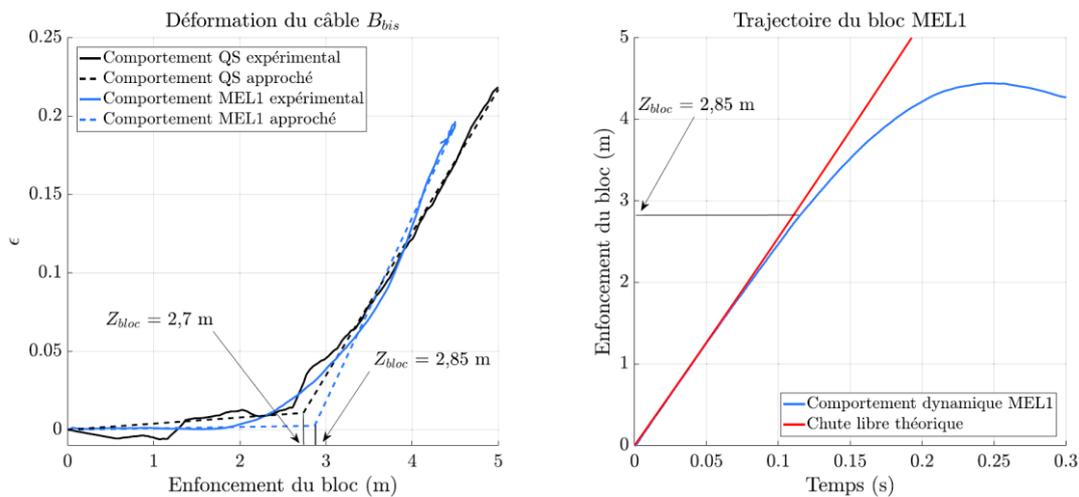


Figure 5 : Analyse des cinétiques de déclenchement des freins (gauche) et de décélération du bloc (droite).

Cette analyse des allongements des dissipateurs aux extrémités des câbles de rive a été menée ensuite de façon systématique sur tous les dissipateurs qui tombaient dans le champ visuel de la caméra et pour l'ensemble des essais (Figure 6). Il a ensuite été mis en regard des efforts mesurés par les capteurs de forces. On constate une grande diversité des forces seuil, des allongements maximum ainsi que des comportements post-pics : certains dissipateurs étant plutôt écrouissants, d'autres plutôt adoucissants. La dispersion des comportements *in situ* est donc supérieure à celle des comportements sur composants seuls ce qui laisse penser que cette variabilité pourrait provenir du caractère dynamique de la sollicitation. L'analyse des causes de cette dispersion nécessiterait une étude plus approfondie qui sort du cadre des essais présentés ici.

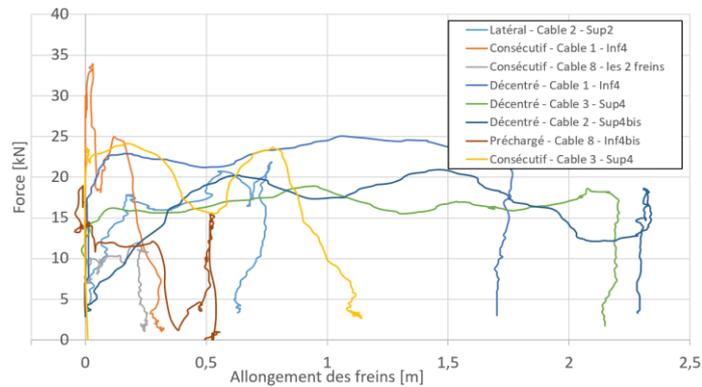


Figure 6 : Synthèse des comportements in situ des dissipateurs

4.3 Comportement de l'ouvrage hors configuration ETAG27

Dans cette partie, le comportement de la structure modifiée (distincte de la configuration standard, soit ouvrage d'un module soit ouvrage préalablement chargé) ou sous une sollicitation différente (position du point d'impact) par rapport aux essais standard type ETAG est décrit. La comparaison porte sur la déformée de la nappe, le défilement des freins et les éventuelles ruptures de composants. La notion de coefficient d'endommagement est introduite. Deux propositions de définition sont formulées par la suite.

Comme la dissipation de l'énergie d'impact se produit au niveau des freins et par déformation plastique des composants de l'ouvrage, on construit un premier coefficient d'endommagement ($Ce1$) comme étant le ratio entre l'énergie dissipée au niveau des freins lors de l'essai de référence et l'énergie dissipée au niveau des freins lors de l'essai. Ici, comme il existe deux essais MEL de référence, on raisonne sur la moyenne des deux essais. Enfin, ce coefficient est qualifié de théorique car le calcul de l'énergie dissipée au niveau des freins est déduit de la longueur de défilement avec une loi de comportement du frein bilinéaire et avec un seuil fixe égal à 25 kN (qui a ses propres limites, comme il a été évoqué au-dessus). Avec cette définition, on retrouve la notion suivante : si l'énergie dissipée au niveau des freins lors de l'essai est moindre, l'endommagement de l'ouvrage est plus important. Une valeur du coefficient $Ce1$ supérieure à 1 rend compte de ce fait.

Un deuxième coefficient d'endommagement ($Ce2$) peut être plus simplement défini à partir du niveau d'effort mesuré au niveau des haubans divisé par la valeur moyenne d'efforts mesurés lors des deux essais MEL de référence.

Le tableau 3 résume les résultats des essais type ETAG27 nécessaires à l'analyse des configurations hors champs ETAG27. Une analyse complète intégrant la dimension temporelle est disponible dans (Coulibaly, 2017). Les indicateurs choisis renvoient aux paramètres de dimensionnement des constituants (efforts), aux caractéristiques géométriques influentes lors de la mise en œuvre (allongement) et à la quantification de la sollicitation des structures et de la marge restante potentielle (énergie dissipée et capacité de dissipation restante).

La Figure 7 montre l'allongement de la nappe depuis l'instant de l'impact jusqu'au temps où l'allongement maximal est atteint pour chacun des essais hors configurations ETAG 27 ; le Tableau 4 résume les grandeurs analysées.

Tableau 3 : Synthèse des résultats des essais réalisés dans les configurations décrites dans l'ETAG27

Essai	MEL 1	MEL 2	SEL 1	SEL 2	SEL 3
-------	-------	-------	-------	-------	-------

Force d'impact	Saturé 115kN	Saturé 115kN	43kN	Saturé	43kN
Allongement max	3,97 m	4,58 m	2,95 m	3,65 m	4,13 m
Effort max dans les rives	41.9 kN	54.5 kN	35.8 kN	Non disponible	49 kN
Effort max dans les haubans	48.7 kN	47.5 kN	40.2 kN	50.8 kN	48.5 kN
Longueur de défilement des freins	8,28 m	11,37 m	3,47 m	6,35 m	8,92 m

Essai sur module isolé

Lors de l'essai d'impact sur un module isolé, des ruptures au niveau de composants ont eu lieu contrairement à l'essai sur trois modules. Les deux câbles des rives latérales et un câble de rive supérieure ont rompu. Les haubans ont également été plus sollicités mais sans rupture. Le bloc a été arrêté mais la résistance de la structure avec le bloc est précaire. Au cours de l'arrêt du bloc, l'allongement de la nappe et le temps d'arrêt ont été plus longs que pour l'ouvrage avec trois modules. Ceci peut s'expliquer par les ruptures de câbles qui ont moins contraint la géométrie.

L'absence des deux modules adjacents au module impacté, qui apportent de la souplesse à la structure tout en retenant la nappe, peut expliquer le comportement de l'ouvrage lors de l'impact. Ici, ce sont les câbles de rive latéraux qui ont joué un rôle tampon. Un dissipateur au niveau des câbles de rive latéraux a été activé mais la configuration géométrique (hauteur du module, longueur à vide du dissipateur et position du dissipateur) n'a pas permis de dissiper l'ensemble de la course des freins (0.5 m au lieu de 2 m). Après le blocage du frein, les efforts dans les câbles de rives latérales ont rapidement augmenté jusqu'à la rupture (96 kN). Les coefficients d'endommagement Ce_1 et Ce_2 calculés sont respectivement très supérieurs et légèrement supérieurs à 1. En effet, le cumul des défilements est plus faible au niveau des freins dans cette configuration: 29 à 48 % de moins. La structure est plus endommagée ce qui se traduit, en particulier, par les ruptures de câbles.

Essai sur module préchargé

Lors de l'essai d'impact avec des masses de préchargement disposées proches du câble de rive inférieure, des ruptures au niveau de deux câbles de rive inférieure ont eu lieu. La structure se comporte de façon plus rigide avec un enfoncement maximal du bloc inférieure et un temps d'arrêt plus rapide par rapport à la configuration de référence.

Globalement, la course des freins est plus faible que dans la configuration de référence. Toutefois, une asymétrie est observable au niveau des allongements de freins : les freins positionnés sur les rives inférieures sont moins sollicités que ceux positionnés en rive supérieure. La présence des masses de préchargement modifie le schéma de propagation des efforts depuis le point d'impact vers les dissipateurs. Les masses font effet tampon et ne transmettent pas, ou de manière moins efficace, les efforts de par leur inertie. Cette moindre dissipation de l'énergie au niveau des dissipateurs signifie un plus grand endommagement de la structure, qui dans ce cas s'est notamment traduit par des ruptures de composants.

Essai d'impacts consécutifs

Lors de l'essai avec deux impacts consécutifs, aucun composant n'a atteint la rupture. Peu de données sont disponibles pour le premier lâcher. L'enfoncement a toutefois pu être estimé avec les images des caméras rapides pour ce premier impact de niveau SEL dans le module latéral. Il est légèrement inférieur à celui d'un impact de même énergie dans le module central. Le comportement de l'ouvrage

lors du deuxième lâcher, au centre du module central avec le premier bloc dans le module latéral, est très similaire à celui observé lors d'un premier impact SEL (1^{ère} campagne) avec un enfoncement important. Il n'est pas similaire au comportement observé lors du deuxième impact SEL (1^{ère} campagne) : une réorganisation géométrique des anneaux de la nappe a lieu pour diffuser les efforts en direction des zones de dissipation d'énergie. Lorsque le deuxième impact a lieu au même point, peu de réorganisation géométrique est possible et la diffusion des efforts s'opère directement vers les freins.

Dans le cas testé, l'ouvrage a pu arrêter deux blocs qui ont impacté consécutivement l'ouvrage au niveau du module latéral puis du module central. Lors du deuxième impact, le premier bloc était encore en place dans l'ouvrage. Le concept de l'essai SEL est démontré et validé lors de cet essai. L'endommagement dans le cadre de cet essai d'impacts consécutifs est similaire à celui de l'essai SEL type ETAG.

Essai sur module latéral

Lors de l'essai d'impact dans le module latéral, aucun composant n'a atteint la rupture. La déformation sous impact est plus faible ce qui met en évidence une réponse plus rigide. Le coefficient d'endommagement Ce_1 calculé est très élevé (2,5) : le cumul de la course des freins est nettement inférieur au cumul mesuré lors de l'impact dans le module central : 42 à 58 % de moins. Lors de cet essai, les freins des rives inférieures n'ont pas été activés. Seuls les freins installés sur des câbles de rive supérieure et le frein de la rive latérale adjacente au point de l'impact ont déclenchés. La nappe de filets, les haubans, les poteaux et le câble de rive latérale côté impact ont été davantage sollicités que pour les essais dans les modules centraux. Leur déformation plastique est sans doute plus importante.

Essai d'impact excentré

Lors de l'essai d'impact excentré, aucun composant n'a atteint la rupture. La déformation sous impact et le temps d'arrêt sont supérieurs aux valeurs obtenues lors d'un impact centré. Ceci est vraisemblablement dû aux conditions de réalisation de l'essai (pour des conditions d'optimisation de l'utilisation des composants, les deux modules non impactés lors de l'essai d'impact dans le module latéral ont été réutilisés pour cet essai et une flèche initiale supplémentaire et égale à 0.5 m existait au niveau de la nappe) et à un allongement plus long qui a pu être favorisé par la pré-sollicitation de la nappe. Dans cette configuration, le cumul de la course des freins est supérieur à la valeur mesurée lors d'un impact centré : entre 6 (MEL 2) et 42 % (MEL 1) de plus. On observe également une sollicitation supérieure des freins situés en rive supérieure et une sollicitation moins importante des freins situés en rive inférieure. Les deux freins en rive supérieure au niveau du module central atteignent leur allongement maximal ce qui tend à indiquer une rupture proche. A noter enfin que les haubans ont été plus sollicités avec la position d'impact décalée vers le câble de rive supérieure. Dans ce cas, le coefficient d'endommagement Ce_1 est plus faible car une énergie plus grande a été dissipée par les freins mais le coefficient Ce_2 en lien avec le niveau de sollicitation des haubans est supérieur à 1.

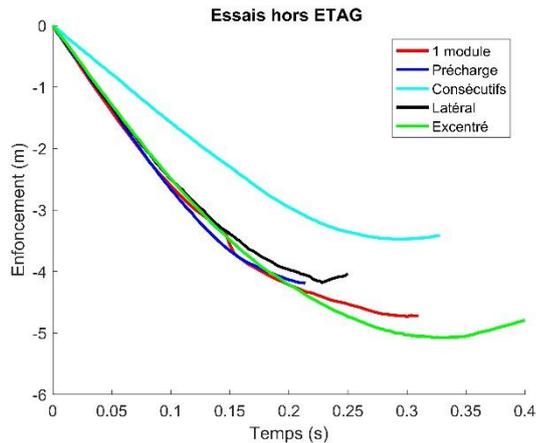


Figure 7 : Enfoncement du bloc lors des 5 campagnes d'essais hors champ ETAG

Tableau 4 : Récapitulatif des résultats des essais hors cadre ETAG27

Essai	1 Module seul	Ouvrage préchargé	2 impacts consécutifs	Module latéral	Impact excentré
Force d'impact max (kN)	187	203	/	205	131
Allongement max (m) / Temps d'arrêt (s)	4.72 m / 0.31 s	4.19 m / 0.21 s	3.97 m / 0.3 s	4.18 m / 0.23 s	5.07 m / 0.33 s
Effort max dans les rives	rupture	/	40	32	31
Effort max dans les haubans (kN)	54	41	26	29	68
Longueur de défilement des freins (m)	5.81	5.79	6.70	4.74	12.10
Coefficient d'endommagement Ce1	1.83	1.85	0.97	2.47	0.78
Coefficient d'endommagement Ce2	1,12	0.85	0.65	0.6	1.41

Synthèse

Les résultats obtenus lors des essais hors cadre ETAG 27 montrent que la sollicitation ETAG 27 (impact au centre du module central) n'est pas la configuration la plus défavorable de façon absolue. En effet, la souplesse apportée par la présence de modules adjacents, l'impact centré et l'effet rideau favorisent la déformation de la nappe de filet vers une configuration efficace et une diffusion homogène (symétrie) des efforts vers les dissipateurs à proximité. A l'inverse, au niveau des haubans, le niveau de sollicitation est relativement élevé.

Dans les configurations hors cadre ETAG, l'endommagement de la structure est plus élevé et/ou la diffusion de l'énergie d'impact est moins aisée : structure plus rigide, freins non déclenchés, freins proches du point d'impact sollicités jusqu'à leur course maximale pouvant conduire à des ruptures de

composants. Il apparaît donc nécessaire d'introduire des coefficients de sécurité vis-à-vis de l'énergie d'impact type ETAG pour garantir la capacité d'arrêt d'un écran de filet soumis à des impacts réels.

Dans ce document, deux définitions de coefficients d'endommagement sont proposées. La première concerne la dissipation de l'énergie au niveau des freins, la seconde se rapporte au niveau de sollicitation des haubans. La comparaison des valeurs des deux coefficients obtenus montre dans certains cas des divergences (endommagement plus grand ou plus petit suivant la définition) ce qui indiquerait la nécessité de construire un coefficient d'endommagement plus complexe et plus intégrateur. Néanmoins, l'endommagement de l'ouvrage calculé à partir de la course des dissipateurs permet d'identifier des tendances.

L'analyse de la dissipation d'énergie entre les différentes configurations est toutefois délicate et n'est pas suffisante pour quantifier le potentiel résiduel. Le défilement des freins est mesuré mais les essais sur freins et les mesures d'efforts lors des essais sur ouvrage complet ont montré une variabilité du seuil de déclenchement des freins (Figure 6). Ce seuil dépend possiblement de la vitesse de sollicitation. Certaines valeurs de seuil sont accessibles grâce aux mesures des capteurs de forces connectés aux dissipateurs. Toutefois, ces mesures d'efforts sont prises sur un câble et sont par conséquent valables localement à cause du frottement et/ou des potentiels points durs. Le nombre de capteurs de force à disposition n'est pas suffisant pour équiper chaque dissipateur. Il n'est par conséquent pas possible de connaître la valeur du seuil de déclenchement de chaque frein. A ceci s'ajoute la question de la pré-tension des câbles et son influence sur le cheminement des efforts.

Suite à cette campagne, certaines des différentes tendances de comportement et phénomènes ne peuvent pas être expliquées de manière satisfaisante. Une analyse paramétrique du comportement de ces ouvrages à l'aide de simulations numériques pourra toutefois contribuer à mieux comprendre certains des phénomènes observés.

Conclusions et perspectives

Les résultats présentés sont le fruit des essais menés pendant le projet national C2ROP (2015-2019). Ces essais ont permis d'étudier expérimentalement le comportement de l'ouvrage C2ROP et d'alimenter les développements numériques. Une étude expérimentale approfondie a pu être menée et trois modèles numériques de comportement des écrans souples sous impact ont pu être développés (Coulibaly, 2017 ; Boulaud, 2020 ; Dugelas, 2020). Le caractère innovant de l'étude réside dans l'approche multi échelle (du composant à l'ouvrage) et la nature des sollicitations (QS et Dyn).

Une large gamme de dispositifs d'instrumentation a été utilisée. Des paramètres influents sur le comportement des ouvrages ont été identifiés et des méthodes d'acquisition de données spécifiques ont été mises en place, notamment pour l'étude de l'activation des dissipateurs d'énergie et le phasage de la déformation de l'ouvrage. Une grande quantité de données a ainsi été recueillie, puis traitée à travers les nombreuses campagnes réalisées.

Des essais selon l'ETAG27 (cadre réglementaire) et hors champ ETAG27 ont été réalisés. Les configurations hors champ ETAG27 ont été définies pour étudier des situations non testées dans le cadre réglementaire mais représentatives du contexte de sollicitations en contexte opérationnel des ouvrages. Leur endommagement a été caractérisé et comparé aux configurations prescrites par l'ETAG27, prises comme références. Des coefficients ont été proposés afin d'illustrer la dégradation de l'état post impact des ouvrages en fonction du type d'impact et par rapport aux configurations de certification. Les résultats mettent en évidence que la configuration définie par l'ETAG27 n'est pas nécessairement la configuration la plus défavorable. Ainsi, l'essai de certification doit être considéré comme un moyen de classification et de comparaison des différents produits sur le marché par rapport à une configuration type. Les performances évaluées et les valeurs mesurées sont représentatives de

la configuration testée mais pas de l'ensemble des configurations rencontrées une fois l'ouvrage mis en œuvre.

Même si l'écran C2ROP est représentatif des technologies des écrans sur le marché, l'ensemble des éléments mis en évidence dans ce document s'appuient sur un produit unique avec un principe de conception et une technologie donnée. En conséquence, cette étude doit être considérée comme une première approche. Des analyses complémentaires sont requises. D'autres technologies de dissipateurs d'énergie, de nappes (filets ou grillages), géométries et principes de conception doivent être testés. Ces variations peuvent avoir une influence significative sur le comportement des ouvrages en condition ETAG ou hors ETAG. Ces investigations seront poursuivies dans le cadre d'un deuxième projet national en cours de montage et faisant suite au projet national C2ROP. Sur le plan expérimental, des configurations d'essais complémentaires sont à envisager afin de mieux anticiper le comportement des ouvrages sous la sollicitation de projectiles présentant des vitesses de translation élevées (> 30 m/s) ou une composante rotationnelle. Sur le plan numérique, les modèles développés lors du projet national C2ROP pourront être utilisés intensivement pour étudier de façon paramétrique ou à l'aide de métamodèles les variations de comportement.

Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre et avec le soutien financier du projet national C2ROP. Les auteurs tiennent à remercier les personnels des entreprises CAN et NGE Fondations qui ont permis la réalisation des campagnes expérimentales riches et intenses.

Références

Bertrand, D., Trad, A., Limam, A., 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*, 45. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0222-5>.

Boulaud, R. Etudes et modélisations du comportement d'un écran de filet pare-blocs à différentes échelles, thèse de doctorat, Université Paris-Est 2020.

Boulaud, R., Douthe, C., Sab, K., Modelling of curtain effect in rockfall barrier with the dynamic relaxation, *International Journal of Solids and Structures*, January 2020

C2ROP, 2020. <https://www.c2rop.fr/> (Dernière consultation 10/02/2020)

Coulibaly, J., 2017, Modélisation numérique discrète du comportement mécanique sous impact des structures d'écrans de filets pare-pierres, Thèse de doctorat.

Coulibaly, J.B., Chanut, M., Lambert, S., Nicot, F., 2019. Toward a Generic Computational Approach for Flexible Rockfall Barrier Modeling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 52, 4475–4496. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01878-6>

Dugelas, L., Coulibaly, J.B., Bourrier, F., Lambert, S., Chanut, M., Olmedo, I., Nicot, F., 2019. Assessment of the predictive capabilities of discrete element models for flexible rockfall barriers. *International Journal of Impact Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2019.103365>

Dugelas, L., 2020, Stratégies probabilistes appliquées à la modélisation numérique discrète : le cas des filets pare-pierres, Thèse de doctorat.

EOTA ETAG 27, 2013. Guideline for European technical approval of falling rock protection kits. European organization for technical approvals. Brussels

Lambert, S., Nicot, F., 2011. *Rockfall engineering*. Wiley, New York.

Nicot, F., Cambou, B., Mazzoleni, G., (2001) Design of rockfall restraining nets from a discrete element modelling. *Rock Mech Rock Eng* 34(2):99–118

Trad, A., 2011, Analyse du comportement et modélisation de structures souples de protection : le cas des écrans de filets pare-pierres sous sollicitations statique et Dynamique, Thèse de Doctorat, INSA Lyon, Univ. Lyon