

## 5.4 Débat sur les ouvrages de protection

Animé par Eric LEROI

**Luca Pitet (RAVA) :** « Pourquoi dans les modélisations simule-t-on toujours des chutes de blocs avec des trajectoires verticales et non pas avec des trajectoires plus réalistes ? »

- **P. Perrotin :** « Dans la partie expérimentale des simulations, il est beaucoup plus simple d'utiliser l'attraction de la Terre et donc d'avoir des trajectoires verticales. Il n'empêche que nos collègues de l'EPFL ont également mis en place un système permettant d'obtenir des trajectoires qui ne sont pas forcément verticales et de tester leurs effets. Pour notre part, nous avons essayé, toujours avec des trajectoires verticales, mais en inclinant l'ouvrage : cela reste difficile, en particulier dans l'interprétation.

- **P. Gotteland :** « Comme on l'a vu dans les trois cas présentés, il est effectivement beaucoup plus simple de faire des expérimentations avec des trajectoires verticales. Pour les numériciens, ces essais sont des 'essais de calibration' : ils permettent de calibrer les modèles à partir d'essais réels, en jouant sur les paramètres d'interaction entre les éléments. Une fois ces paramètres calibrés, on peut extrapoler vers d'autres modes de sollicitation, en simulant des impacts inclinés, avec des blocs en rotation, avec des impactants en forme de cubes et non plus de boules, etc. Mais ces modèles sont encore du domaine de la recherche (les temps de calcul sont encore très longs) et ne sont actuellement pas directement utilisables en ingénierie ».

Question de **L. Pitet** pour **J. Tonello** : « Pourquoi n'avez-vous pas considéré de matériau de remblai sur la dalle ciment ? »

- **J. Tonello :** « Entre les 4,5m de remblai mis en œuvre en France sur ce type d'ouvrage et les 50-60 cm que préconise la norme suisse, une façon d'attaquer le problème est de ne pas en mettre du tout. La démarche actuelle est de considérer que la structure est structurellement dissipante, d'abord par les effets de la percussion de premier temps au cours de laquelle se produit la déstructuration du béton, dont il faut évaluer l'intensité, ensuite par un travail élastoplastique. Il est toujours possible de voir ensuite quelle amélioration on peut apporter au système si l'on y ajoute une épaisseur de matériau dissipant.

Par contre, si l'on veut dimensionner l'ouvrage pour des réponses de 19 000 - 20 000 kJ, et qu'il faut pour cela incliner les structures, le matériau dissipant rapporté sur une structure inclinée n'aura aucun effet car il sera embarqué directement par le bloc qui l'attaque. Nous voulions également connaître les effets strictement déviants d'une structure en béton armé dissipante (par des rotules plastique, par des effets fusible ou par la percussion de premier temps), c'est à dire l'effet de mise à nu de la structure. La structure est malgré tout recouverte avec des 'bétons d'impact', épais de 12 cm et légèrement armés, qui servent à la protéger de toutes les petites chutes non déterminantes dans le calcul de la structure.

Il s'agit donc d'une volonté délibérée de dire : 'on commence sans remblai, on verra après'. Au vu de tout ce qui a été présenté ce matin, je me demande même si nos dalles ne pourraient pas supporter des filets (!). Il semble que le débat puisse s'ouvrir sur ce genre de choses, je demande l'avis de tout le monde à ce propos... ».

**Jean-Pierre Requillart (RTM 38) :** « Je m'interroge sur cette philosophie. Je partage tout à fait la volonté de soutenir les efforts de recherche faits actuellement en la matière, qui me paraissent tout à fait indispensables, mais il faut en parallèle bien envisager la cible à protéger. Je comprends que pour des infrastructures linéaires, vues leur situation et leurs conditions de réalisation, il faille raisonner de façon extrêmement pointue en dimensionnant les ouvrages 'au plus juste'. Mais je me demande s'il n'y a pas un danger à étendre ce type de raisonnement à la protection de lieux habités. Je crains qu'actuellement on n'avance beaucoup plus au niveau de la résistance des ouvrages et de la vulnérabilité que sur la connaissance des phénomènes et de leur impact. N'y a-t-il pas un danger pour des zones habitées à dimensionner 'au plus juste' sans marges de sécurité ? Globalement, les constructions anciennes étaient plus résistantes ; aujourd'hui, à la moindre sécheresse, au moindre glissement, le bâtiment ne résiste pas parce que ce n'était pas prévu dans le dimensionnement des experts.

Une deuxième remarque concerne les tableaux qui ont été présentés : je pense que les merlons peuvent aller jusqu'à des énergies beaucoup plus importantes que celles indiquées, jusqu'à 100 000 voire 150 000 kJ, selon des résultats obtenus pour des dimensionnements avec le bureau d'études SAGE. Le CETE a peut être aussi des éléments de référence. Si l'on a des enjeux importants de type urbain ou autres à protéger, notre problématique est de ne pas dimensionner 'trop juste'.

**P. Perrotin :** « Il existe des ouvrages linéaires couverts avec un matériau dissipant, par exemple une galerie pare-blocs dans le Val d'Arly, qui devait être couverte de 'tout venant' (vue sur les photos de la présentation). Mais il faut savoir que cette technique est assez rarement utilisée. A posteriori, le matériau, n'est jamais remis en place pour renouveler l'effet dissipant.

Par rapport à la question qui vient d'être soulevée, certes nous allons vers une optimisation des ouvrages, mais en connaissance de cause : lors d'un choc au niveau des appuis, nous savons où va être dissipée l'énergie, contrairement au cas d'un ouvrage traditionnel pour lequel le résultat est plus incertain.

Par contre je pense qu'il faut instaurer rapidement un réel dialogue entre les experts qui déterminent les niveaux d'énergie et ceux qui les utilisent pour calculer le dimensionnement des ouvrages ».

**E. Leroi :** « Ce point me paraît important : on nous parle d'énergie, de dimensionnement, de bloc de référence, de distribution probabiliste des blocs en terme de taille et d'énergie, etc. Le dimensionnement en terme d'énergie est un dimensionnement d'ingénierie, mais il faut d'abord répondre à une demande de protection. Comment passe-t-on de la demande de protection sur le terrain à une réponse en terme d'étude, d'analyse puis de dimensionnement ? ».

**Franco Lunghi (Europroget) :** « Jusqu'à récemment, les galeries et les merlons ont été étudiés avec des méthodes classiques (dynamique des forces, seul le triangle effort-déformation dans l'élasticité est considéré). Les nouvelles approches utilisent des méthodes énergétiques. A-t-on pensé à étudier de vieilles structures avec ces méthodes énergétiques, comprenant une prise en compte de la plasticité du matériel, car les galeries d'il y a 30 ans peuvent aussi être plastifiées ? ».

- **J. Tonello :** « Je suis toujours impressionné par le dimensionnement des vieilles galeries aux formes un peu ovoïde et de petite section utilisable. Les praticiens qui les ont conçues avaient suffisamment de savoir faire pour que ces ouvrages tiennent, et on les voit très souvent endommagés, par exemple dans la vallée de l'Arvan, où de vieilles galeries ont effectivement été plastifiées. On a parlé de 'maçonnerie plastifiée', c'est-à-dire disjointe. Pour ma part, je ne connais pas d'exemple de calcul d'agression énergétique sur des ouvrages anciens. Je pense que cela ressemblerait beaucoup à de la mécanique des roches avec la notation dynamique, car ces ouvrages sont souvent en maçonnerie. »...

- **Franco Lunghi :** « Sur les ouvrages de protection de votre première diapositive, où il y a 4 m de terre au-dessus... ».

- **J. Tonello :** « A mon avis, il y a là ce que j'appellerais une 'faute collective' de l'ingénierie en ce sens que, culturellement, l'ingénieur de génie civil / de structure aime trouver dans des règlements les chargements des véhicules, l'intensité des poids d'essieux (avec ou sans Eurocode...) et faire un dimensionnement strictement statique. On étudie parfois l'effet dynamique des véhicules qui ont tendance à avoir une trajectoire légèrement tombante sur le pont, donc il y a une prise en compte de l'effet dynamique, mais c'est encore 'statifié'... ».

J'avais constaté que les ingénieurs de structure ne voulaient pas aborder le problème de dissiper  $\frac{1}{2}mv^2$ . Ils répondaient traditionnellement : *'ce n'est pas ma culture, il faut aller voir quelqu'un d'autre'*, ce qui revient à séparer complètement la dissipation et la tenue des efforts devenus statiques par l'effet des pics d'effort de pénétration, ce qui m'est apparu comme un contresens. Par exemple, pour les paravalanches, si l'on dévie un flux de neige de vitesse  $v$  d'une quantité  $\alpha$ , en pratique, compte tenu de la définition du talus et du vecteur vitesse de la neige sachant que 'la faille' n'est pas corrigée, le résultat des calculs sera faux.

J'ai donc mesuré à quel point se spécialiser ainsi sans se connaître conduisait à 'des orgies de matériaux' (par exemple pour 1800 kJ, devoir porter - avec la même armature que celle des dalles PSD - 4,5m de matériaux qu'il faudrait régulièrement foisonner quand un bloc a pénétré). Cette façon de faire me semble globalement mauvaise... ».

**Raphael Mayoraz :** « Je n'ai pas bien compris comment vous faisiez le calcul pour arriver au dimensionnement des galeries en projet que vous avez présentés. Est-ce que c'est à partir de la dalle d'essai qui est 3 fois plus petite que la normale ? Comment arrivez-vous à calculer l'énergie à partir du profil de l'ouvrage ? ».

- **J. Tonello :** « Nous avons réalisé les essais sur la maquette à échelle 1/2,5. En parallèle, nous avons fait du pré-dimensionnement, selon ce qui nous semblait être la bonne démarche, en 3 temps : percussion dissipante, travail élastoplastique, restitution d'énergie/rebond des blocs. Nous n'avons pas attendu que la maquette nous donne des indications, nous avons prédéterminé les déformations qui ont été ensuite validées par les essais.

En arrivant à des niveaux d'énergie beaucoup plus élevés, pour des ouvrages plus importants, l'administration centrale en la personne des 'Ingénieurs Généraux Ouvrages d'Art' nous a dit : '*si vous commencez à incliner les dalles, j'aimerais beaucoup que le phénomène et la physique de cette inclinaison soient appréhendés*'. C'est la raison pour laquelle vous avez vu une dalle inclinée : un effet tangent entraîne la dalle, en plus de l'effet normal, donc statiquement cela conduit à d'autres dispositions. Il nous a également été demandé de faire un calcul 'abaqus' de ces structures pour vérifier les convergences entre la maquette, le modèle simplifié à 3 temps que l'on proposait et l'abaqus. Ce travail a été effectué par Philippe Berthet-Rambaud qui, en faisant quelques adaptations paramétriques sur la base des modèles et des renseignements apportés par Pascal Perrotin, a confirmé notre appréciation de la galerie de Poniente sous 9000 kJ. »

- **R. Mayoraz :** « Ce dimensionnement est donc basé sur quelques calculs. Accepteriez-vous d'aller sous cette galerie si j'envoie un bloc à 16 000 kJ ? ».

- **J. Tonello :** « Oui j'y vais ! »

- **R. Mayoraz :** « Parce que les lois de similitude, c'est assez délicat... ».

- **J. Tonello :** « On n'a pas fait de similitude... ».

- **R. Mayoraz :** « C'est ce qui me gêne beaucoup... ».

- **J. Tonello :** « Nous n'avons pas cherché à trouver des équations dimensionnelles des phénomènes nous permettant d'extrapoler vers des niveaux d'énergie supérieurs, par exemple de 135 kJ à 10 000 kJ... Nous avons dimensionné sous 135 kJ avec les méthodes de fonctionnement pressenties, c'est-à-dire le choc mou, le travail élasto-plastique et la restitution, et ensuite effectivement, il y a cette phase 'abaqus' qui a fait tourner les ordinateurs quelques nuits... et qui a été entièrement pilotée par Mr Mazars et Philippe Berthet-Rambaud ».

**R. Mayoraz :** « Une deuxième question : ce qui m'embête dans tous ces essais, c'est que vous envoyez toujours un cube bien à plat sur les dalles. J'ai montré un bloc qui avait tranché du béton sur 4m de haut, par effet de poinçonnement : ce n'est pas qu'une question d'énergie, c'est une question de section d'impact... A mon avis, par expérience, la même masse qui tomberait sur votre dalle avec une forme de feuillet plutôt que de cube la traverserait... ».

**J. Tonello :** « Nous avons testé d'abord ces blocs carrés, qui étaient la première version la plus simple et la moins chère, mais ensuite nous sommes passés à des blocs de 800 kg multi-facettes pour que les angles d'attaque soient aléatoires ; nous avons vu qu'effectivement, quand le bloc tombe sur une arête, une bonne partie de la dissipation se passe dans le bloc, avec l'effet 'couteau' dont vous parlez : le couteau s'émousse et explose aussi ».

**Christophe Delacourt** (Univ. Bretagne occidentale) : « Concernant la dernière présentation sur la modélisation numérique d'endommagement, des schémas montraient un bon accord entre la réalité et les modèles numériques, mais par contre, vous avez dit aussi que vous paramétriez vos modèles numériques. Avez-vous tellement de paramètres que vous arriverez toujours à rendre compte de la réalité ou le niveau de maturité de ces modèles numériques en terme de physique, de mathématiques et de résolution numérique est-il tel qu'on arrive maintenant à résoudre à peu près tous les problèmes ? Où sont les verrous actuellement sur les modèles numériques d'endommagement ? ».

- **P. Perrotin :** « Pour la partie pare-blocs, nous avons essayé d'avoir des modèles avec des paramètres physiques réels, et non pas des paramètres qui conduisent justement à faire converger le calcul mais qui n'ont pas de réalité physique.

Deuxième point : certes, nous vous avons montré des belles courbes, mais celles-ci ont été obtenues 'proprement' : tous les paramètres de calage aussi bien au sens physique du matériau que les autres

(interface entre le bloc et la dalle, difficile à gérer au niveau numérique) ont été calés sur un seul essai. Après cela, tout a été du prévisionnel : nous n'avons absolument pas retouché les paramètres des essais numériques effectués. Dans le cas contraire, effectivement, on peut tout faire dire à un modèle numérique : n'importe quel utilisateur de code éléments finis est aujourd'hui capable de retrouver des courbes proches des courbes expérimentales ».

**Jean-Bruno Pasquier** (géologue, Géoval, Sion) : « A propos des 2 dernières présentations, l'idée de travailler sur le renforcement de la structure de la galerie elle-même paraît intéressante, mais avec la couche de protection, la simple force d'impact dépend aussi du remblai présent sur la galerie. Pourrait-on imaginer de combiner les 2 voies de recherche, en appliquant sur le toit d'une galerie le principe de structure cellulaire des merlons ? »

- **J. Tonello** : « Je crois que ces idées nous ont tous parcouru l'esprit à un moment ou un autre... Pour ma part, je suis à peu près convaincu que pour des énergies de 10 000, à 25 000 kJ, il ne faut pas chercher à arrêter les blocs mais à les dévier. S'il faut pour cela incliner des dalles à des pentes de 35% voire 50%, j'aurai un problème d'angle d'attaque du matériau cellulaire, qui ne réagira pas comme vient de le modéliser Mr Gotteland : si un bloc attaque une de ces cellules avec un effort rasant, elle n'aura pas les réponses espérées. Il faudrait que ces cellules soit attelées entre elles encore d'une autre manière que ce que met au point Philippe Gotteland en ce moment.... ».

- **Ph. Gotteland** : « Il est prévu d'attacher les cellules entre elles : il y a des systèmes d'attaches avec des joints de rupture... ».

- **J. Tonello** : « Tout à fait ! Si on incline une dalle, c'est par rapport à une trajectoire qui est elle-même toujours inclinée – une chute strictement gravitaire étant exceptionnelle. Si l'on peut se permettre de dévier le bloc vers une rivière – si l'on n'a pas d'habitat en aval – ces dalles structurellement dissipantes peuvent tenir tous les contrats d'énergie possibles, sous condition de budget. Si dans une pente à 50% on veut stabiliser un matériau qui interviendrait dans la première phase d'impact de percussion dissipante, un problème mécanique se pose tout de suite: le matériau en question se fera éjecter, sauf si on l'attache... On peut imaginer sur une telle pente des sacs de sable attelés à la dalle : ils exploseront mais ils rempliront une partie du contrat d'énergie par leur explosion. Ce qui me gênait dans le fait de rapporter 0,5-1m de matériaux pulvérulents, c'est que cela nous privait complètement de cette possibilité d'inclinaison, nous empêchant de tenir le contrat à 15 000 kJ. Mais l'ambition de 'panacher' les techniques est réelle. Par exemple, concernant les merlons présentés par Mr Gotteland, nous avons fait des croquis avec l'entreprise Géolithe pour des cas où le merlon ne pouvait pas trouver son emprise au sol : nous avons réalisé une structure pour placer le merlon plus haut sur le site. Dans ce cas il s'agit d'une sous-structure simplement porteuse, à laquelle on ajoute une valeur dissipante, mais il ne faut pas l'endommager sous peine de compromettre la stabilité de l'ouvrage dans son ensemble. On peut toutefois l'amener dans des systèmes de déformation qui donnent un bilan énergétique non nul.

Donc, je suis tout à fait convaincu de l'intérêt de ces 'cohabitations'. Pour la société Avarock à qui j'en ai parlé, ces combinaisons paraissaient tout à fait bienvenues et porteuses...

En pratique, est-on gêné les uns les autres car, tout en connaissant un peu son voisin, chacun s'isole dans ses méthodes pour les protéger ? De tels effets intellectuels jouent probablement... ».

**Jean-Louis Durville** (CETE Lyon) : « Ces recherches sur le comportement des différents types d'ouvrages (filets, merlons, structures en béton) et les innovations sont très intéressantes. Tout cela fonctionne avec des modélisations très performantes et de l'expérimentation, y compris en vraie grandeur – côté français, nous attendons la nouvelle station d'essais.

Toutefois une troisième source n'a pas été mentionnée : le retour d'expérience. Peut-être ne fait-on pas assez l'effort d'exploiter au maximum les cas où des événements ont sensiblement endommagé les filets ou les merlons (il n'y a pas eu énormément de cas sur des dalles en béton, c'est d'ailleurs le projet d'instrumentation...).

Deuxième remarque, pour rejoindre ce que disait Mr Requillart : je crois effectivement que la sécurité, quand on est à l'aval de tout cela, c'est d'abord la structure protectrice, dont on voit qu'on arrivera petit à petit à la dimensionner et à connaître sa fiabilité – ce qui n'est pas le cas aujourd'hui – mais c'est aussi le bloc qui arrive à l'amont de cette structure, pour lequel il doit y avoir un bon accord entre les hypothèses du facteur de sécurité que prennent le géologue et celui qui réalise la

trajectographie (dont les logiciels présentent encore de nombreuses variations entre eux...). Il y a encore des incertitudes. Je n'ai jamais entendu parler de coefficients de sécurité pris sur une trajectoire, en tout cas, ça n'est pas exprimé de façon claire. Entre cette partie en amont et l'ouvrage en aval, il faut une bonne concordance pour arriver à une fiabilité appréciable et satisfaisante. Le dernier point étant ensuite que la puissance publique définisse le niveau de sécurité qu'elle souhaite et éventuellement des méthodes de dimensionnement. Il reste donc encore de nombreux points sur lesquels avancer... ».

**E. Leroi** : « Effectivement, il y a encore du travail en la matière, notamment en ce qui concerne la définition par la puissance publique d'un niveau de protection ou de sécurité qui soit accepté. Je crois que l'on pourra gagner énormément dans ce domaine, ce qui permettra de demander ensuite aux concepteurs et à ceux qui réalisent ces ouvrages de donner des informations sur le risque résiduel.

A aucun moment je n'ai entendu parler de cette notion: les ouvrages arrêtent toujours tout et fonctionnent constamment ! Il y a très peu d'analyse sur ce qui effectivement fonctionne et ne fonctionne pas. Or c'est quand même le problème auquel sont confrontées la puissance publique et les collectivités territoriales : quelle garantie de sécurité peuvent-ils avoir et comment peut-on la chiffrer ? Quel niveau de protection a-t-on à l'aval ? ».

**Franck Compagnon (RTM 05)** : « Pour continuer dans le même sens, l'ensemble de ces expérimentations considèrent la chute d'un bloc alors que dans la réalité il s'agit souvent de cortèges de blocs de taille variable. Que se passe-t-il pour les blocs suivants lorsque l'ouvrage a déjà été sollicité une fois pour sa capacité maximale? Pour la réparation, il est nécessaire de mettre en place une procédure sur ce type d'ouvrages ».

**- J. Tonello** : « Vous évoquez ce que l'on appelle 'l'effet de réplique' : un bloc qui en suit un premier, éventuellement sur la même cible exactement. Dans ce type de configuration, nous sommes convaincus que la réplique est possible pour les domaines de mise en plasticité que nous pratiquons (qui sont encore des domaines de plasticité limités par les valeurs de l'Eurocode 2, c'est-à-dire des raccourcissements du béton de 3,5 à 4 ou 5 s'il le faut mais pas plus, et des extensions de l'armature qui vont éventuellement à 20-25/1000). Nous avons bien observé dans nos essais que l'endommagement permet la réplique, puisque l'on a répliqué des frappes à des endroits déjà endommagés.

Il faut savoir que le vocabulaire normé recèle un piège avec le terme Etat Limite Ultime (ELU) L'ELU de déformation (3/1000 sur le béton et 8/1000 ou 10/1000 sur l'acier) ne représente pas une déformation importante : une légère fissuration, pour laquelle il faut commencer à se préoccuper de la durabilité des ouvrages. Il ne s'agit pas d'une ruine ! Dans nos essais, nous étions encore très loin de la ruine... L'avantage de faire ces 'incursions dans le domaine plastique' est bien de pouvoir quantifier l'endommagement. C'est un point très important. Lorsque qu'on avance dans la plastification, la notion de coefficient de sécurité n'est pas du tout déviée : il faut essayer de voir les choses en terme de 'parcours sur le domaine plastique' pour pouvoir tolérer la réplique, c'est-à-dire ne pas épuiser la réserve de fonctionnement en arrivant à la ruine au premier impact ; on doit pouvoir se dire avant une réplique : 'j'ai consommé tant de plasticité de sorte que je peux avoir ensuite un 2<sup>ème</sup> impact'... Il est difficile de se ramener à l'écriture conventionnelle des ELU du règlement, pour lesquels on cherche à savoir si l'ouvrage devient précaire en durabilité. Il faudrait avoir une vision similaire à celle de l'équipage des porte-avions qui se sert de filets pour empêcher les avions de tomber dans la mer : ils pratiquent l'endommagement tous les jours ! ».

**Valerio Segor (RAVA)** : « Je pense qu'on a centré le problème à la fin de ce débat : le vrai challenge pour le futur est la gestion du risque résiduel. Avec la recherche et les études à venir, on pourra déterminer avec plus de fiabilité les énergies auxquelles on peut être confronté ou les débits des torrents qu'il faut choisir pour dimensionner les ouvrages. Mais il y aura toujours des événements qui dépasseront le dimensionnement de projet. Le vrai problème est ce que la société n'accepte pas : le risque résiduel.

J.-D. Rouiller a dit auparavant : 'il faut vivre avec'. C'est vrai, je pense que cela est accepté par les populations habitant en montagne, qui savent très bien qu'il y a des avalanches, des éboulements et chutes de pierres ou des crues torrentielles. Par contre il est quelque fois très difficile de faire passer ce

message auprès des touristes. C'est absurde : j'ai en tête un cas où des touristes ont dénoncé le maire parce qu'ils avaient glissé sur un trottoir gelé, en hiver. C'est une provocation, mais c'est notre société.

Pour terminer, une petite remarque sur les ouvrages : au moins ici en Val d'Aoste, il y a 3 ans, il était plus intéressant de mettre 2 filets de 1500 kJ au lieu d'un filet de 3000 kJ, très cher car il y avait seulement 2 producteurs. Maintenant, le filet de 3000 kJ devient moins cher : il coûte 20% de plus que le filet de 1500 kJ ».