

5.2 Ouvrages de protection contre les chutes de blocs, un concept nouveau : les Pare-blocs Structurellement Dissipants (PSD)

Pascal PERROTIN (LOCIE, Polytech'Savoie, Université de Savoie) et Jean TONELLO (Tonello I.C.)

P.Perrotin et J.Tonello présentent leurs travaux de recherches et applications sur les ouvrages Pare-blocs Structurellement Dissipant (PSD), nouvelle famille de pare-blocs à même de dissiper des niveaux d'énergie extrêmement importants et ne nécessitant pas l'ajout d'une couche granulaire.

Contexte de l'étude

Les risques naturels (avalanches, chutes de blocs) perturbent énormément l'activité économique, surtout dans les vallées alpines : la pression du tourisme étant très forte, il faut absolument se protéger pour « vendre » ces vallées.

En Savoie, le Val d'Arly, accès entre les stations de Tarentaise et du secteur de Megève, offre un excellent site d'expérimentation car les éboulements, chutes de blocs, coulées de boues y sont très fréquents. Aujourd'hui, sur une portion de 2 km aux niveaux du secteur des Essariaux, il existe déjà 7 ouvrages de protection, positionnés sur les endroits prioritaires où les énergies sont les plus fortes.

La présentation s'intéresse plus particulièrement aux ouvrages des Essariaux (visités lors de l'*Atelier 3 Albertville*) et de Poniente (en cours de réalisation).

Pour dimensionner les ouvrages de protection, l'ingénieur dispose d'énergies d'impact sur l'ouvrage, déterminées à partir de l'analyse de l'aléa par le géologue et d'études trajectographiques.

Pour l'ouvrage des Essariaux (Mur Basso), l'énergie maximale attendue (E1) est de 3360 kJ (tableau ci-dessous), avec des vitesses de bloc de 41,5 m/s.

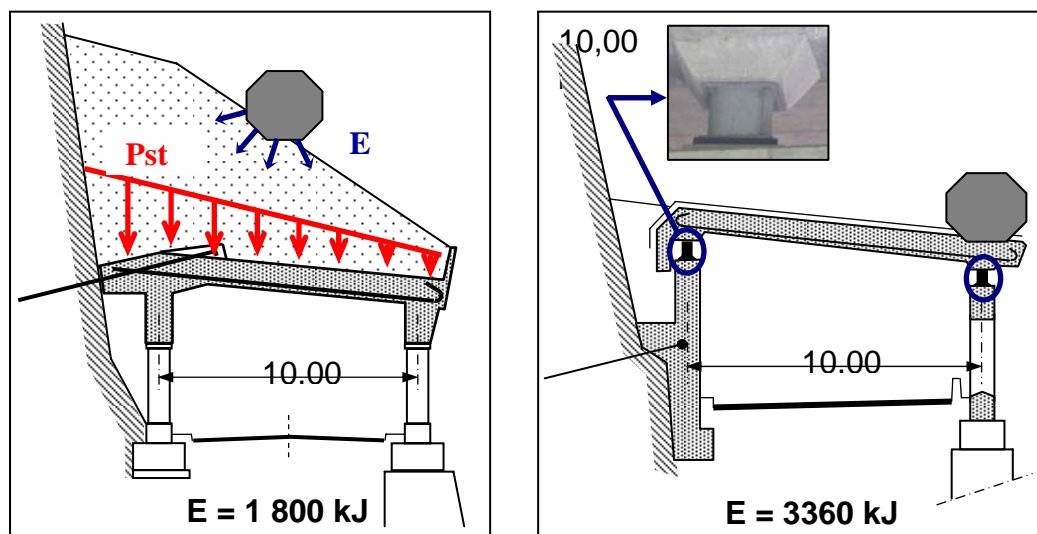
| Lieu dit | PR 13,600 LES FOURCHES | | PR 9,100 MUR BASSO | |
|---|---------------------------|---------|-----------------------|---------|
| | 1 | 2 | 1 | 2 |
| N° de profil | 1 | 2 | 1 | 2 |
| Alt de départ en m | 750 | 750 | 830 | 860 |
| Hypothèse du poids des blocs au départ en t | 13 à 18 | 10 à 15 | 1 à 4 | 1 à 0,6 |
| Energie maximale E1 en KJ | 6700 | 11 450 | 3360 | 650 |
| Vitesse verticale maximale en m/s | 33 | 41,3 | 41,5 | 35,8 |
| Vitesse horizontale maximale en m/s | 24,1 | 21,2 | 19,8 | 18,4 |
| Poids à l'arrivée maximal en t | 12,3 | 13,4 | 3,9 | 1 |
| Energie maximale observée E2 en KJ | 1970 | 9500 | 3100 | 580 |
| Poids associé avec la vitesse verticale en t | 0,3 | 11,1* | 3,6* | 0,7 |
| Vitesse associée avec le poids maximal en m/s | 17,9* | 25,7 | 24,3 | 33,8* |
| Energie optimale E3 en KJ | 1100 | 2560 | 1750 | 650 |
| Poids le plus courant en t | 2 | 3 | 2 | 1 |
| Pourcentage des blocs inférieurs à ce poids | 92 | 86 | 90 | 100 |
| Energie moyenne optimale E4 en KJ | 380 | 600 | 400 | 430 |
| Vitesse verticale moyenne en m/s | 19,4 | 20 | 19,8 | 29,1 |
| Vitesse horizontale moyenne en m/s | 16,3 | 13,1 | 12,5 | 13,6 |

Concept de Pare-blocs Structurellement Dissipant (PSD)

Les ouvrages classiques (schéma ci-dessous à gauche) sont basés sur le principe de dissipation de l'énergie d'impact du bloc dans le remblai supporté par une dalle en béton armé. Les inconvénients de ce système sont multiples :

- Le dimensionnement de la dalle est basé essentiellement sur une approche pseudo-statique ; on peut s'interroger sur l'adéquation du système pour lequel un remblai de 4,5m de terre est conçu pour dissiper « seulement » une énergie de 1800 kJ ;

- Le poids propre de l'ouvrage est élevé, ce qui implique une structure massive, des fondations problématiques ;
- Le remblai est difficilement accessible, ce qui pose des problèmes de maintenance de la structure.



Ces différentes observations ont progressivement amené Tonello I.C. à réfléchir à des alternatives possibles.

La démarche a été de travailler sur des dalles nues, sans remblai, pour juger de la pertinence du dimensionnement, sur un contrat supérieur à 1800 kJ (actuellement 3360 kJ, ci-dessus à droite). Pour un choc en travée, la dissipation se fait donc directement dans la dalle, avec acceptation d'un certain niveau d'endommagement ; pour un choc en rive, elle se fait dans des appuis fusibles (cerclée en bleu ci-dessus). Le dimensionnement de la dalle se fait cette fois sous des sollicitations dynamiques.

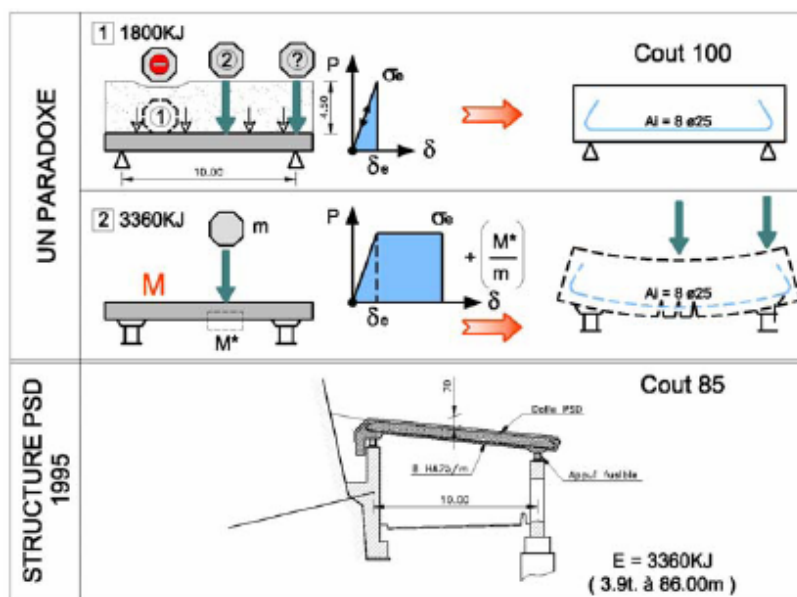
En 1998 a lieu la construction du pare-blocs « Les Essariaux », sans essai préalable, si ce n'est celui « grandeur nature » de la réception d'un bloc de 30 tonnes sur un pont de bretelle de voie rapide (qui a résisté, voir photo de la [diapo 4](#), Moutiers 1998). Ensuite, en Juillet 2000, Novembre 2002 et Mars 2003 se succèdent trois campagnes d'essais avec le LOCIE. Les résultats montrent qu'une réduction de 30 % de l'épaisseur de la dalle est possible, avec pour conséquences une diminution du poids propre, un ouvrage accessible et une maintenance et une surveillance facilitées.

Au niveau des appuis interviennent des éléments qui ne sont pas uniquement dissipants, mais qui sont des limiteurs d'efforts. Ils ont été conçus de manière assez rustique, en prenant en compte le flambement du pourtour de l'appui.

Essais sur appuis fusibles (galerie de Poniente) : avant et après essai d'enfoncement.



La démarche a été guidée en analysant le paradoxe suivant :



Sur une dalle supportant un remblai de 4,5m (cas 1), dimensionnée pour recevoir des énergies de 1800 kJ, un second bloc ne « doit pas » tomber sur une zone déjà impactée car le remblai n’est jamais refoisonné ; d’autre part les impacts sur les appuis sont mal pris en compte . Pour le dimensionnement de ce type d’ouvrages, il n’y a que le domaine "élastique" du matériaux qui est pris en compte (en terme d’armatures un calcul classique donne 8 ϕ 25 /m, ce qui est assez conséquent).

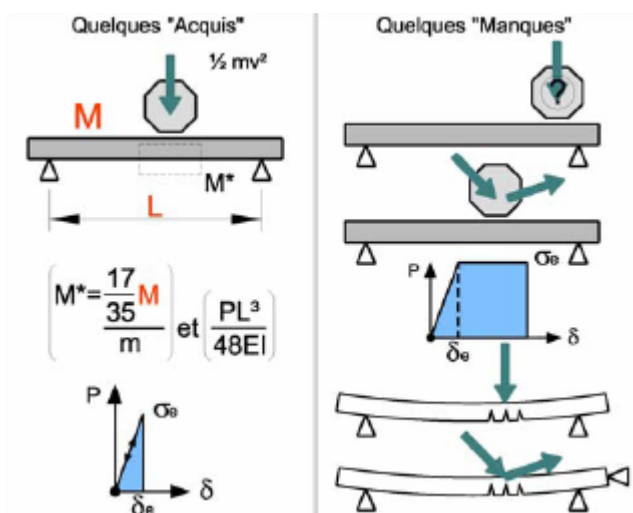
Sur une dalle sans remblai (considérée à 2 dimensions, cas 2), un impact de bloc profite de la première phase de contact (choc mou, dissipante sur le plan énergétique), puis sollicite une phase d’endommagement (domaine de plasticité en terme de contraintes) : avec la même quantité d’armature (8 ϕ 25/m), la structure accepte des énergies de 3360kJ.

C’est ce concept qui a mené à la réalisation de la galerie des Essariaux, avec au final un gain de coût par rapport à une structure classique de 15%, gain non négligeable étant données les sommes engagées

Dans la littérature (« Acquis » ci-contre), on connaissait le choc d’une masse m (bloc) contre une masse M^* (masse équivalente de la dalle) avec une première dissipation (choc mou, supposé puis confirmé par les essais, voir ci-après) puis une phase élastique.

Par contre certains aspects avaient été très peu étudiés (« Manques » ci-contre):

- Un impact sur appui, qui ne peut pas mobiliser la déformation de la dalle pour dissiper l’énergie cinétique et se répercute directement dans la fondation : l’idée innovante a été de créer un système qui permette ce cas de choc ;
- Un choc oblique, avec renvoi du bloc : le bilan énergétique n’est pas le même que lorsque le bloc s’arrête sur la dalle ;
- La prise en compte du comportement "élasto-plastique" des matériaux.



Campagnes expérimentales

Les concepts proposés ci-avant ont été validés par une importante étude expérimentale, réalisée par le LOCIE et soutenue par Tonello I.C. et d'autres partenaires (DDE Savoie, SETRA, CETE Lyon, RNVO, LCPC, Léon Grosse).

Remarques préliminaires :

- (1) Aujourd'hui, les études trajectographiques fournissent des niveaux d'énergie ; or (en France tout du moins), les ingénieurs ont l'habitude de dimensionner les structures à partir d'efforts : le pas à franchir entre les deux est loin d'être simple.
- (2) Dès le dimensionnement de l'ouvrage, un certain niveau d'endommagement de la structure est accepté.

Sur une maquette à l'échelle 1/2,5, trois types d'essais ont été réalisés :

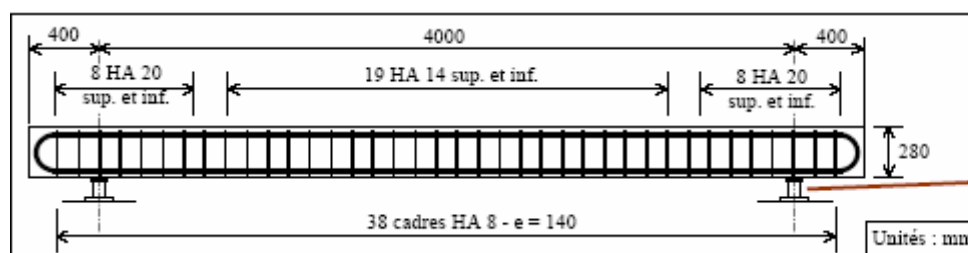
- Des chocs « courants », correspondant à un niveau d'énergie de 67 kJ, qui ne provoquent pas d'endommagement significatif de la structure = un bloc de 450 kg lâché verticalement d'une hauteur de 15m ;
- Des chocs dits « exceptionnels », à 135 kJ, qui font apparaître des déformations permanentes nécessitant la réparation de la structure (énergie maximale) = un bloc de 450 kg lâché de 30m ;
- Des chocs « hors dimensionnement », à 294 kJ, testés pour endommager le plus fortement la structure = un bloc de 810 kg lâché de 37m (essais T6).

Pour réaliser un cycle complet d'étude, les essais ont été réalisés dans différentes conditions :

- Etat de la dalle avant le choc : intact (T1, T2), endommagé (T5) ou réparé (T4, T6) ;
- Position de l'impact : en travée (T1,2,4,5 et 6) ou sur appuis (T3).

La structure d'essai est une dalle horizontale de 4,80 m x 12 m x 0,28 m, avec un ratio d'acier de 1,12 % (soit 270 kg d'acier par m³ de béton), réalisée avec des gammes d'acier et de béton très courantes, telles que celles susceptibles d'être mises en œuvre dans le Val d'Arly :

- FeE 500 (valeur garantie)
- fbc = 30 MPa (essai de compression)
- Béton = 30 700 MPa (extensométrie)



La dalle repose sur 22 appuis fusibles (ci-dessus à droite), constitués de tubes métalliques de 2,9 mm d'épaisseur soudés entre deux plaques d'acier, d'une hauteur de 100 mm et de 70 mm de diamètre, posés sur des patins en néoprène de 10 mm d'épaisseur.

Cette dalle d'essai est instrumentée avec

- des mesures de déplacements verticaux maximaux ;
- une centrale d'acquisition (fréquence de 7000 Hz) qui gère :
 - des capteurs de déplacement LVDT (photo ci-contre) ;



- des accéléromètres en sous-face de la dalle ;
- un accéléromètre dans le bloc d'impact ;
- des jauges de déformation sur les armatures ;
- des capteurs d'effort sous une ligne d'appuis fusibles.

Enfin, une caméra ultra rapide à 1000 images / seconde filme les essais.

Résultats

Essais en travée :

| Test | Position | Énergie d'impact (kJ) | Flèche max (mm) | ε max enregistrées Armatures inférieures ($\mu\text{m.m}^{-1}$) | Endommagement |
|------|-------------|-----------------------|-----------------|---|--|
| T1 | En travée | 67 | 14,5 | 1200 | - Faible fissuration du béton en sous face. |
| T2 | En travée | 135 | 22,5 | 1980 | - Fissuration importante du béton. - 5 brins (HA 8) de cadres rompus. |
| T4 | Idem que T2 | 138 | 19,7 | - | - Faible fissuration du béton en sous face. |
| T5 | Idem que T1 | 134 | 23,2 | 2290 | - Fissuration importante du béton en sous face. |
| T6 | En travée | 294 | - | Plastification | - Ejection du béton d'enrobage. - Plusieurs épingles (HA 10) rompues. - Armatures supérieures et inférieures cisailées. - Plastification de six appuis. |

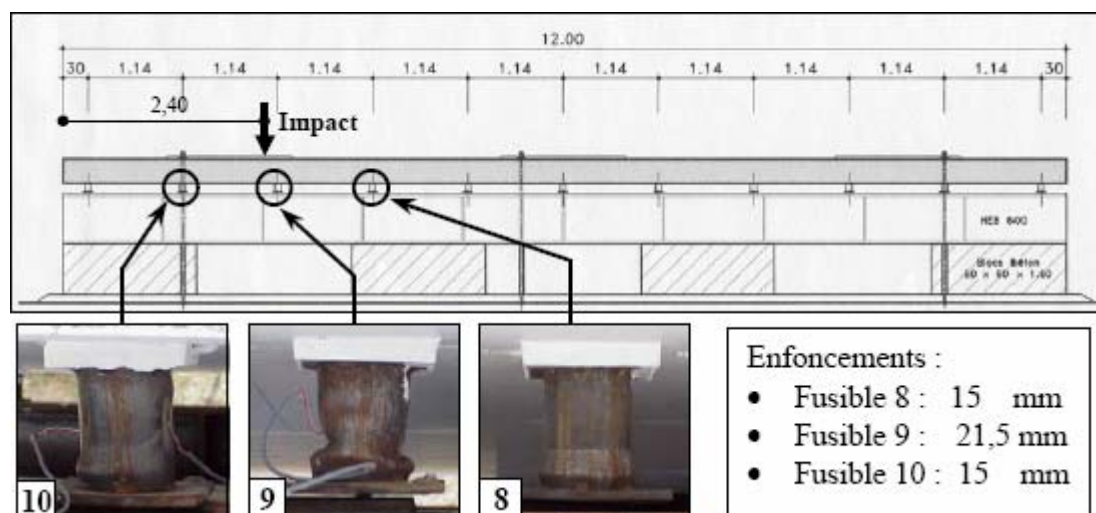
La déformation maximum (limite élastique) pour un acier est proche de $2500 \mu\text{m.m}^{-1}$: les essais T1 à T5 montrent des déformations dans les armatures en deçà de cette limite.

Pour l'essai T2, on observe des ruptures de cadres d'armature, qui s'expliquent par une évaluation insuffisante de l'effort de poinçonnement au moment de l'impact. Ceci a été corrigé pour l'essai T4 : une partie du béton a été hydrodémolée pour remplacer des armatures, puis recoulé ; l'essai qui a suivi (T4) a montré un niveau de flèche inférieur.

Lors de l'essai T6, la structure s'est complètement plastifiée, mais il s'agit bien d'un essai « hors dimensionnement ».

Impact en rive à 135 kJ - Essai T3 :

L'objectif du dispositif est de dissiper un maximum d'énergie dans les appuis fusibles, très peu au niveau de la dalle pour ne pas l'endommager. Cela a bien été vérifié, avec une forte plastification des trois appuis (ci-dessous).



Aucun endommagement significatif n'a été observé dans la dalle, ni dans les éléments supportant les appuis fusibles : l'énergie d'impact a bien été absorbée par le cloquage des appuis.

Au niveau de la dalle réelle, lorsqu'un appui est endommagé, le mode opératoire prévoit de lever la dalle à l'aide de vérins pour remplacer les appuis endommagés.

Lors de l'essai T6 « hors dimensionnement », on a observé une expulsion du béton d'enrobage, une déstructuration de l'ensemble du béton avec des fissures à 45°, des ruptures de cadres d'armatures (pourtant augmentées de $\phi 8$ à $\phi 10$) (illustration dans la présentation, dia 24). Par contre, confirmant une importante réserve de "capacité", le bloc (810 kg lâché de 37m) n'a pas traversé la dalle.

Dans le cycle de vie complet d'un ouvrage, celui-ci peut être impacté et endommagé ; il faut donc prévoir de le réparer. Le béton peut donc être hydrodémoli (1) sur la portion fissurée (les essais ont montré que cette zone est assez restreinte, l'essentiel de la dalle restant dans un domaine semi-élastique) ; le ferrailage est ainsi mis à nu (2), ce qui permet de remplacer les armatures plastifiées ; du béton est ensuite recoulé pour compléter la dalle (3). Les essais après réparation ont fait ressortir des caractéristiques plutôt meilleures que les précédentes, ce qui prouve que le principe de réparation est efficace.



En résumé de ces essais, la simulation d'un cycle de vie complet de l'ouvrage a été réalisée, avec :

- des chocs « courants » à 67 kJ, qui provoquent un faible endommagement et ne nécessitent aucune réparation (la dalle a résisté ensuite à un 2^e impact « exceptionnel » à 135 kJ) ;
- des chocs « exceptionnels » à 135 kJ qui provoquent un endommagement uniquement localisé à la zone d'impact.

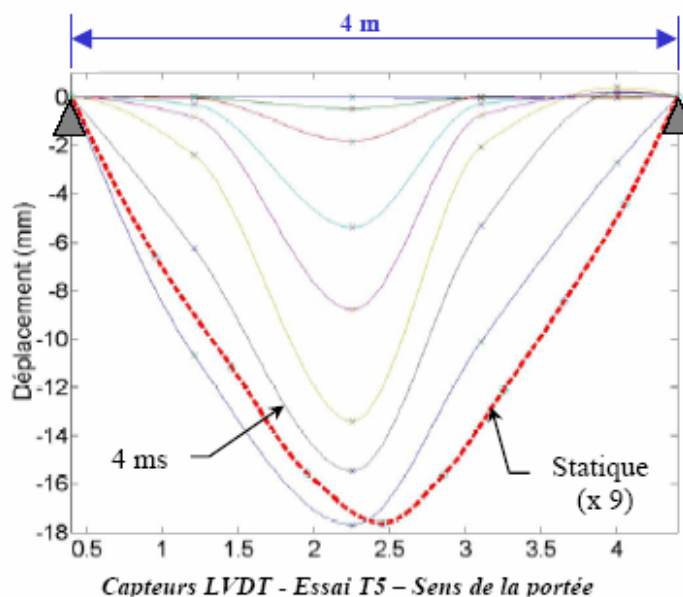
Avant ou après réparation, le comportement de la dalle s'est avéré globalement identique. Enfin, le cloquage des appuis intervient uniquement pour les chocs en rive, jamais pour des chocs en travée bien que cette circonstance ne soit pas à écarter exceptionnellement.

Les campagnes d'essais ont donc permis la **validation du principe de fonctionnement et de réparation des Pare-blocs Structuellement Dissipants**.

Mise en mouvement de la dalle

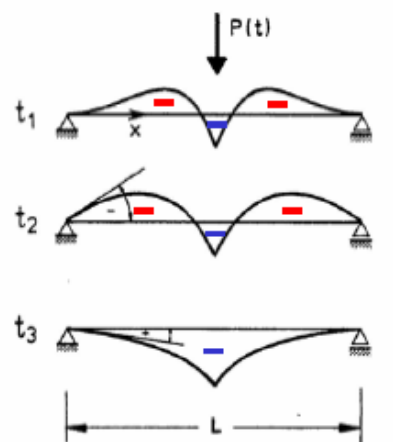
D'un point de vue plus théorique, le graphe ci-contre présente les courbes de déplacement de la dalle, toutes les 0,5 millisecondes environ. On observe qu'en fin de choc les déplacements sont pratiquement conformes à la courbe de déplacement statique bien connue des mécaniciens (pointillé rouge).

Par contre, au tout début de l'impact, les déplacements sont très faibles, ce qui induit des efforts très importants : c'est ce qui explique la rupture des cadres (armatures d'effort tranchant) lors des premiers essais.



D'autre part, lors d'un impact tel que celui d'un bloc sur une dalle, des phénomènes de vibrations se déclenchent, qui ne sont pas selon le premier mode mais selon des modes plus élevés. Entre autre, dans la zone d'étude, au niveau des armatures inférieures (qui sont théoriquement toutes en traction dans un phénomène de flexion statique), certaines jauges montrent bien de la traction mais d'autres commencent par être en compression pour passer ensuite en traction (schéma ci-contre et graphiques des [diapos 28-29](#)) : cela est dû à un phénomène de mise en mouvement progressive de la dalle, qui n'avait pas été pris en compte avant les essais mais est désormais bien intégré dans les modèles :

- Une surface réduite de dalle est mise en flexion lors du choc ;
- Il y a apparition de contraintes de compression dans les armatures inférieures éloignées de l'impact au début du choc ;
- La déformée dynamique a la même allure que la déformée statique au bout d'environ 3,5 à 4 ms.



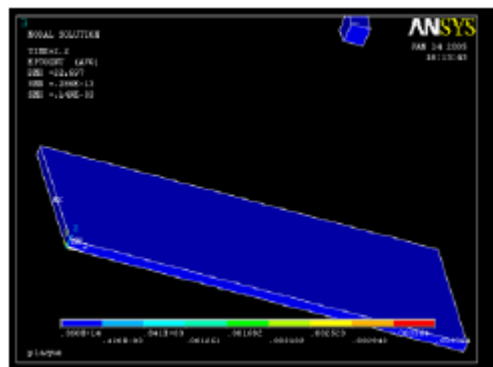
Bilan énergétique

L'énergie cinétique du bloc est en partie transmise à la dalle (énergie cinétique et énergie de déformation), en partie dissipée par le phénomène de poinçonnement de la dalle ; les appuis peuvent également fonctionner sous certains chocs, et si le bloc est éjecté (essais sur dalle inclinée) une partie de l'énergie est transformée en énergies de translation, de rotation et de la déstructuration des matériaux.

Modèles numérique et mécanique

Pour comprendre tous les phénomènes mis en jeu, une modélisation numérique (ANSYS) a été réalisée dans le cadre d'un projet de recherche avec le groupe RNVO (Risques Naturels et Vulnérabilité des Ouvrages) :

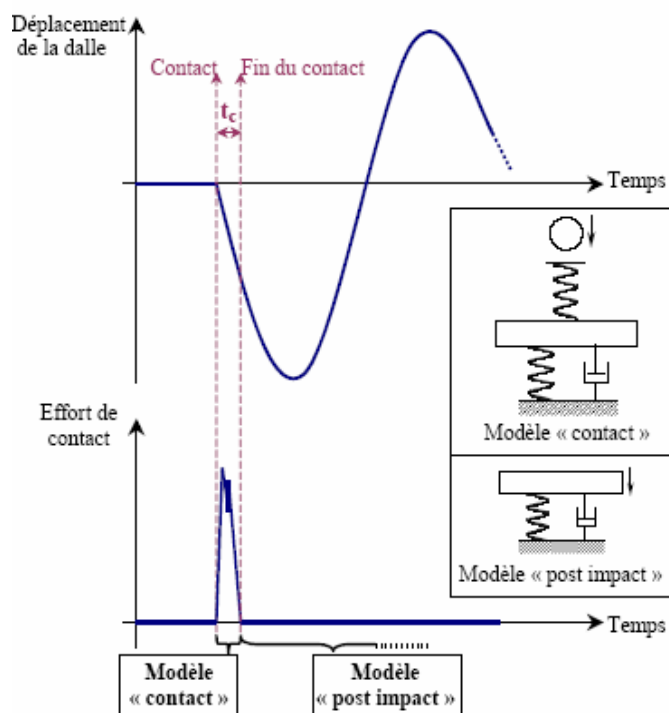
- Approche multicouches 3D : 4 couches dans l'épaisseur ;
- Armatures et béton homogénéisés : SOLID65 ;
- Analyse transitoire implicite : schéma d'intégration temporelle de Newmark ;
- Béton : critère de rupture de Willam-Warnke ;
- Armatures : comportement élasto-plastique ;
- Maillage : 7168 éléments.



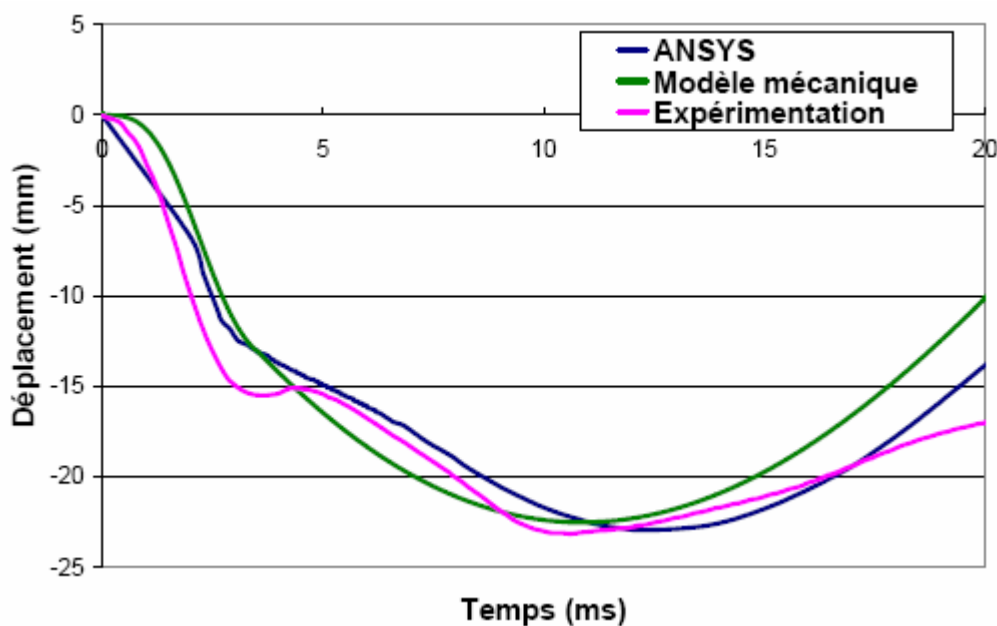
Le modèle a été calé avec des essais statiques et l'essai T5, puis validé avec les essais T2, T4, T6.

A l'issue de cette modélisation, la compréhension des phénomènes a permis de créer un modèle mécanique simplifié pour réaliser les premières démarches de dimensionnement, ce dont l'ingénieur a effectivement besoin. Il s'agit d'un modèle de type masse-ressort simple, décomposés en deux sous-modèles :

- un « Modèle contact » : il prend en compte la surface réduite de la dalle mise en mouvement au départ ($0 < t < t_c$) et intègre l'effort de percussion, le déplacement de la dalle et l'énergie transférée ;
- un « Modèle post-impact » (post-impact sur la figure): modèle de flexion globale ($t > t_c$), il reproduit le déplacement maximal de la dalle et les déformations des armatures.



Les résultats des simulations montrent une très bonne concordance entre les essais réels, numériques et mécaniques (courbes et tableau ci-dessous). Le modèle numérique est malgré tout compliqué à mettre en place.



| | | Déplacement (mm) | | Effort (MN) |
|----------------------|---------------------|------------------|------|-------------|
| | | à t_c | max | |
| Essai T5 (135 kJ) | modèle numérique | 13,5 | 23,0 | 3,3 |
| | « masse – ressort » | 13 | 22,5 | 5 |
| | expérimentation | 15 | 23,2 | 2,8 |
| Essai T1 (67 kJ) | modèle numérique | 8,5 | 15,0 | 1,8 |
| | « masse – ressort » | 9 | 15,4 | 3,3 |
| | expérimentation | - | 14,5 | - |

Les niveaux d'effort très importants mis en évidence au moment de l'impact (3 à 5 MN) expliquent la déstructuration des matériaux observée dans l'expérimentation.

Les modèles simplifiés permettent donc de dimensionner :

- les armatures longitudinales à travers les phénomènes de flexion ;
- les armatures d'effort tranchant grâce à l'effort de contact (poinçonnement).

D'autre part :

- les temps de calcul et de modélisation sont réduits ;
- le changement des caractéristiques de la dalle est facilité ;
- le modèle « masse – ressort » prend en compte les phénomènes dynamiques.

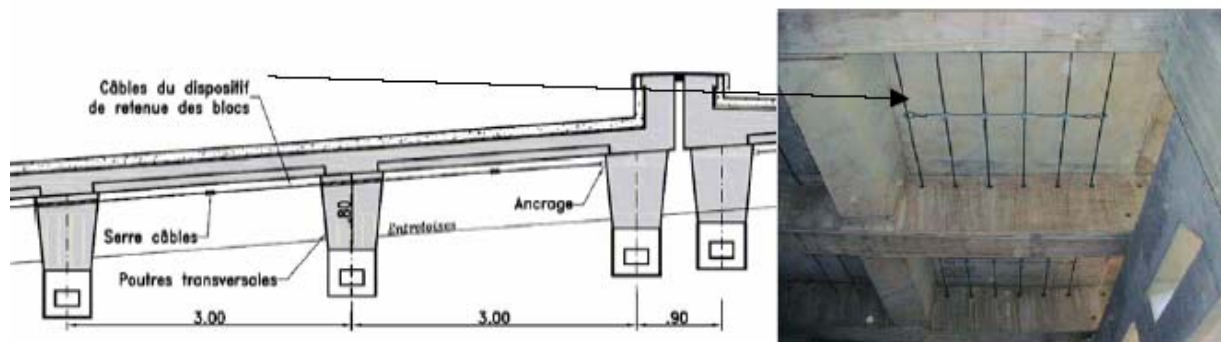
Ils constituent donc une **première approche dans le développement d'outils de calcul pour l'ingénierie.**

Ils confirment aussi les valeurs de la percussion dissipante (choc mou) et celle du travail élasto plastique avec "rotule" unique simplifiée.

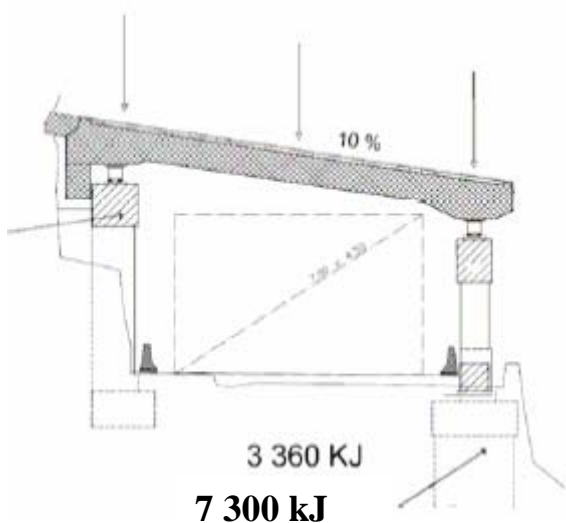
Ouvrages réalisés et en projet :

Neige et blocs associés

La réalisation d'un important paravalanche à Val Thorens avait été prévu selon une méthode de préfabrication intensive, car les délais de chantier en montagne à 2000 m sont courts, d'avril à octobre. Or il a fallu très tard dans le projet prendre en compte au-delà du risque d'avalanche un risque de chute de blocs, qui n'était de prime abord pas facilement conciliable avec le projet initial (hourdis entre poutres important, ne permettant pas de mobiliser l'effet bidimensionnel de la dalle nécessaire pour accepter des impacts de blocs) : il a fallu entretoiser les poutres, mais le niveau d'énergie atteint n'était toujours pas tout à fait suffisant. La sous-face de la dalle a donc été équipée de câbles dissipants (ci-dessous).



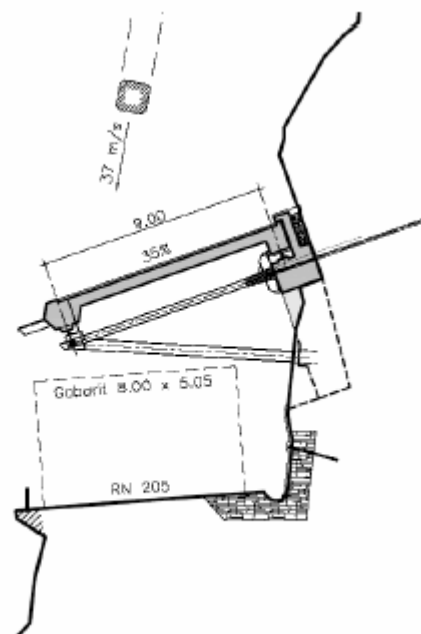
Galerie pare-bloc de Poniente (Val d'Arly)



Initialement conçu pour 16 000 kJ, le projet a dû être ramené à 7300 kJ pour des raisons de coût, une zone de falaise ayant été purgée pour limiter le risque d'éboulement et réduire le niveau d'énergie.

Route des Egratz Passy-Chamonix (Haute Savoie)

Une « casquette », sans capacité d'appui arrière mais toujours avec appuis fusibles, est en projet (2700 kJ).



Conclusions

Les expérimentations ont permis de :

- Valider le principe de fonctionnement et de réparation des PSD ;
- Déterminer expérimentalement les efforts de percussion **dissipante** appliqués à la dalle ;
- Dimensionner la dalle vis à vis du phénomène de poinçonnement ;
- Estimer les différents transferts et dissipations d'énergie lors d'un impact sur une dalle.

Des simulations du choc ont été réalisées à l'aide de deux modèles simplifiés :

- éléments finis multicouches ;
- masse-ressort-amortisseur.

confirmant bien les trois phases :

- percussion dissipante ;
- travail élasto plastique ;
- restitution.

Perspectives

Dans un futur proche, il s'avère nécessaire de poursuivre l'analyse des phénomènes de dissipation durant la phase de contact (chaleur, compaction, ...), ainsi que de prendre en compte l'influence d'une couche amortissante mince. On envisage également une étude dynamique de la résistance au poinçonnement des dalles.

Le développement des modèles simplifiés va se poursuivre : étude de sensibilité, chocs à des positions intermédiaires, loi de contact.

Instrumentation d'un Pare-blocs Structurellement Dissipant réalisé :

Après les essais réalisés sur une structure à l'échelle 1/2,5, il paraît particulièrement intéressant d'obtenir des essais sur un ouvrage en vraie grandeur. L'ouvrage de Poniente, actuellement en cours de réalisation, est ainsi en train d'être instrumenté. Le premier objectif est de savoir comment il va fonctionner dans la réalité, observer comment il va s'endommager et suivre tout son cycle de vie.

D'autre part, cet ouvrage est situé dans une zone très active : il pourrait donc servir de « capteur d'aléa » en détectant les blocs qui tombent sur la dalle, afin d'aider les décideurs à gérer le risque sur cette route très exposée (à condition de pouvoir mettre en parallèle l'activité sur cet ouvrage et l'activité de l'ensemble du versant).

Analyse concertée des niveaux d'énergie arrivant sur les ouvrages :

Pour un travail cohérent entre d'une part les chercheurs et les ingénieurs qui dimensionnent les ouvrages et d'autre part les experts de terrain qui déterminent l'aléa, il paraît important d'avoir une réflexion commune sur les niveaux d'énergie annoncés :

- L'énergie maximale E1 (ex. 3360 pour l'ouvrage des Essariaux) correspond à des probabilités d'apparition très faibles (en général $< 10^{-4}$).
- L'énergie maximale observée E2 correspond à la plus grande valeur faisant partie de la série de calculs. Sa probabilité d'apparition peut être estimée $< 10^{-2}$.
- L'énergie optimale E3 correspond à une probabilité d'apparition plus grande puisqu'on associe aux vitesses maximales une valeur de poids qui ne résulte pas des calculs à partir des valeurs de poids au départ supposées.

A quoi correspondent véritablement ces niveaux ? La question est ouverte, en l'associant à la notion de risque résiduel.