



HAL
open science

Conception et comportement dynamiques des structures de génie civil : application aux ouvrages paravalanches

J.M. Tacnet, Emmanuel Thibert, P. Berthet Rambaud, A. Liman, Mohamed Naaim, P. Perrotin, D. Richard

► To cite this version:

J.M. Tacnet, Emmanuel Thibert, P. Berthet Rambaud, A. Liman, Mohamed Naaim, et al.. Conception et comportement dynamiques des structures de génie civil : application aux ouvrages paravalanches. Sciences Eaux & Territoires, 2010, 2, p. 46 - p. 57. 10.14758/SET-REVUE.2010.2.06 . hal-00528300

HAL Id: hal-00528300

<https://hal.science/hal-00528300v1>

Submitted on 21 Oct 2010

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.

Conception et comportement dynamiques des structures de génie civil : application aux ouvrages paravalanches

Optimiser la conception des ouvrages de protection contre les avalanches est une priorité pour la sécurité en montagne. Les auteurs nous démontrent ici comment la discipline du génie civil contribue à améliorer les connaissances sur le comportement des ouvrages rigides de protection face aux différentes pressions exercées par les avalanches.

L

a sécurité des personnes et des biens soumis aux risques d'avalanches* repose en grande partie sur l'efficacité et la résistance d'ouvrages de protection. Le projet de recherche PRANE* (ouvrages de PROtection soumis à l'Action de la Neige [sous l'égide du RGPU* :

Réseau génie civil et urbain] ; Berthet-Rimbaud *et al.*, 2004) a étudié la résistance de ces ouvrages. Ses résultats en termes d'amélioration de la connaissance de l'interaction entre un phénomène gravitaire rapide (de type avalanche) et des structures rigides n'ont été diffusés que sous une forme et dans un cadre exclusivement scientifique.

Est-ce qu'un ouvrage en béton armé présente un intérêt pour se protéger contre une avalanche ? Est-ce que les matériaux se comportent tous de la même façon en cas de chocs ? Comment se calcule un ouvrage soumis à un impact ? Sait-on où les réaliser et à quel coût ? Voici le type de questions que les maîtres d'ouvrage se posent lors de la conception d'ouvrage de protection.

Cette synthèse reprend les éléments essentiels d'un rapport rédigé par un groupe d'ingénieurs et de chercheurs (Tacnet *et al.*, 2009). Elle propose un panorama sous l'angle du génie civil, aussi pédagogique que possible, de la connaissance des actions exercées par une avalanche et du comportement des structures rigides de protection.

Du phénomène à la protection : situation actuelle

Types d'avalanches

Une avalanche est un écoulement gravitaire rapide de neige, suite à une rupture du manteau neigeux. Trois zones morphologiques existent dans une avalanche (UNESCO*, 1981) : les zones de départ, d'écoulement et d'arrêt. C'est dans la zone de départ que se produit la rupture initiale du manteau neigeux instable et la mise en mouvement de la neige. Dans la zone d'écoulement, la neige peut être reprise ou déposée par l'avalanche, avec

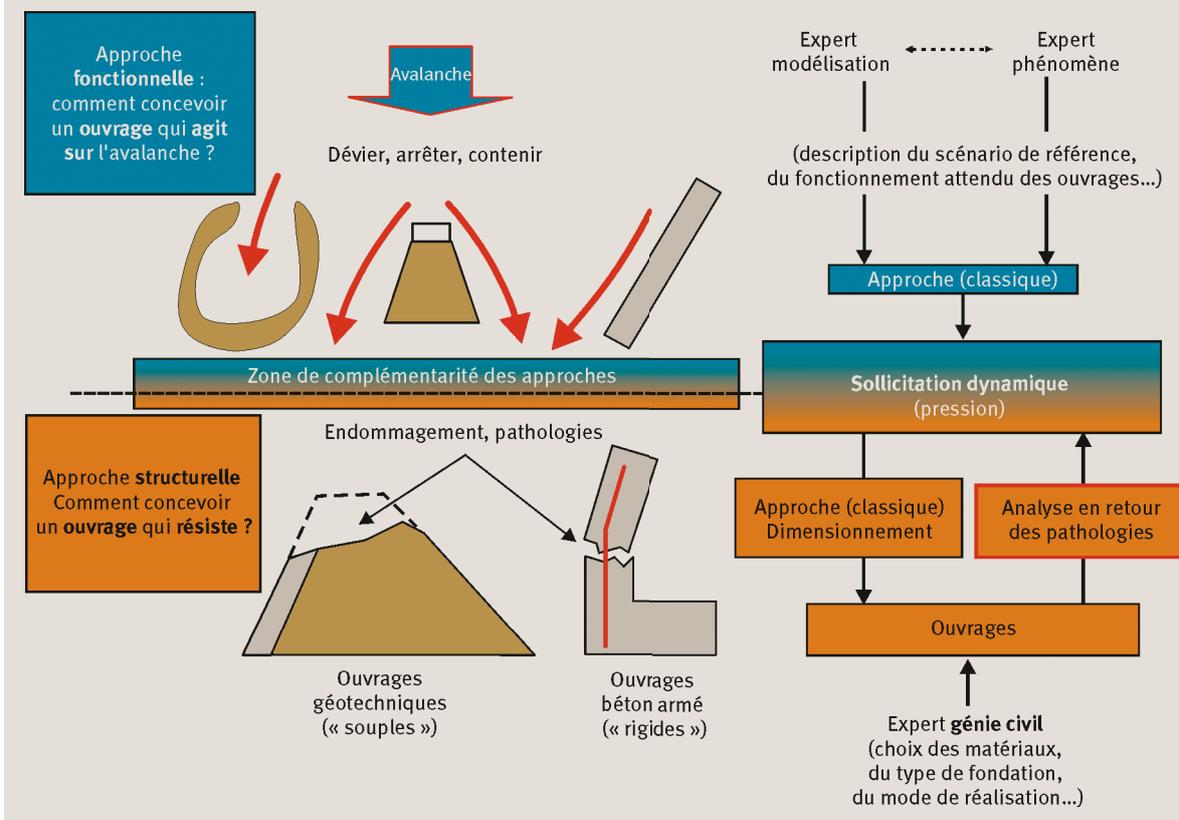


Dépôts d'avalanches de neige humide.



Avalanche aérosol, versant nord du K2 en Himalaya.

1 Les deux volets fonctionnel et structurel de la conception d'un ouvrage de protection



un transit déterminé en partie seulement par le relief du site : chenal, couloir ou versant entier. La zone d'arrêt ou de dépôt est la zone de décélération où la neige et les débris se déposent et l'avalanche s'arrête.

Les avalanches sont également classées par rapport au type d'écoulement et d'un point de vue dynamique, on distingue :

- les avalanches de neige dense ou avalanches coulantes sont des écoulements de neige coulant le long du sol en suivant le relief avec une vitesse relativement faible (inférieure à 30 m/s) et une densité importante (masse volumique supérieure à 150 kg/m³) et une épaisseur de l'ordre du mètre (cas de l'avalanche de neige humide au printemps, photo 1). Par son inertie, la masse mobilisée peut provoquer des dégâts importants ;

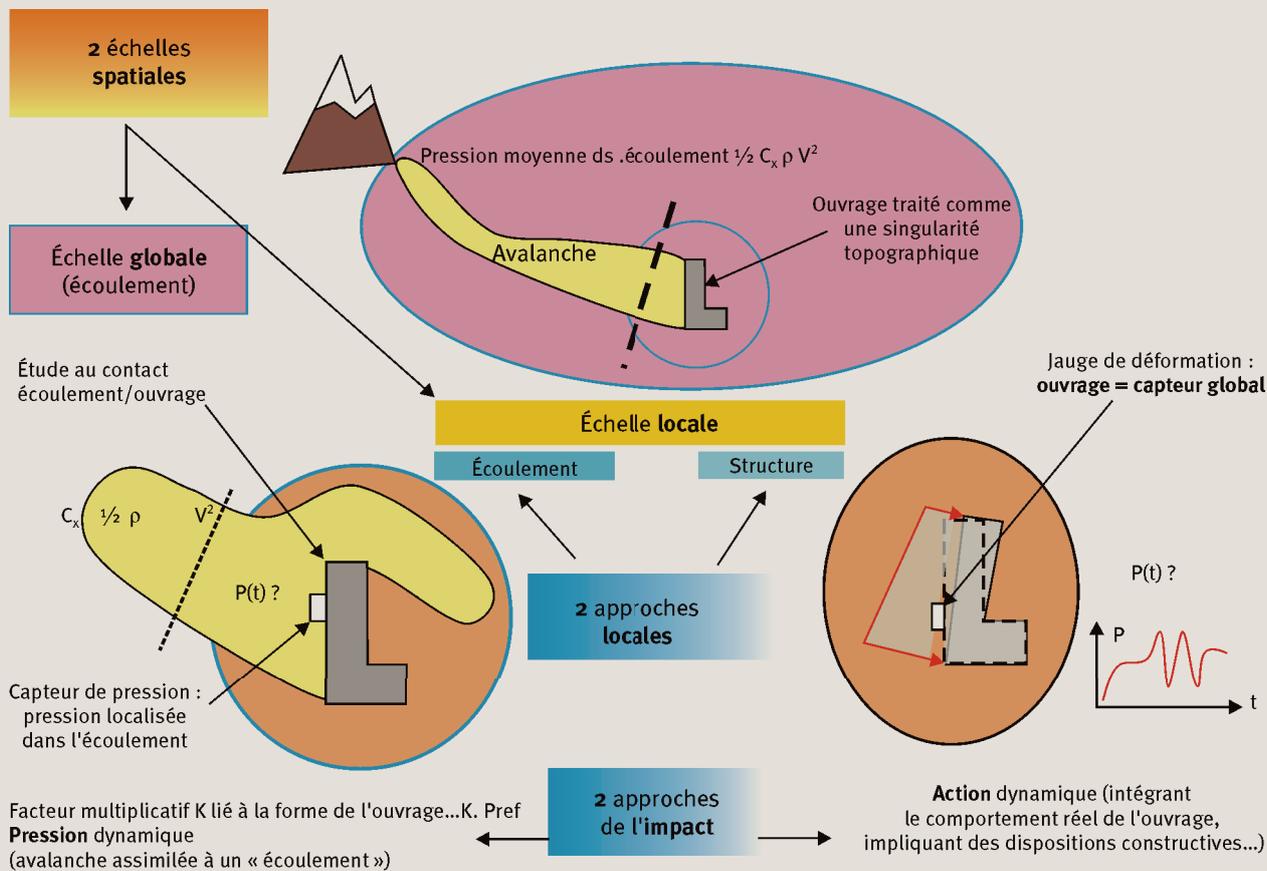
- les avalanches aérosol ou avalanches de neige poudreuse (photo 2) sont des écoulements formés au départ de neige fraîche, légère et à faible cohésion, accumulée sur de fortes pentes (> 30°). L'écoulement est un nuage peu dense (mélange d'air et de particules de neige) s'écoulant rapidement (jusqu'à 100 m/s) sur une hauteur de 10 à plusieurs centaines de mètres. Il s'accompagne de grandes bouffées turbulentes et d'une onde de pression (souffle) peu sensible au relief. Les pressions développées peuvent être importantes et provoquer des dégâts considérables. En fait, un aérosol pur est assez rare et on observe en général des avalanches mixtes possédant les deux caractéristiques, à savoir une couche en écoulement dense surmontée d'un aérosol.

Nécessité d'approches complémentaires pour construire des ouvrages paravalanches

Les ouvrages de génie civil susceptibles d'être impactés par les avalanches comprennent les ouvrages de protection, mais aussi l'ensemble des constructions et équipements situés dans les zones d'arrêt des phénomènes en respect des mesures de contrôle de l'occupation du sol. Pour l'ensemble de ces structures, la démarche standard de conception des ouvrages de génie civil reste valable. Il s'agit notamment de choisir un (des) phénomène(s) de référence, de définir le principe de fonctionnement des ouvrages (dévier, stopper, résister, absorber...), de justifier les équilibres (stabilité externe, stabilité interne) et enfin, de définir les dispositions constructives en considérant la maintenance et l'entretien au cours de la vie de l'ouvrage. Dans le cadre de l'impact d'une avalanche, la connaissance de l'action constitue un point critique. Par rapport à des contextes du génie civil plus classiques, la démarche de conception d'ouvrages de protection nécessite de prendre en compte la fonction de l'ouvrage avant de s'assurer de sa résistance. L'approche classique consiste à considérer que l'étude des phénomènes (associée essentiellement à des méthodes et recherches issues de la mécanique des fluides) permet d'accéder aux valeurs des actions exercées (figure 1). Celles-ci sont ensuite injectées dans le processus de dimensionnement des ouvrages.

Par rapport à des démarches plus classiques, l'approche proposée introduit une phase d'analyse en retour du

2 Complémentarité des échelles et des types d'approches des actions liées à des phénomènes (d'écoulement) gravitaires rapides



► comportement d'ouvrages réels pour déterminer l'action à partir du comportement de la structure (figure 1). Cette vision du problème correspond également à un changement d'échelle. D'un côté, on s'intéresse à l'écoulement à une échelle globale ou locale. De l'autre, la réponse de la structure fournit une information sur l'action exercée sur l'ensemble de l'ouvrage (figure 2). La complémentarité est donc évidente à la fois entre les différents types d'experts impliqués dans la conception d'ouvrages soumis à des actions dynamiques (figure 1) et aussi entre les approches issues du génie civil et de la mécanique des fluides (figure 2).

Les avalanches : des phénomènes dynamiques encore mal connus

Pourquoi et comment les sollicitations dynamiques sont-elles si particulières ?

Les cycles d'application des charges sont plus importants que la charge maximale

La classification des phénomènes dynamiques se fait en fonction de la durée du chargement ou plutôt d'un temps caractéristique de sa variation (figure 3). Le régime dynamique « lent » (cas des séismes ou chute

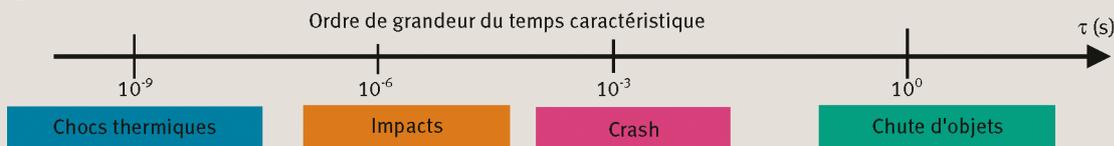
d'objet) se caractérise par une vitesse de déformation entre 1 et 10 m/m·s⁻¹. Le comportement des structures ou matériaux est alors proche du cas quasi-statique et mobilise les techniques de calcul classiques. La démarche consiste à déterminer l'effort maximum à partir de sa distribution temporelle, de le majorer avec un coefficient de sécurité et de vérifier par le calcul qu'il est inférieur à l'effort maximum que peut supporter la structure sans dommages.

Le mode de ruine peut changer en cas de sollicitation dynamique

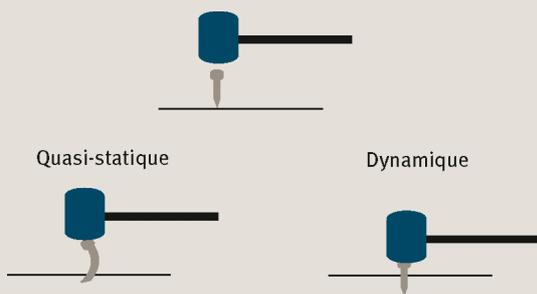
Les sollicitations dynamiques se distinguent des sollicitations statiques/quasi-statiques par une vitesse d'application de la charge beaucoup plus élevée. Le temps d'application d'une charge en statique est très long et les effets de masse (d'inertie) ne sont pas mis en jeu. Par opposition, une sollicitation dynamique conduit à la mise en mouvement « rapide » des points matériels, et les effets inertiels et la viscosité participent alors à la réponse de la structure. Les forces d'inertie peuvent parfois changer le comportement de la structure. Ceci peut même se traduire par un mode de ruine totalement différent du cas quasi-statique.

Si on soumet un clou, en appui sur une poutre en bois d'un côté et soumis à un effort croissant (marteau) de

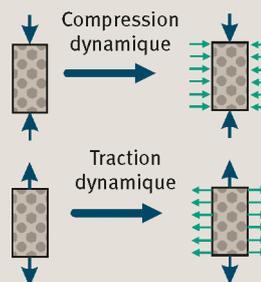
3 Phénomènes dynamiques en fonction d'un temps caractéristique



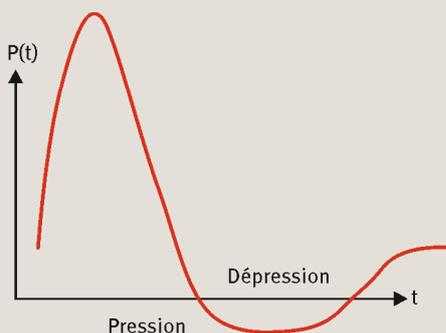
4 Exemple du clou impacté, effet des forces d'inertie



5 Exemple de l'éprouvette de béton en traction ou compression dynamique



6 Exemple de définition temporelle d'un chargement



7 Exemple de la chaîne avec maillon faible (en rouge)



l'autre, à une force incrémentée de façon lente, il finira par plier pour une charge égale à la charge critique de flambement de la poutre équivalente au clou (avec une demi-longueur critique égale ici à la longueur totale du clou). Dans ce cas (quasi-statique), cette instabilité géométrique surviendra avant que le clou ne pénètre dans le bois. Sous l'effet d'un impact dynamique toujours à l'aide du marteau, le clou supportera une charge bien supérieure à la charge critique précédente, et finira par pénétrer dans le bois. Dans ce deuxième cas, la présence des forces d'inertie inhibe le premier mode de flambage, ce qui permet un gain substantiel de capacité portante, et la pénétration dans le bois (figure 4).

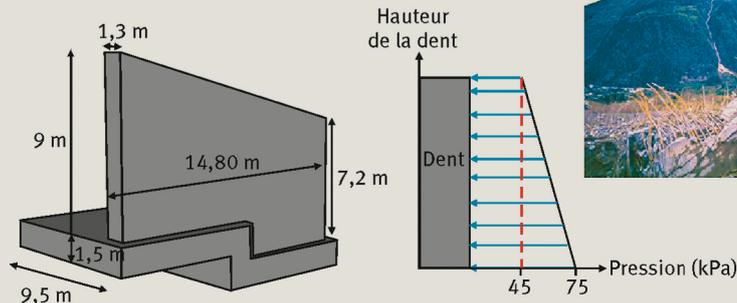
L'exemple d'une éprouvette de béton qui serait soumise à un effort de compression quasi-statique ou dynamique (figure 5) montre également le rôle primordial des effets d'inertie. Dans le cas du chargement quasi-statique, la compression induit une expansion radiale (effet de Poisson). Le matériau béton étant fragile et peu résistant en traction, cette expansion induit des microfissures qui coalescent en macro-fissure, accélérant l'effondrement de l'éprouvette pour une contrainte égale à la contrainte

ultime du béton. Dans le cas du chargement dynamique, les forces d'inertie s'opposent au mouvement des points matériels, ce qui se traduit par une diminution de l'effet de Poisson (expansion), et de ce fait conduit à inhiber la micro-fissuration. L'éprouvette de béton résiste alors à une charge de compression supérieure à celle obtenue en quasi-statique, le gain étant dépendant de l'effet de vitesse. Plus le chargement sera rapide, plus la contrainte maxi augmentera. Beaucoup d'autres matériaux sont sensibles à la vitesse de déformation, et pour certains (béton, acier, aluminium), on constate une nette amélioration des contraintes ultimes en fonction de la vitesse de charge. On ne peut cependant pas systématiquement conclure à une amélioration des contraintes ultimes. Il faut étudier au cas par cas pour conclure sur l'effet positif ou négatif relativement à la capacité portante, et surtout s'intéresser au mode de ruine. De plus, les états ultimes ne sont pas forcément identiques à ceux caractérisant la structure en quasi-statique. Certains phénomènes peuvent être inhibés, laissant la place à d'autres modes de ruine ou de dommages. Par exemple une onde de souffle ou un impact de la face amont d'un mur en béton peut conduire à l'écaillage du béton de la face aval (onde de détente générant une forte traction), alors qu'un chargement identique mais quasi-statique ne conduit pas à ce type de dommages. L'effet dynamique peut donc changer le mode de ruine : le concepteur doit en tenir compte pour renforcer convenablement la structure pour les différents modes de ruine potentiels.

La démarche quasi-statique est également inadaptée dans les cas où les efforts changent de sens (figure 6). ▶

8 Exemples de pathologies dues aux impacts sur des habitations et des ouvrages de protection contre les avalanches

Habitation détruite
(MontRoc, Chamonix,
France)



Ouvrages de protection endommagés
Dents défectives de Taconnaz
(Chamonix, Les Houches, France)

► La pression conduit à préconiser une couche d'armature sur la face amont d'un mur alors que la dépression peut initier une rupture en face aval, par absence de ferrailage, conduisant alors à une rupture fragile sur toute l'épaisseur du mur. Le profil temporel complet de la charge, avec tous ses cycles de chargement-déchargement doit donc être pris en compte : les modes de ruine peuvent en effet changer au cours de ces cycles.

Échelles spatio-temporelles en dynamique

En dynamique, les échelles spatio-temporelles caractéristiques sont complexes et résultent de l'interaction de celles du chargement, de la structure, du matériau, et elles vont interagir avec les échelles relatives aux différents états limites. La sollicitation possède un temps caractéristique. La structure possède elle-même différentes caractéristiques géométriques et temporelles. Enfin, le matériau a aussi des grandeurs caractéristiques correspondant à la taille de grain ou d'une imperfection. Si ces grandeurs n'ont pas d'influence lorsque le chargement est quasi-statique, elles peuvent réapparaître suivant la vitesse de sollicitation. Enfin, ces grandeurs vont parfois interagir du fait de la propagation des ondes mécaniques, complexifiant ainsi le comportement. La notion d'échelle spatiale couramment utilisée en quasi-statique ne permet plus d'appréhender la complexité en dynamique. Dans le cadre des sollicitations dynamiques rapides (impact) des structures de génie civil (figure 3), des ondes de contraintes apparaissent et se propagent. En dynamique, l'hypothèse du maillon le plus faible, valable pour un chargement quasi-statique, devient ainsi caduque. Un essai quasi-statique de traction sur une chaîne qui comporterait un maillon faible (figure 7) conduirait systématiquement à la rupture de ce maillon alors qu'un essai dynamique peut conduire à la rupture du premier

maillon ! En effet, si le chargement est très rapide, on peut imaginer que les ondes mécaniques qui transportent l'information « chargement » ainsi que les grandeurs thermomécaniques associées atteignent tout d'abord le premier maillon qui pourra rompre (selon l'intensité du chargement) avant que l'information « chargement » n'atteigne le maillon faible.

Dans ce cas, on doit alors intégrer à l'observation du comportement dynamique des facteurs supplémentaires par opposition au raisonnement en quasi-statique. La variable temps, l'inertie, la propagation d'onde et le caractère évolutif font désormais partie intégrante de la réponse du matériau. Appréhender le comportement dynamique d'une structure revient à tenir compte de l'ensemble de ces phases, car chacune peut conduire à des types de dommages qui diffèrent les uns des autres, et l'état limite est l'aboutissement de l'interaction de ces dommages. La notion d'échelle spatio-temporelle est le point clef pour une analyse pertinente du comportement dynamique, la donnée précise de la distribution spatio-temporelle du chargement est d'autant plus nécessaire que le chargement relève de la dynamique rapide.

Si la spécificité des chargements dynamiques sur les structures de génie civil ne peut pas être niée, ces approches ne sont pas, à l'exception de quelques ouvrages novateurs, utilisées dans le cadre d'ouvrages de protection réels de manière opérationnelle. Des pathologies illustrent les lacunes actuelles dans ce domaine.

L'exemple du comportement d'ouvrages réels

L'hiver 1999 a été marqué par des avalanches majeures aux conséquences dramatiques, causant notamment la destruction de nombreux chalets et la mort de douze de leurs occupants dans le hameau de Montrac à Cha-

monix (Haute-Savoie, France) (figure 8). Le 11 février 1999, l'avalanche de Tacconnaz (Les Houches-Chamonix) atteint le dispositif paravalanche et détruit des dents déflectrices en béton armé (figure 8) en arrachant leur coin supérieur, transporté à plusieurs mètres vers l'aval. Une analyse en retour détaillée des destructions de ces dents déflectrices (Berthet-Rambaud, 2004) confirme la nature dynamique des actions et propose des scénarii d'impact localisé (dent n° 9) et de pression dynamique répartie (dent n° 11).

Pression d'une avalanche sur un ouvrage : état des connaissances actuelles et lacunes

La connaissance de la répartition spatio-temporelle de la pression caractérisant de manière essentielle l'impact d'une avalanche sur un obstacle rigide est encore très partielle. Passer de la pression potentiellement générée par le phénomène (pression de l'écoulement libre) à l'action effectivement subie par l'ouvrage (pression d'impact) reste difficile du fait de l'interaction écoulement/obstacle. La neige mobilisée par une avalanche est un matériau naturel complexe, anisotrope* et hétérogène, se comportant différemment selon le mode de sollicitation. Des lois de comportement sont plus difficiles à établir que pour les fluides simples. Des lois empiriques récentes (Sovilla *et al.*, 2008 ; Thibert *et al.*, 2008) ou théoriques (Naaïm *et al.*, 2008 ; Faug *et al.*, 2010) relient la pression d'impact aux grandeurs de l'écoulement. Elles montrent que les relations utilisées jusqu'à maintenant pour évaluer la pression d'impact d'une avalanche dense sur un obstacle sous-estiment le niveau de pression lorsque l'avalanche est lente.

Pression de l'écoulement libre

La pression d'impact d'une avalanche sur une structure est définie comme étant la force d'impact divisée par la surface orthogonale à l'écoulement. Dans le cadre de la mécanique des fluides, on définit la pression dynamique d'un écoulement libre (sans obstacle) comme étant l'énergie cinétique par unité de volume. La pression dynamique pour un écoulement caractérisé par une masse volumique ρ et se déplaçant à une vitesse v est donnée par :

$$P_{el} = \frac{1}{2} \rho v^2 \quad \text{1}$$

La masse volumique d'une avalanche dense varie de 100 à 500 kg/m³ et sa vitesse de 0 à 60 m/s. La pression dynamique varie donc de 0 à 600 kPa. La première difficulté réside dans l'estimation de la masse volumique. La neige étant compressible, sa masse volumique est très variable pendant l'écoulement. Peu de mesures ou de lois d'état sont disponibles pour rendre compte de ces variations. Quant à la vitesse, elle est distribuée verticalement selon un profil particulier. Les mesures disponibles, aussi bien *in situ* (Kern *et al.*, 2009) qu'en modèle réduit (Rognon *et al.*, 2008) montrent une zone fortement cisailée à la base d'écoulements denses et une zone faiblement cisailée au-delà. En dehors de la zone basale, la pression dynamique moyenne de l'écoulement libre doit alors être sensiblement constante dans le corps de l'avalanche dense.

L'écoulement d'une avalanche aérosol, dominé par la turbulence de l'air, a une masse volumique de 5 à 20 kg/m³ et une vitesse de 0 à 70 m/s. La pression dynamique dans une avalanche aérosol varie donc de 0 à 60 kPa. Ces écoulements aérosols sont caractérisés par une forte stratification verticale de la densité et de la vitesse. Il en résulte une variation forte de la pression moyenne entre la base et le sommet de l'avalanche. Les vitesses réelles à l'intérieur de l'écoulement aérosol peuvent atteindre le double de la vitesse du front. Les pressions dynamiques calculées à partir de la vitesse du front sous-estiment donc de manière significative les pressions dynamiques réelles dans un aérosol.

Pression sur un obstacle

Un obstacle placé à l'intérieur de l'écoulement d'un fluide subit une pression dynamique proportionnelle à la pression dynamique de l'écoulement libre. Le coefficient de proportionnalité, dit coefficient de traînée C_x , n'est pas constant. Il varie non seulement avec la forme de l'obstacle mais aussi avec les grandeurs de l'écoulement. Le coefficient de traînée peut se décomposer en un produit de deux paramètres C_{fo} (coefficient de forme) et C_{re} (coefficient du régime d'écoulement). Le premier rend compte de l'influence de la forme de l'obstacle et le second de l'influence du régime de l'écoulement. La pression dynamique sur un obstacle P_{do} est alors donnée, en fonction de la pression de l'écoulement libre P_{el} par :

$$P_{do} = C_{re} C_{fo} P_{el} \quad \text{2}$$

> Effet de forme de l'obstacle

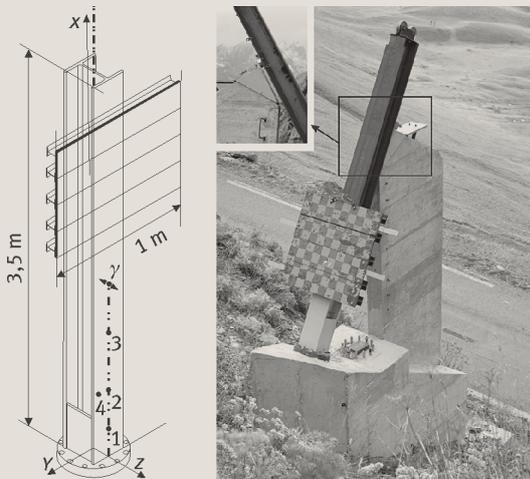
Dans le cas des fluides simples, le coefficient de forme C_{fo} varie de 1 pour un obstacle peu déviant, à 2 pour un obstacle plan. Actuellement, aucune information ne permet de définir simplement ce coefficient pour un fluide complexe tel que la neige en écoulement dense. Il est ainsi d'usage de retenir 2 comme valeur pour ce coefficient pour tout type d'ouvrage (Salm *et al.*, 1990).

> Effet du régime d'écoulement

Pour un fluide simple, le coefficient du régime d'écoulement C_{re} dépend du nombre de Reynolds*. Pour des valeurs du nombre de Reynolds élevées (écoulements fortement inertiels), ce coefficient converge vers une valeur proche de 1. Le coefficient de traînée ne dépend alors plus que de la forme de l'obstacle. Pour les écoulements d'avalanches denses, il faut distinguer les écoulements rapides (inertiels), des écoulements lents où les forces de frottement, de gravité et de cohésion sont prépondérantes. Le nombre de Froude*, rapport entre les forces d'inertie et les forces de gravité, peut être utilisé pour distinguer ces deux régimes. Les mesures récentes montrent une forte décroissance du coefficient de traînée en fonction du nombre de Froude de l'écoulement. D'après Sovilla *et al.* (2008), cette décroissance est bien décrite par une loi puissance à exposant négatif ajustée sur trois avalanches déclenchées sur le site d'étude des avalanches de la Sionne en Suisse :

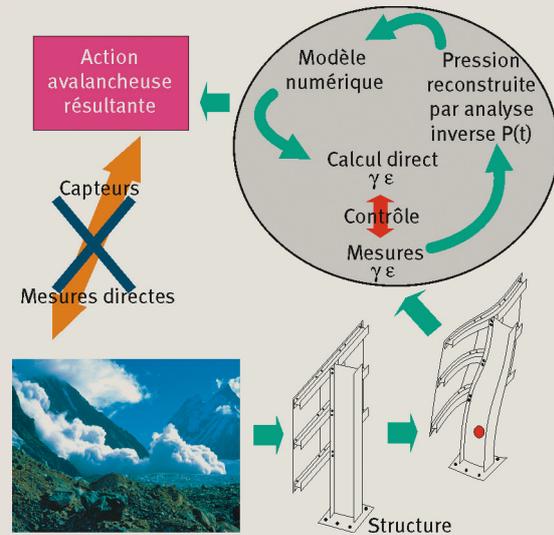
$$C_{re} \approx \frac{2508}{\rho} F^{-0.8} \quad \text{3}$$

9a Structure instrumentée au col du Lautaret



Les numéros indiquent la localisation des mesures de déformation de l'ouvrage.

9b Principe expérimental général



- Ces mesures ont été obtenues grâce à des capteurs de force placés sur un mat de mesures installé dans l'écoulement. Les mesures réalisées par le Cemagref à l'aide de nouveaux dispositifs de mesure intégrant la pression d'impact sur une surface de l'ordre de 1 m² indiquent des résultats similaires (Thibert *et al.*, 2008) avec une dépendance au nombre de Froude :

$$C_{re} \approx \frac{1236}{\rho} F^{-1.3} \quad (4)$$

où la loi est ajustée sur une avalanche dense de neige froide (grains fins).

Une étude théorique (Naaim *et al.*, 2008), qui repose sur une analogie avec les fluides simples, a également permis de relier le coefficient de traînée aux grandeurs de l'écoulement par une loi théorique qui rend compte de cette forte dépendance du coefficient de traînée avec le nombre de Froude de l'écoulement. D'après ces résultats, pour un nombre de Froude élevé, le coefficient du régime d'écoulement tend vers 1 et le coefficient de traînée tend vers le coefficient de forme. Quand le nombre de Froude diminue, le coefficient de traînée augmente de manière significative et peut atteindre des valeurs de 15 (pour un nombre de Froude tendant vers 0,5), rendant l'effet de forme de la structure secondaire.

Dynamique de la pression d'impact

À cette analyse, il faut associer une étude temporelle de l'interaction entre l'écoulement et l'obstacle. Pour un écoulement dense, on distingue généralement une phase transitoire de montée en pression et une phase quasi-permanente si l'écoulement est suffisamment alimenté, ou avec une pression qui diminue (Kern *et al.*, 2009). Pendant la phase permanente, la sollicitation sur l'obstacle peut être considérée comme quasi-statique avec une pression stabilisée. Cette phase peut néanmoins comporter ponctuellement des variations importantes de l'ordre de plusieurs centaines de kPa en quelques centièmes de

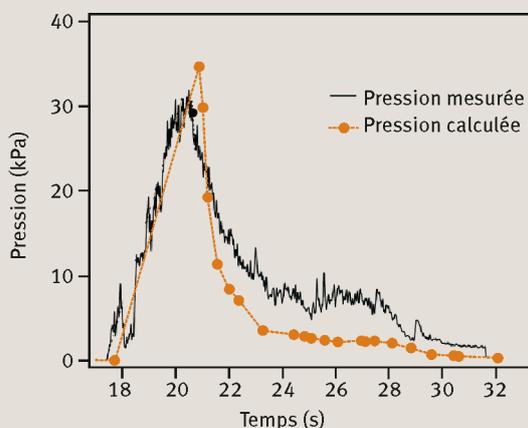
seconde. Des analyses spectrales des mesures de pression (Sovilla *et al.*, 2008 ; Baroudi *et al.*, 2009) ont ainsi montré que les spectres comportent une densité d'énergie importante entre 10 et 200 Hertz. Ceci indique des chargements dans la gamme de dynamique rapide où le dimensionnement par des valeurs statiques n'est pas suffisant.

Le régime transitoire est plus délicat à aborder alors même qu'il est crucial pour le comportement dynamique des structures sollicitées : l'apparition d'un pic d'impact semble avérée dans les approches numériques, mais il ne se produit pas toujours de manière aussi marquée dans la réalité en fonction de la forme du front. Thibert et Baroudi (2009) ont montré récemment que c'est lors de cette phase transitoire que le maximum d'énergie est injectée dans l'ouvrage par l'avalanche, alors que la pression d'impact maximale n'est pas encore atteinte.

Mieux concevoir pour mieux construire**Utiliser les ouvrages comme des macro-capteurs pour mieux connaître les actions**

Devant le manque de données à l'échelle de l'ouvrage, des expérimentations spécifiques ont été développées sur le site expérimental d'étude des avalanches du Cemagref au Col du Lautaret (Berthet-Rambaud *et al.*, 2008 ; Thibert *et al.*, 2008). Elles étudient, selon une approche originale basée sur l'analyse inverse, les conséquences directes d'une avalanche sur un ouvrage dont la taille est similaire à celle de l'écoulement : le comportement de l'ouvrage (contraintes-déformation) est interprété pour remonter à la sollicitation. Cette approche fournit, à une échelle où l'avalanche peut être considérée comme un milieu continu et homogène, une mesure de pression intégrée sur l'ensemble de l'ouvrage et interprétable par les équations de la mécanique des fluides. En revanche,

10a Sollicitation correspondante à l'avalanche du 15 février 2007 sur le site du Lautaret obtenue par analyse inverse des déformations ponctuelles de la structure (pression mesurée) et calculées (approche hydrodynamique)



10b Dépôt de neige sur la structure



cette approche ne permet pas d'accéder à la structure interne de l'écoulement. Elle complète, de manière non exclusive, les approches hydrodynamiques à échelle plus fine qui permettent seules de définir des lois d'état et de comportement du matériau neige.

Un ouvrage instrumenté

Le principe général est d'introduire dans l'écoulement une structure instrumentée. Le site du Lautaret dispose ainsi d'une structure dite « plaque » correspondant à un récepteur de 1 m² supporté par une poutre (figure 9a). L'effet de l'avalanche est mesuré au niveau du pied de la poutre équipé de jauges de déformation et d'accéléromètres. Par analyse inverse de ces signaux mesurant la réaction de l'ouvrage, il est possible de remonter à la pression d'impact (Berthet-Rambaud *et al.*, 2008).

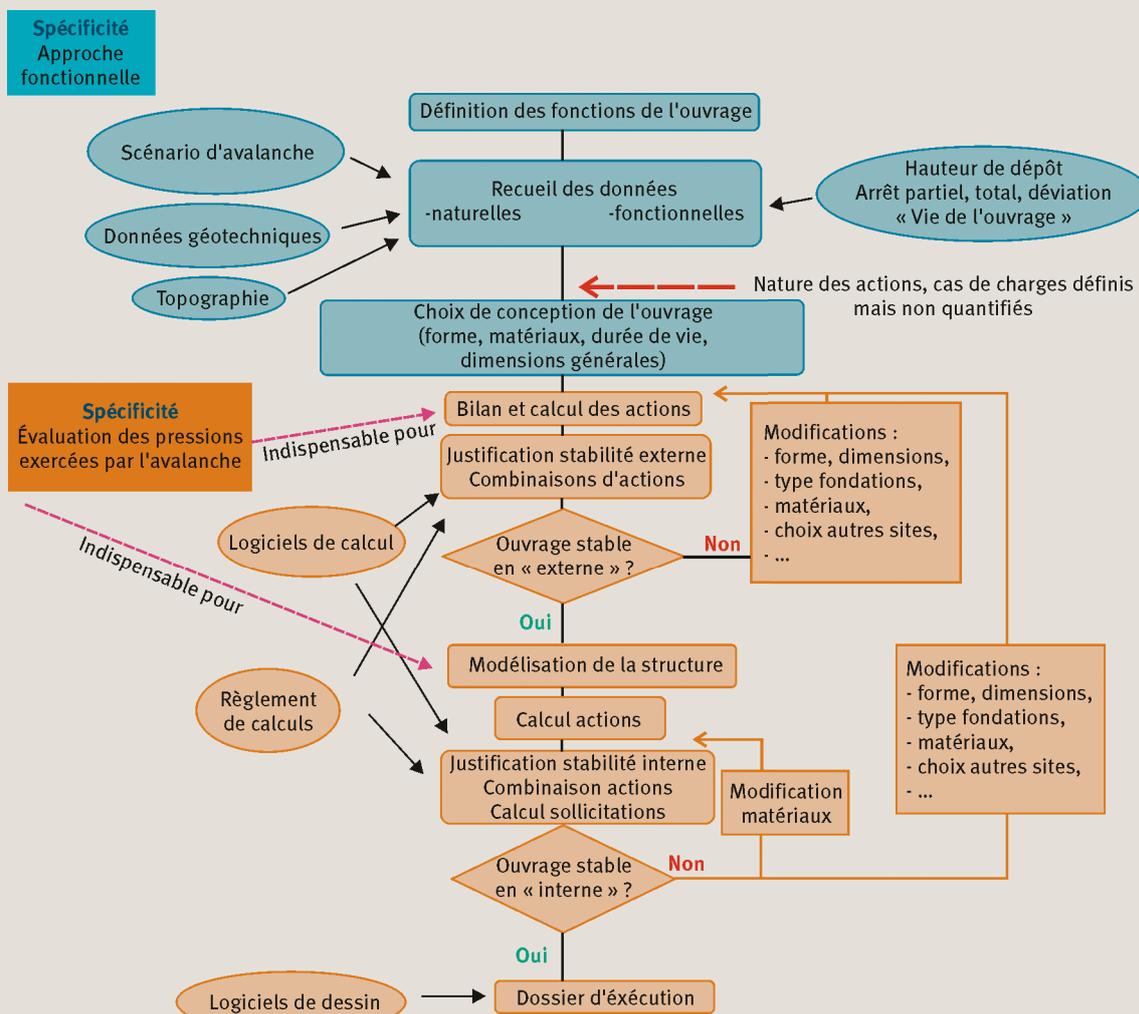
À partir de la pression reconstruite, un modèle numérique qualifié de « direct » permet de recalculer les déformations et les accélérations de l'ouvrage pour les comparer à celles mesurées lors d'une étape de contrôle (figure 9b).

Pression d'impact

À titre d'exemple, les mesures de pression et de vitesse (figure 10) obtenues pour une avalanche dense de neige froide (tir du 15 février 2007) sont particulièrement pédagogiques (Thibert *et al.*, 2008). Le pic de pression est très proche des prévisions issues des calculs classiques d'estimation de la pression en fonction de la densité et de la vitesse de l'avalanche. En effet, la pression calculée par le modèle cinétique hydrodynamique (équation 1) reproduit bien la pression mesurée comme le montre la figure 10a. Pour une vitesse d'écoulement élevée comme lors de l'impact, il y a cohérence entre les mesures et ce modèle qui considère que l'énergie de l'avalanche est purement d'origine cinétique. Par contre, lorsque la vitesse de l'écoulement diminue, la pression obtenue par le calcul sous-estime systématiquement la pression

mesurée sur l'ouvrage. Aux faibles vitesses, les forces de frottements et de cohésion internes à l'écoulement de neige apportent une contribution non négligeable à la sollicitation sur l'ouvrage. Pour que l'équation 1 puisse expliquer la pression mesurée, le coefficient de traînée liée au régime de l'écoulement C_{re} doit augmenter fortement aux faibles vitesses.

En revanche, les forces de cohésion à l'origine de l'augmentation de ce coefficient de traînée liée au régime de l'écoulement C_{re} sont aussi responsables d'un dépôt de neige sur la face amont de la structure (figure 10b). Celui-ci a un effet plutôt protecteur en donnant à la structure une forme de dièdre* plus « aérodynamique » que sa surface plane d'origine. Ce phénomène peut s'interpréter comme une minimisation de l'énergie d'interaction entre l'avalanche et l'ouvrage. Le coefficient de traînée liée à la forme de l'ouvrage C_{to} se trouve ainsi réduit d'environ 30 %. Cependant, ce phénomène ne compense pas l'augmentation du coefficient de traînée liée au régime de l'écoulement C_{re} qui augmente d'un facteur voisin de 10 lorsqu'interviennent ces mêmes forces de cohésion. La mesure directe sur l'« ouvrage-captur » assure que le résultat est bien la sollicitation qu'a subi *in situ* la structure : la pression d'impact résulte en effet de l'interaction avec l'écoulement. La mesure intègre également l'interaction écoulement-ouvrage (dépôt de neige sur la structure), alors que ce phénomène est une source d'artéfact lors de l'utilisation de capteur de pression de petite dimension. Par ailleurs, on peut considérer qu'elle fournit des résultats particulièrement intéressants représentatifs d'événements d'intensité moyenne en terme de vitesse et de hauteur de neige tels qu'il peut s'en produire en zones d'arrêt. Mais il faudrait obtenir des mesures pour de la neige humide, plus probable à basse altitude, là où les forces de cohésion internes sont vraisemblablement très différentes de celle des neiges sèches. Dans l'attente de nouvelles avancées sur le volet de l'étude hydrodynamique des écoulements, les valeurs de pres-

11 Démarche de conception générique d'un ouvrage de génie civil

► sion mesurées peuvent être exploitées en tant qu'ordre de grandeur pour des applications de zonage* et/ou de dimensionnement de structures exposées.

Stratégies de conception, calcul et de réalisation

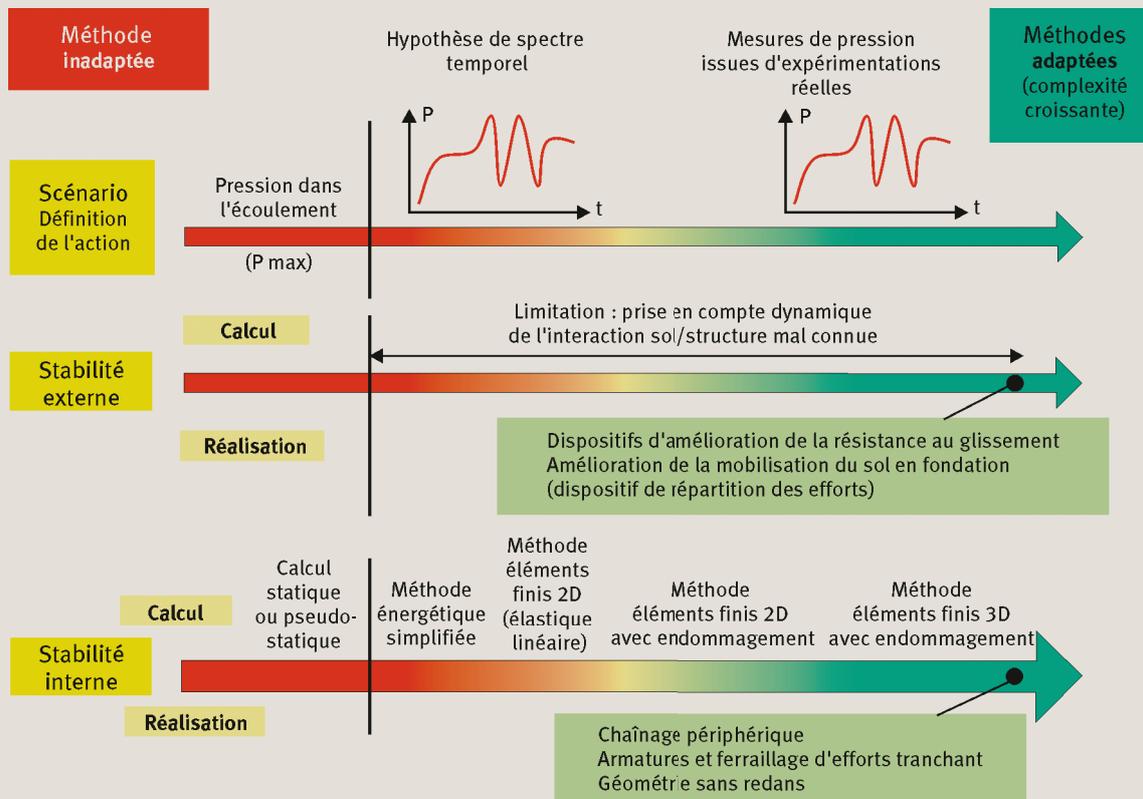
La démarche de conception standard reste valable

Les structures rigides en béton armé correspondent soit au cas d'habitations impactées par une avalanche, soit au cas d'ouvrages de protection. Le premier cas correspond à des situations dans lesquelles les structures ne sont pas exclusivement conçues pour résister à des phénomènes naturels. Malgré un niveau de sollicitation inférieur, ce contexte s'avère plus contraignant car il impose de concevoir une structure résistante en conservant la vocation architecturale et la fonction d'habitation. Les guides actuels (ministère de l'Écologie et du Développement durable et ministère de l'Équipement, des Transports, du Logement, du Tourisme et de la Mer, 2004) proposent,

dans ce cadre, des prescriptions architecturales mais assez peu de règles de dimensionnement et de calcul. Malgré les cas avérés de destruction de structures de protection en béton armé (figure 8), celles-ci présentent un intérêt fonctionnel pour assurer notamment la déviation de l'avalanche (figure 13). Pour les dimensionner, la démarche standard (figure 11) s'applique. Les stratégies de calcul et les modes de réalisation doivent cependant intégrer le caractère dynamique des actions. Dans ce cadre, les actions doivent être décrites non par des charges statiques (indépendantes du temps), mais par des charges dynamiques définies par un profil temporel (figure 12).

En terme de réalisation, des solutions technologiques existent pour résister aux sollicitations dynamiques du point de vue de la stabilité externe et interne, et ce dans un contexte d'ouvrages neufs ou existants (figure 14). Dans le domaine des ouvrages de protection contre les chutes de blocs, un dispositif innovant dénommé pare-blocs structurellement dissipants (PSD*) (figure 15) a fait l'objet de travaux de recherche-dévelop-

12 Niveaux d'adaptation des stratégies de calcul et de réalisation dans un contexte de sollicitation dynamique



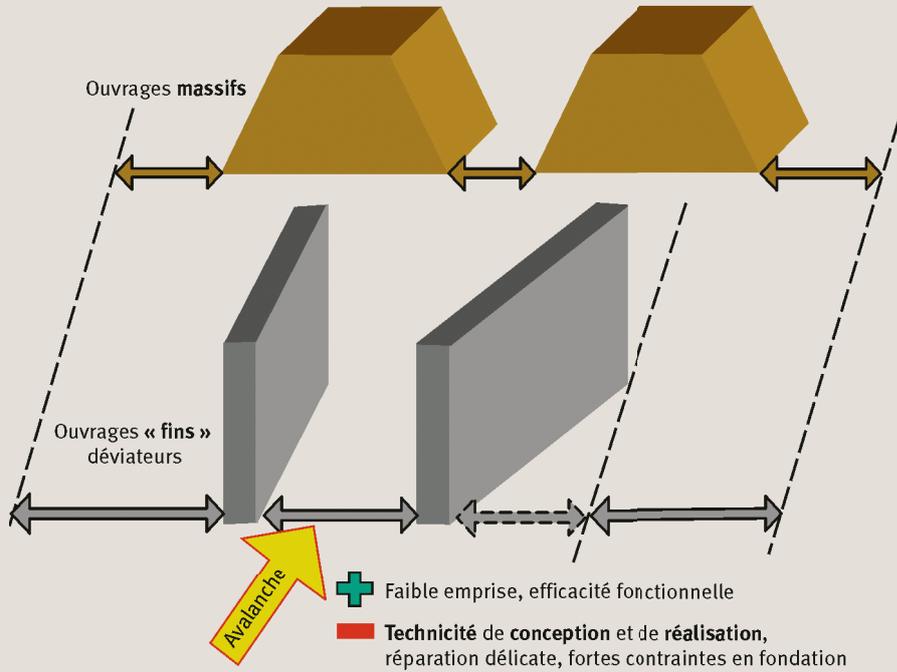
pement. Ce nouveau type de galeries pare-blocs est basé sur la réalisation d'une dalle en béton armé de faible épaisseur (donc moins lourde) reposant sur des appuis métalliques fusibles. Par rapport à des solutions classiques de galeries pare-blocs surmontées d'une couche de remblai lâche de l'ordre d'un mètre, cette solution conduit à réduire considérablement le poids propre de la structure. Elle s'avère à la fois très avantageuse en termes techniques (en réduisant les dimensions des éléments d'appui principaux de la structure, les contraintes en fondation) et économiques. En cas de chocs sur la dalle, les expérimentations en semi-grandeur montrent les capacités de ces ouvrages à supporter les impacts directs. Des méthodes de dimensionnement prenant en compte la déformation de la structure ont été proposées dans ce contexte. Les ouvrages géotechniques massifs peuvent apparaître plus simples à concevoir mais ils n'ont pas la même action sur l'écoulement que des ouvrages plus fins (figure 13). La réalisation d'un parement en encochements bétonnés à l'amont de telles structures a peu de chance de résister aux types de sollicitations dynamiques d'avalanche majeure. La solution est peut-être dans la réalisation et l'interposition de dalles de répartition en béton armé sur des ouvrages réputés plus souples dans une technique multi-couches. L'énergie d'impact est ainsi transmise dans le corps de l'ouvrage où elle est dissipée par friction, plastification et rupture des éléments fusibles.

Conclusion et perspectives

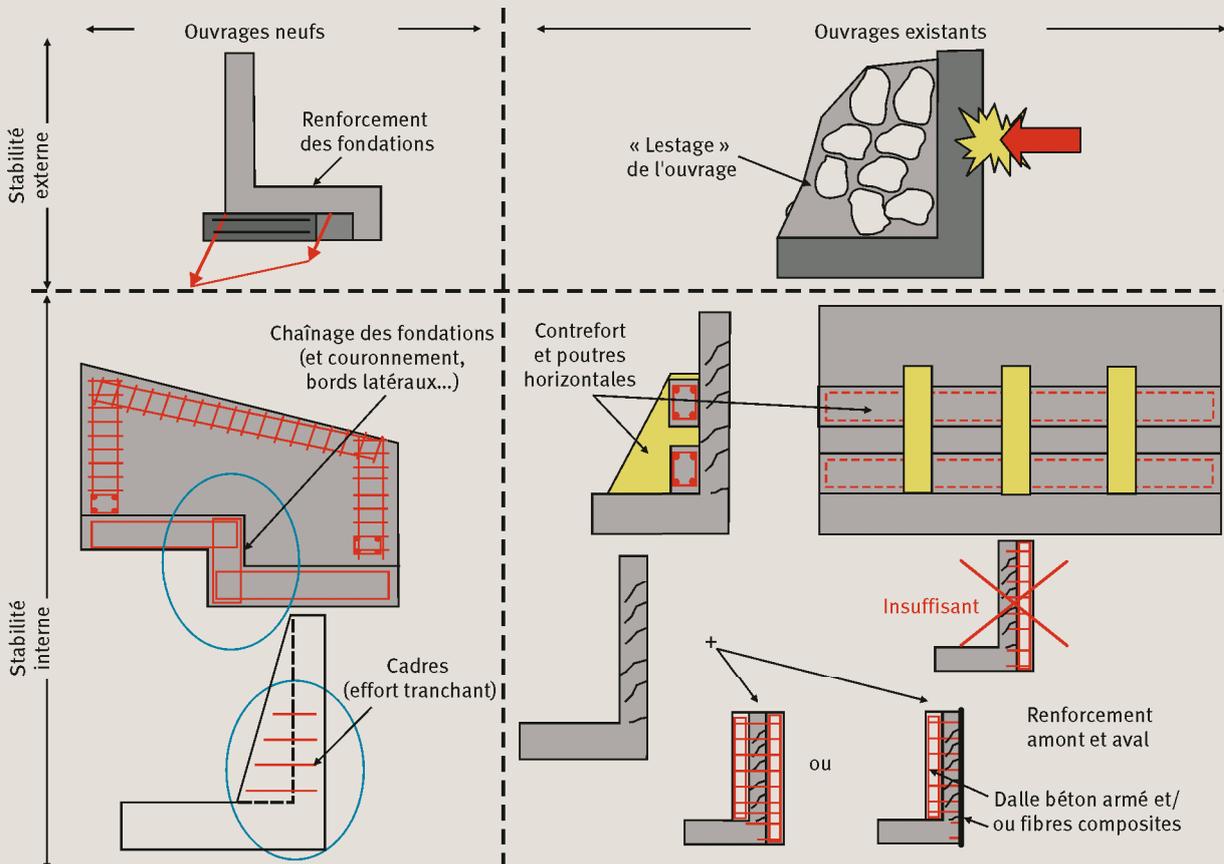
Améliorer la prise en compte de l'impact d'une avalanche sur un ouvrage rigide nécessite de progresser sur le comportement de la structure (notamment en termes de modes de ruine) et sur la connaissance de la pression exercée. Les disciplines du génie civil et de la mécanique des fluides complexes contribuent de manière indissociable à cet effort de recherche. L'analyse du comportement d'ouvrages réels (qui demeureront toujours les seuls à voir une avalanche d'aussi près...) et la modélisation des écoulements démontrent ici leur caractère complémentaire. La première approche s'appuie sur l'instrumentation de sites expérimentaux permettant de répéter des déclenchements artificiels, mais aussi d'une analyse des pathologies *in situ* après désordres. Dans ce cadre, il apparaît essentiel de mettre en place et de structurer des équipes pluri-disciplinaires comprenant non seulement des experts « avalanches » mais aussi des spécialistes du génie civil. Leur rôle serait, dans des contextes post-catastrophiques toujours délicats, de constater rigoureusement et explicitement les pathologies observées sur les structures. Décrire reste en effet la première phase indispensable pour espérer mieux comprendre les mécanismes. Sur la seconde approche, la mise en œuvre de modèles numériques et physiques à différentes échelles permet de proposer de nouvelles lois de comportement et d'étudier l'interaction écoulement-obstacle.

13 Exigences fonctionnelles et conception des ouvrages de protection

- + Faible technicité, rapidité de conception et de réalisation, réparation
- Emprise, efficacité fonctionnelle, sensibilité du couronnement



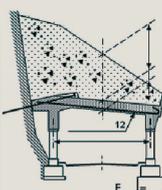
14 Exemples de mesures d'amélioration de la stabilité externe et/ou interne des ouvrages



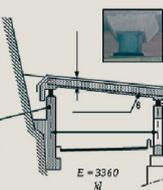
15 Un exemple de structure en béton armé résistant aux impacts dynamiques (Perrotin, Tonello)



Galerie pare-blocs classique
(Val d'Arly, Savoie)



Galerie pare-blocs structurellement
dissipantes (Val d'Arly, Savoie)



Dalle d'essai

► La quantification des actions reste encore incertaine et motive les travaux de recherche dans ce domaine. La prise en compte du caractère dynamique des actions est en effet une nécessité. Trois principes de base doivent guider le concepteur dans sa démarche : premièrement, l'impact dynamique sur une structure rigide induit des modes de ruine complètement différents des cas de chargement statiques ; la sollicitation dynamique doit être définie en respectant le mode de chargement au travers d'un spectre temporel. Ensuite, les dispositions constructives sont au moins aussi importantes que le calcul en lui-même ; les chaînages et les armatures d'effort tranchant jouent un rôle essentiel. Enfin, si des méthodes de calcul avancées existent pour prendre en compte les sollicitations dynamiques, elles restent quand même d'une forte technicité et n'ont pas forcément encore diffusé dans tous les domaines du génie civil classique (bâtiment notamment) ; le recours à des équipes spécialisées est nécessaire dans les situations d'impacts potentiels. Ces éléments doivent être déclinés dans les deux grandes situations d'exposition d'ouvrages à des impacts dynamiques dus aux avalanches.

Le cas des habitations soumises à l'impact des avalanches, et des phénomènes naturels en général, reste certainement la situation la plus délicate à gérer. Les solutions techniques de renforcement des structures existent, mais n'ont de sens qu'en rapport avec un niveau de sécurité et de protection acceptables dont le seuil doit être prédéfini par la puissance publique. Doit-on, peut-on raisonnablement augmenter la résistance des habitations susceptibles d'être impactées par une avalanche ?

Le cas des ouvrages de protection est paradoxalement plus simple car il vise dans tous les cas à concevoir des structures qui doivent résister avec une latitude plus grande en

matière de solutions technologiques. Dans ce cadre, l'important est, pour les maîtres d'ouvrages et les concepteurs d'ouvrages, de ne pas adopter de positions catégoriques et définitives vis-à-vis de solutions technologiques et de considérer objectivement l'ensemble des connaissances techniques et contraintes de chaque site. ■

Les auteurs

Jean-Marc Tacnet

Cemagref, centre de Grenoble, UR ETGR, Érosion torrentielle, neige et avalanches, 2 rue de la Papeterie, BP 76, 38402 Saint Martin d'Hères Cedex, jean-marc.tacnet@cemagref.fr

Emmanuel Thibert

Cemagref, centre de Grenoble, UR ETGR, Érosion torrentielle, neige et avalanches, 2 rue de la Papeterie, BP 76, 38402 Saint Martin d'Hères Cedex, emmanuel.thibert@cemagref.fr

Philippe Berthet-Rimbaud

MND engineering, Parc d'activités ALPESPACE, 74 voie Magellan, 73800 Sainte Hélène du Lac, contact@groupemnd.com

Ali Limam

INSA – LGCIE Lyon, Institut national des sciences appliquées de Lyon – Laboratoire de génie civil et d'ingénierie environnementale, 20 avenue Albert Einstein, 69621 Villeurbanne Cedex, ali.limam@insa-lyon.fr

Mohamed Naaim

Cemagref, centre de Grenoble, UR ETGR, Érosion torrentielle, neige et avalanches, 2 rue de la Papeterie, BP 76, 38402 Saint Martin d'Hères Cedex, mohamed.naaim@cemagref.fr

Pascal Perrotin

ESIGEC-LOCIE, École supérieure d'ingénieurs de Chambéry – Laboratoire Optimisation de la conception et ingénierie de l'environnement, Campus Scientifique, 73376 Le Bourget du Lac Cedex, pascal.perrotin@univ-savoie.fr

Didier Richard

Cemagref, centre de Grenoble, UR ETGR, Érosion torrentielle, neige et avalanches, 2 rue de la Papeterie, BP 76, 38402 Saint Martin d'Hères Cedex, didier.richard@cemagref.fr

QUELQUES RÉFÉRENCES CLÉS...

- **BERTHET-RAMBAUD, P. et al.**, 2008, Characterization of avalanche loading on impacted structure: a new approach based on inverse analysis, *Journal of Glaciology*, vol. 54, n° 185, p. 324-332.
- **FAUG, T. et al.**, 2010, A simple analytical model for pressure on obstacles induced by snow avalanches and structure, *Annals of Glaciology*, vol. 51, n° 54, p. 1-8.
- **NAAIM, M. et al.**, 2008, Snow avalanche pressure on obstacles, in : *Proceedings of the International Snow Science Workshop 2008, 21-27 September 2008, Whistler, BC, Canada*, International Snow Science Workshop Canada Inc. (eds), p. 740-746.
- **TACNET, J.-M. et al.**, 2009, *Action des avalanches sur les ouvrages de génie civil : pratiques et connaissances actuelles, lacunes et enjeux associés*, rapport d'études, Cemagref/INSA/Cete/ESIGEC/Tonello I.C., MEEDDAT/DIREN Rhône-Alpes, 91 p.
- **THIBERT, E. et al.**, 2008, Avalanche impact pressure on an instrumented structure, *Cold Region Science and Technology*, vol. 54, p. 206-215.

► Consulter l'ensemble des références sur le site de la revue www.set-revue.fr