

---

## Note explicative

# Calcul des pressions et poussées sur des pylônes

---

### Table des matières

1	Objet de la note . . . . .	2
2	Notions de base . . . . .	3
2.1	Période de retour . . . . .	3
2.2	Nature des phénomènes . . . . .	5
2.3	Pression . . . . .	7
2.4	Avalanche de projet . . . . .	8
3	Calcul des efforts . . . . .	9
3.1	Notations . . . . .	9
3.2	Poussée du manteau neigeux . . . . .	9
3.3	Poussée de l'avalanche coulante . . . . .	10
3.4	Poussée de l'avalanche aérosol ou effet de souffle . . . . .	10

# 1 Objet de la note

L'objet de la note est d'expliciter les diagrammes d'efforts fournis par Toraval dans les études de ligne.

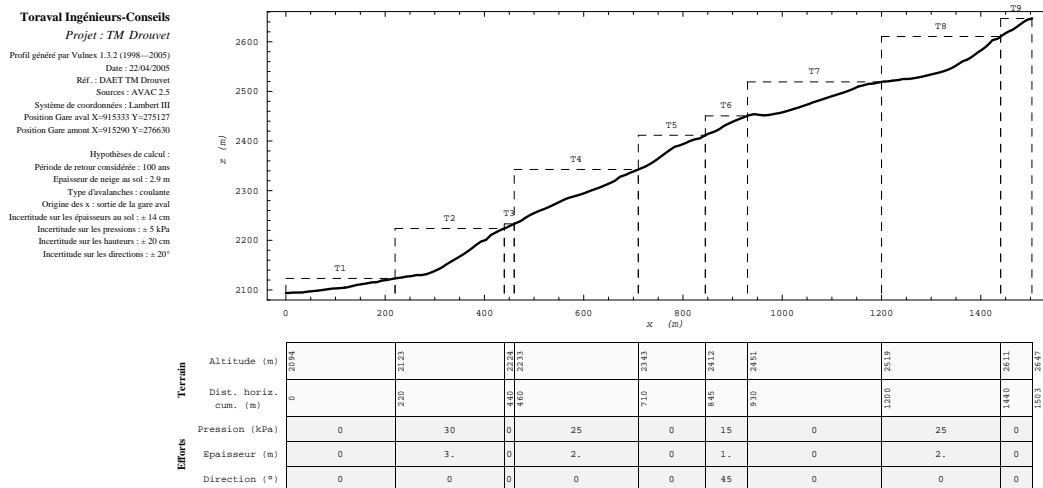


Figure 1 : exemple de diagramme d'efforts.

Un diagramme d'effort comprend :

- le profil en long du terrain naturel sous la ligne entre les deux gares avec report des tronçons le long desquels les avalanches ont une action à peu près homogène sur les pylônes en termes de pression d'impact ;
- un cartouche précisant les principaux paramètres du calcul :
  - nom de l'étude et date de réalisation du diagramme ;
  - nature et version des codes de calcul Toraval ;
  - système de géo-référencement utilisé ;
  - coordonnées des gares,
 ainsi que les hypothèses du calcul :
  - période de retour de l'avalanche de projet  $T$  ;
  - épaisseur de neige au sol ( $h_n$ ) ;
  - nature de l'avalanche : en général coulante même s'il y a des effets de souffle (« aérosol » signifie que seules des avalanches en aérosol sont prises en compte) ;
  - incertitudes sur les pressions, hauteurs, directions.
- un tableau rappelant les cotes du terrain naturel et les distances comptées depuis la gare (en général de départ) et fournissant pour chaque tronçon la pression d'impact d'une avalanche coulante  $p_{ac}$ , la hauteur de sollicitation  $h_a$  de l'avalanche sur le pylône, la direction de la sollicitation dans le plan normal au pylône, et quand cela est le cas, la pression liée au souffle.

## 2 Notions de base

Pour bien comprendre le diagramme des efforts, il est nécessaire de connaître quelques notions importantes du calcul des avalanches.

### 2.1 Période de retour

Les caractéristiques des avalanches et des conditions nivo-météorologiques montrent une grande variabilité qu'il est possible de caractériser à l'aide de lois de probabilité. Plutôt que de parler de probabilité d'occurrence d'un phénomène, il est d'usage d'introduire la *période de retour*. Mathématiquement, si  $P$  est la probabilité de non-dépassement<sup>1</sup>, alors la période de retour est définie comme  $T = (1 - P)^{-1}$ . Son interprétation est la suivante : la période de retour est l'intervalle de temps **moyen** entre deux événements, dont l'intensité atteint ou dépasse un certain seuil  $s$  ; autrement dit, en **moyenne** sur un intervalle de temps  $T$ , il y a un événement d'intensité supérieure ou égale à  $s$ . Ainsi l'avalanche centennale<sup>2</sup> sur un couloir donné est :

- une avalanche qui se produit en moyenne tous les cent ans ;
- il y a en moyenne chaque année une probabilité de 1 % qu'une avalanche centennale ou plus rare se produise.

Soulignons l'importance de « moyen », qui est à l'origine de bien des erreurs de compréhension. Cette définition de la période de retour s'entend en moyenne, c'est-à-dire si l'on considérait de grandes périodes de temps (typiquement couvrant au moins  $1000T$ ) et qu'on faisait une statistique sur l'occurrence des événements d'intensité supérieure ou égale à un seuil. Les assertions suivantes sont fausses :

- il y a un cycle des phénomènes et toutes les  $T$  années environ, on doit s'attendre à avoir un phénomène d'une certaine intensité ;
- sur un intervalle de  $T$  années, le phénomène d'intensité supérieure ou égale à un seuil donné ne se produit au pire qu'une fois.

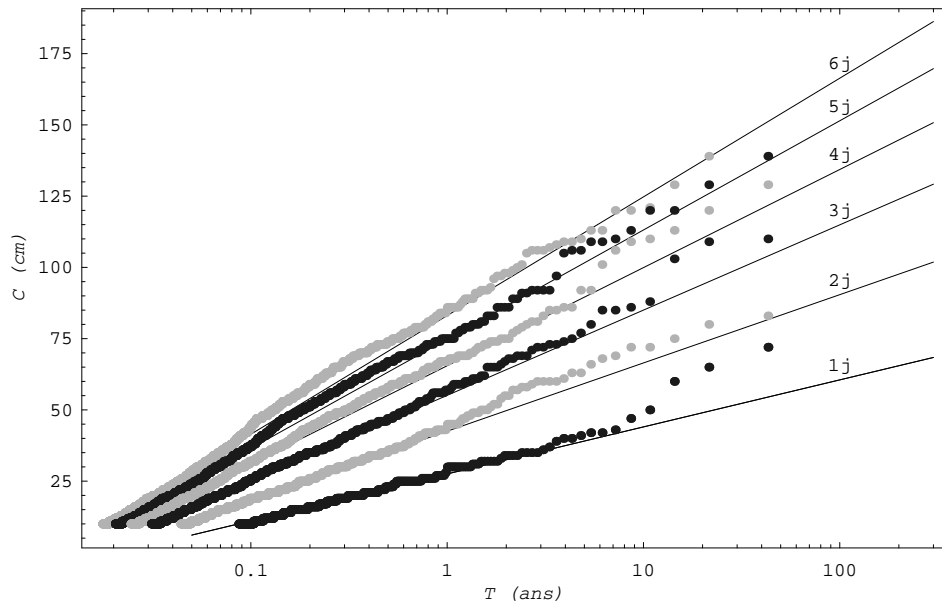
Le nombre d'événements d'intensité supérieure ou égale à un seuil que l'on peut observer pendant une certaine durée est en soi un problème statistique. Ce problème est en fait analogue au problème de Bernoulli, appelé encore problème du tirage d'une urne : on possède une urne contenant majoritairement des boules blanches et une tout petite fraction  $p$  de boules noires. La loi binômiale nous enseigne que la probabilité  $P$  de trouver  $k$  boules noires quand on a effectué  $n$  tirages est :  $P(k) = C_n^k p^k (1 - p)^{n-k}$ . Par exemple, si l'on considère que la durée de vie typique d'une remontée mécanique est de 30 ans, quelle est la probabilité que l'exploitant puisse utiliser cette remontée sans jamais être confronté à un problème d'avalanche ? L'exploitant souhaiterait qu'il n'y ait pas d'impact d'avalanche sur la durée de vie de l'appareil ; cela veut dire qu'en moyenne, la période de retour d'une avalanche au niveau de la remontée mécanique doit dépasser 30 ans ou, dit autrement, il y a chaque année un risque égal ou inférieur à  $1/30$  que la remontée soit touchée. On pose ici  $p = 1/30$  ; en admettant pour simplifier qu'il n'y a qu'une avalanche par an, on en déduit que la probabilité qu'il n'y ait pas d'impact est de  $P(0) = 36,2\%$ , un seul impact  $P(1) = 37,4\%$ , deux impacts  $P(2) = 18,7\%$ , etc. Ainsi,

1. c'est-à-dire la probabilité que l'intensité du phénomène étudié ne soit pas dépassée.

2. L'adjectif numéraire traduisant une idée de fréquence se termine toujours en al/-ale. Un phénomène centenaire est un phénomène dont l'âge est de 100 ans, alors qu'un phénomène centennal est un phénomène qui se produit tous les cent ans en moyenne.

en choisissant une avalanche de projet  $T = 30$  ans, il y a 36 % de chances qu'il ne passe se passe rien, 37 % d'observer l'avalanche de projet au cours de la durée de vie de l'appareil, 18 % de l'observer deux fois, etc.

En pratique dans les études de ligne, nous réalisons des analyses statistiques complètes sur les données nivo-météorologiques. La figure 2 montre un exemple typique d'étude statistique sur des chutes de neige sur des durées allant de 1 à 6 jours : les données mesurées sont ajustées par des lois de probabilité (ici loi exponentielle) qui permettent d'extrapoler les données pour estimer les chutes de neige extrêmes. Nous n'entrons pas ici dans le détail, mais cette extrapolation est délicate (on note sur la figure que les points extrêmes sont décalés par rapport aux courbes ajustées) et nécessite un gros travail statistique.



**Figure 2 :** chutes de neige sur des durées de 1 à 6 jours en fonction de la période de retour (points : données mesurées ; courbes : loi exponentielle ajustée sur les données).

Pour les avalanches, les choses sont un peu plus compliquées car il faut plusieurs paramètres pour caractériser l'intensité d'une avalanche : volume, distance d'arrêt, extension latérale, pression d'impact, etc. Pour définir correctement la période de retour d'un phénomène complexe comme une avalanche, il faudrait procéder à une étude statistique explorant l'espace de probabilités généré par ces paramètres. Cela n'est que rarement fait en pratique car cela nécessite des temps de calcul colossaux (en centaines voire milliers d'heures de calcul pour une simulation stochastique réalisée sur un ordinateur moderne). Pour aller dans le sens de la sécurité et en s'appuyant sur l'expérience des 30 dernières années, on fait les hypothèses suivantes :

- l'avalanche de période de retour  $T$  est déclenchée par une forte chute de neige elle-même de période de retour  $T$  ;
- le volume mobilisé correspond à la chute de neige sur 3 jours ;
- les coefficients de frottement sont fonctions du volume mobilisé et des caractéristiques du site.

## 2.2 Nature des phénomènes

En ingénierie paravalanche, on a considéré jusqu'à présent qu'il est suffisant de distinguer deux cas limites d'écoulement :

- **L'avalanche en aérosol** : c'est un nuage turbulent de particules de neige en suspension dans l'air qui tend à aller selon la ligne générale de la plus grande pente, en s'affranchissant souvent des variations topographiques locales. Sa vitesse maximale est élevée (50–100 m/s). Il faut que l'aérosol entraîne de la neige au cours de sa descente pour qu'il reste puissant (sinon il se dilue rapidement) ; cela est l'une des principales raisons pour lesquelles les avalanches en aérosol mobilisent plus fréquemment de la neige froide et sèche que de la neige humide. L'échelle de sa hauteur est la dizaine de mètres ; la masse volumique est de quelques dizaines de  $\text{kg/m}^3$  en moyenne<sup>3</sup>. Voir figure 3(a).
- **L'avalanche coulante** : il s'agit d'un écoulement peu épais (échelle de hauteur de l'ordre de quelques mètres) et assez dense (quelques centaines de  $\text{kg/m}^3$ ). La trajectoire est dépendante du relief local, avec de possibles changements brutaux de direction et des variations significatives de largeur (étalement). La vitesse maximale est généralement inférieure à 30 m/s, mais certains écoulements peuvent atteindre des vitesses très élevés (de l'ordre de 50 m/s). Constituée de neige humide, elle peut ressembler à un écoulement lent de lave (vitesse de quelques m/s). Constituée de neige sèche et froide, elle peut garder une allure assez rapide (30–50 m/s). Voir figure 3(b).

Il faut garder à l'esprit qu'il s'agit d'une simplification de la dynamique des phénomènes.

On prendre garde aussi que les tableaux ne renseignent pas sur la poussée du manteau neigeux (reptation et fluage) car seules ici sont reportées des valeurs des efforts causés par des avalanches. Dans la plupart des cas, les efforts de reptation sont bien plus que les efforts d'avalanche. Dans des cas peu fréquents, certains sites peuvent être soumis à des phénomènes de reptation capables de générer des efforts impressionnants. La prise en compte de ces efforts nécessite une note de calculs spécifique. On peut aussi se référer à la publication [Ancey, C., and V. Bain, Dynamics of glide avalanches and snow gliding, Reviews of Geophysics, 53, 745–784, 2015.](#)

---

3. Le qualificatif « en moyenne » est important car la masse volumique (ainsi que la vitesse) varie très significativement avec la hauteur.



(a)



(b)

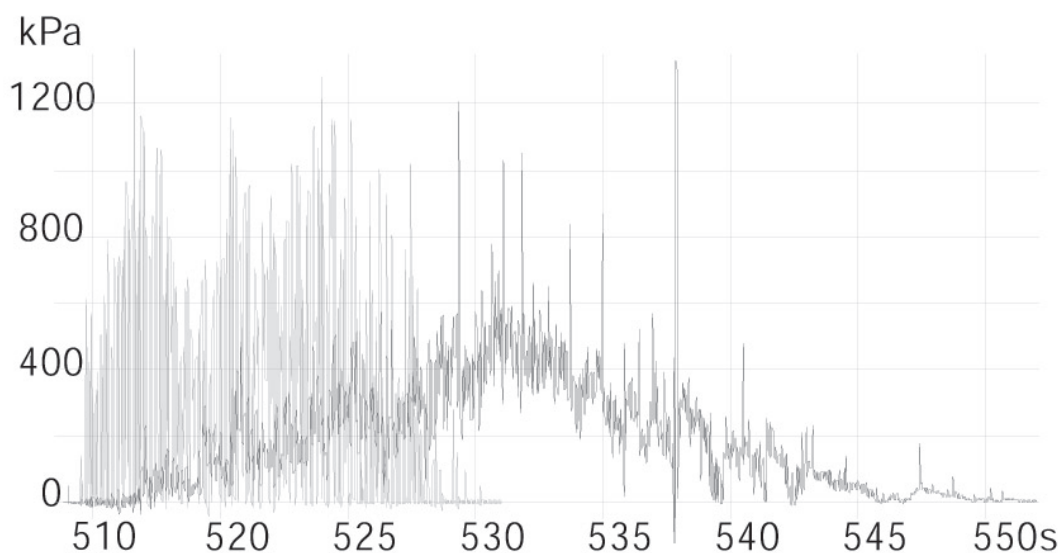
**Figure 3 :** (a) avalanche en aérosol (l'ellipse indique le pylône de mesure) ; (b) avalanche coulante.

## 2.3 Pression

La pression d'impact dépend principalement :

- du type de l'avalanche ;
- des dimensions et de la forme de l'obstacle ;
- de la position de l'obstacle par rapport à l'écoulement.

Un certain nombre de sites ont été équipés d'instruments de mesure de la pression d'impact. Les mesures ont montré un signal très bruité, composé de pics de pression parfois très importants (2 à 3 fois la pression moyenne pendant quelques ms) autour d'une valeur moyenne qui varie beaucoup plus lentement au cours du temps. Sur l'exemple de la figure 4, des valeurs moyennes autour de 500 kPa ont été mesurées, mais des pics de pression instantanée (sur des temps de l'ordre de 5 ms) au-dessus de 1400 kPa sont également visibles.



**Figure 4** : mesure de pression sur un pylône (site de la Sionne, Suisse) soumis à un aérosol (voir figure 3 pour la position du pylône par rapport à l'avalanche) ; mesure sur une plaque circulaire de diamètre 10 cm située à 3 m au-dessus du sol (trait noir) et à 3,9 m (trait gris). Données SLF.

L'origine de la pression est diverse : flux de quantité de mouvement (ordre de grandeur en  $\rho v^2/2$ , avec  $v$  la vitesse de l'avalanche), traîne visqueuse, poussée hydrostatique, etc. Selon le type de l'avalanche, un seul type de processus est considéré comme prépondérant. Les valeurs de pression que nous fournissons tiennent donc compte de la nature du phénomène.

Les codes de calculs fournissent la valeur moyenne de pression. Plus précisément, les pressions reportées dans le diagramme des efforts donnent la valeur maximale<sup>4</sup> moyenne<sup>5</sup> observée sur le tronçon. Des pics de pression allant jusqu'à 2–3 fois la pression moyenne sont possibles sur des temps courts (10 ms). Les codes de calcul ne sont pas actuellement capables de fournir le spectre complet de pression.

4. On prend la valeurs maximale enregistrée au cours du passage de l'avalanche.

5. les fluctuations dans le spectre sont lissées.

## 2.4 Avalanche de projet

Chaque diagramme d'effort correspond à une période de retour  $T$ , en général de 30 ou 100 ans. Il appartient au maître d'ouvrage de choisir la période de retour selon le risque qu'il accepte de prendre. Aucune réglementation n'existe actuellement pour le forcer dans son choix ; en revanche, pour les gares, des prescriptions architecturales sont parfois à respecter selon ce qu'indique le Plan de Prévention des Risques (ou le Plan d'Exposition aux Risques) de la commune. Sur le plan général, c'est une optimisation entre coût induit par la sécurisation de l'appareil et pertes en cas de dommages (pertes d'exploitation ou bien frais de réparation) qui devrait prévaloir dans le choix de la période de retour.

L'*avalanche de projet* correspond à l'avalanche d'intensité maximale à laquelle doit résister la remontée mécanique sans dommage important sur la structure ; des dommages légers (échelle arrachée, déraillement du câble, bris de vitre dans les gares, etc.) sont possibles. Selon les cas de figure, le chargement accidentel induit par cette avalanche de projet devrait être pris en compte comme un état limite de service et non comme un état limite ultime.

L'avalanche de projet – appelée encore avalanche de référence – est le pendant de la notion de crue de projet en hydraulique. Cette avalanche est caractérisée en tout premier lieu par sa période de retour, autrement dit, la probabilité d'occurrence du phénomène ou d'un phénomène d'intensité supérieure en moyenne chaque année.



### 3 Calcul des efforts

#### 3.1 Notations

- $h_n$  : épaisseur de neige au sol (épaisseur du manteau neigeux mesurée selon la perpendiculaire au terrain naturel entre le sol et la surface libre).
- $h_a$  : hauteur de sollicitation d'une avalanche coulante ou d'une partie dense d'un aérosol.
- $h_s$  : hauteur de sollicitation du souffle.
- $\theta$  : pente du terrain naturel.
- $g$  : gravité ( $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ ).
- $\rho_n$  : masse volumique du manteau neigeux (valeur maximale usuelle  $\rho_n = 400 \text{ kg/m}^3$ )
- $S_e$  : section efficace du pylône lors du chargement ; de façon générale, si  $h$  est la hauteur de sollicitation et  $D$  le diamètre du pylône,  $S_e = C_d h D$ , avec  $C_d$  un coefficient de poussée. Pour un pylône circulaire, on a  $C_d = 1$ .

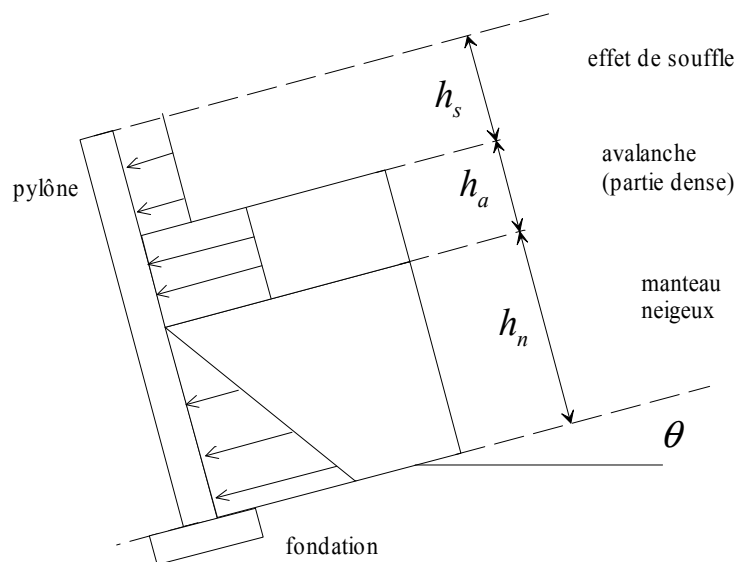


Figure 5 : Schéma de chargement.

#### 3.2 Poussée du manteau neigeux

En l'absence de fluage et de reptation du manteau neigeux, on admet que la distribution de pression est hydrostatique au sein du manteau neigeux. La résultante est donc

$$F_1 = \frac{1}{2} \rho_n g h_n^2 S_e \cos \theta,$$

avec  $S_e = h_n D$  et le plus souvent  $\cos \theta \approx 1$ . Le point d'application est

$$z_1 = \frac{h_n}{3},$$

avec l'axe des  $z$  orienté selon la normale au terrain naturel ( $z = 0$  correspondant au sol). La direction de sollicitation est la ligne de plus grande au droit du pylône quand celle-ci existe (sinon on peut prendre la direction de la ligne ou  $F_1 = 0$ , par exemple dans le cas d'une implantation sur un massif rocheux).

En présence de reptation/fluage important(e), des calculs spécifiques doivent être menés.

### 3.3 Poussée de l'avalanche coulante

On admet que les efforts de pression sont uniformes sur toute la hauteur de sollicitation. La résultante des forces s'écrit donc

$$F_2 = p_{ac} S'_e,$$

avec  $p_{ac}$  la pression d'impact exercée par l'avalanche coulante et  $S'_e = h_n D$ . Le point d'application est

$$z_2 = z_1 + \frac{h_a}{2}.$$

Il faut également spécifier la direction de l'écoulement. Pour cela on oriente la ligne dans le sens aval → amont et les angles sont comptés positivement dans le sens direct (c'est-à-dire inverse au sens des aiguilles d'une montre).

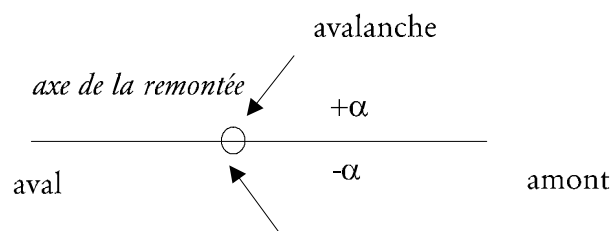


Figure 6 : Convention de signe pour l'angle d'impact.

### 3.4 Poussée de l'avalanche aérosol ou effet de souffle

On admet là encore que les efforts de pression sont uniformes sur toute la hauteur de sollicitation. La résultante des forces s'écrit donc

$$F_3 = p_s S''_e,$$

avec  $p_s$  la pression d'impact exercée par l'avalanche en aérosol et  $S''_e = h_s D$ . Le point d'application est

$$z_3 = z_2 + \frac{h_s}{2}.$$

En général, la hauteur de sollicitation avec les pylônes classiques (hauteur de moins de 20 m) correspond à toute la hauteur restante du pylône.

Pour plus de renseignements :

- contacter Christophe Ancey, [ancey@toraval.fr](mailto:ancey@toraval.fr), ou Vincent Bain, [bain@toraval.fr](mailto:bain@toraval.fr) ;
- voir le site web [www.toraval.ch](http://www.toraval.ch) ;
- l'ouvrage « Dynamique des avalanches » (Presses Polytechniques Universitaires Romandes, Lausanne, 2006).



Les Favrets  
F-73400 Héry sur Ugine  
04 79 37 46 80 (tél. )  
06 13 38 44 43 (mobile)  
<http://www.toraval.fr>  
info : [bain@toraval.fr](mailto:bain@toraval.fr)