



Ingénieurs-conseils

**Étude des risques d'avalanches
sur le télésiège des Chaudannes
Station des Karellis, Savoie**

Rapport

Novembre 2025

Table des matières

1	Contexte nivo-météorologique	6
1.1	Données météorologiques	6
1.2	Conditions climatiques	6
1.2.1	Contexte général	6
1.2.2	Évolution nivométrique	12
1.2.3	Épaisseur du manteau neigeux	18
1.2.4	Évolution des températures	18
1.3	Analyse des précipitations extrêmes	21
1.3.1	Méthode	21
1.3.2	Ajustement d'une loi de valeurs extrêmes pour les chutes de neige	22
1.3.3	Ajustement d'une loi de valeurs extrêmes pour les épaisseurs du manteau neigeux	24
1.4	Synthèse	26
2	Analyse du risque d'avalanche	27
2.1	Méthodes	27
2.2	Données	27
2.3	Éléments historiques	28
2.3.1	Enquête permanente sur les avalanches	28
2.3.2	Carte de localisation des phénomènes d'avalanches	29
2.3.3	PIDA	32
2.4	Analyse spatiale du risque d'avalanche	34
2.4.1	Principe	34
2.4.2	Secteur 1	34
2.4.3	Secteurs 2 et 3	35
2.4.4	Secteurs 4 et 5	36

2.4.5	Secteur 6	36
2.5	Synthèse	37
3	Analyse par simulation numérique des avalanches	38
3.1	Principe et hypothèses du calcul	38
3.2	Modèles utilisés pour le calcul des avalanches coulantes	39
3.2.1	Origine et historique du modèle	39
3.2.2	Équations du mouvement	39
3.2.3	Paramètres utilisés pour le calcul	40
3.2.4	Autres hypothèses et rendu du calcul	41
3.2.5	Pression de l'avalanche	42
3.3	Résultats des simulations numériques	45
3.3.1	Avalanches naturelles rares ($T \sim 30$ ans)	45
3.3.2	Avalanches naturelles exceptionnelles ($T \sim 100$ ans)	48
4	Synthèse	51
4.1	Niveau de risque et choix du scénario de référence	51
4.2	Diagrammes d'effort	52

Objet de l'étude

Contexte

LA STATION DES KARELLIS étudie le remplacement du télésiège des *Chaudannes*. L'exploitant souhaite disposer d'une étude des risques d'avalanches pesant sur ce projet. La figure 1 localise l'appareil et le périmètre de notre zone d'étude.



Figure 1 – Localisation du télésiège (segment bleu) et de la zone d'étude (contour blanc). Échelle 1:25 000. Fond topographique Géoportail © IGN Paris 2025.

Mission

La station des Karellis demande au groupement Toraval de caractériser les phénomènes d'avalanche affectant le projet. La caractérisation du risque d'avalanche s'accompagne d'un tableau des efforts estimés pour la période de retour de référence choisie par le maître d'ouvrage. Comme nous le pratiquons habituellement pour ce type d'appareil, nous proposons deux scénarios affectés de deux périodes de retour (T) différentes :

- avalanches $T = 30$ ans (chances de 1/30 de se produire en moyenne chaque année); et
- avalanches $T = 100$ ans (chances de 1/100 de se produire en moyenne chaque année).

Le présent rapport s'accompagne d'un supplément électronique représentant une scène tridimensionnelle du versant à l'adresse suivante :

http://telec.toraval.fr/3d/chaudannes_2025.html

Contexte nivo-météorologique

1.1 Données météorologiques

L'analyse nivo-météorologique s'est appuyée sur les données suivantes :

- les données du poste de nivo-observation du poste n° 73173400 géré par le service des pistes, situé à l'altitude de 1603 m au pied des pistes de ski, près de la gare de départ du télésiège du Plan du Four. Ce poste est censé être en fonctionnement depuis le 26 décembre 1975, mais les données sont lacunaires entre décembre 1975 et décembre 1994 pour les chutes de neige journalières ;
- les données du modèle SAFRAN de Météo-France avec une résolution de $8 \times 8 \text{ km}^2$. Le site se situe dans la maille du nœud 7543 dont l'altitude moyenne est 1505 m ;
- Les données mensuelles observées et reconstituées des précipitations ECMWF¹ sur les Alpes de 1871 à 2021 sur une maille de $5 \times 5 \text{ km}^2$.

La carte 1.1 permet de situer le poste de mesure et la maille du nœud 7543 de Safran.

1.2 Conditions climatiques

1.2.1 Contexte général

La station des Karellis se trouve à la périphérie de la zone la plus sèche des Alpes du Nord quand on examine les cumuls de précipitations à l'échelle de la journée ou de l'année. Il faut chercher l'origine de ces valeurs relativement faibles par l'effet de barrière exercé par les Préalpes puis la façade occidentale des massifs internes (Belledonne, Grande Lauzière) : ainsi, le cumul annuel moyen passe de 2000 mm à Saint-Pierre-de-Chartreuse à 1600 mm à Montsapey (Grande Lauzière), puis à 858 mm aux Karellis à 1603 m et 770 mm à Saint-Michel-de-Maurienne à 698 m.

Les figures 1.2 et 1.3 montrent la distribution spatiale des cumuls annuels moyens de précipitations et la valeur maximale de précipitation journalière enregistrée sur la période 1958–

1. Jeu de données LAPrec C3S_M311a_Lot4.2.3.6_v1 : Copernicus Climate Change Service (C3S) (2021): Alpine gridded monthly precipitation data since 1871 derived from in-situ observations, LAPrec1871, v1.1, Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS), [doi:10.24381/cds.6a6d1bc3](https://doi.org/10.24381/cds.6a6d1bc3)

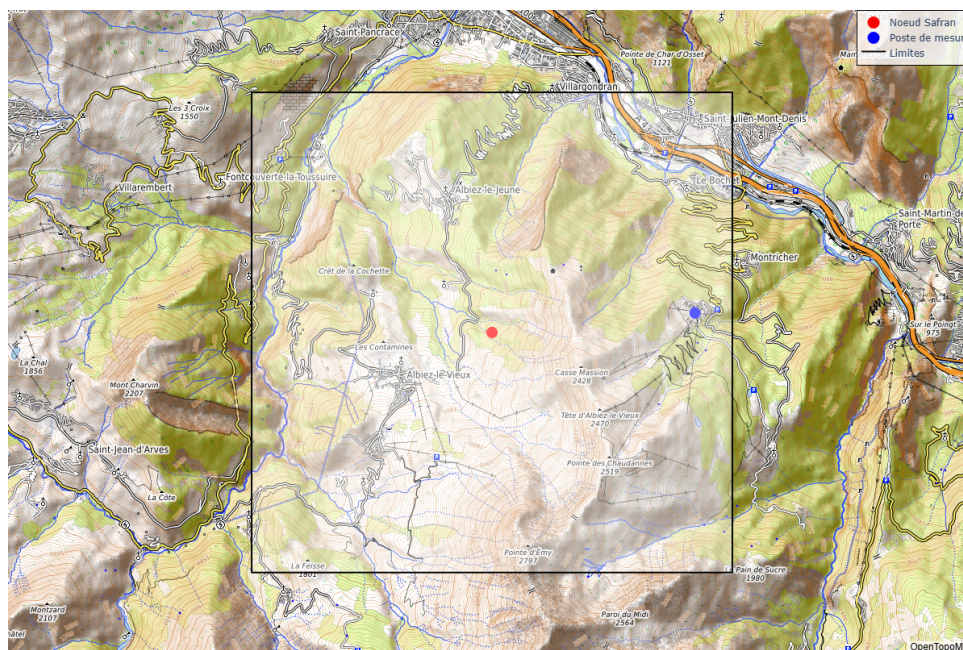


Figure 1.1 – Localisation du poste de mesures des Karellis et de la maille Safran $8 \times 8 \text{ km}^2$ couvrant le domaine skiable des Karellis.

2024 dans les Alpes. On note qu’aussi bien en matière de cumul annuel de précipitations que des fortes pluies journalières, la moyenne Maurienne est dans une zone sèche en comparaison de l’est du département (sous influence des retours d’est) ou de l’ouest (sous influence atlantique directe).

Les figures 1.2 et 1.3 montrent les distributions spatiales des cumuls annuels moyens de précipitations et de la valeur maximale de précipitation journalière enregistrée sur la période 1958–2024 sur les Alpes du Nord. Ces distributions ont été établies à partir de la grille de mesures Safran. On note qu’aussi bien en matière de cumul annuel de précipitations que de fortes précipitations journalières, la station des Karellis est située au cœur de la zone sèche. Les figures 1.4 et 1.5 montrent une information similaire pour les chutes de neige (cumul annuel moyen de neige et précipitation maximale observée sur la période 1958–2024).

Les valeurs remarquables tirées de la grille de mesures Safran sont les suivantes :

- pour les précipitations totales (neige ou pluie) :
 - le cumul annuel de précipitations est de 858 mm (avec un écart-type de 158 mm) selon le modèle Safran,
 - la pluie journalière maximale a été observée le 24 novembre 2016 avec un cumul journalier de 86 mm selon le modèle Safran ;
- pour les chutes de neige (équivalent en eau liquide) :
 - le cumul annuel de précipitations est de 311 mm (avec un écart-type de 100 mm) selon le modèle Safran,
 - la précipitation journalière maximale a été observée le 21 mars 1971 avec un cumul journalier de 77 mm selon le modèle Safran.

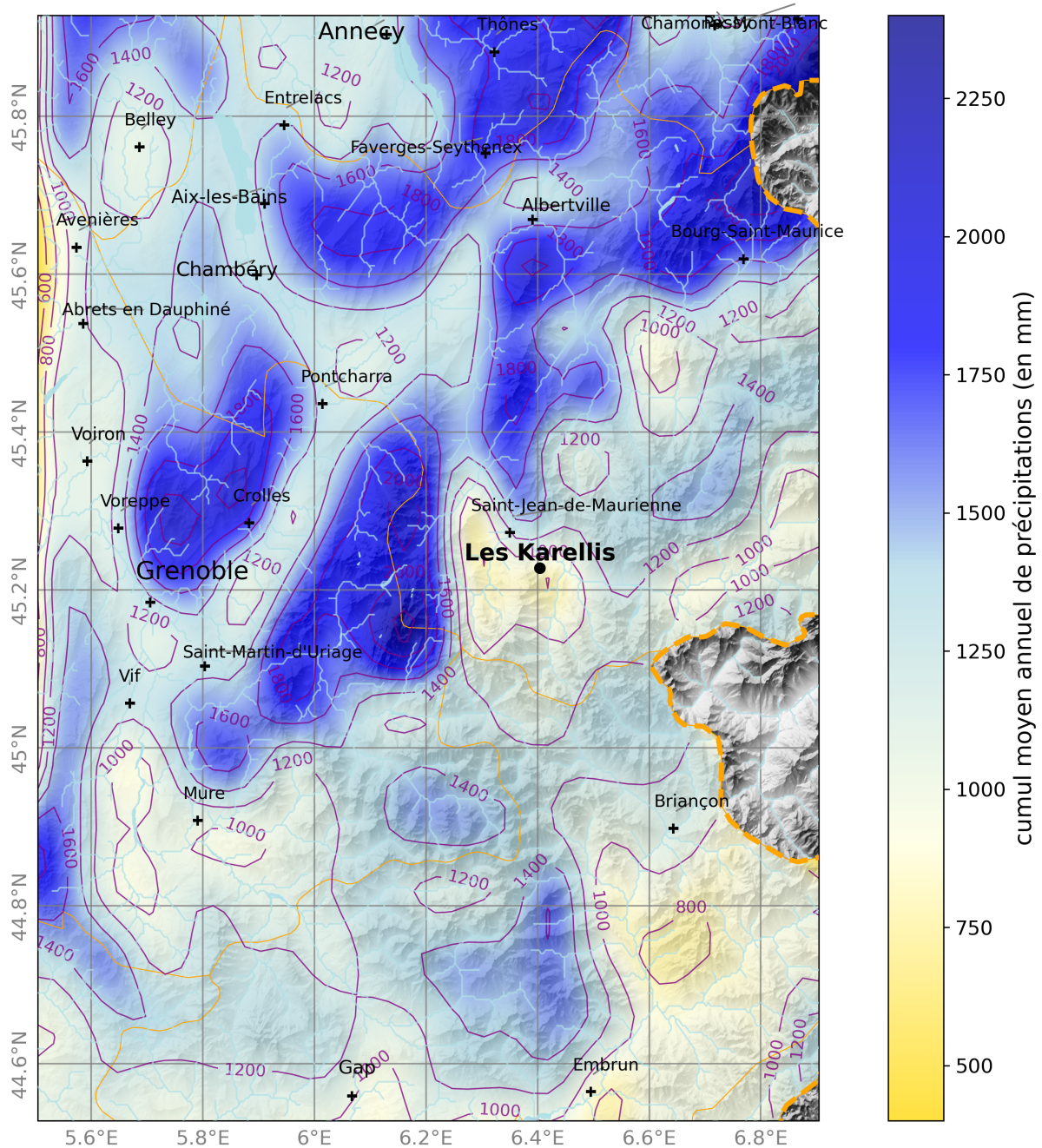


Figure 1.2 – Carte des isovaleurs des cumuls annuels moyens de précipitations totales (valeur équivalente en eau liquide). Source : données Safran sur la période 1958–2024. Les données Safran ont été rééchantillonnées par interpolation linéaire avec une maille de $1 \times 1 \text{ km}^2$.

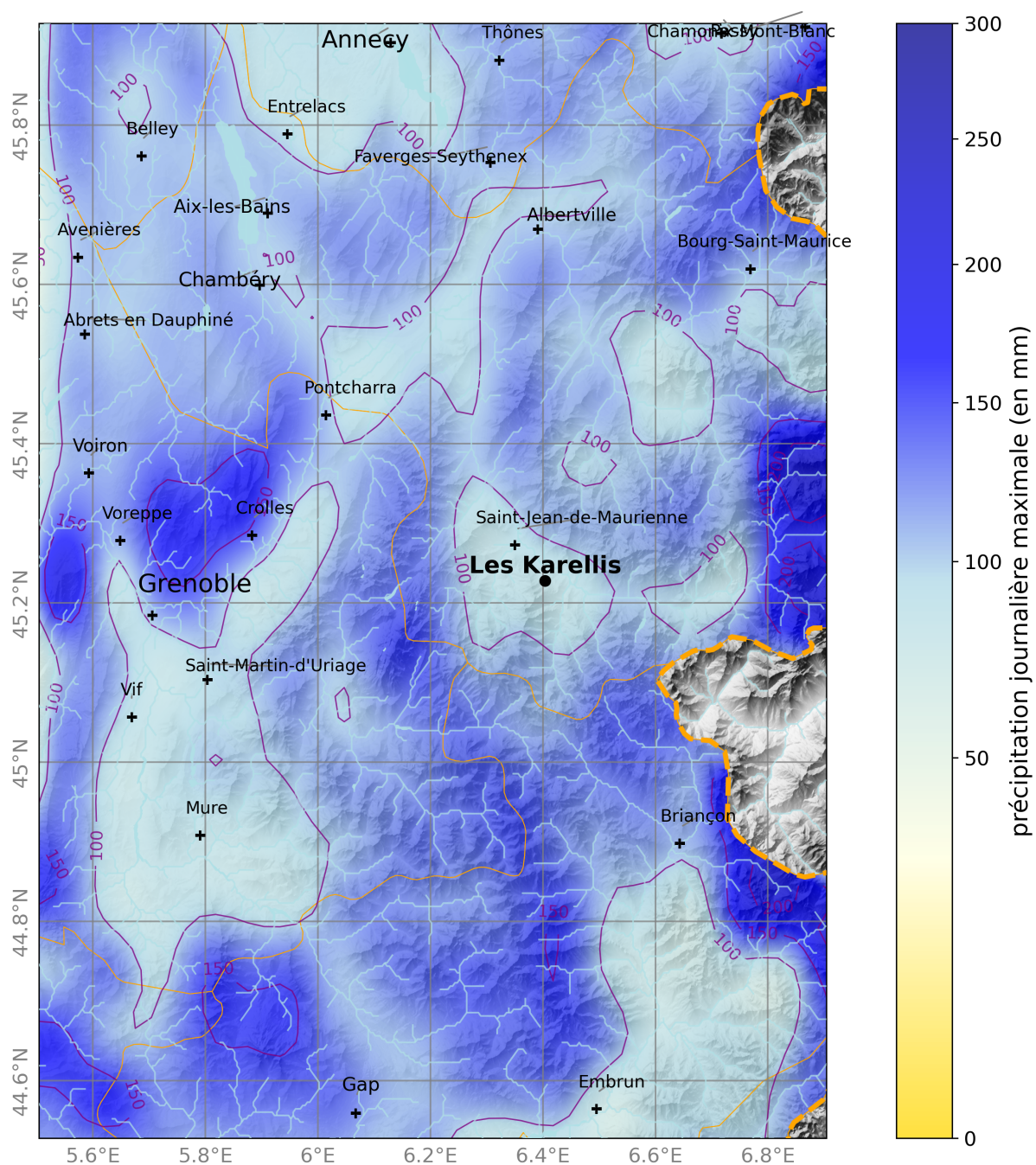


Figure 1.3 – Carte des isovaleurs des précipitations journalières maximales (précipitation sous forme liquide ou solide traduite en sa valeur équivalente en eau liquide) sur 67 années (1958–2024). Source : données Safran sur la période 1958–2024. Les données Safran ont été rééchantillonnées par interpolation linéaire avec une maille de $1 \times 1 \text{ km}^2$.

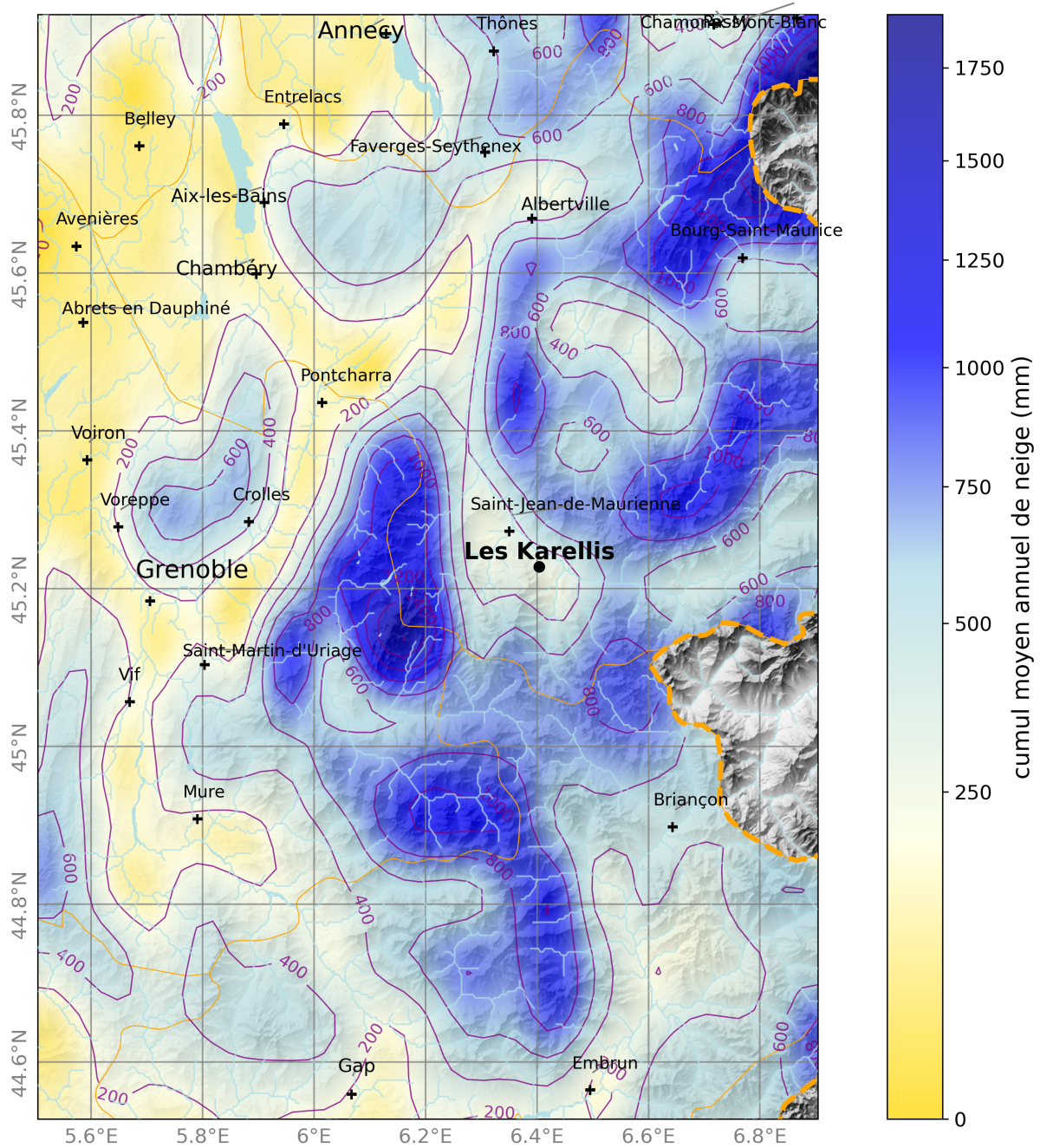


Figure 1.4 – Carte des isovaleurs des cumuls annuels moyens de chutes de neige (valeur équivalente en eau liquide). Source : données Safran sur la période 1958–2024. Les données Safran ont été rééchantillonnées par interpolation linéaire avec une maille de $1 \times 1 \text{ km}^2$.

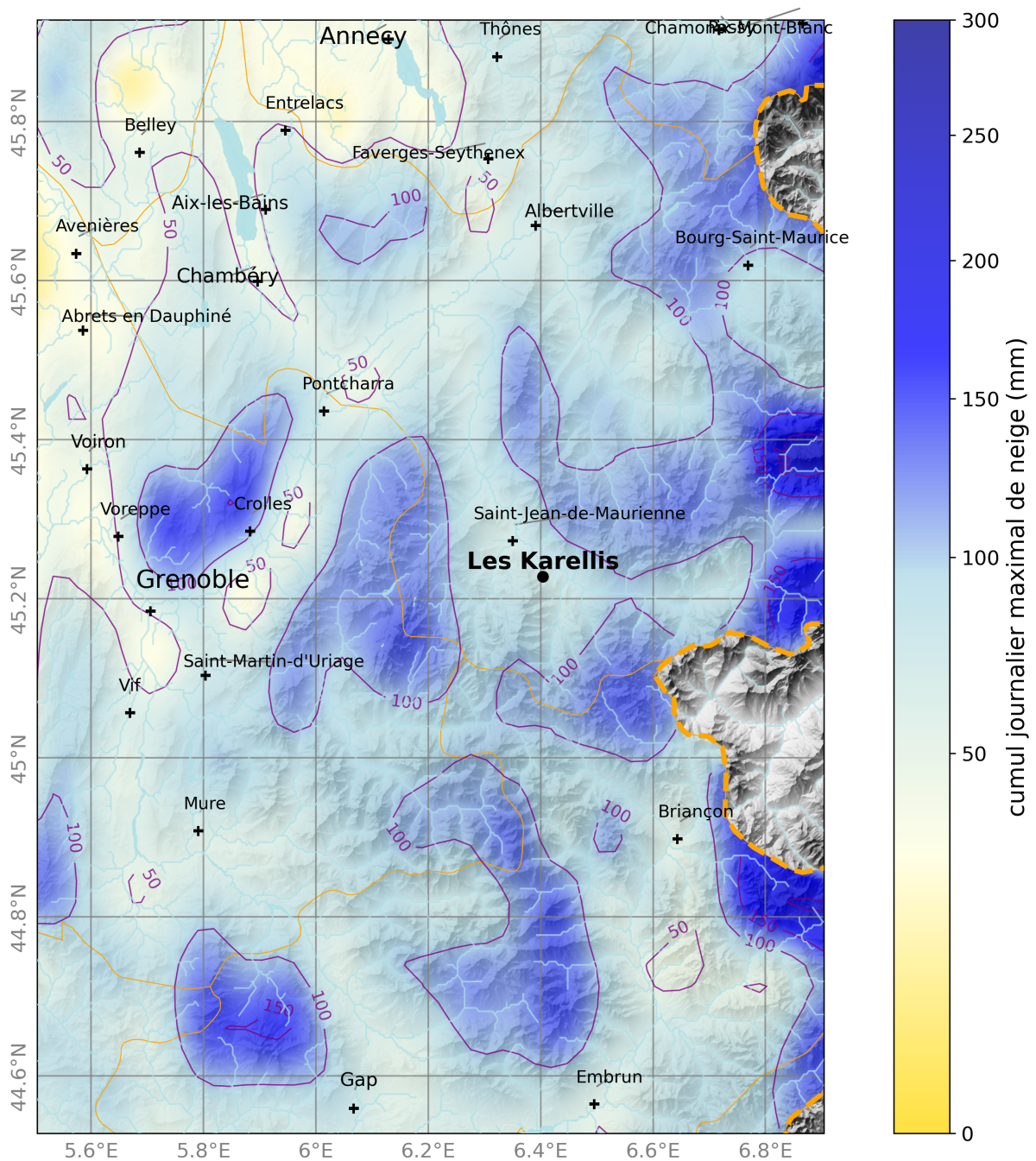


Figure 1.5 – Carte des isovaleurs des chutes de neige journalières maximales (valeur équivalente en eau liquide) sur 67 années (1958–2024). Source : données Safran sur la période 1958–2024. Les données Safran ont été rééchantillonnées par interpolation linéaire avec une maille de $1 \times 1 \text{ km}^2$.

1.2.2 Évolution nivométrique

Évolution sur le long terme

L'analyse des données de précipitations reconstituées depuis 1871 par le modèle ECMWF montre une forte variabilité des précipitations annuelles (voir figure 1.6) :

- la valeur moyenne est de 759 mm sur la période 1871–2020 pour les précipitations annuelles ;
- le cumul moyen de précipitation est de 315 mm pour les précipitations durant la saison hivernale, une valeur remarquablement proche des données Safran (311 mm) et proche également des valeurs en eau des précipitations mesurées aux Karellis (359 mm).

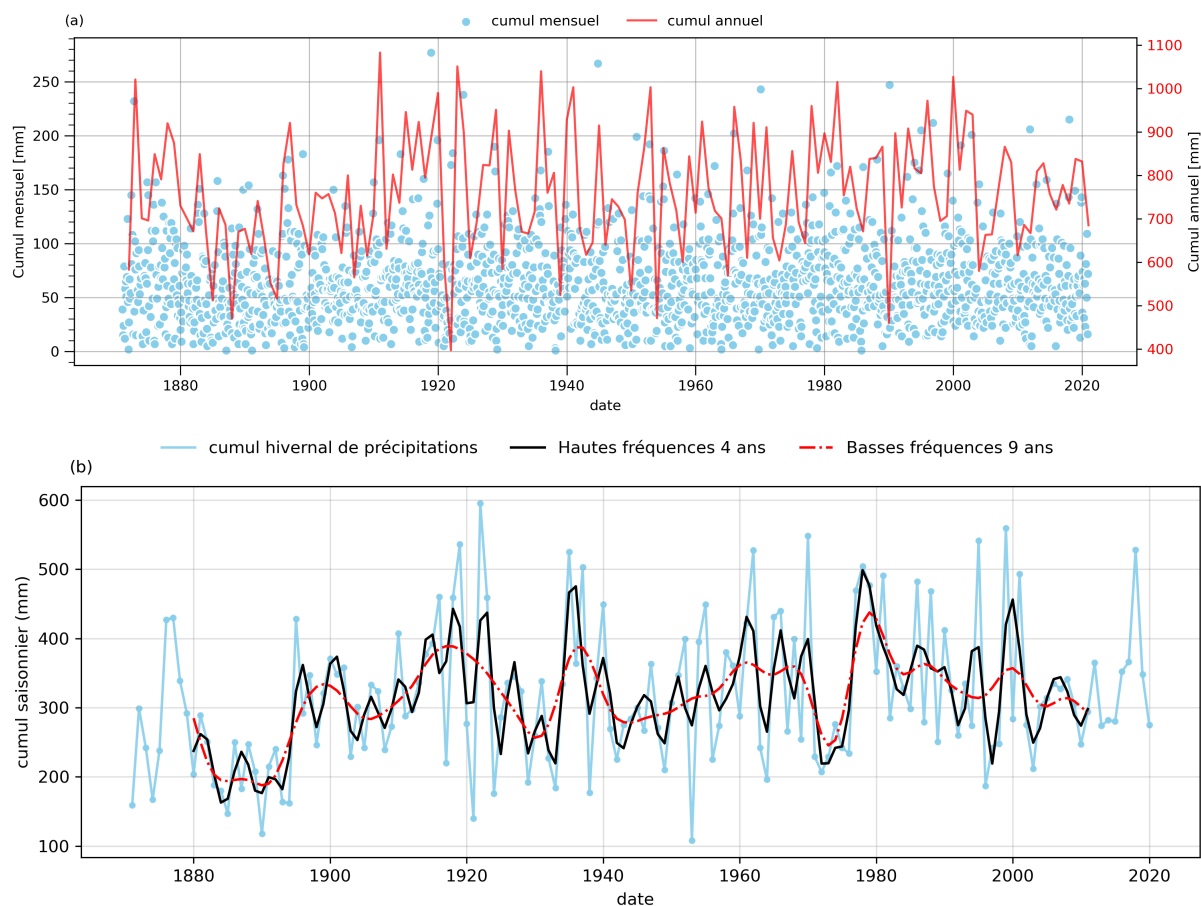


Figure 1.6 – (a) Évolution des cumuls mensuels et annuels de précipitation sur le secteur des Karellis (sur une maille de 25 km²) depuis janvier 1871 d'après le modèle ECMWF. (b) Évolution des cumuls saisonniers sur les cinq mois allant de décembre à avril. On a également reporté les courbes obtenues par filtrage des basses fréquences (cycle avec une période moyenne de 9 ans) et hautes fréquences (cycle avec une période moyenne de 4 ans). Pour déterminer la durée des cycles, nous avons analysé l'autocorrélation partielle des cumuls saisonniers, puis pour tracer les cycles, nous avons utilisé des filtres passe-bas de Lancsoz.

La variabilité des précipitations d'une année à l'autre est grande, particulièrement pour la saison hivernale : la figure 1.6(b) montre l'évolution du cumul de neige durant la saison hivernale depuis 1871. Il est manifeste qu'il existe des cycles assez réguliers. Pour mettre cela en évidence, on a appliqué un filtre passe-haut et un filtre passe-bas aux données hivernales.

Il s'avère qu'il existe au moins deux cycles qui se superposent :

- un cycle long, avec une période d'environ 9 ans ;
- un cycle court, avec une période d'environ 4 ans.

Même le cycle lent n'est pas stationnaire, mais semble avoir subi une augmentation depuis la fin du XIX^e siècle, peut-être en relation avec la fin du Petit Âge Glaciaire. On note :

- une augmentation des précipitations saisonnières entre 1870 et 1920 (d'environ 250 mm à 350 mm), qui est masquée par
- les fluctuations du cycle court. On peut avoir des cumuls saisonniers à peine supérieurs à 250 mm pendant 4 ans, puis des cumuls beaucoup plus importants (dépassant 350 mm) pendant un autre cycle de 4 ans.

Ce comportement se distingue de ce qui est observé dans le reste des Alpes du Nord (où majoritairement on voit un cycle de 10 ans et une plus grande stationnarité des cumuls saisonniers de précipitations), mais il est cohérent avec ce qui est observé en Maurienne.

Données du poste des Karellis

La figure 1.7 montre la chronologie des chutes de neige sur les Karellis à 1603 m d'altitude. La plus forte chute de neige a été de 72 cm (le 10 janvier 1995). Le cumul annuel de neige varie entre 171 cm (en 2011) et 664 cm (en 1999). Le cumul moyen de neige est de 319 cm.

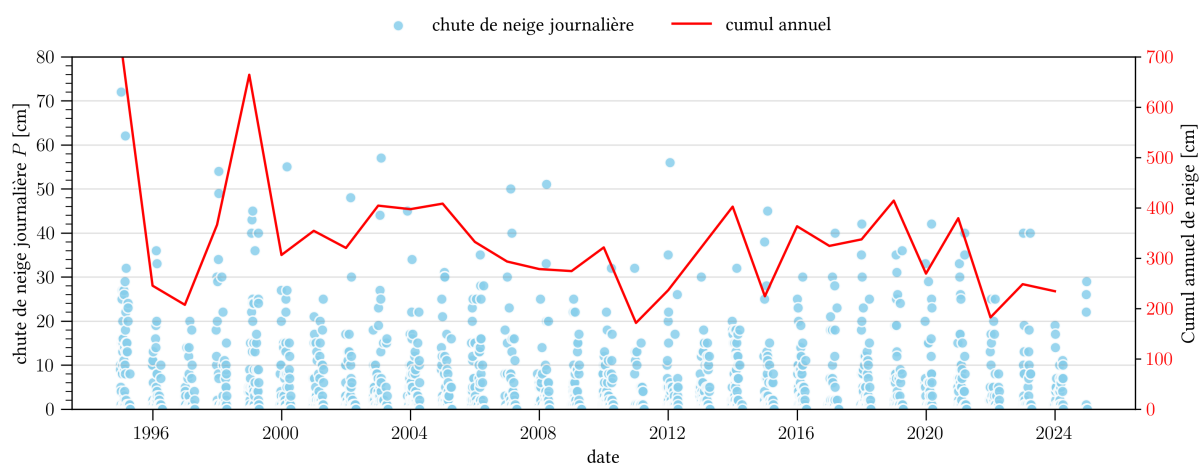


Figure 1.7 – (a) Série temporelle des chutes de neige journalières depuis 1995.

Les cumuls de neige ne sont pas distribués uniformément durant l'hiver, et sans doute faut-il y voir un effet de l'altitude, car quand on examine les valeurs en eau liquide des précipitations, les cumuls mensuels sont à peu près bien répartis tout le long de l'année. Pour les chutes de neige, janvier est le plus neigeux, avec en moyenne 100 cm de cumul mensuel de neige. Les cumuls mensuels diminuent au fil de l'hiver.

Données du modèle Safran

La série de données simulées par Safran pour une altitude de 1505 m est conforme à ce que montre la série de mesures de la station nivo-météorologique des Karellis. Notamment on retrouve le fait que :

- la plupart des chutes de neige ne dépassent pas 30 cm, mais

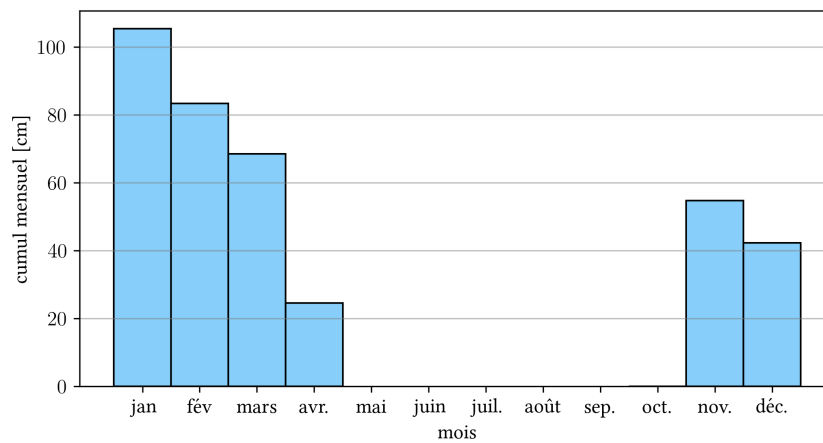


Figure 1.8 – Distribution des cumuls moyens de neige durant l’année aux Karellis.

- exceptionnellement (avec une fréquence environ décennale) des chutes de neige dépassant 50 cm sont observées.

La variabilité des cumuls de neige est bien visible sur la figure 1.9(a). Comme on l’a indiqué plus haut, on peut avoir une succession de quelques saisons (typiquement 4 saisons) avec un enneigement faible, suivie d’une série de saisons avec un enneigement plus fort.

La figure 1.9(b) montre la chronique des précipitations totales (neige et/ou pluie) ainsi que les cumuls annuels de précipitations. On note que les plus fortes précipitations ne se retrouvent pas sur les deux graphiques de la figure 1.9 aux mêmes dates, ce qui implique que ces gros événements se produisent généralement sous forme de pluie en été ou durant l’automne.

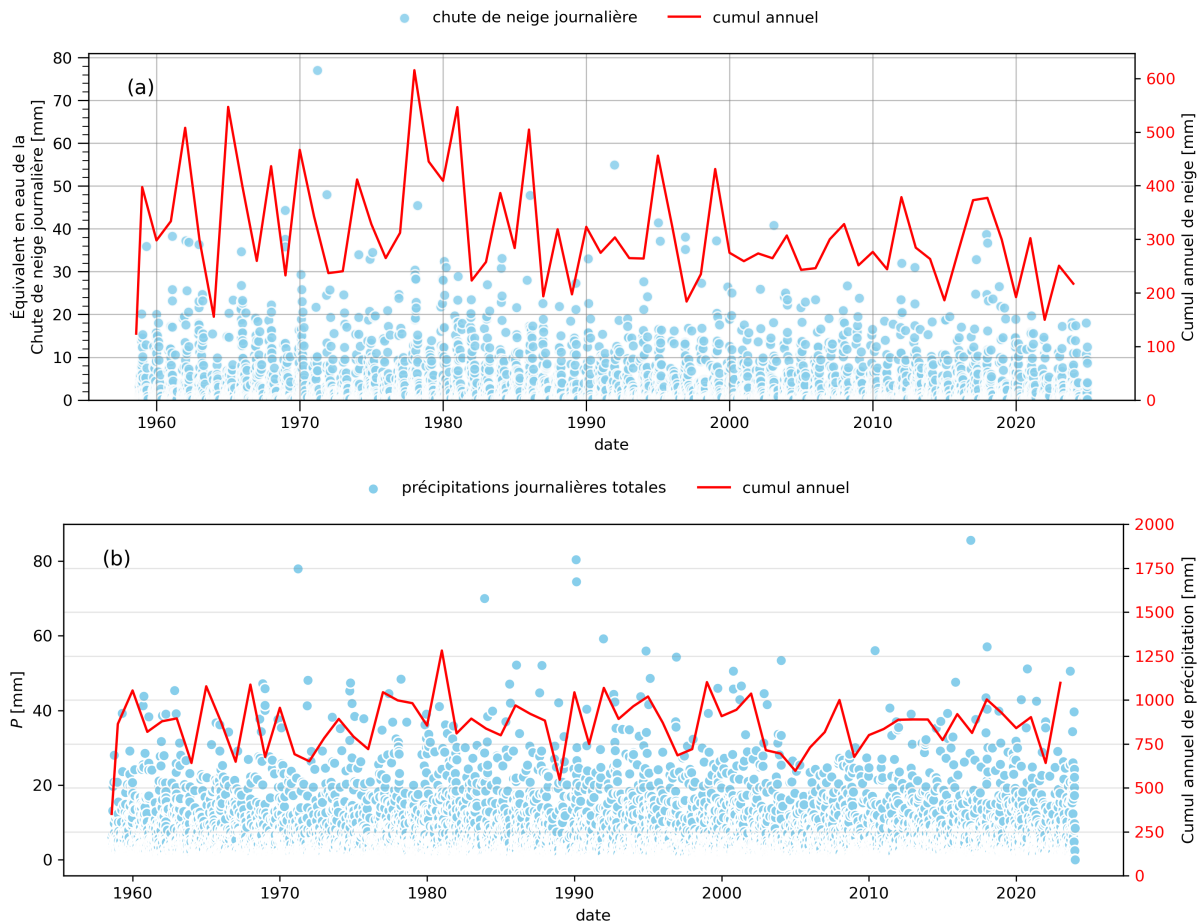


Figure 1.9 – (a) Série temporelle des chutes de neige journalières aux Karellis selon le modèle Safran de 1958 à 2024. On reporte les équivalents en eau des précipitations solides. (b) Cumuls annuels de précipitations (neige ou pluie) sur le secteur des Karellis d’après le modèle Safran.

Tableau 1.1 – Liste des épisodes de neige ayant amené plus de 80 cm sur les Karellis (1603 m) entre janvier 1995 et décembre 2024. La période de retour T est estimée à partir de l'équation (1.1) ajustée sur les données.

date	P (cm)	durée (j)	T (ans)
19/01/2003	81	5	3
14/02/2000	84	6	3
28/01/2015	87	6	3
09/01/1995	92	4	4
11/01/2004	93	10	4
29/02/2000	95	4	5
11/03/2021	98	7	5
28/02/2006	105	8	7
11/04/1999	108	8	8
26/01/1999	110	4	9
18/01/1998	111	4	9
28/01/2003	121	9	14
05/02/1999	127	5	17
21/02/1995	129	7	19
26/01/2019	146	9	37

Épisodes de neige

Au sens météorologique du terme, un *épisode neigeux* est une succession de chutes de neige journalières sur n jours ; la première chute journalière est précédée d'une journée sans précipitation de neige, tandis que la chute de neige pour le jour n est suivie d'une journée sans précipitations. Pour le modèle Safran, la difficulté d'isoler les vrais épisodes neigeux vient du fait que le modèle tend à produire de petites chutes, qui ne seraient pas significatives dans la réalité ; la durée des épisodes est donc plus longue que dans la réalité.

Dans le tableau 1.1, on a reporté tous les épisodes de neige ayant dépassé un seuil de 80 cm sur les Karellis (1603 m) pour la période 1995–2024. On a fait de même avec les chutes de neige à 1505 m calculées par le modèle Safran pour la période 1959–2024 dans le tableau 1.2, mais avec un seuil de 120 mm. On note le faible accord avec les deux sources d'informations pour ce type de données :

- les différences peuvent provenir du fait que dans Safran, les simulations génèrent des précipitations de faible intensité alors qu'en réalité, il ne neige pas de façon appréciable. Ces chutes de neige de faible intensité simulées par Safran ont pour effet d'allonger la durée des épisodes alors qu'en pratique, on aurait tendance à scinder ces gros épisodes en épisodes de plus courte durée ;
- le modèle Safran met aussi en évidence des épisodes sur la période durant laquelle nous n'avons pas de mesure aux Karellis (avant 1995) ;
- inversement, les gros coups de neige sur les Karellis comme janvier 2019 (146 cm en 9 jours) ne sont pas vus par Safran.

L'examen détaillé des précipitations montre qu'il existe une assez bonne corrélation entre données mesurées et simulées, et que si on regarde le total des précipitations, les deux séries temporelles sont bien corrélées, mais que Safran donne également des valeurs globalement plus faibles d'un facteur 2 en moyenne. La carte 1.1 fournit une explication possible : la maille

Tableau 1.2 – Liste des épisodes de neige ayant amené plus de 120 mm sur le secteur des Karellis (1505 m) entre janvier 1958 et décembre 2024. La période de retour T est estimée à partir de l'équation (1.1) ajustée sur les données.

date	P (mm)	durée (j)	T (ans)
02/12/1980	122	17	8
28/01/1961	132	10	10
10/01/1995	133	9	11
18/12/1959	134	14	11
12/01/1981	135	12	11
13/03/1978	137	14	12
12/12/1962	140	10	13
21/12/1968	148	10	15
10/02/1990	149	13	15
20/01/1978	155	15	17
24/11/1965	165	12	20
31/12/1967	206	25	41

de calcul Safran comprend non seulement les domaines skiables des Karellis et d'Albiez, mais également le fond de la vallée de l'Arc. Comme Safran fournit une valeur moyennée sur toute la maille, il a tendance à sous-estimer les précipitations sous forme de neige.

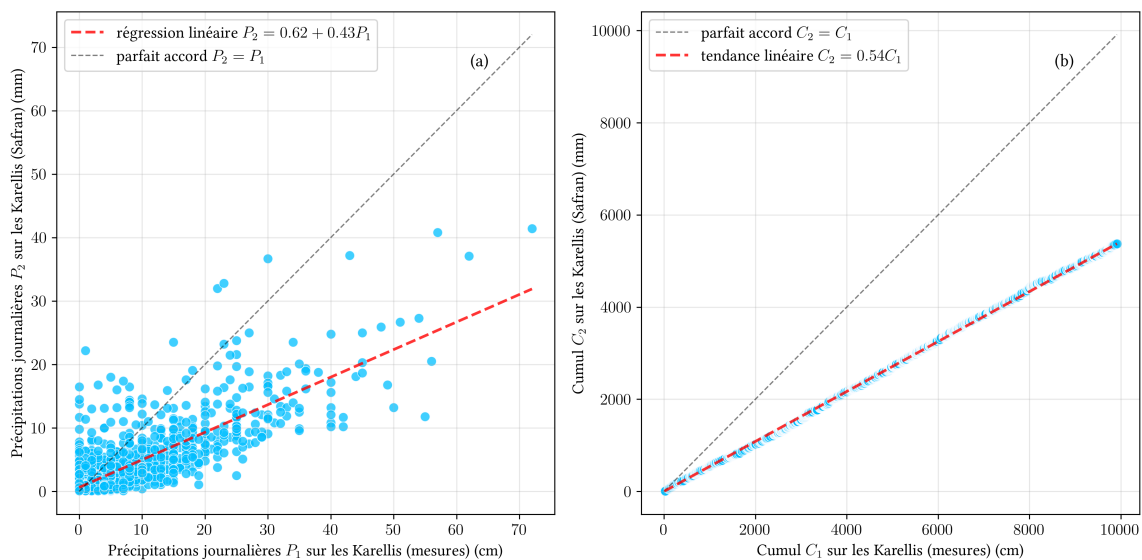


Figure 1.10 – (a) Comparaison des valeurs de chutes de neige journalières mesurées (en cm) par le poste de nivo-observation et simulées (en mm) par Safran pour les Karellis sur la période 1995–2025. (b) Comparaison du cumul des précipitations neigeuses journalières depuis le 1^{er} janvier 1995.

1.2.3 Épaisseur du manteau neigeux

La figure 1.11 montre la chronique des épaisseurs du manteau neigeux aux Karellis à 1603 m d'altitude entre décembre 1975 et avril 2025. La figure 1.12 montre comment varie l'épaisseur moyenne, l'épaisseur minimale et l'épaisseur maximale au fil de la saison. Si généralement l'épaisseur du manteau neigeux ne dépasse pas 75 cm, elle peut dépasser, certaines années, des seuils allant de 100 cm à 180 cm selon le mois de l'année.

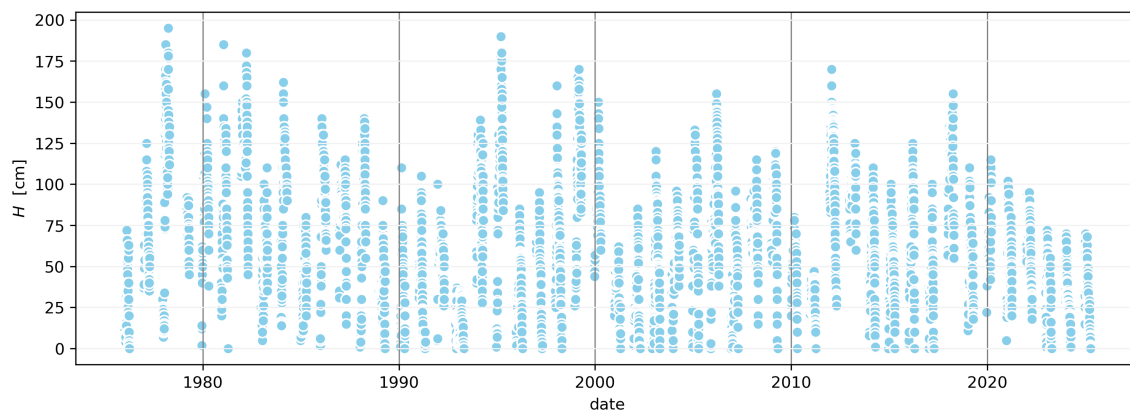


Figure 1.11 – Série temporelle des épaisseurs journalières du manteau neigeux aux Karellis à 1603 m d'altitude de 1976 à 2025.

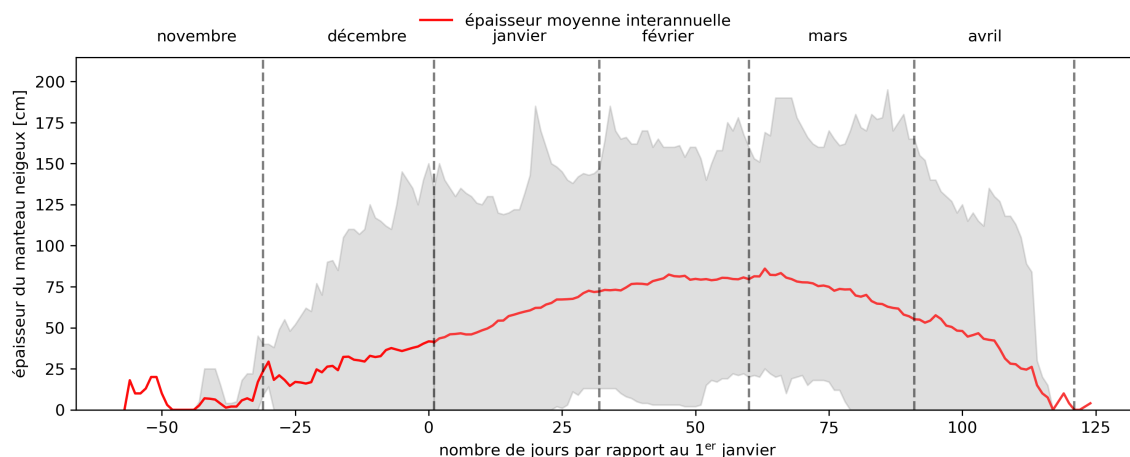


Figure 1.12 – Variation de l'épaisseur journalière du manteau neigeux aux Karellis à 1603 m d'altitude au fil de la saison. On reporte la valeur moyenne des épaisseurs calculée à partir des données de 1976 à 2025. La bande grisée représente la plage de valeurs observées au cours de la saison.

1.2.4 Évolution des températures

La figure 1.13 montre l'évolution des températures sur les Karellis :

- sur le poste des Karellis (1603 m), la tendance séculaire serait une augmentation de 4,1 °C par siècle quand on cale une tendance linéaire sur les données collectées depuis le début des mesures (décembre 1975). Ce résultat est légèrement biaisé par les données lacunaires de 2020–2021 (durant la crise covid) ;

- le modèle Safran montre également une augmentation des températures sur le secteur des Karellis à 1505 m, mais avec un accroissement plus marqué (2,8 °C par siècle) des températures moyennes. Contrairement aux données du poste de nivo-météorologie des Karellis (données de température collectées durant la période d'ouverture de la station de ski en hiver), les données Safran concernent toute l'année.

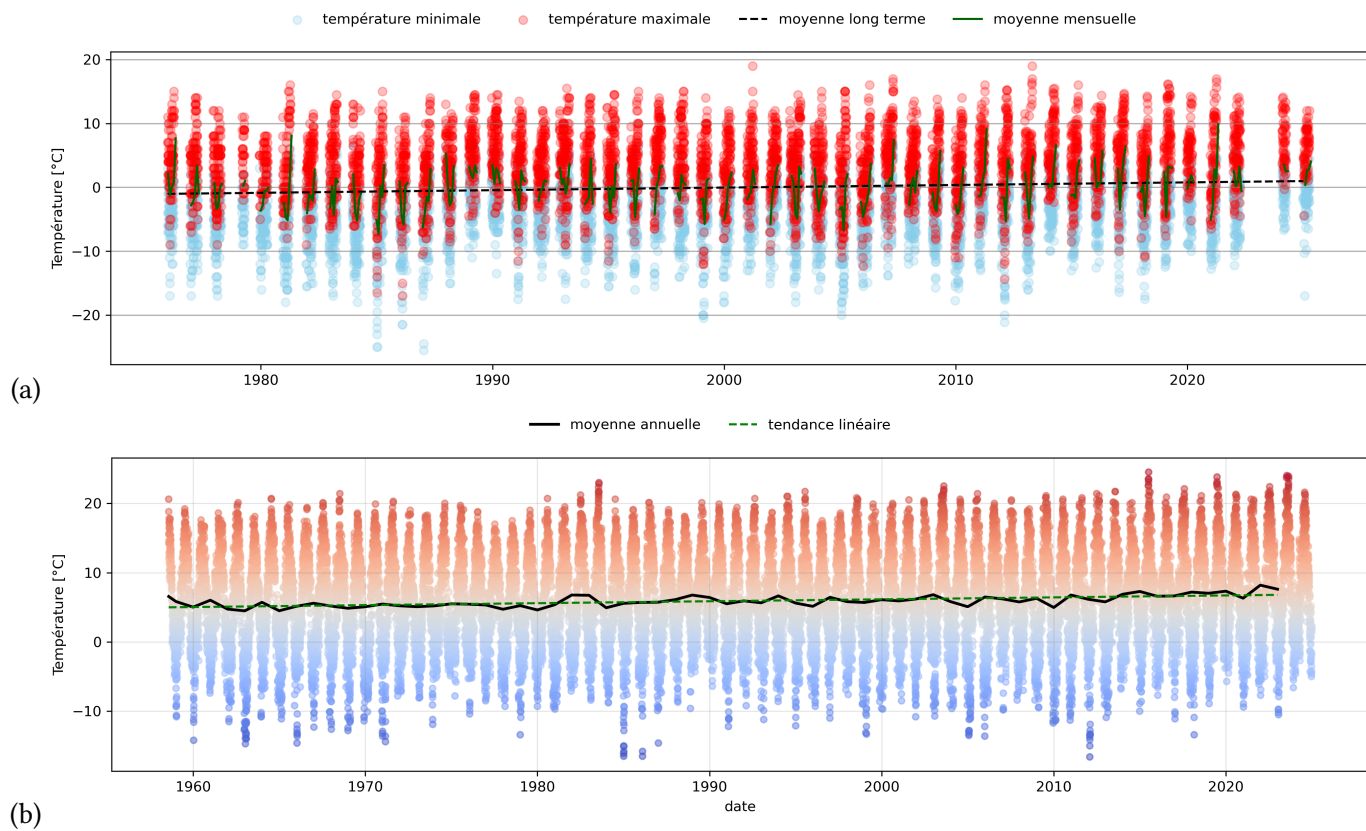


Figure 1.13 – Évolution des températures journalières. (a) Poste des Karellis à 1603 m d’altitude sur la période 1976–2025 ; pour 2020–2021, des données sont manquantes. (b) Données Safran sur la maille des Karellis pour la période 1958–2024.

1.3 Analyse des précipitations extrêmes

1.3.1 Méthode

Lois de probabilité considérées

On se place ici dans le cadre de l'existence d'un régime stationnaire (ou faiblement instationnaire) des précipitations au fil des décennies et on admet que les précipitations sont représentées par une seule loi dite *loi généralisée des valeurs extrêmes*:

$$P = \begin{cases} \mu - \frac{\sigma}{\xi} \left[1 - \left(-\ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right)^{-\xi} \right] & \text{si } \xi \neq 0, \\ \mu - \sigma \ln \left[1 - \ln \left(1 - \frac{1}{T} \right) \right] & \text{si } \xi = 0, \end{cases} \quad (1.1)$$

avec T la période de retour, P le quantile de précipitation, et (μ, σ, ξ) les paramètres de la loi de probabilité. Cette loi de valeurs extrêmes est la forme générique de trois lois de probabilité en fonction de l'exposant ξ :

- $\xi > 0$: *loi de Fréchet*;
- $\xi = 0$: *loi de Gumbel*;
- $\xi < 0$: *loi de Weibull*.

Par la suite, on va :

- soit supposer que la loi est de type Gumbel et donc poser $\xi = 0$;
- soit ne faire aucune hypothèse sur ξ et ajuster cet exposant en même temps que les paramètres μ et σ .

Si en théorie la seconde approche est la plus rigoureuse, la première peut se révéler meilleure en pratique quand on travaille avec un faible nombre de données (les résultats du calage sont très sensibles à la valeur de ξ , et donc pour les petites séries de données, le calage peut produire des valeurs sensiblement différentes d'une année à l'autre).

Ajustement des paramètres

Pour les lois de probabilité de valeurs extrêmes, les paramètres ont été estimés à la fois :

- par la méthode du maximum de vraisemblance ;
- par inférence bayésienne. Dans une première étape, on a estimé ces paramètres par la méthode du maximum de vraisemblance, puis on a utilisé cette information pour construire les priors nécessaires à la méthode de Bayes. Un algorithme de Monte Carlo hamiltonien a été utilisé pour générer le posterior des paramètres. Nous retenons comme paramètres (μ, σ, ξ) les valeurs moyennes des échantillons ainsi générés.

Nous retenons les valeurs qui obtiennent le meilleur score AIC (c'est-à-dire la plus faible valeur du critère d'information d'Akaike²).

2. Le score est défini par $AIC = 2k - 2\ell$ avec $k = 2, 3$ ou 5 le nombre de paramètres de la loi. La loi la plus fidèle aux données et la plus économique en nombre de paramètres est celle qui obtient le score AIC le plus petit.

1.3.2 Ajustement d'une loi de valeurs extrêmes pour les chutes de neige

Nous reportons ici le résultat récapitulatif pour les chutes de neige sur des durées de 1 à 3 jours pour la station des Karellis. Une loi de valeurs extrêmes (LVE) a été ajustée sur les données des maxima annuels par la méthode bayésienne. Le tableau 1.3 donne la valeur des paramètres ξ , μ , et σ et quelques quantiles de chutes de neige extrêmes pour les Karellis à 1603 m à partir des données mesurées. La figure 1.14 montre l'ajustement des lois de valeurs extrêmes sur les maxima annuels pour des durées de 1 jour, 2 jours, 3 jours et pour un épisode de n jours.

Comme les mesures sur les Karellis (période 1995–2025, altitude 1603 m) et les données de Safran (1958–2024, 1505 m) sont certes corrélées, mais avec une différence significative dans les valeurs de précipitations journalières, seules les données mesurées sur le poste des Karellis ont été utilisées pour ajuster une loi de valeurs extrêmes.

Tableau 1.3 – Estimation par inférence bayésienne des paramètres ξ , μ , et σ pour la loi des valeurs extrêmes (LVE) ou pour la loi de Gumbel pour des chutes de neige de 1 à 3 jours ainsi que pour des épisodes météorologiques de durée $d = n$ jours quelconque sur les Karellis à 1603 m. On a reporté les quantiles (en cm) pour les périodes de retour décennale, trentennale, centennale et tricennale et pour chacune des lois. Valeurs en cm. Le logarithme du maximum de vraisemblance est noté ℓ , et AIC est le critère d'information d'Akaike.

<i>Gumbel</i>	$d = 1 \text{ j}$	$d = 2 \text{ j}$	$d = 3 \text{ j}$	$d = n \text{ j}$
μ	34,5	49,4	56,0	64,7
σ	8,9	12,0	15,3	20,9
ℓ	-117,0	-126,2	-133,1	-143,8
AIC	238,0	256,4	270,1	291,5
$T = 10 \text{ ans}$	55	76	90	112
$T = 30 \text{ ans}$	65	90	108	135
$T = 100 \text{ ans}$	75	105	126	161
$T = 300 \text{ ans}$	85	118	143	184
<i>Loi de valeurs extrêmes</i>				
μ	34,7	49,6	56,5	65,1
σ	9,7	12,9	16,5	22,6
ξ	-0,06	-0,05	-0,08	-0,05
ℓ	-117,2	-126,4	-133,0	-144,0
AIC	240,3	258,8	272,1	294,0
$T = 10 \text{ ans}$	55	77	90	113
$T = 30 \text{ ans}$	64	90	105	136
$T = 100 \text{ ans}$	74	103	120	158
$T = 300 \text{ ans}$	82	114	132	178

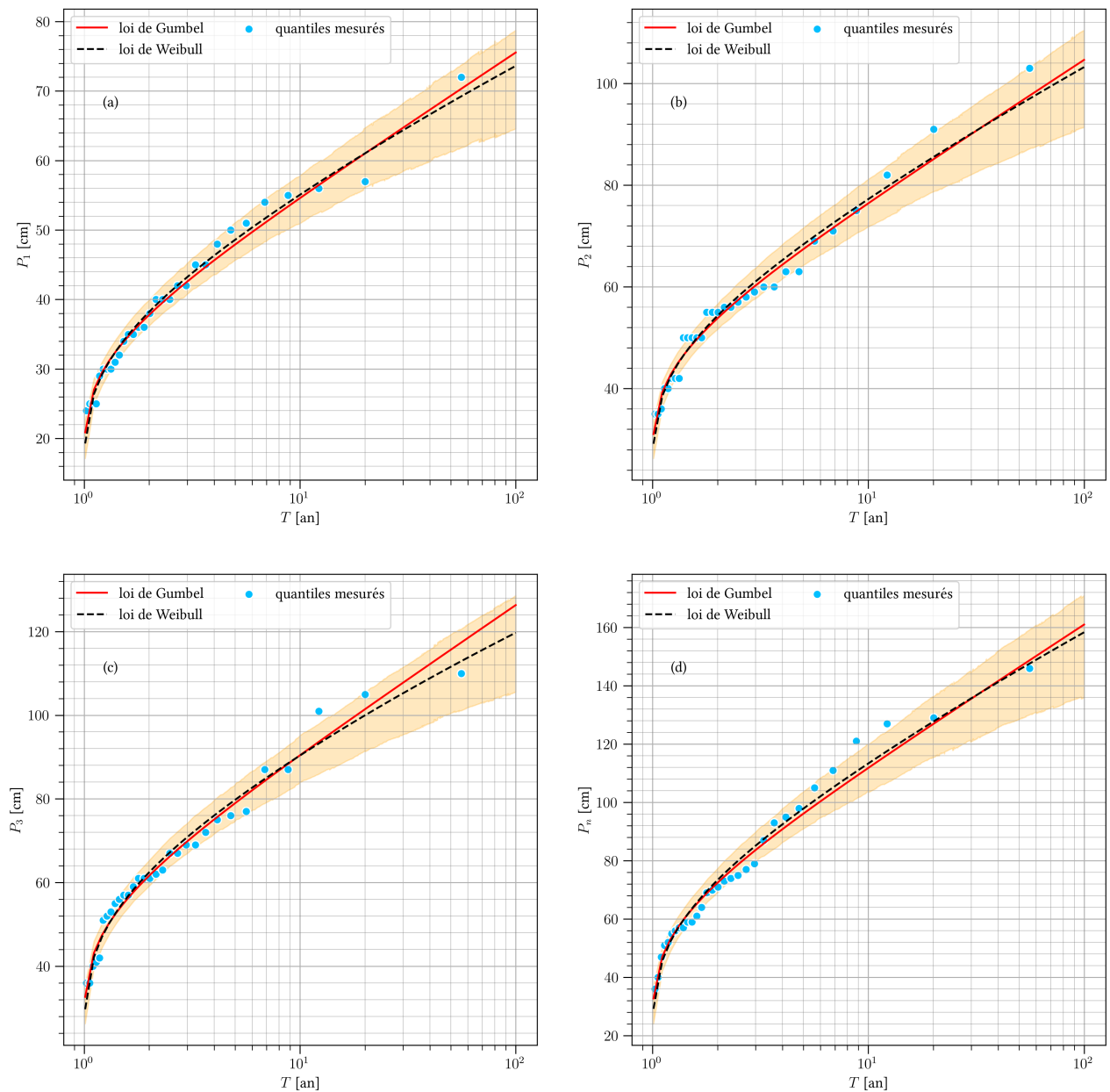


Figure 1.14 – (a) Variation de la chute de neige journalière P_1 avec la période de retour T ; on a reporté la loi de Gumbel et la loi de Weibull calées au tableau 1.3. (b) Variation du cumul de neige P_2 sur deux jours avec la période de retour T . (c) Variation du cumul de neige P_3 sur trois jours avec la période de retour T . (d) Variation du cumul de neige P_n sur un épisode de n jours avec la période de retour T . La bande colorée en orange représente l'intervalle de confiance à 70 % de la loi de Gumbel. Données des Karellis (1603 m).

1.3.3 Ajustement d'une loi de valeurs extrêmes pour les épaisseurs du manteau neigeux

On a calé une loi de valeurs extrêmes (1.1) sur les maxima annuels des épaisseurs du manteau neigeux. Les paramètres de la loi de valeurs extrêmes (équation 1.1) calée sur les données sont reportés dans le tableau 1.4. La variation de la hauteur de neige au sol en fonction de la période de retour est reportée à la figure 1.15. On notera :

- des différences assez faibles d'épaisseur du manteau neigeux entre le modèle de Gumbel et le modèle de Weibull aux petites périodes de retour ($T \leq 4$ ans), mais
- des différences bien plus marquées aux grandes périodes de retour, avec des différences de l'ordre de 60 cm (33 % en écart relatif) pour $T = 100$ ans entre les modèles de Gumbel et de Weibull.

On optera pour un modèle de Weibull pour estimer les quantiles extrêmes d'épaisseur du manteau neigeux compte tenu du caractère weibullien marqué (un cas usuel pour les stations de moyenne montagne).

Tableau 1.4 – Estimation par inférence bayésienne des coefficients ξ , μ , et σ pour la loi des valeurs extrêmes de Weibull et la loi de Gumbel pour les maxima annuels de l'épaisseur journalière du manteau neigeux sur les Karellis (1603 m). On a également reporté les quantiles H (en cm) pour les périodes de retour décennale à centennale. L'indice AIC est le critère d'information d'Akaike (le modèle avec l'indice le plus faible est le plus performant).

	Gumbel	Weibull
μ	99,0	101,5
σ	38,4	37,1
ξ	0,00	-0,20
AIC	527,1	520,2
$T = 10$ ans	185	169
$T = 30$ ans	228	193
$T = 100$ ans	275	214

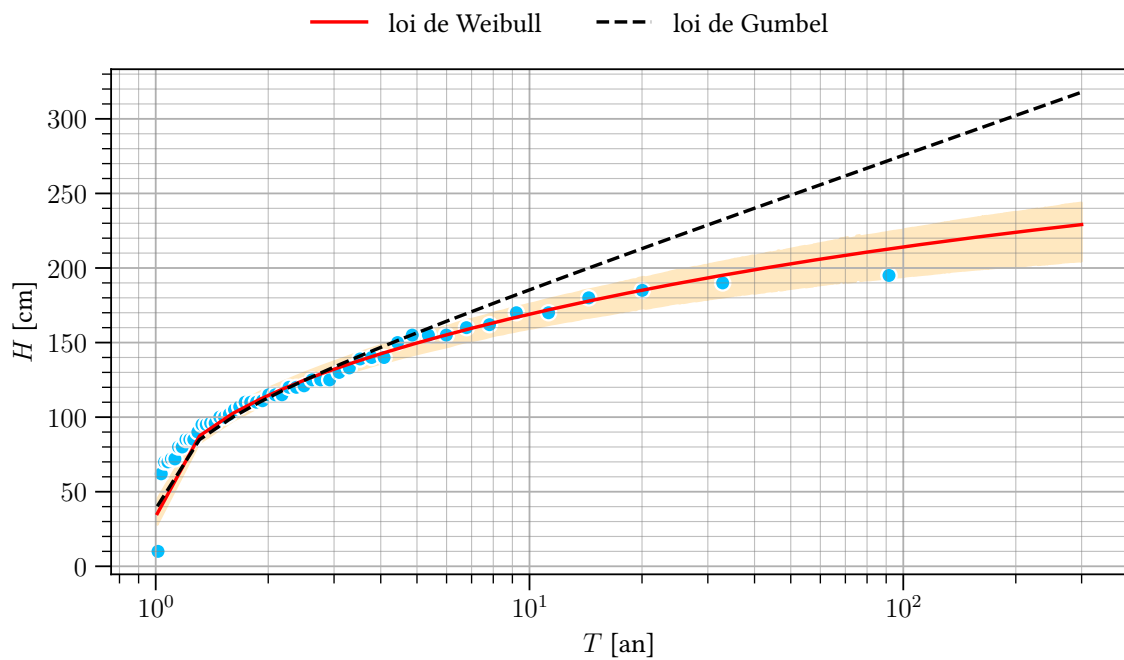


Figure 1.15 – Variation de l'épaisseur maximale de neige au sol (sur une journée) en fonction de la période de retour aux Karellis, 1603 m. La bande colorée en orange représente l'intervalle de confiance pour la loi de Weibull.

1.4 Synthèse

La présente étude s'est fondée sur une série de 30 années de mesures aux Karellis (1603 m). L'étude a montré qu'une loi de Weibull décrit correctement les cumuls de neige quelle que soit sa durées d . Pour l'épaisseur du manteau neigeux, nous avons également considéré une loi de Weibull. Nous retenons donc les estimations suivantes des quantiles extrêmes pour les chutes de neige sur trois jours et les épaisseurs du manteau neigeux aux Karellis (1603 m) :

	$T = 30$ ans	$T = 100$ ans
chute de neige sur $d = 3$ j	105 cm	120 cm
épaisseur du manteau neigeux	190 cm	215 cm

Analyse du risque d'avalanche

2.1 Méthodes

L'analyse spatiale vise à donner une image qualitative du fonctionnement avalancheux du site étudié. Elle est principalement fondée sur l'expérience naturaliste et l'observation de terrain. À partir de différents éléments :

- observations recueillies lors de notre visite de terrain du 25 novembre 2025 ;
- collecte et analyse critique de diverses sources historiques ;
- analyse des profils de terrain et carte des pentes,

nous avons cherché à distinguer d'une part les zones de départ élémentaires (les panneaux de départ) des versants menaçant le projet et, d'autre part, les trajectoires et les zones d'arrêt qui leur sont associées.

2.2 Données

L'étude a pris en considération les documents suivants :

- les données de l'enquête permanente sur les avalanches (EPA) ;
- la carte de localisation des phénomènes d'avalanches (CLPA),

et s'est appuyée sur :

- le levé lidar LidarHD de l'IGN, disponible sur le périmètre de la zone d'étude¹ ;
- l'orthophotoplan BDOrtho de l'IGN ;
- la couverture de photographies aériennes : plusieurs missions de l'IGN et l'IFN de 1948 à 2016.

1. La date d'acquisition du nuage de points est le 23 septembre 2021.

2.3 Éléments historiques

2.3.1 Enquête permanente sur les avalanches

L'EPA est une procédure de suivi des avalanches mise à l'œuvre par l'administration forestière au début du xx^e siècle sur l'ensemble des Alpes françaises. L'agent forestier renseigne l'activité avalancheuse d'un certain nombre de couloirs identifiés ; il consigne pour chaque événement constaté la date d'occurrence (ou à défaut la date d'observation), les altitudes de départ et d'arrêt, le type d'avalanche (selon une typologie qui a souvent changé depuis le début du xx^e siècle), les dégâts éventuels occasionnés, etc. Le secteur étudié figure sur la feuille AW64 de l'atlas de l'EPA (voir figure 2.1).

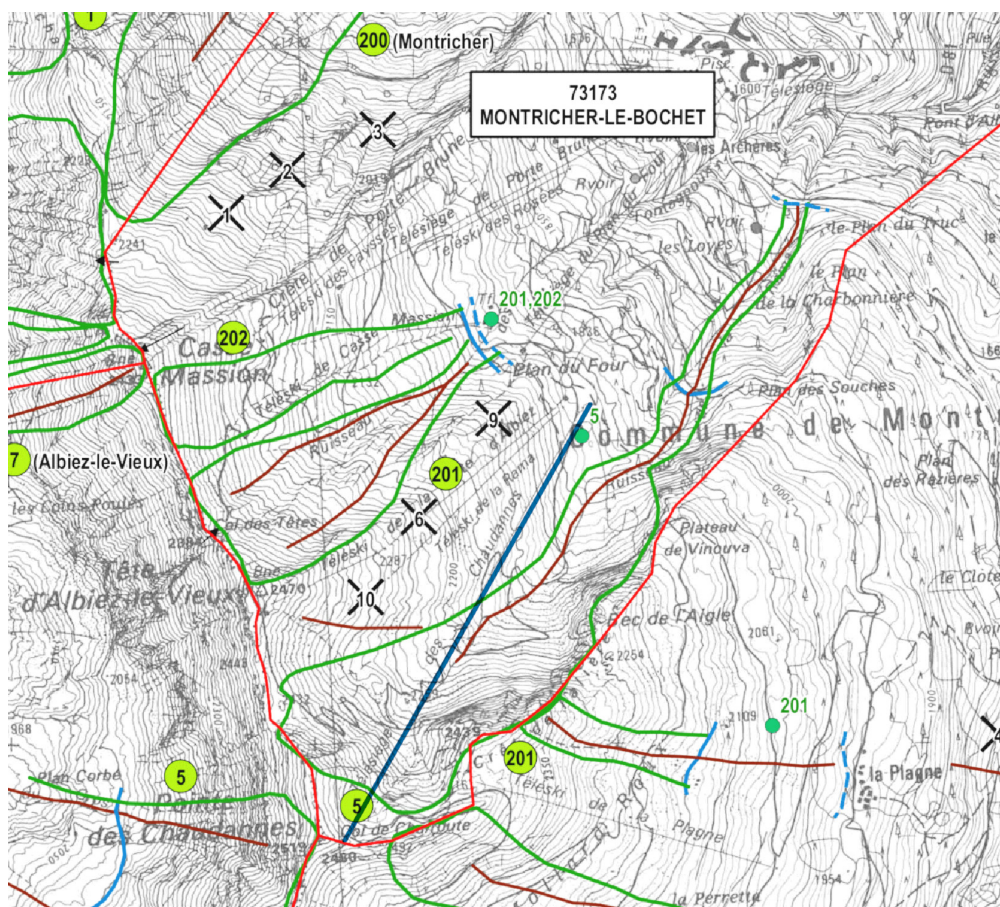


Figure 2.1 – Extrait de la feuille AW64 de l'atlas de l'EPA, édition 2012. L'appareil est reporté en sur-impression (segment bleu). Échelle 1:25 000. © IGN-Paris 2003, © MEDDE-ONF-Irstea 2012.

Le site n° 5 dit du *ruisseau de la Rama* concerne le projet. Il est probable que ce site d'observation corresponde à l'ancien site n° 6 du *ruisseau des Moulins*. La chronique est peu fournie ; seuls les carnets forestiers du début du siècle dernier nous renseignent sur une avalanche datée du 2 mars 1935 qui se serait déclenchée vers 2300 m (soit le revers nord du Crêt de Talière présume-t-on), et qui aurait atteint la cote 1650 m (c'est-à-dire approximativement l'altitude de la route des Karellis à Albanne au franchissement du ruisseau des Moulins).

Les informations délivrées par l'EPA demeurent trop partielles pour constituer une source d'information exploitable pour notre étude.

2.3.2 Carte de localisation des phénomènes d'avalanches

La carte de localisation des phénomènes d'avalanches (CLPA) est un document informatif mis en œuvre au début des années 1970, qui dresse un inventaire des avalanches connues sur une grande partie des Alpes et des Pyrénées. Elle comporte deux types d'informations :

- des avalanches reconnues par enquête sur le terrain (figurées en magenta sur la carte) ;
- des avalanches reconnues par photo-interprétation (figurées en orange sur la carte).

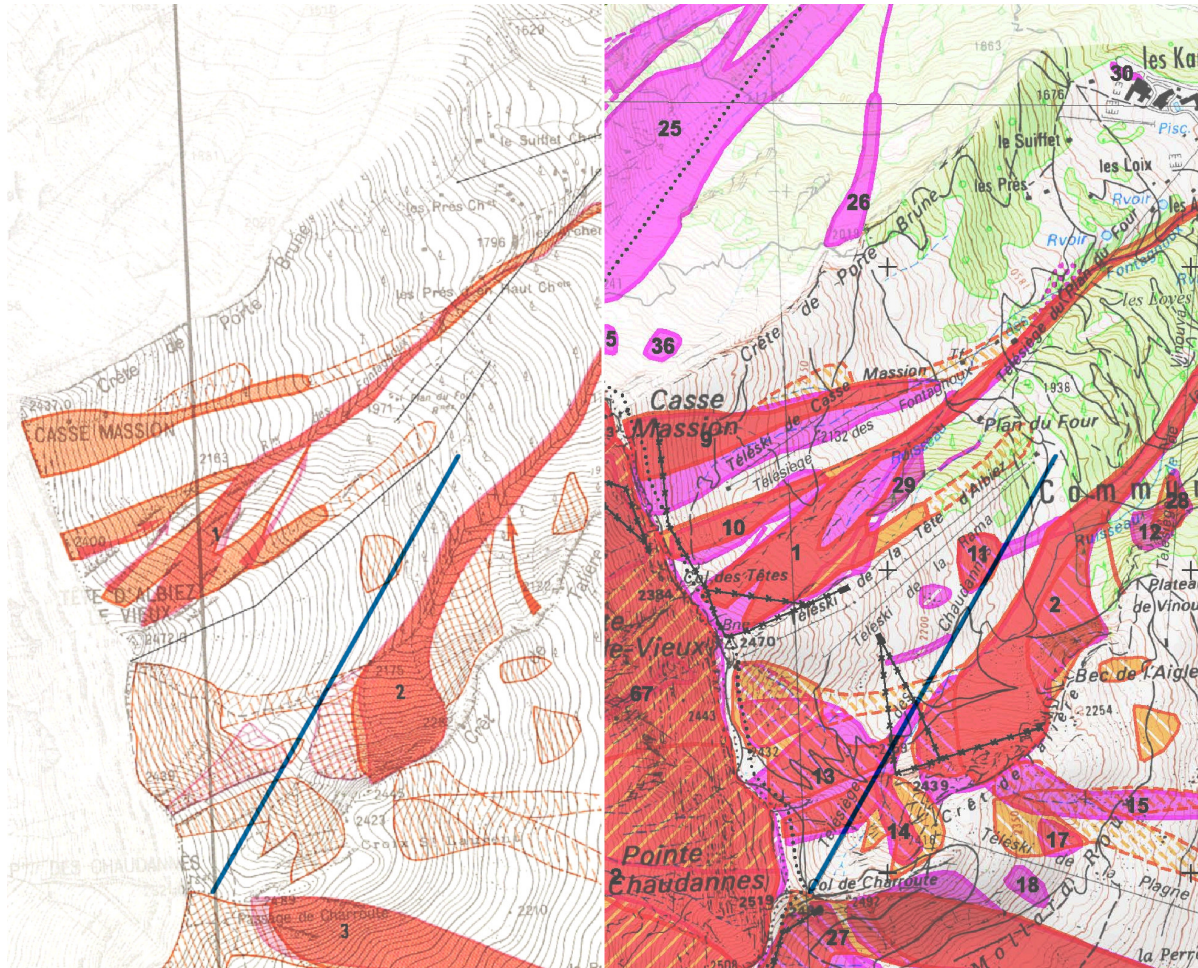


Figure 2.2 – À gauche : extrait de la feuille *Valloire et La Norma* (1972). À droite : extrait de la feuille AW64 de l'atlas de la CLPA (2022). L'appareil est reporté en surimpression (segment bleu). Échelle 1:25 000. © IGN-Paris 1972, © MTEs-ONF-Irstea 2022.

Le secteur étudié figure sur la feuille AW64 de l'atlas de la CLPA. Cette version de la carte publiée en 2022² est une réédition de la feuille *Moyenne Maurienne* dressée en 1990, elle-même réédition de la carte *Valloire et La Norma* parue en 1972. La figure 2.2 présente le document dans sa version initiale et sa version la plus récente.

Avalanches reconnues par photo-interprétation

La photo-interprétation est héritée de l'édition de 1972, elle souffre donc des imprécisions inhérentes au levé topographique de la carte à l'échelle 1:20 000 de cette époque. Une seule ava-

2. il s'agit de la date d'émission de la feuille, l'enquête la plus récente sur le terrain a été réalisée en 2008, et complétée ponctuellement par des mises à jour annuelles.

lanche fait l'objet d'un tracé individualisé. C'est un phénomène qui affecte le versant nord du *Crêt de Talière*. L'écoulement large de 300 m au départ, converge dans le ruisseau de la *Rama* en se cantonnant à l'est de la remontée mécanique, située sur la rive gauche du vallon des Chaudannes. Le photo-interprète a traité le reste du vallon en zones d'avalanches d'ampleur diverse (hachures oranges), mode de représentation des avalanches qui ne fournit pas une revue détaillée des écoulements qui s'y produisent. La photo-interprétation nous indique simplement que des avalanches concernent la remontée mécanique dans les intervalles d'altitude 2060–2100 m et 2240–2390 m. Le photo-interprète signale une avalanche présumée (hachures à tirets) qui, provenant du versant sud-est de la Tête d'Albiez, pourrait s'écouler jusque dans le ruisseau de la Rama. La remontée mécanique est concernée par ce phénomène entre 2180 et 2220 m d'altitude.

Avalanches reconnues par recueil de témoignages

Si, à l'image du travail de photo-interprétation, la première version de la carte montre une enquête sommaire, les recueils de témoignages de 1990 et 2008 fournissent une représentation plus détaillée de l'activité avalancheuse connue sur le vallon des Chaudannes. Plusieurs emprises d'avalanches numérotées y figurent, leurs fiches signalétiques apportant parfois des renseignements complémentaires intéressants.

- Avalanche n° 2 : c'est une avalanche caractérisée par une vaste zone de départ (750 m de largeur) qui s'écoule dans le vallon, sans débordement sur sa rive gauche. La délimitation de la zone de départ (héritée de l'enquête de 1990) nous apparaît approximative en particulier au voisinage des crêtes rocheuses de Talière. La fiche signalétique de 1990 ne délivre aucune information quant à ce tracé.
- Avalanche n° 11 : portée à la carte lors de l'enquête de 1990, cette avalanche croise le tracé de l'appareil. Lors de l'enquête de 2008, l'information suivante est ajoutée à la fiche : « *En 1991 ou 1992, l'avalanche s'est déclenchée naturellement après que l'avalanche n° 2 ait été déclenchée artificiellement dans le cadre du PIDA. L'avalanche n° 11 est partie vers 2100 m d'altitude et est descendue en neige poudreuse à travers les mélèzes pour aller rejoindre l'avalanche n° 2.* ».
- Avalanche n° 13 : il s'agit d'une avalanche de versant occupant le flanc oriental de l'arête reliant la Pointe des Chaudannes à la Tête d'Albiez. L'enquête de 2008 fournit les commentaires suivants :
 - « *Vers 2002-2003, l'avalanche, déclenchée manuellement dans le cadre du PIDA, est descendue en neige poudreuse. Elle est allée taper dans les pylônes P12 et P13 du télésiège des Chaudannes (échelles légèrement pliées) et s'est arrêtée au niveau du pylône P10. Le dépôt de neige atteignait 2m50 au niveau des pylônes P12 et P13.* »
 - « *L'avalanche s'est déjà arrêtée dans le creux vers 2230 m d'altitude après un parcours de 450 m. Son départ a fréquemment été consécutif à la formation d'une congère sous le vent de l'éperon Est. Le dépôt de l'avalanche, dans le creux de réception, a été estimé à plus de 8 mètres l'hiver 1988.* »
- Avalanche n° 14 : l'avalanche affecte la pente nord du petit vallon de *Charoutte*. L'enquête de 2008 fournit les commentaires suivants :
 - « *En février 2006, l'avalanche a été déclenchée manuellement dans le cadre du PIDA et est partie au terrain (sur toute l'épaisseur du manteau neigeux). La cassure faisait entre 1m et 1m50 de hauteur. Descendue en neige poudreuse, l'avalanche est arrivée au niveau du pylône P10 du télésiège des Chaudannes. Le dépôt faisait 50 mètres de large.* »

– « *L'avalanche s'est déjà vraisemblablement arrêtée dans le replat à 2320 m.*»

Notons enfin que la CLPA mentionne les ouvrages de lutte paravalanche (surcharges noires). Ici est reporté le câble transporteur d'explosifs (catex) de Talière, mais son tracé a changé (voir section suivante).

En somme, la lecture de la CLPA nous indique que **le projet de télésiège est exposé à une activité avalancheuse sur plusieurs portions de la ligne. Les gares ne sont pas menacées par les avalanches.**

2.3.3 PIDA

La station dispose d'un plan d'intervention pour le déclenchement des avalanches (PIDA) sur ce secteur. La figure 2.3 fournit un extrait de la cartographie du PIDA où sont représentés les points de tir du secteur.

Les tirs n^{os} 6 à 8 sont réalisés par grenadage manuel. Le point de tir n^o 9 est équipé d'un catex à manivelle. Le catex de Talière permet la réalisation des tirs de la face nord du Crêt de Talière. Afin de mieux desservir les couloirs situés entre les points de tir n^{os} 11 et 12, le tracé du catex a quelque peu évolué l'an passé par rapport au tracé décrit dans le document fourni par la station. La figure 2.3 localise précisément les segments de câble actuellement en service.

Le projet d'appareil est concerné occasionnellement par les coulées observées sur le point de tir n^o 6. Les tirs n^{os} 8 et 9 donnent lieu à des avalanches qui atteignent couramment les pylônes de la remontée mécanique actuelle. Les échelles du pylône p12 ont été endommagées au passage d'avalanches de neige poudreuse. L'appareil, construit en 1988, n'a pas subi d'autres dommages liés aux avalanches.

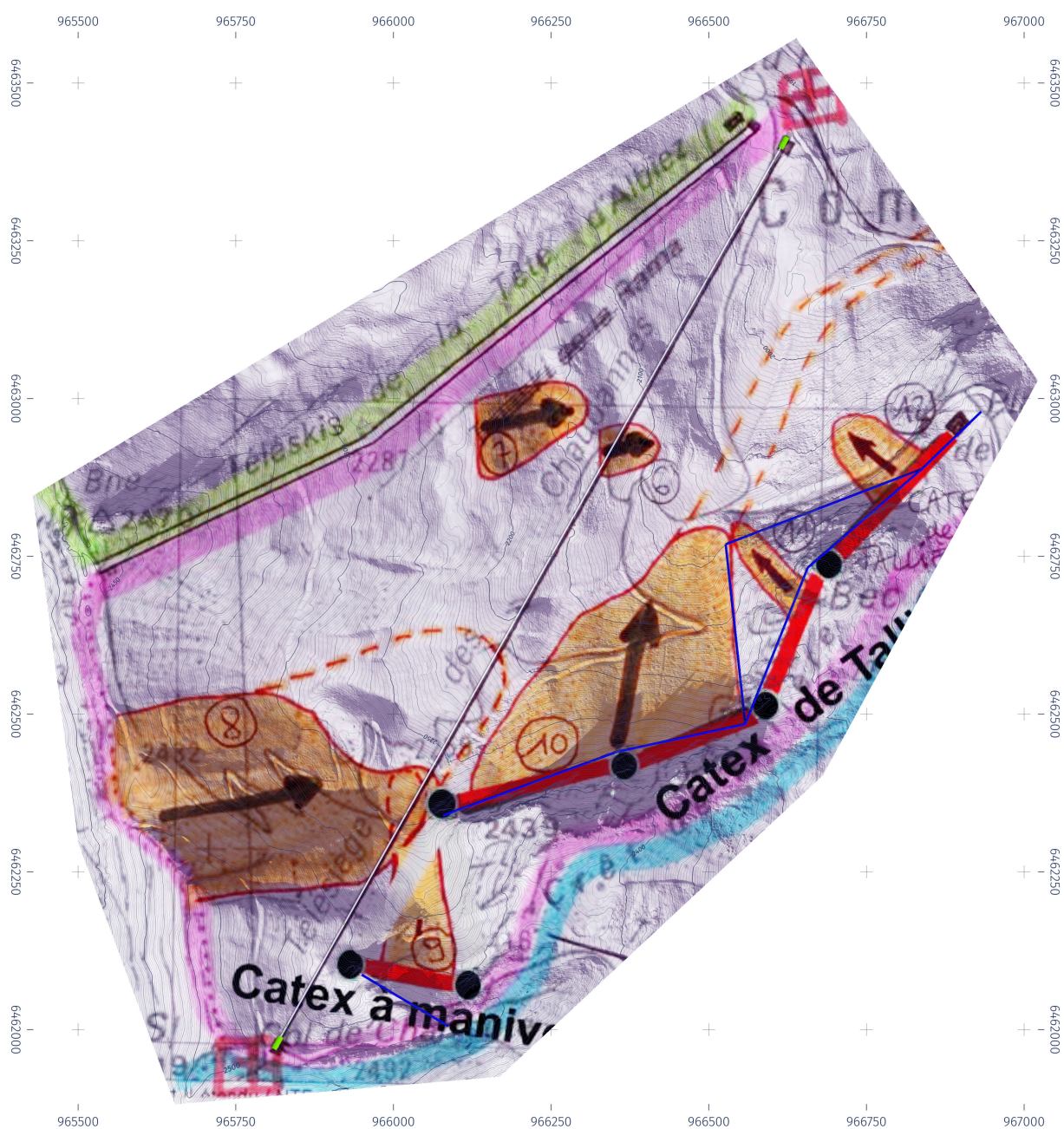


Figure 2.3 – Extrait du PIDA des Karellis, secteur *Rama*. Le tracé jaune localise le projet de remontée mécanique. Les segments bleus localisent la modification apportée récemment au catex de Talière. Échelle 1:10 000. Fond topographique LidarHD IGN © IGN 2025. Système de coordonnées Lambert 93.

2.4 Analyse spatiale du risque d'avalanche

2.4.1 Principe

Notre analyse spatiale repose sur

- un examen stéréoscopique des couples de photographies aériennes de l'IGN³ ;
- l'exploitation des données du programme lidarHD de l'IGN ;
- nos observations de terrain.

↪ La symbolique utilisée pour les cartes est la suivante :

- traits rouges : délimitation des panneaux déclencheurs ;
- traits oranges épais : singularités du relief, jouant un rôle dans la propagation des flux ;
- flèches bleues : trajectoires d'avalanches en aérosol caractérisées par un comportement inertiel ;
- flèches noires : trajectoires d'avalanches coulantes caractérisées par un comportement gravitaire ;
- flèches grises : trajectoires d'avalanches gravitaires d'occurrence rare à exceptionnelle.

Le schéma de fonctionnement des avalanches présenté figure 2.4 accompagne les commentaires qui suivent.

Notre examen de la zone d'étude conduit à identifier six secteurs dont l'activité avalancheuse peut intéresser le projet.

2.4.2 Secteur 1

Il s'agit d'un étagement de trois pentes orientées à l'est. Chacun des ressauts présente une dénivellation modeste, et des replats marqués, voire localement des dépressions (s_{12} , s_{13}), perturbent fortement la régularité du profil en long du versant. Les mensurations du panneau p_{11} permettent la survenue d'avalanches coulantes larges, suivant les trajectoires g_{11} . La topographie ne favorise pas la concentration des flux de neige c'est-à-dire que les écoulements sont sans doute peu épais au franchissement de l'appareil, et les vitesses d'écoulement sont modérées par la faible raideur du profil en long.

Les flux g_{12} issus des panneaux p_{12} se déposent dans le replat s_{12} , où les dépôts sont parfois épais de plusieurs mètres. Enfin la purge des pentes p_{13} , si elle se cantonne d'ordinaire au replat s_{13} , peut émettre des débordements selon les trajectoires g_{x1} . À sa marge sud ce secteur présente une succession de courtes pentes orientées au sud-est, panneaux identifiés p_{14} . Des coulées de neige (neige humide au redoux ou neige froide sans cohésion pendant les chutes de neige) se déversent sur quelques dizaines de mètres de dénivellation, suivant les trajectoires g_{14} et croisent l'axe de l'appareil. Sans réelle capacité à concentrer les flux, ce système produit des coulées dont le potentiel de dommage à des pylônes de télésiège est très faible.

3. Plusieurs missions aériennes ont été examinées :

- mission IGN C3334-0011_1948_F3334-3434 du 28 août 1948, clichés 142 et 143 ;
- mission IGN C3234-0051_1975_F3234-3434 du 19 octobre 1975, clichés 214 et 215 ;
- mission IGN CA02S00032_2001_fd0073_250_c du 12 août 2001, clichés 4513 et 4515 ;
- mission IGN CP13000562_13FD7325x00041 du 31 juillet 2013, clichés 1773 à 1775 ;
- mission IGN CP16000422_16FD7325x00043 du 20 juillet 2016, clichés 11010 à 11012.

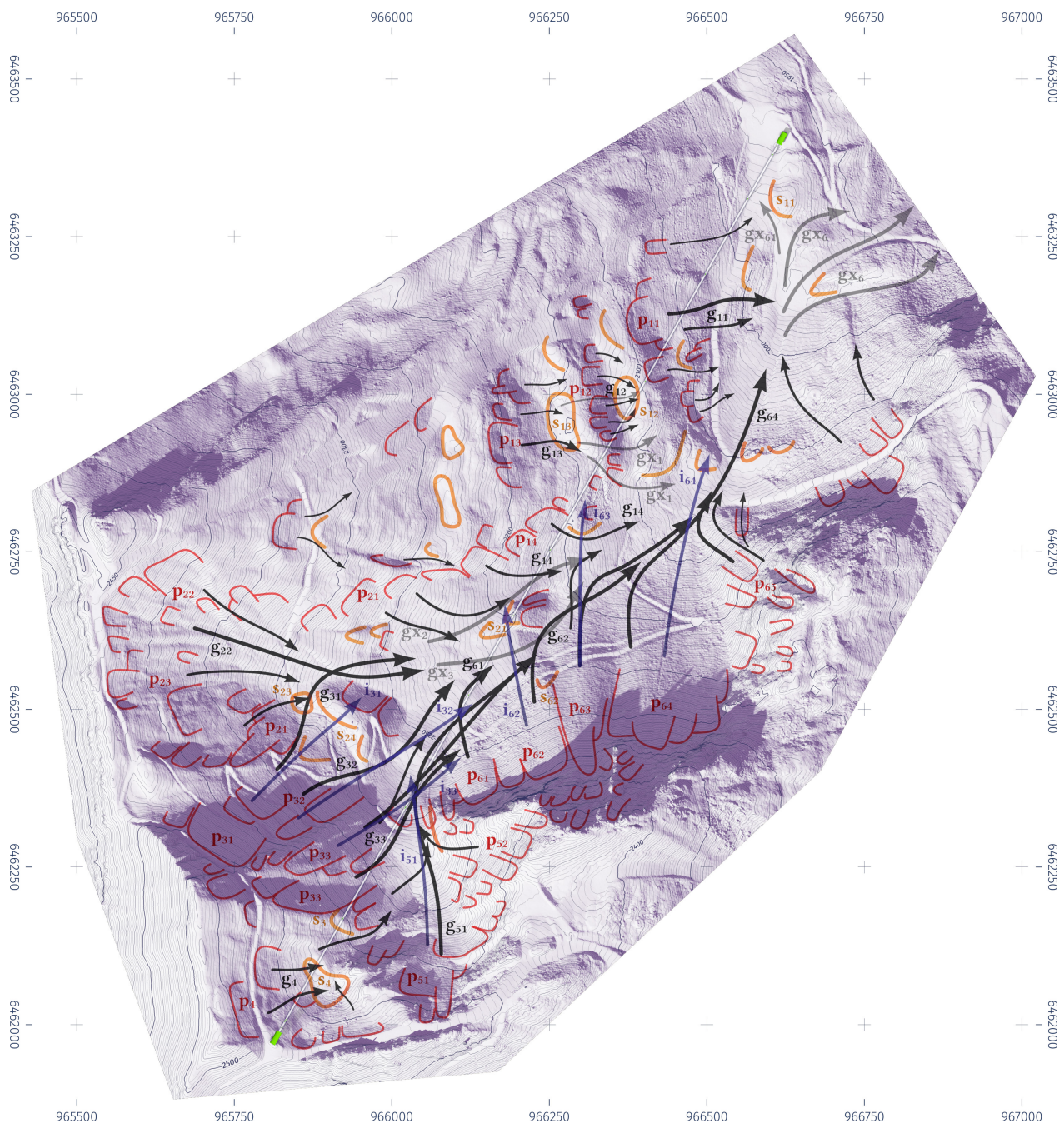


Figure 2.4 – Schéma de fonctionnement des avalanches. La ligne blanche localise le projet de télésiège. La topographie incorpore les terrassements prévus au voisinage des gares. Échelle 1:10 000. Fond topographique LidarHD IGN © IGN 2025. Système de coordonnées Lambert 93.

2.4.3 Secteurs 2 et 3

Ce sont deux vallons adjacents qui partagent le revers oriental de l'arête reliant la Pointe des Chaudannes à la Tête d'Albiez-le-Vieux. La distinction de deux groupes de panneaux d'accumulation p_2 et p_3 s'opère sur leur orientation générale, ainsi que sur la présence d'un relief noté s_{24} vers 2300 m, relief qui scinde *grosso modo* les écoulements issus de l'un et l'autre de ces groupes de zones de départ.

Culminant à 2450 m les pentes p_{22} à p_{24} , d'orientation générale est à sud-est, sont localement raides. Les sections inclinées à plus de 30° sont toutefois suffisamment disjointes pour

nous évoquer un fonctionnement morcelé des avalanches qui s'y produisent, trajectoires g_{22} .

Les panneaux p_{31} à p_{33} sont caractérisés par une orientation nettement plus froide, une raideur plus soutenue, une plus grande continuité transversale et longitudinale des sections escarpées. Dès lors, il est probable que l'activité avalancheuse courante y soit plus intense que dans le secteur voisin : avalanches coulantes parfois volumineuses qui suivent les trajectoires g_{31} à g_{33} . Les phénomènes concernent l'appareil : la pente soutenue et la section transversale devenant nettement *convexe* au-dessous de 2300 m favorisent le développement d'avalanches coulantes vigoureuses, et potentiellement épaisses. Une composante aérienne rapide accompagne ces phénomènes, trajectoires i_{31} à i_{33} .

Sous des conditions nivo-météorologiques sévères, il est probable que se produisent des purges d'ensemble de ces panneaux, conduisant à la formation d'avalanches de plus grande ampleur qui se propagent dans le vallon au-dessous de 2150 m, trajectoires gx_2 , gx_3 .

La remontée mécanique est dans l'emprise des phénomènes courants. On peut considérer schématiquement que les sollicitations sur les pylônes seront liées :

- à des pressions cinétiques élevées dans l'intervalle 2250–2350 m ;
- à des efforts de poussée importants dans les zones d'arrêt des avalanches au-dessous de 2250 m.

2.4.4 Secteurs 4 et 5

C'est un étage de deux petits cirques d'orientation générale nord. Le cirque supérieur (dénommé Combe des Chamois) présente quelques panneaux d'accumulation sensibles au transport de neige par le vent. Leurs mensurations ne permettent pas d'alimenter de grandes avalanches, en particulier la présence d'une large dépression s_4 limite l'extension des écoulements vers l'aval, coulées g_4 . La ligne est concernée, mais la gare d'arrivée est située en dehors de ces coulées.

Le cirque voisin présente des panneaux d'accumulation un peu plus étendus, notés p_{51} , p_{52} . Les pentes orientées nord et nord-ouest alimentent de petites avalanches qui en situation nivométrique courante se déposent vers 2320 m. La mobilisation du panneau p_{51} provoque des avalanches qui franchissent occasionnellement le verrou situé à 2315 m, en suivant la trajectoire g_{51} qui croise la ligne. Des avalanches de neige froide et sèche peuvent atteindre des vitesses appréciables, trajectoire i_{51} . Sous des conditions nivo-météorologiques sévères, les phénomènes issus de ce vallon concernent la remontée mécanique au même titre que ceux issus du secteur 3.

2.4.5 Secteur 6

Il s'agit du revers nord du Crêt de Talière. Un escarpement rocheux d'une centaine de mètres de commandement domine un vaste pierrier. On identifie une juxtaposition de larges panneaux d'accumulation notés p_{61} à p_{64} . Leur distribution convexe, la dénivellation moyenne de la portion raide (50 à 100 m), évoquent des avalanches coulantes d'ampleur moyenne. Si les écoulements g_{61} peuvent fréquemment croiser la ligne, les avalanches suivant les trajectoires g_{62} à g_{64} s'écoulent à bonne distance de l'appareil.

Les avalanches de neige froide émettent occasionnellement des phases aériennes inertielles qui suivent les trajectoires i_{62} à i_{64} . Des effets de souffle au potentiel de dommage limité

peuvent affecter la remontée mécanique, trajectoire i_{62} principalement.

Sous des conditions nivo-météorologiques rares à exceptionnelles, la mobilisation unitaire des panneaux p_6 peut conduire à la formation de grandes avalanches. Les volumes mis en jeu occasionnent des dépôts qui atteignent le replat au-dessous de 2000 m, en suivant les trajectoires gx_6 . Nous considérons que l'appareil, et notamment la gare de départ, sont hors d'atteinte de ces phénomènes.

2.5 Synthèse

Le projet de télésiège des Chaudannes est moyennement exposé au risque d'avalanches. Les gares ne sont pas menacées par les avalanches. Des phénomènes fréquents affectent ponctuellement la ligne entre 2030 m et 2470 m d'altitude. Les phénomènes y ont **un potentiel de dommage assez élevé dans l'intervalle d'altitude 2220–2390 m**. En dehors de cette zone, un positionnement judicieux des pylônes permet de se soustraire aux sollicitations les plus sévères.

Analyse par simulation numérique des avalanches

3.1 Principe et hypothèses du calcul

Les avalanches sont des phénomènes complexes, reposant sur une multitude de processus depuis la chute de neige jusqu'à l'arrêt de l'écoulement. Il est possible de rendre compte des caractéristiques de l'activité avalancheuse d'un couloir à l'aide de modèles relativement simples. L'analyse par simulations numériques se nourrit des éléments précédents, mais est réalisée de manière totalement indépendante et autonome. Notamment, nous n'avons pas recours à une modification des paramètres pour faire coller les résultats du modèle à l'analyse experte. Comme paramètres d'entrée des modèles numériques, nous avons pris en compte :

1. les valeurs des cumuls de neige (voir chapitre 1);
2. le découpage en panneaux tiré de l'analyse experte (voir chapitre 2);
3. les valeurs usuellement obtenues sur d'autres sites similaires, permettant d'obtenir les coefficients mécaniques des simulations;
4. des règles expertes tirées de l'utilisation de ces phénomènes dans la reconstitution de l'activité avalancheuse dans des sites bien documentés et dans la simulation de phénomènes extrêmes.

Nous attirons l'attention du lecteur qu'une tendance lourde de l'ingénierie est de recourir massivement aux codes numériques pour le calcul des caractéristiques des écoulements. Malheureusement, l'état de l'art en matière de calcul numérique reste fragile, les incertitudes sont grandes, les résultats des calculs sont très sensibles au choix des paramètres. Les calculs présentés ci-dessous n'ont de sens que s'ils sont regardés de façon critique et contradictoire avec l'analyse experte. C'est ce travail de confrontation qui permet d'aboutir à la définition des efforts le long de la ligne.

3.2 Modèles utilisés pour le calcul des avalanches coulantes

3.2.1 Origine et historique du modèle

Pour les avalanches coulantes, nous avons utilisé le code de calcul AVAC fondé sur la résolution des équations du mouvement de Saint-Venant avec une loi de frottement de type Voellmy. Il s'agit d'un code numérique développé par Toraval. La première version du code a été créée en 1993, et dérivait du code aux volumes finis créé par Jean-Paul Vila¹. La première version a été utilisée en ingénierie dès 1997, puis a connu de nombreuses évolutions². Plus d'information sur ce modèle et le calcul des pressions sont disponibles sur le site de [Toraval](http://www.toraval.ch). Nous utilisons actuellement la version AVAC 4.1. Depuis l'été 2019, le code AVAC a été rendu librement téléchargeable depuis github; voir le site :

www.toraval.ch/avac/

pour plus d'informations. À notre connaissance, AVAC est le plus ancien code de dynamique des avalanches³.

AVAC 4 fait appel à la bibliothèque fortran [Clawpack](#) spécialisée dans les méthodes « volumes finis » pour les problèmes hyperboliques. Pour la résolution des équations de Saint-Venant, AVAC utilise un solveur développé par David George⁴.

AVAC est un code qui réalise les calculs en parallèle sur plusieurs « threads » du processeur, ce qui lui permet d'être beaucoup plus rapide que les codes classiques non parallélisés qui tournent sur un seul « thread ». Le maillage de calcul est composé de rectangles, dont la taille peut varier au cours du temps (maillage adaptatif).

3.2.2 Équations du mouvement

AVAC 4 est un code bidimensionnel qui permet de calculer l'évolution d'une masse de neige sur une topographie complexe. Les équations du mouvement sont les équations de Saint-Venant, c'est-à-dire un jeu d'équations moyennées selon la hauteur décrivant la conservation de la masse et de la quantité de mouvement. AVAC travaille dans un système de coordonnées cartésiennes avec l'axe des z orienté selon la verticale, et les axes x et y alignés avec les directions du système de géoréférencement employé (ici Lambert 93).

En un point (x, y) donné du fond topographique atteint par l'avalanche, on caractérise celle-ci par sa vitesse moyenne $\bar{u}(x, y, t)$ et sa hauteur $h(x, t)$. La masse volumique est sup-

1. Vila, J.P., *Sur la théorie et l'approximation numérique des problèmes hyperboliques non-linéaires, application aux équations de Saint-Venant et à la modélisation des avalanches denses*, thèse de doctorat, Paris VI, 1986.

2. L'article originel date de 1994: Ancey, C., Modélisation des avalanches denses, approches théorique et numérique, *La Houille Blanche*, 5-6, 25-39, 1994. Article en ligne sur le site www.toraval.ch.

3. AVAC précède de quinze années le code commercial RAMMS employé par les bureaux d'ingénieurs. RAMMS est fondé sur les mêmes équations qu'AVAC, mais ne bénéficie pas des avancées dans le domaine numérique comme le maillage adaptatif ou le calcul parallélisé. RAMMS utilise un solveur de type HLLC, qui est également considéré comme dépassé de nos jours.

4. George, D. L., Augmented Riemann solvers for the shallow water equations over variable topography with steady states and inundation, *Journal of Computational Physics*, 227, 3089-3113, 2008. George, D. L., Adaptive finite volume methods with well-balanced Riemann solvers for modeling floods in rugged terrain: Application to the Malpasset dam-break flood (France, 1959), *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 66, 1000-1018, 2011.

posée constante et égale à :

$$\rho = 300 \text{ kg/m}^3.$$

L'avalanche est soumise à un frottement de type Voellmy (ou Coulomb) ; la contrainte pariétale τ_p est une fonction *ad hoc* censée traduire deux processus : un frottement coulombien (comportement granulaire de l'avalanche) et une résistance inertielle (dissipation visqueuse, frottement de l'air, effet centrifuge, etc.) exprimée comme une fonction quadratique de la vitesse :

$$\tau_p = \mu\sigma + \rho g \frac{\bar{u}^2}{\xi}, \quad (3.1)$$

avec :

- $\sigma = \rho gh \cos \theta$ la contrainte normale,
- θ la pente locale,
- μ et ξ les coefficients de frottement de Voellmy.

Quand $\xi \rightarrow \infty$, le modèle de Voellmy dégénère en modèle de Coulomb.

3.2.3 Paramètres utilisés pour le calcul

Voici les paramètres utilisés dans le calcul :

- Les deux paramètres de Voellmy μ et ξ doivent être ajustés à partir des données de terrain (en calant la distance d'arrêt à partir d'information historique) ou par hypothèse (à dire d'expert, en prenant des valeurs obtenues pour des sites similaires). Il s'agit plus d'une modélisation conceptuelle du frottement que physique car les paramètres ne sont pas mesurables. Le tableau 3.1 reporte les valeurs utilisées pour les calculs.
- Pour l'évaluation de cette épaisseur et du volume initial de neige, nous avons utilisé les hypothèses suivantes :

- Dans le code AVAC 4, les épaisseurs h_0 reportées dans le tableau 3.1 correspondent aux cumuls de neige sur trois jours pour un sol horizontal à 1600 m d'altitude. De cette information, on tire l'épaisseur moyenne d_0 de la couche de neige déclenchée dans la zone de départ :

$$d_0 = f(h_0, \Delta z, \theta),$$

à l'aide de la méthode Burkard-Salm⁵ (BS).

- Des corrections peuvent être apportées en fonction de la différence d'altitude Δz (avec le poste où est mesurée la hauteur h_0) et de la pente de chaque panneau θ . Dans le cas présent, un gradient hypsométrique de 3 cm par tranche de 100 m a été appliqué (voir § 1.4).
- L'influence du vent n'a pas été prise en compte pour les phénomènes extrêmes. En effet, il est difficile, si ce n'est impossible, d'estimer les zones à ablation ou dépôt avec précision. Compte tenu des caractéristiques du site (raideur des zones d'accumulation, face ouverte), il est peu probable que de grosses quantités de neige instable se forment sans qu'il y ait une ou plusieurs purges naturelles au cours de l'épisode. De plus, les gros coups de neige se produisent lors du passage de grosses dépressions atlantiques ou de retours d'est, accompagnés de vents très violents en altitude.

5. André Burkard und Bruno Salm, *Die Bestimmung der mittleren Anrissmächtigkeit d_0 zur Berechnung von Fliesslawinen*, Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos, 1992. Traduction française sur le site www.toraval.ch.

- En règle générale, ces vents sont peu favorables à un chargement massif de neige dans les conditions climatiques actuelles sans qu’il y ait une purge naturelle durant les chutes de neige.
- Toutefois, compte tenu du changement climatique et de la tranche d’altitude du site (une grande partie du site sous la cote 2000 m), on ne peut exclure des scénarios atlantiques avec des neiges plus humides, et donc des conditions de chargement différentes de celles actuellement observées sur le site. Ces remarques justifient qu’aucune minoration des cumuls de neige n’ait été réalisée.
- Pour localiser les zones de départ, nous avons utilisé les zones obtenues par photo-interprétation. La zone de départ est renseignée sous la forme d’un « shapefile » à partir des éléments fournis par l’analyse experte (voir chapitre 2). L’épaisseur initiale de neige d_0 dans la zone de départ varie fortement en fonction de la pente locale.
- Pour les calculs d’avalanche, nous devons évaluer le volume de neige mobilisable par l’avalanche et à cet effet, nous prenons comme épaisseur de neige d_0 dans la zone de départ les cumuls de neige sur 3 jours (on suppose qu’il y a une défaillance du PIDA).
- Pour la topographie, nous avons utilisé le modèle numérique de terrain au pas de 2 m tiré du lidarHD de l’IGN. Le modèle de terrain représente l’état du terrain nu en été à la date du 23 septembre 2021 (date d’acquisition du nuage de points).
- Les calculs ont été réalisés avec une maille de 2 m, mais AVAC permettant le raffinement automatique de maillage en cours de calcul, la maille de calcul a été affinée jusqu’à 50 cm localement.
- L’influence du vent n’a pas été prise en compte pour les phénomènes extrêmes. En effet, il est difficile, si ce n’est impossible, d’estimer les zones à ablation ou dépôt avec précision. Compte tenu des caractéristiques du site (raideur des zones d’accumulation, face ouverte), il est peu probable que de grosses quantités de neige instable se forment sans qu’il y ait une ou plusieurs purges naturelles au cours de l’épisode. De plus, les gros coups de neige se produisent lors du passage de grosses dépressions atlantiques, accompagnées de vents très violents en altitude.

Tableau 3.1 – Épaisseur de neige d_0 à 1600 m utilisée pour estimer l’épaisseur de la cassure par la méthode BS, l’épaisseur totale H du manteau neigeux (selon la verticale), les coefficients de Voellmy μ et ξ en fonction de la période de retour.

	$T = 30$ ans	$T = 100$ ans
d_0 (cm)	105	120
H (cm)	190	215
μ	0,275	0,225
ξ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	800	1000

3.2.4 Autres hypothèses et rendu du calcul

Les résultats des calculs sont reportés par la suite sous forme de cartes. Quelques remarques générales pour accompagner la lecture de ces cartes et en comprendre la portée :

- Les cartes ont été réalisées pour deux périodes de retour :
 - $T = 30$ ans, ce qui correspond à l’acceptation d’un risque « industriel » plus ou moins important. Prendre une période de retour $T = 30$ ans implique en effet que le maître d’ouvrage accepte la survenue d’une défaillance majeure sur le télésiège

- au cours de sa durée d'exploitation (c'est-à-dire la période d'amortissement usuelle pour des remontées mécaniques);
- $T = 100$ ans, ce qui correspond au risque accepté pour des habitations permanentes en France dans le cadre actuel des Plans de prévention des risques (PPR).
 - Compte tenu de la résolution du modèle numérique de terrain et de la capacité actuelle des modèles dynamiques d'avalanche, la précision du calcul est au mieux de l'ordre de 10 m pour les emprises reportées.
 - Les cartes reportent les emprises d'avalanches comme si tous les panneaux des zones de départ s'étaient simultanément déclenchés. Naturellement, en pratique, un tel cas de figure ne se produit pas nécessairement mais, en l'absence d'observations suffisantes, nous n'avons pas discriminé les cas où les panneaux fonctionnent collectivement de ceux où seule une partie de la zone de départ est mise en mouvement.
 - Les cartes reportent les valeurs maximales (dans le temps) de hauteur et de pression cinétique au sein de l'avalanche. On distingue différentes formes de pression, et on se reportera à la section 3.2.5 pour plus d'informations.
 - Les effets de souffle accompagnant la partie dense de l'écoulement ne sont pas reportés. Ils peuvent plâtrer des surfaces et occasionner des dommages mineurs (moins de 1 kPa), qui ne sont pas significatifs pour une structure telle qu'un télésiège.

La réglementation pourrait à court terme imposer la prise en compte de la reptation dans le calcul des efforts causés par la neige et les avalanches. Cela imposerait alors de considérer les efforts lents causés par le fluage et le glissement des dépôts d'avalanche. Dans des circonstances exceptionnelles comme pour la télécabine du Lys à Cauterets, des pylônes peuvent être endommagés ou emportés par des culots d'avalanche en glissement, et la combinaison de pressions élevées et d'épaisseurs de neige de plusieurs mètres conduit à des efforts très importants pour les structures (pour le P9 du Lys, le moment de force a été estimé à 5 ± 1 MN·m). On sait que de tels efforts sont exceptionnellement possibles et on sait les estimer grossièrement⁶, mais on ne sait rien sur leur fréquence et les raisons de la déviation significative par rapport aux valeurs usuelles. Jusqu'à présent, l'état de l'art les a considérés comme des horsains⁷, et en pratique, on ne les a pas considérés. Nous n'avons pas considéré un scénario « Cauterets » ici.

3.2.5 Pression de l'avalanche

Définition de la pression d'une avalanche

Dans les figures ci-après, nous reporterons les valeurs maximales (dans le temps) de vitesse et de pression au sein de l'avalanche. Il nous faut dire un mot sur la pression pour bien comprendre ce que l'on calcule.

La pression de l'avalanche est composé de deux termes :

- Le premier est la *pression cinétique*, qui est définie comme :

$$p_c = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^2, \quad (3.2)$$

6. Ancey, C., and V. Bain, Dynamics of glide avalanches and snow gliding, *Reviews of Geophysics*, **53**, 745–784, 2015.

7. Ancey, C., Are there “dragon-kings” events (i.e. genuine outliers) among extreme avalanches?, *European Physical Journal Special Topics*, **205**, 117–129, 2012. Ancey, C., Les avalanches extrêmes sont-elles des horsains?, *Neige & Avalanches*, **133**, 4–9, 2011.

avec \bar{u} la vitesse moyenne de l'avalanche et ρ la masse volumique locale. Cette pression au sein de l'avalanche ne permet pas de déduire instantanément la pression d'un impact car celle-ci dépend d'autres paramètres comme la forme de l'objet, la direction de sollicitation, et le mode d'interaction entre l'objet et l'avalanche. Selon les phénomènes (p. ex. avalanche inertielle), les pressions peuvent se caractériser par un spectre avec des fréquences caractéristiques de l'ordre de 10–100 Hz et des pics de surpression pouvant atteindre trois fois la pression moyenne.

- Le second terme est abusivement appelée *pression hydrostatique*, car la pression est exprimée comme une fonction linéaire de la hauteur d'écoulement h . Cette pression est de la forme⁸ :

$$p_h = \kappa \rho g h \cos \theta, \quad (3.3)$$

avec :

- κ un coefficient traduisant l'interaction de l'écoulement et son environnement (typiquement $1 \leq \kappa \leq 10$),
- g la gravité, et
- θ la pente locale.

La pression totale sein de l'avalanche est donc définie comme $p = p_c + p_h = f(\bar{u}, h)$.

Pression d'impact sur un pylône

Pour un pylône de faible dimension par rapport à la largeur de l'avalanche (ce qui est le cas usuel), on peut considérer que la pression d'impact comprend une contribution cinétique (3.2) et d'une contribution hydrostatique (3.3) avec $\kappa = 8$ dans le cas d'avalanche gravitaire et $\kappa = 0$ dans le cas d'avalanche inertielle. La méthode VSG⁹ préconise de prendre en compte la remontée de l'avalanche contre le pylône (*runup*) dans le cas d'avalanche inertielle. Comme notre approche est plus conservatrice que la méthode originelle VSG, nous n'incluons plus cette composante.

Pression d'impact sur un bâtiment

La pression au sein de l'avalanche permet d'apprécier la dynamique de l'écoulement, mais n'est pas suffisante à elle-seule à calculer les efforts sur un bâtiment tel qu'une gare, c'est-à-dire la pression d'impact sur une façade ou tout autre élément architectural. Il faut connaître le détail de chaque construction pour fournir une estimation précise de la poussée de l'avalanche au moment de l'impact. En l'absence d'information, une règle empirique est de prendre $p = 2p_c$ comme estimation de la pression à l'impact d'un bâtiment dans le cas d'une avalanche en régime inertiel. Cet ordre de grandeur peut être dépassé en cas de concentration du flux ou de transport d'objet (effet « coup de bélier » en cas de mobilisation de troncs ou de débris de grande taille).

Il ne faut pas se faire d'illusion sur la précision des calculs dans la zone d'arrêt des avalanches. D'une part, nous ignorons la végétation et les bâtiments dans le modèle numérique de terrain, or ceux-ci peuvent influencer sur la constitution des dépôts (en freinant ou en déviant les flux de neige). D'autre part, les conditions d'arrêt d'une avalanche sont sensibles aux détails

8. Kyburz, M., B. Sovilla, J. Gaume, and C. Ancey, Physics-based estimates of drag coefficients for the impact pressure calculation of dense snow avalanches, *Engineering Structures*, **254**, 113478, 2022.

9. Salm, B., A. Burkard, und H. Gubler, *Berechnung von Fliesslawinen, eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen*, Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung (Davos), 1990. Traduction française sur le site www.toraval.ch.

de la loi de frottement, or une loi de frottement empirique comme la loi de Voellmy ne décrit qu'approximativement ce qui se passe durant la phase d'arrêt. L'erreur commise est faible tant qu'on s'intéresse aux caractéristiques de l'avalanche dans la zone d'écoulement car dans ce cas, la dynamique de l'avalanche dépend principalement de la pente locale, et peu du détail de la loi de frottement. Cela n'est plus le cas dans la zone d'arrêt de l'avalanche.

Notons que pour les avalanches coulantes en régime inertiel, la partie dense de l'écoulement est généralement accompagnée d'effets de souffle. Ceux-ci peuvent plâtrer des façades et occasionner des dommages mineurs (moins de 3 kPa) à des bâtiments, mais ils ne sont en général pas significatifs pour le dimensionnement d'un bâti. Ils ne sont pas calculés ici. Ces effets de souffle peuvent être dangereux pour la sécurité des personnes (comme le sont les coups de vent brutaux).

3.3 Résultats des simulations numériques

3.3.1 Avalanches naturelles rares ($T \sim 30$ ans)

↪ Voir cartes 3.3 et 3.2.

Pour les avalanches trentennales, la ligne traverse une multitude de zones avalancheuses, mais elle évite les secteurs les plus dangereux sous le Bec de l'Aigle et le Crêt de Talière. Les deux gares ne sont pas concernées par les avalanches. Comme le montrent les profils de la figure 3.1, le niveau de pression d'impact est généralement modéré (moins de 30 kPa), mais il est fort sur certains secteurs du versant oriental de la Pointe des Chaudannes, avec des pressions pouvant atteindre 50 kPa; compte tenu d'un adoucissement de pente, les hauteurs d'écoulement (avalanche en fin de vie) peuvent être importantes (jusqu'à 4 m) sous le col de Charroute.

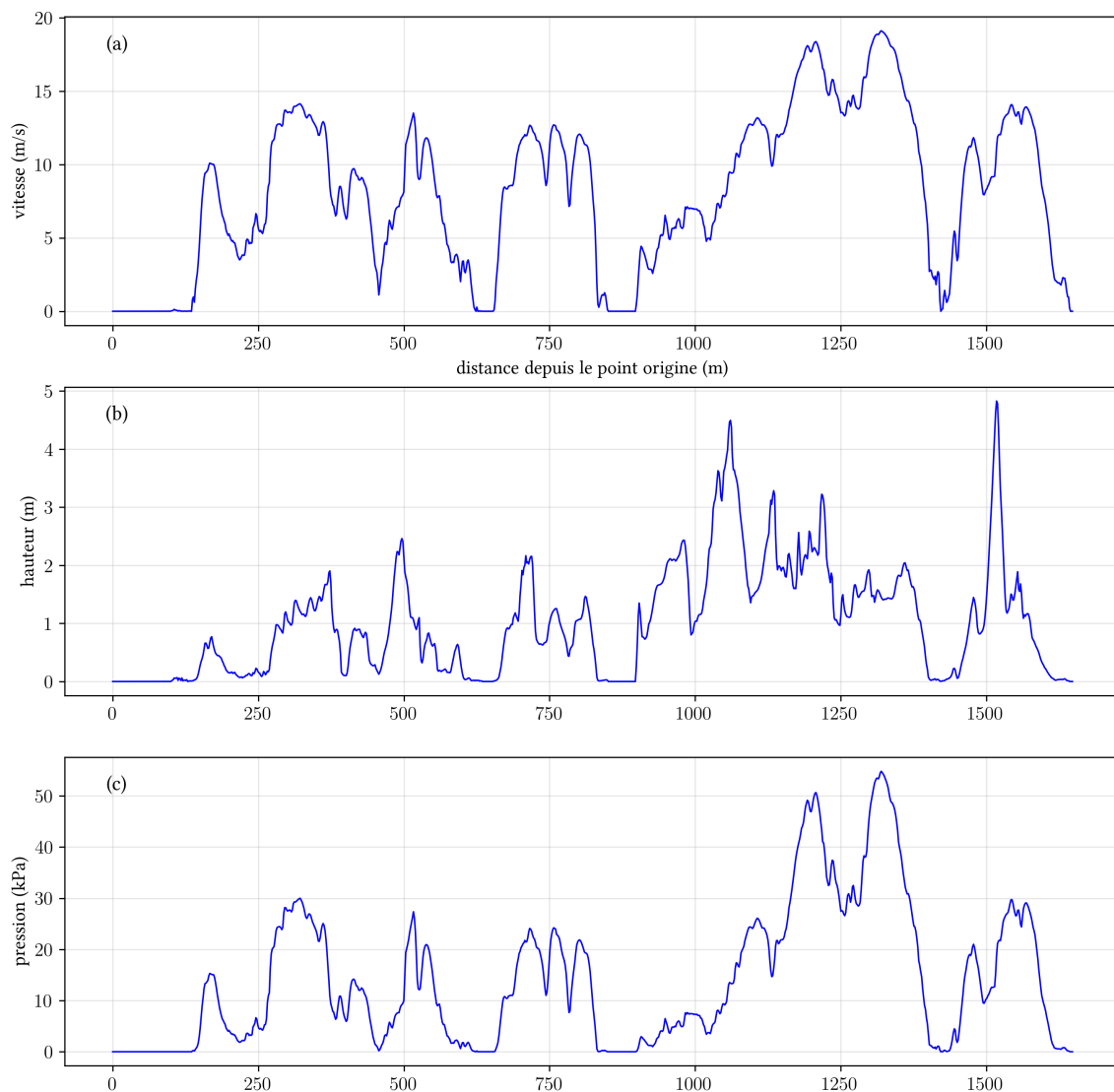


Figure 3.1 – Profils de (a) vitesse maximale [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], (b) hauteur maximale [m], et (c) pression cinétique maximale [kPa] le long de la ligne. L'abscisse $x = 0$ correspond à la gare de départ. Période de retour considérée: $T = 30$ ans.

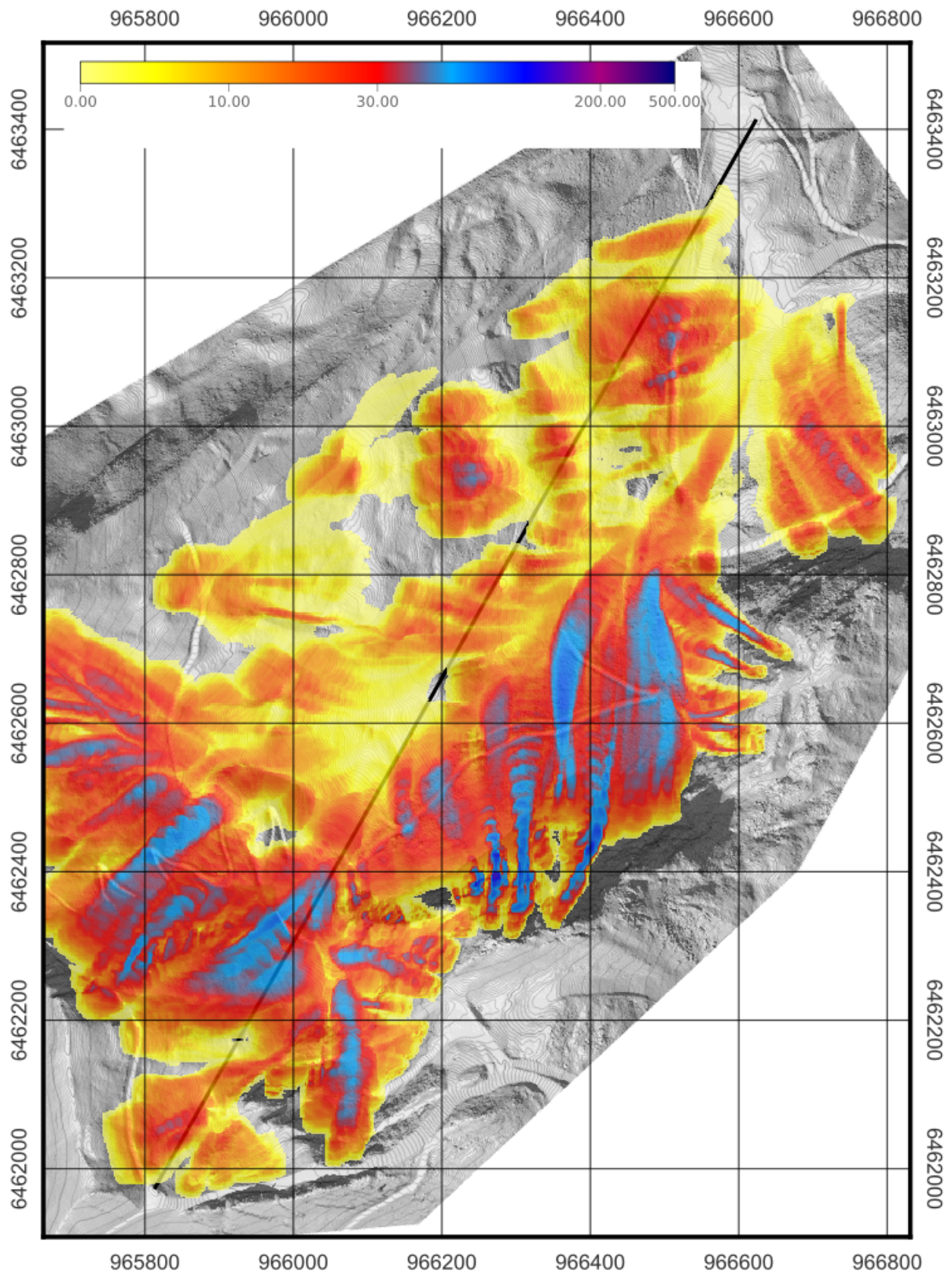


Figure 3.2 – Carte des simulations numériques montrant l’emprise maximale et la distribution des pressions cinétiques $p = \frac{1}{2}\rho\bar{u}^2$ maximales au sein de l’avalanche pour $T = 30$ ans et des avalanches coulantes naturelles (hors PIDA). Échelle 1:10 000. Système de coordonnées Lambert 93.

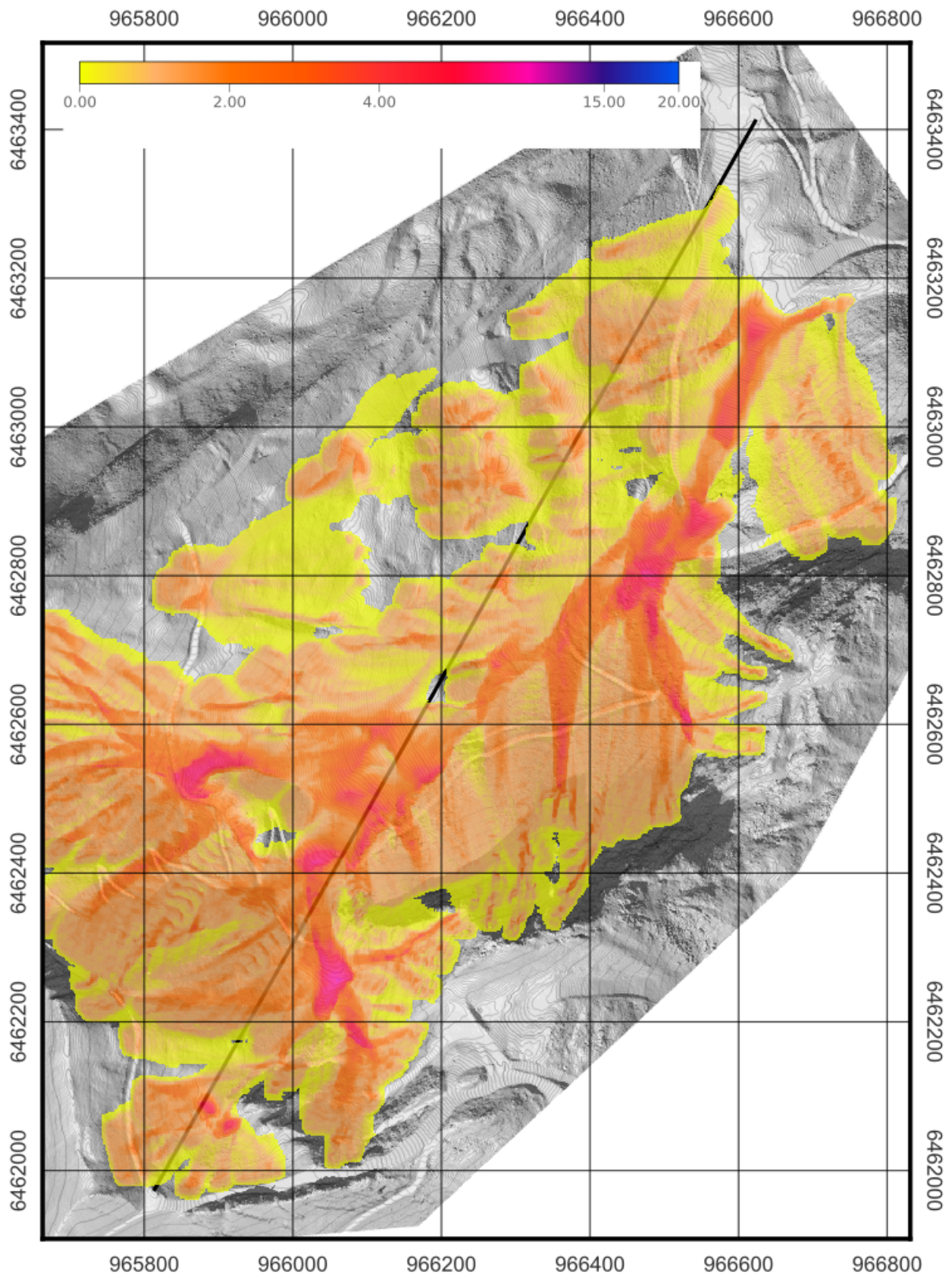


Figure 3.3 – Carte des simulations numériques montrant l’emprise maximale et la variation des hauteurs maximales pour $T = 30$ ans et des avalanches coulantes naturelles (hors PIDA). Échelle 1:10 000. Système de coordonnées Lambert 93.

3.3.2 Avalanches naturelles exceptionnelles ($T \sim 100$ ans)

↪ Voir cartes 3.6 et 3.5.

Les grandeurs calculées pour $T \sim 100$ ans sont en continuité avec celles obtenues pour les avalanches $T \sim 30$ ans en ce qui concerne les emprises et les zones menacées. Les pressions d'impact sont un peu plus élevées (80 kPa au lieu de 50 kPa). Au niveau de l'adoucissement de pente sous le col de Charroute, l'avalanche peut présenter à la fois un pic de pression important au passage du front (50 kPa) et des hauteurs de dépôt importantes (jusqu'à 5 m).

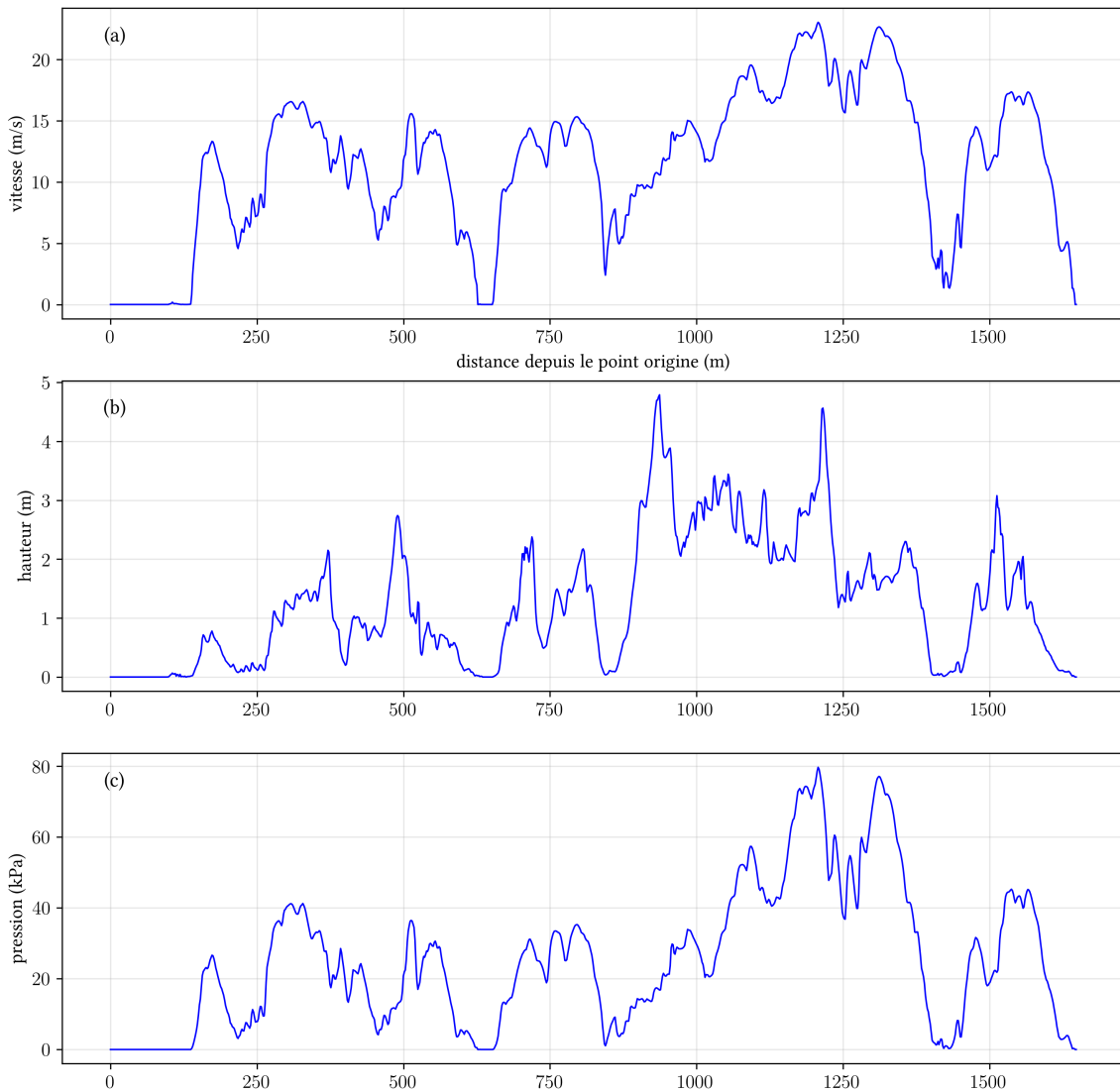


Figure 3.4 – Profils de (a) vitesse maximale [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$], (b) hauteur maximale [m], et (c) pression cinétique maximale [kPa] le long de la ligne. L'abscisse $x = 0$ correspond à la gare de départ. Période de retour considérée: $T = 100$ ans.

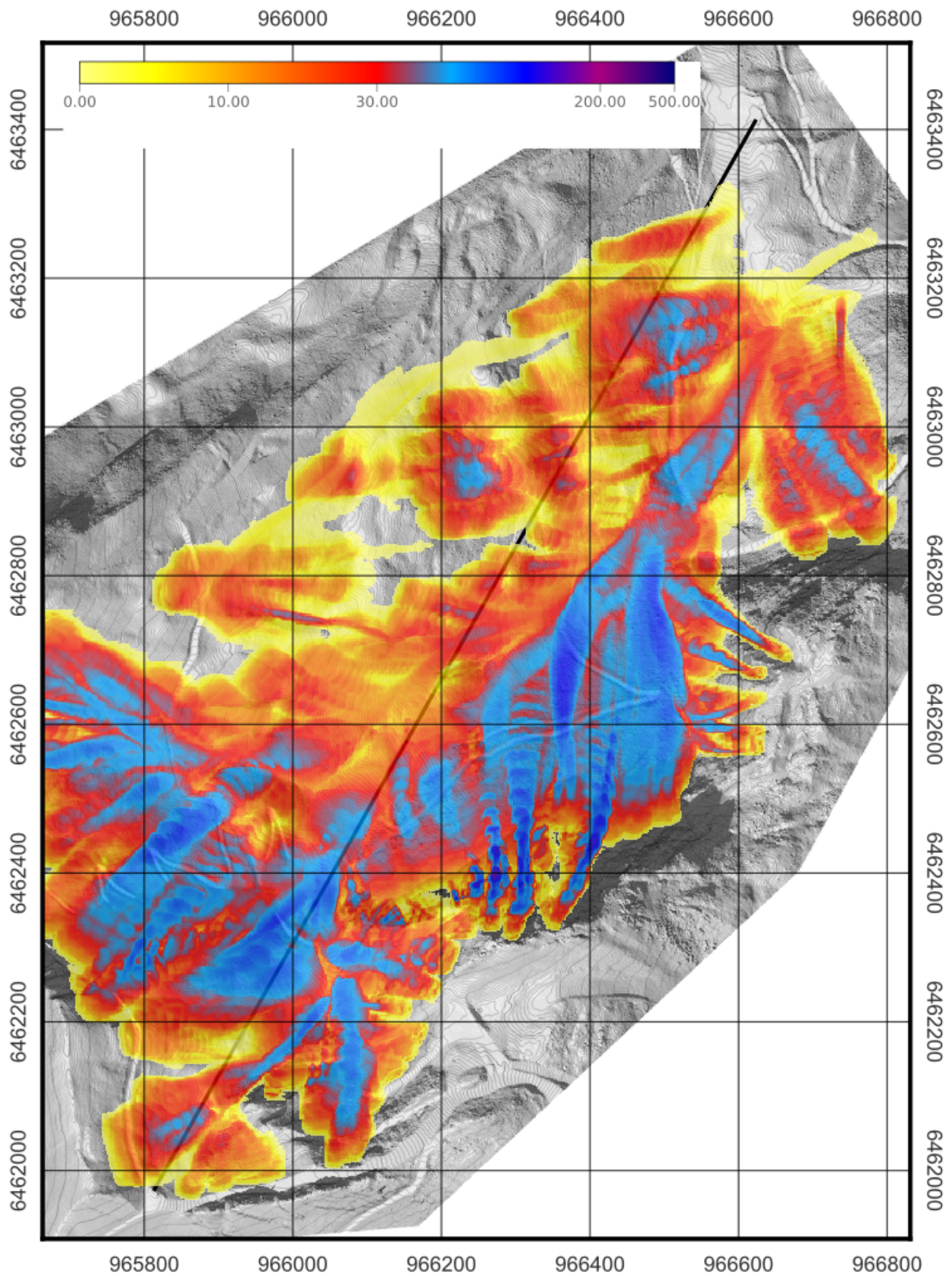


Figure 3.5 – Carte des simulations numériques montrant l’emprise maximale et la distribution des pressions cinétiques $p = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^2$ maximales au sein de l’avalanche pour $T = 100$ ans pour les avalanches coulantes naturelles (hors PIDA). Échelle 1:10 000. Système de coordonnées Lambert 93.

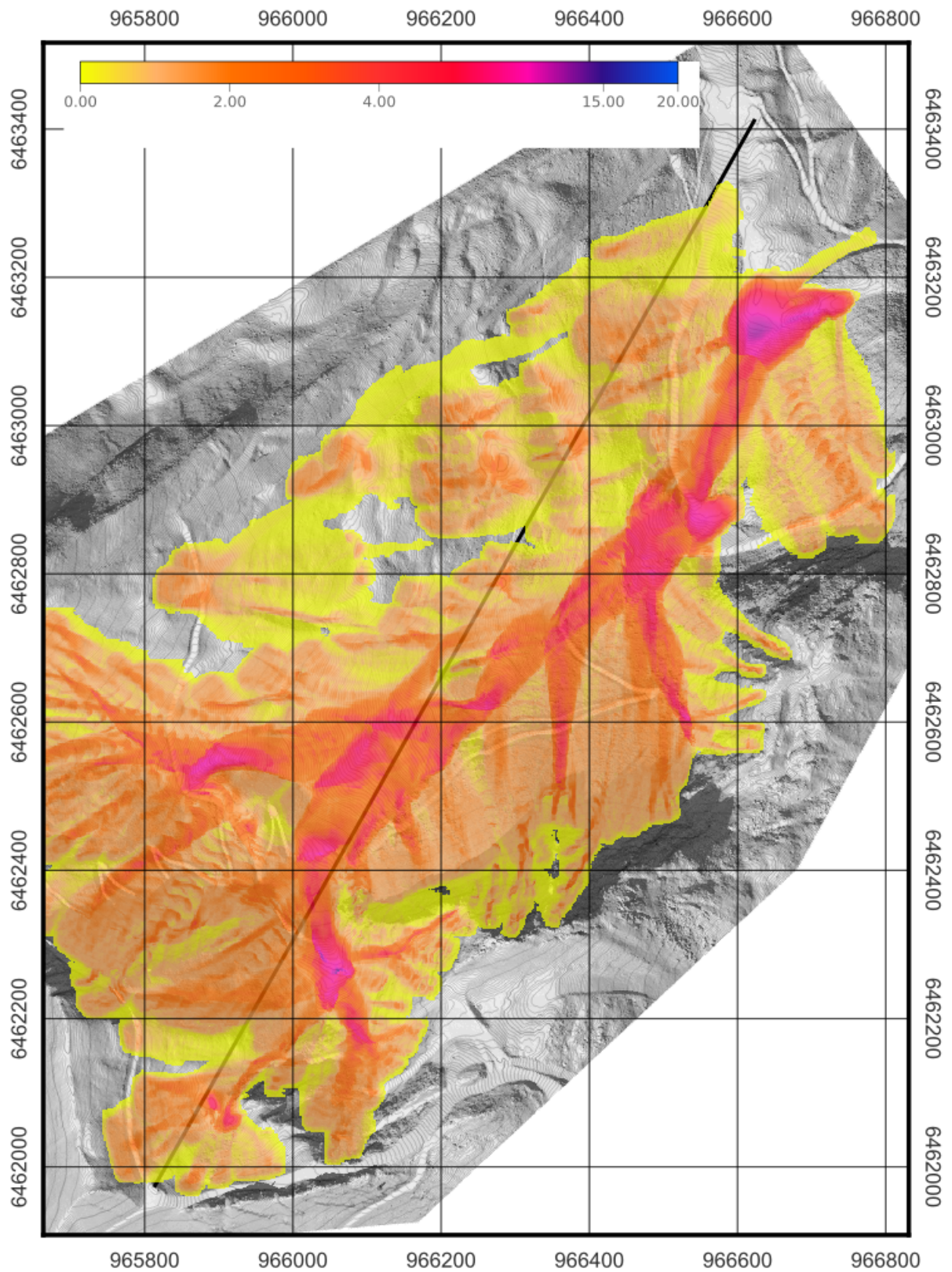


Figure 3.6 – Carte des simulations numériques montrant l’emprise maximale et la variation des hauteurs maximales pour $T = 100$ ans et des avalanches coulantes naturelles (hors PIDA). Échelle 1:10 000. Système de coordonnées Lambert 93.

Synthèse

4.1 Niveau de risque et choix du scénario de référence

La ligne du télésiège est soumise localement à un risque d'avalanche fort. Le reste de la ligne (la plus grande partie) est soumis à un risque modéré. Les deux gares ne sont pas exposées au risque d'avalanche.

La réalisation d'un PIDA réduit sensiblement le risque encouru par le télésiège. Les calculs ont néanmoins été conduits avec l'hypothèse d'un PIDA défaillant.

Il faut rappeler que le choix du scénario pour le dimensionnement des pylônes est à la discrétion du maître d'ouvrage. Il est motivé notamment par l'acceptation d'un risque « industriel » plus ou moins important :

- prendre une période de retour $T = 30$ ans implique que le maître d'ouvrage accepte la survenue d'une défaillance majeure sur son appareil au cours de sa durée d'exploitation (au moins la période d'amortissement usuelle) ;
- prendre $T = 100$ ans implique qu'il considère que le risque à considérer est similaire à celui accepté pour des habitations permanentes en France dans le cadre actuel des PPR.

4.2 Diagrammes d'effort

Les valeurs indiquées dans les tableaux 4.1 à 4.2 fournissent les caractéristiques des avalanches (hauteur d'écoulement et pression d'impact de l'avalanche) pour les tronçons T1 à T15 en fonction de la période de retour retenue par le maître d'ouvrage. Ces tableaux fournissent aussi l'épaisseur du manteau neigeux établie au § 1.3.3. Pour plus d'informations sur les grandeurs employées ici et le calcul des efforts, on se reportera utilement au document

www.toraval.fr/telec/addendum.pdf.

Voici le détail des résultats pour chacun des deux scénarios :

Projet: TSD des Chaudannes

Les Karellis

Diagramme généré par vulnOSE.sh

Date: 27 novembre 2025

Réf.: DCE TDS Chaudannes

Sources: r.avac 3.1.5

Système de coordonnées: Lambert93

Position G1: x = 966622, y = 6463411

Position G2: x = 965814, y = 6461975

Hypothèses de calcul:

Période de retour considérée: 30 ans

défaillance du PIDA

Épaisseur de neige au sol: 190 cm

Type d'avalanche: coulante

Origine des abscisses: X_{G1-1}

Incertitude sur les épaisseurs au sol: ± 40 cm

Incertitude sur les pressions: ± 5 kPa

Incertitude sur les épaisseurs: ± 30 cm

Incertitude sur les directions: $\pm 20^\circ$

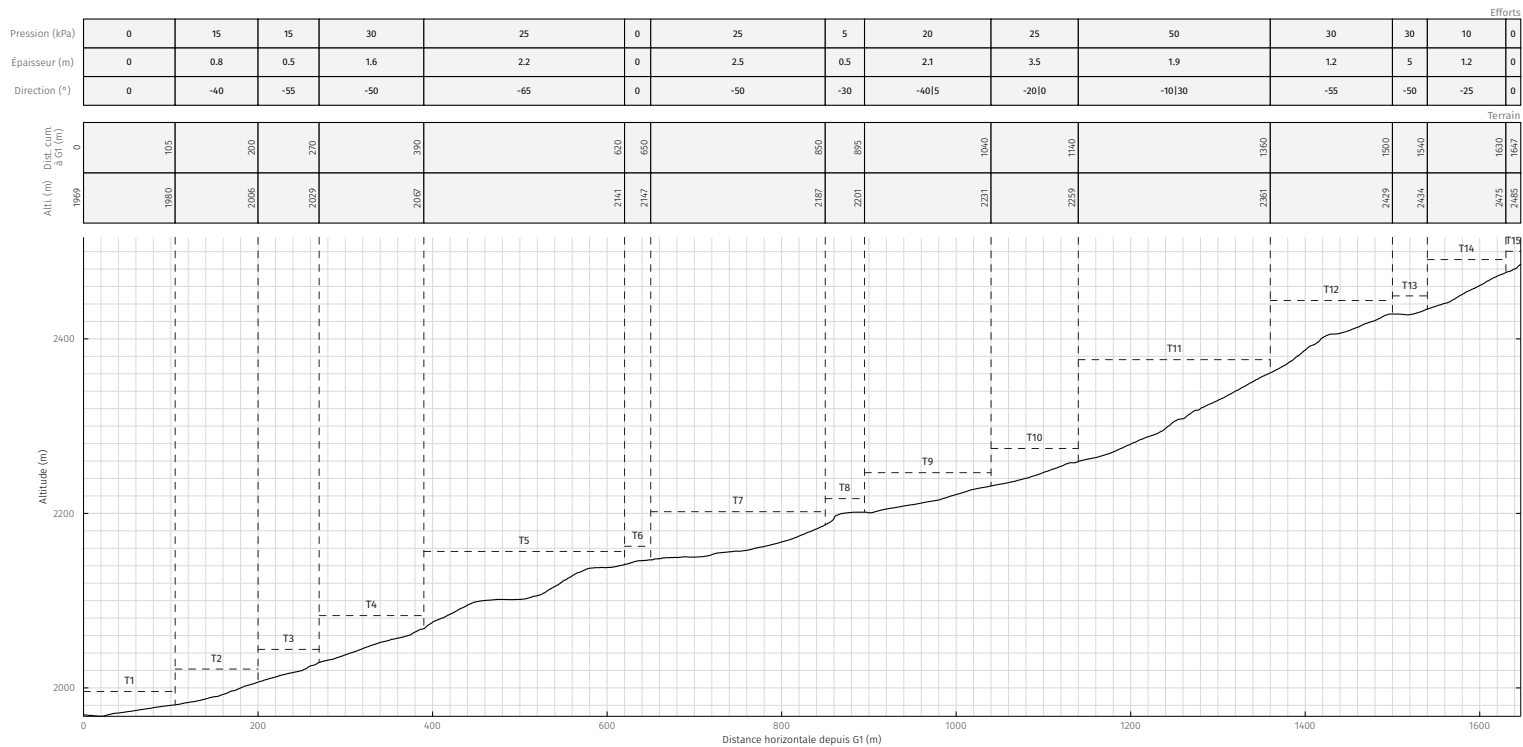


Figure 4.1 – Avalanches rares pour le TSD ($T \sim 30$ ans).



**Projet: TSD des Chaudannes
Les Karellis**

Diagramme généré par vulnOSE.sh

Date: 27 novembre 2025

Réf.: DCE TDS Chaudannes

Sources: r.avac 3.1.5

Système de coordonnées: Lambert93

Position G1: x = 966622, y = 6463411

Position G2: x = 965814, y = 6461975

Hypothèses de calcul:

Période de retour considérée: 100 ans

défaillance du PIDA

Épaisseur de neige au sol: 215 cm

Type d'avalanche: coulante

Origine des abscisses: x_{G1-1}

Incertitude sur les épaisseurs au sol: ± 40 cm

Incertitude sur les pressions: ± 5 kPa

Incertitude sur les épaisseurs: ± 30 cm

Incertitude sur les directions: $\pm 20^\circ$

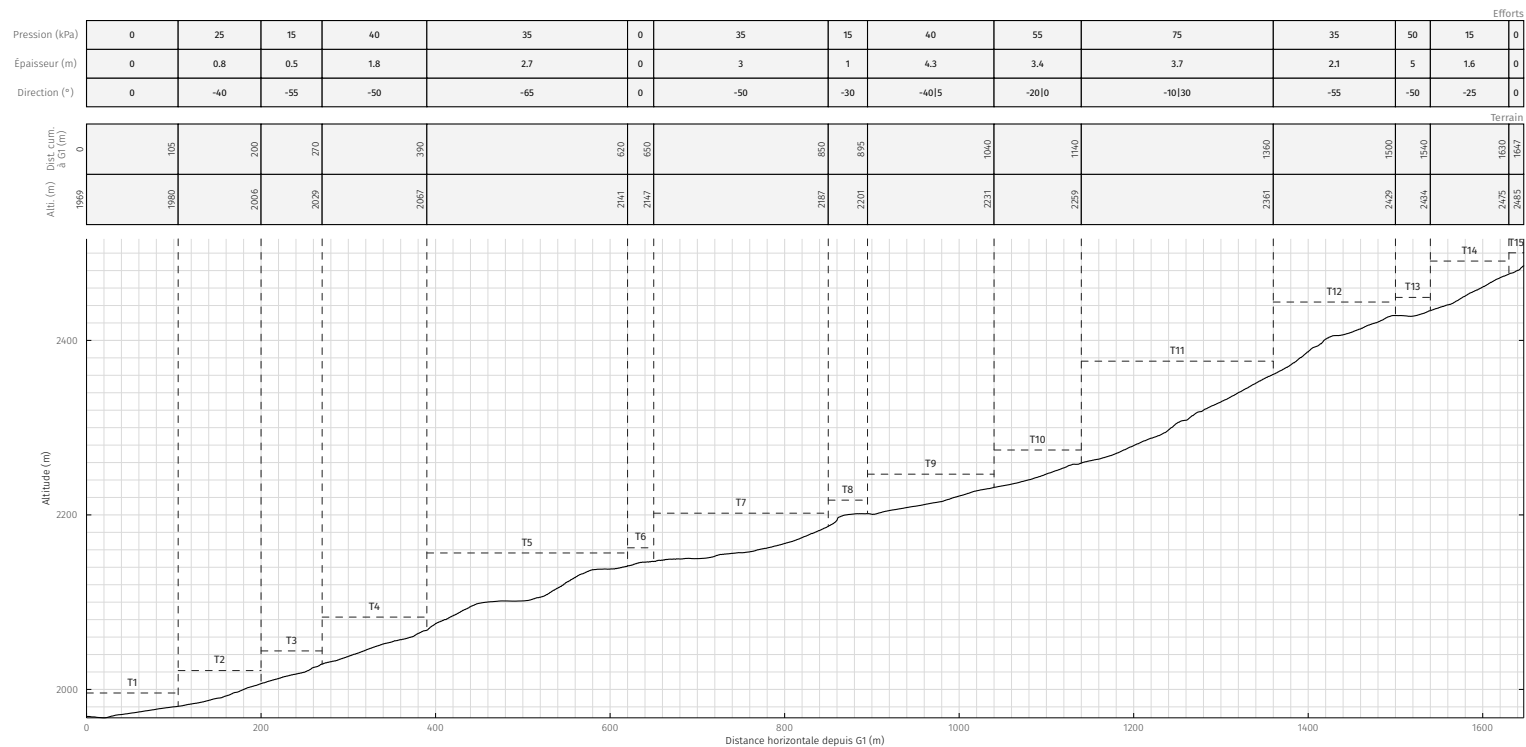


Figure 4.2 – Avalanches exceptionnelles pour le TSD ($T \sim 100$ ans).

Cette étude a été réalisée par Toraval groupement d'ingénieurs-conseils.



<http://www.toraval.fr>

<http://www.toraval.ch>

Toraval Suisse : Chemin des Chardonnerets 13, CH-1008 Prilly

Toraval France : 2838 route des Annuits, F-73 400 Ugine

- chargés d'étude:
 - Christophe Ancey (ancey@toraval.ch)
 - Vincent Bain (bain@toraval.fr)
- commanditaire de l'étude : Régie autonome des remontées mécaniques des Karellis
- maîtrise d'œuvre : ERIC
- le corps de ce rapport contient 55 pages.
- pièce annexée : représentation tridimensionnelle

http://telec.toraval.fr/3d/chaudannes_2025.html