

PC 0380202220001

07 AVR. 2022



Ingénieurs-conseils

---

**Étude des risques d'avalanches sur le  
projet de TSCD des Sûres  
Station d'Auris-en-Oisans, Isère**

---

Rapport

---

Mars 2022

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Contexte nivo-météorologique</b>	<b>5</b>
1.1	Données météorologiques	5
1.2	conditions climatiques	6
1.3	Analyse des précipitations	6
1.3.1	Méthode	6
1.3.2	Aperçu général sur la chronique des précipitations de neige	7
1.3.3	Analyse par la méthode du renouvellement	9
1.3.4	Analyse par la théorie des valeurs extrêmes	12
1.4	Épaisseur du manteau neigeux	14
1.5	Synthèse	16
<b>2</b>	<b>Analyse du risque d'avalanche</b>	<b>17</b>
2.1	Méthodes	17
2.2	Données	17
2.3	Éléments historiques	18
2.3.1	Enquête permanente sur les avalanches	18
2.3.2	Carte de localisation des phénomènes d'avalanches	19
2.3.3	PIDA et témoignage du service des pistes	22
2.3.4	Synthèse	22
2.4	Analyse spatiale du risque d'avalanche	25
2.4.1	Principe	25
2.4.2	Secteur des Sûres	25
2.4.3	Secteur du Signal de l'Homme	28
2.5	Synthèse	32
<b>3</b>	<b>Analyse par simulation numérique des avalanches</b>	<b>33</b>

---

3.1	Principe et hypothèses du calcul . . . . .	33
3.1.1	Modèle utilisé pour le calcul . . . . .	33
3.1.2	Paramètres utilisés pour le calcul . . . . .	34
3.1.3	Hypothèses et rendu du calcul . . . . .	35
3.2	Résultats des simulations numériques . . . . .	37
3.2.1	Avalanches rares ( $T \sim 30$ ans) dans le cadre d'un PIDA . . . . .	37
3.2.2	Avalanches naturelles rares ( $T \sim 30$ ans) . . . . .	40
3.2.3	Avalanches naturelles exceptionnelles ( $T \sim 100$ ans) . . . . .	45
3.2.4	Avalanches maximales vraisemblables ( $T > 100$ ans) . . . . .	50
4	<b>Synthèse</b>	<b>53</b>

# Objet de l'étude

## Contexte

LA STATION D'AURIS-EN-OISANS étudie le remplacement du télésiège des *Sûres* par un télé-mix. L'exploitant souhaite disposer d'une étude des phénomènes d'avalanches menaçant le projet. L'appareil projeté et le périmètre de notre zone d'étude sont localisés sur la figure 1.



**Figure 1** – Localisation de l'axe de la remontée mécanique (segment bleu) et de la zone d'étude (contour blanc). Échelle 1:25 000. Fond topographique Géoportail © IGN Paris 2022.

## Mission

La station d'Auris demande au groupement Toraval de :

- caractériser les phénomènes d'avalanches affectant le projet de remontée mécanique ;
- dresser un tableau des efforts d'avalanches estimés sur la ligne 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 interactive du versant à l'adresse suivante :

[http://telec.toraval.fr/3d/auris\\_2022.html](http://telec.toraval.fr/3d/auris_2022.html)

## Contexte nivo-météorologique

### 1.1 Données météorologiques

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

- les données nivo-météorologiques de la station d'Auris située à une altitude de 1600 m et fonctionnant depuis février 1986. La chronique de neige considérée s'est arrêtée mi-mars 2020 et durant la saison 2020-21 à cause de la crise de la covid-19;
- des données de neige issues d'autres postes dans les vallées voisines : postes de l'Alpe d'Huez (altiport, 1850 m) sur la période 1980–2006 et du Rivier d'Allemont (village, 1260 m) sur la période 1959–2003<sup>1</sup>

**Tableau 1.1** – Données des différentes stations météorologiques à proximité d'Auris. Sont indiqués : la distance du poste par rapport à Auris (à vol d'oiseau), l'altitude de la station, le type de mesures, la durée pendant laquelle les mesures ont été réalisées, la pluie décennale journalière PJ (c'est-à-dire le cumul de pluie sur une période de 24 heures et de période de retour  $T=10$  ans) et le gradex des pluies journalières. Le gradex renseigne sur l'accroissement du cumul des précipitations en fonction de la période de retour : plus le gradex est grand, plus le cumul de précipitations des événements rares sera grand par rapport aux événements courants.

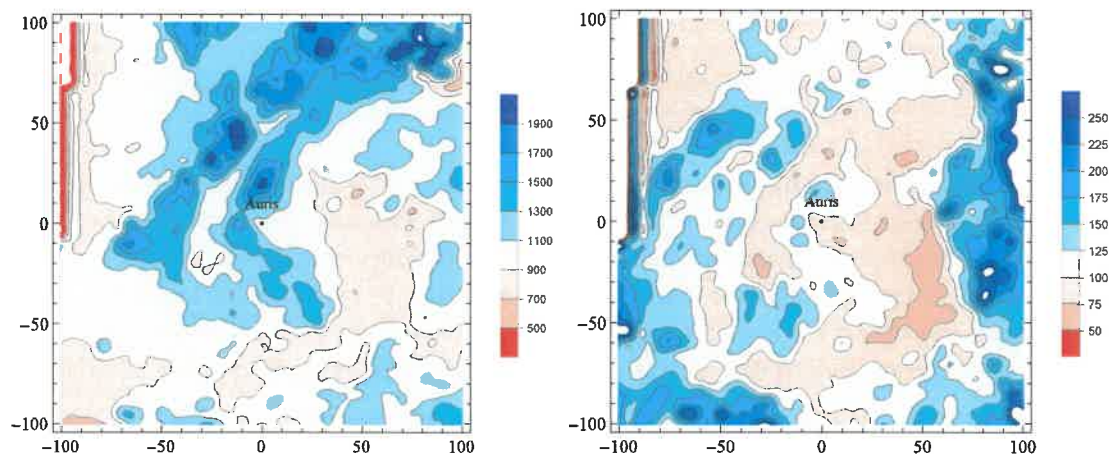
Station	Altitude (m)	$D$ (km)	Type	période	PJ (mm)	Gradex (mm)
La Garde	1080	2,5	Pluviomètre	1948–74	66	12,0
Vaujany	772	11	Pluviomètre	1949–95	85	16,4
Verney	770	9	Pluviomètre	1948–94	84	16,2
Chambon	1050	5	Pluviomètre	1959–75	56	10,0
Bourg d'Oisans	720	4	Pluviomètre	1907–89	71	13,5
Chazelet	1780	16	Pluviographe	1956–90	61	11,4
Pont Excoffier	770	6	Pluviographe	1961–90	68	11,9

1. Fermeture du poste à cette date.

## 1.2 conditions climatiques

Le secteur étudié se trouve à la périphérie d'une zone très humide centrée sur la chaîne de Belledonne, et plus particulièrement la vallée de l'Eau d'Olle. Des effets de barrière dus au relief important (chaîne de Belledonne, puis des Grandes Rousses à l'ouest, groupe Olan-Muzelle au sud) limitent sensiblement l'intensité et la quantité de précipitations par rapport à la partie occidentale du département de l'Isère et à la vallée de l'Eau d'Olle (voir figure 1.1). Le tableau 1.1 montre une forte variabilité des pluies journalières et du gradex des pluies dans cette partie de la vallée de la Romanche.

Ce sont presque exclusivement des dépressions de sud-ouest à nord-ouest qui intéressent le secteur d'étude, caractérisé par un climat de type Alpes du Nord, c'est-à-dire : des passages perturbés pouvant durer plusieurs jours et se succéder sur des intervalles de temps courts, souvent accompagnés de vents forts et parfois de températures très froides. De fait les cumuls de neige peuvent être importants et induire une activité avalancheuse. Les cumuls de neige sont importants (typiquement de l'ordre de grandeur des massifs internes des Alpes du Nord) sans atteindre les valeurs remarquables mesurées dans la vallée de l'Eau d'Olle.



**Figure 1.1** – Carte des isovaleurs des cumuls moyens annuels de précipitation (à gauche) et des plus fortes précipitations journalières observées sur la période 1971–2008 (à droite). Valeurs en mm. Les données ont été cadrées sur Auris (indiquées par un point). Source : données Alpine Precipitation Grid Dataset (EURO4M-APGD) (doi:10.18751/Climate/Griddata/APGD/1.0).

## 1.3 Analyse des précipitations

### 1.3.1 Méthode

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 de distribution dite loi de valeurs extrêmes :

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

On va aussi considérer un modèle plus simple à ajuster, qui est une variante du modèle de *renouvellement* :

$$C = \mu + \sigma \ln T. \quad (1.2)$$

### 1.3.2 Aperçu général sur la chronique des précipitations de neige

Nous reportons sur la figure 1.2 la distribution dans le temps de ces chutes de neige journalières. L'agglomération en amas de points résulte simplement du caractère saisonnier des chutes de neige. Le caractère aléatoire des chutes de neige, notamment la densité des amas et les valeurs extrêmes observées sur une saison, sont très variables d'une année à l'autre.

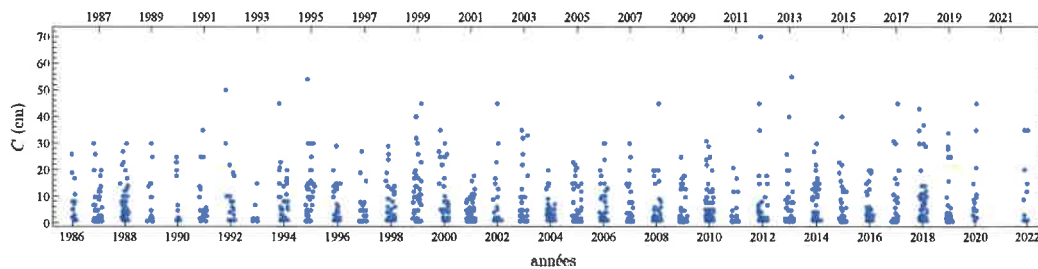


Figure 1.2 – Répartition dans le temps des chutes de neige journalières sur Auris.

Le cumul des chutes de neige sur de longues périodes est également très variable. Si on s'intéresse à la distribution des cumuls mensuels, la figure 1.3 montre la variabilité des mesures depuis 1986. Si on passe au cumul sur une saison entière (de décembre à avril), on note des variations également très importantes (dans la fourchette 101–531 cm sur la période 1986–2022). Le maximum a été observé en 1994-95 (avec 5,31 m de neige sur la saison). Le cumul moyen des chutes de neige sur une saison (d'octobre à mai) est de 270 cm (moyenne sur 33 saisons).

Sans surprise on retrouve cette disparité si l'on examine l'épaisseur moyenne du manteau neigeux. On note toutefois qu'il n'y a pas de corrélation directe systématique entre précipitations mensuelles et épaisseur moyennée du manteau neigeux, ce qui est normal car la température et le vent sont des facteurs essentiels de conservation d'un manteau neigeux.



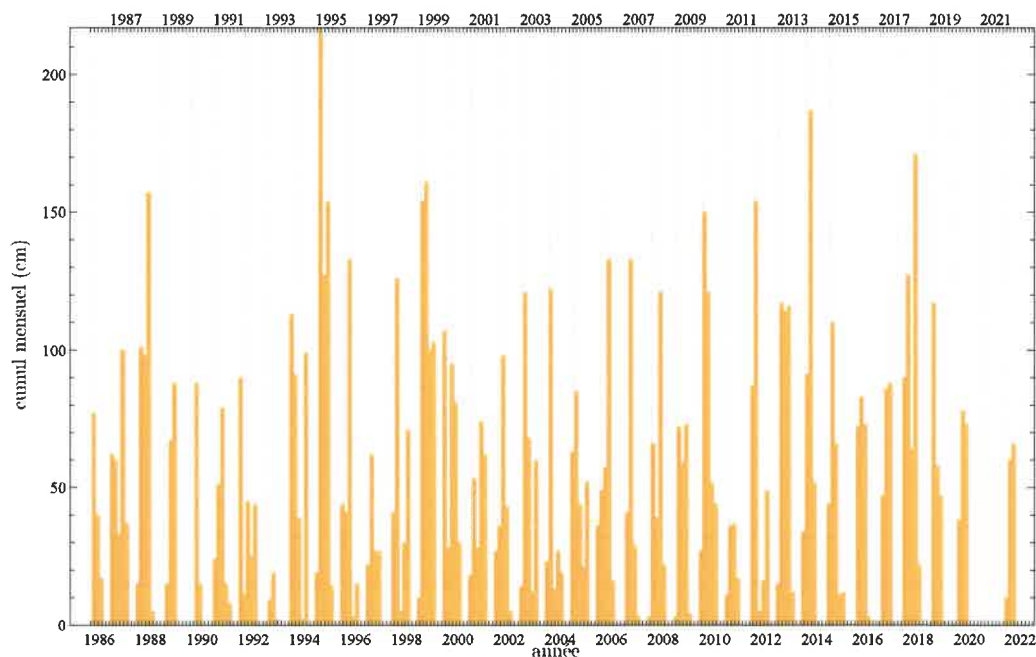


Figure 1.3 – Variation dans le temps des cumuls mensuels de chutes de neige sur Auris.

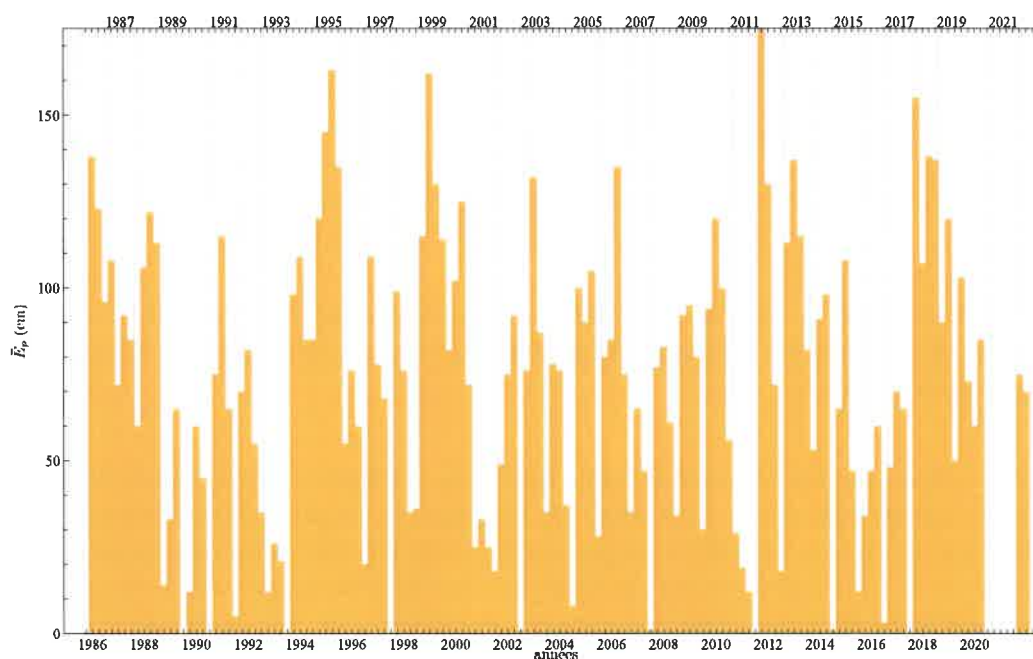


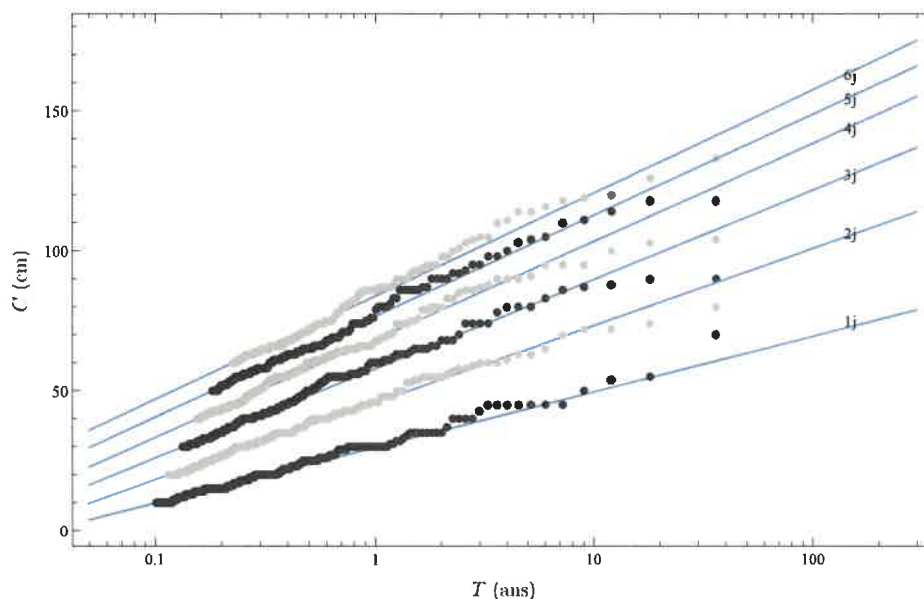
Figure 1.4 – Variation dans le temps des épaisseurs du manteau neigeux moyennées sur un mois sur Auris.

### 1.3.3 Analyse par la méthode du renouvellement

Nous avons appliqué la méthode du renouvellement avec les données observées sur Auris. Nous reportons dans le tableau 1.2 les valeurs de ces deux paramètres en fonction de la durée considérée pour la précipitation ainsi que la valeur des chutes de neige pour  $T = 10$  ans,  $T = 30$  ans, et  $T = 100$  ans.

**Tableau 1.2** – Valeurs des coefficients  $\mu$  et  $\sigma$ , déterminés par la méthode du renouvellement (seuil fixé à 10 cm à 60 cm selon la durée). Quantiles des chutes de neige décennales, trentennales, et centennales pour les durées allant de 1 à 6 jours. Valeurs en cm.

	1 j	2 j	3 j	4 j	5 j	6 j
$\mu$	29,8	45,8	58,0	68,4	76,7	83,9
$\sigma$	8,60	12,0	13,8	15,2	15,7	16,0
$C(T = 10)$	50	73	90	103	113	121
$C(T = 30)$	59	86	105	120	130	121
$C(T = 100)$	70	101	122	138	149	138



**Figure 1.5** – Variation de la chute de neige de durée 1–6 jours en fonction de la période de retour sur Auris. Points : valeurs mesurées affectées d’une période de retour empirique ; courbes : loi exponentielle (1.2) ajustée sur les données.

On trouve que pour les périodes de retour supérieures à 5 ans et des durées de 48 h à 144 h, les points de mesure sont situés au-dessous des lois ajustées, ce qui montre une saturation des valeurs de cumul. En revanche, il y a un bon accord entre loi calée et données pour les chutes de neige sur 24 h. Cela indique que le modèle peut fournir une description correcte pour les chutes journalières, mais surestime ce qui peut se produire pour des durées de précipitation plus importantes.

La méthode du renouvellement peut également être appliquée à des épisodes au sens employé par Météo-France, c’est-à-dire une succession continue (sans interruption) de chutes de neige sur plusieurs jours<sup>2</sup>. En prenant un seuil de 80 cm, on a pu ajuster une loi exponentielle

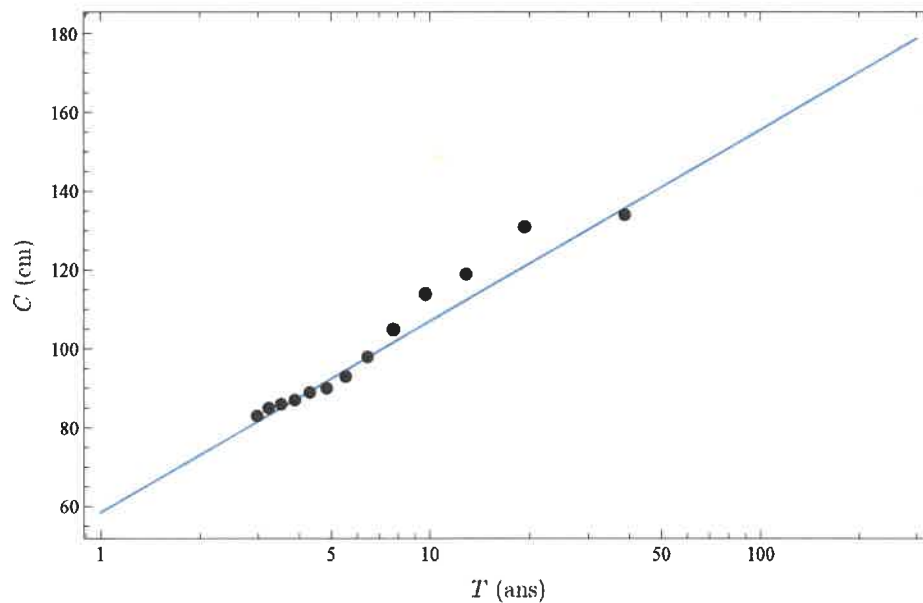
2. un épisode est suivi et précédé d’un jour sans précipitations

[éq. (1.3)]:

$$C = 58,5 + 21,1 \ln T \quad (1.3)$$

Le résultat est reporté sur la figure 1.6. Dans le tableau 1.3, on a également reporté tous les épisodes de neige ayant dépassé un seuil de 80 cm sur Auris pour la période 1986–2022. On a indiqué la période de retour en se servant de l'équation (1.3).

On note que le plus gros épisode (avril 1999, avec 134 cm, voir tableau 1.3) est important, mais pas exceptionnel en comparaison avec ce qu'on a observé sur des postes voisins. Par exemple, à l'Alpe d'Huez, on a mesuré des cumuls de 334 cm sur 8 jours (avril 1981) et 265 cm sur 12 jours (avril 1994) ; au Rivier-d'Allemont, on a observé des cumuls de 279 cm sur 14 jours (décembre 1962) et 233 cm sur 17 jours (février 1970).



**Figure 1.6** – Variation de la chute de neige de durée quelconque en fonction de la période de retour sur Auris. Points : valeurs mesurées affectées d'une période de retour empirique ; courbes : loi exponentielle (1.3) ajustée sur les données.

**Tableau 1.3** – Liste des épisodes de neige ayant amené plus de 80 cm sur Auris entre fév. 1986 et fév. 2022.

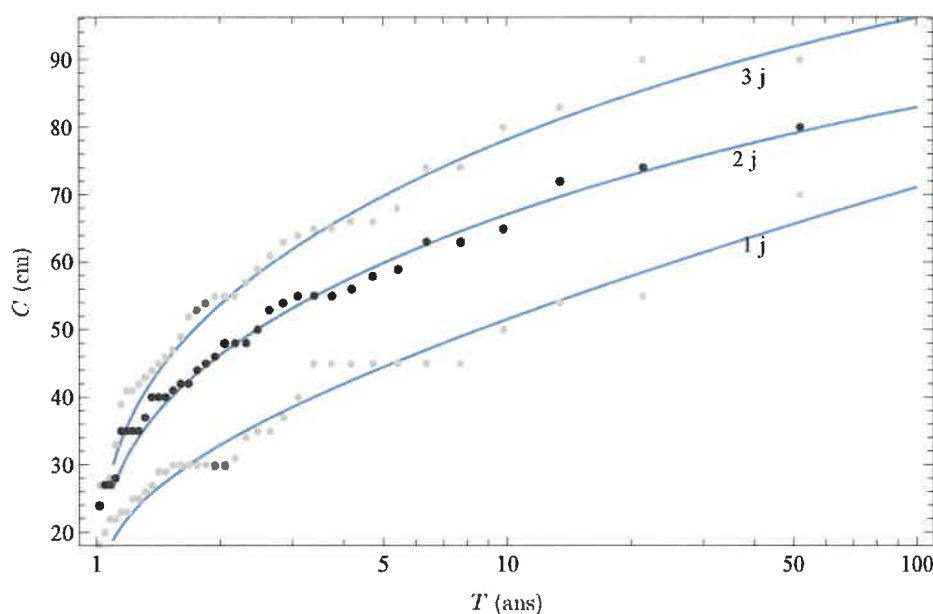
date	durée (j)	$C$ (cm)	$T$ (ans)
29 décembre 2017	3	83	3
6 février 2007	9	85	4
11 février 1990	4	86	4
21 février 1995	6	87	4
25 février 2018	8	89	4
20 décembre 1991	3	90	4
28 janvier 2015	7	93	5
24 février 1989	9	98	7
22 décembre 1993	5	105	9
5 février 1999	5	114	14
28 février 2006	12	119	18
26 janvier 2019	8	131	31
11 avril 1999	7	134	36

### 1.3.4 Analyse par la théorie des valeurs extrêmes

Nous reportons ici le résultat récapitulatif pour les chutes de neige sur des durées de 1 à 6 jours pour Auris. Une loi de valeurs extrêmes (LVE) a été ajustée sur les données des maxima annuels par la méthode bayésienne. Le tableau 1.4 donne la valeur des paramètres  $\xi$ ,  $\mu$ , et  $\sigma$  et quelques quantiles de chutes de neige extrêmes pour Auris. La figure 1.7 fournit l'ensemble des données et l'ajustement par des lois de valeurs extrêmes.

**Tableau 1.4** – Estimation par la méthode bayésienne des coefficients  $\xi$ ,  $\mu$ , et  $\sigma$  pour la loi des valeurs extrêmes (LVE) pour des chutes de neige de 1 à 6 jours sur Auris à 1600 m d'altitude. On a reporté les quantiles (en cm) pour les périodes de retour décennale, trentennale, et centennale. Valeurs en cm.

	1 j	2 j	3 j	4 j	5 j	6 j
$\mu$	29,0	41,1	47,5	53,7	59,3	63,7
$\sigma$	11,0	14,9	17,8	20,4	23,4	25,0
$\xi$	-0,081	-0,234	-0,248	-0,256	-0,223	-0,209
$C(T = 10)$	52	67	78	89	101	109
$C(T = 30)$	61	76	88	100	115	124
$C(T = 100)$	71	83	96	109	127	138



**Figure 1.7** – Figure récapitulant la distribution des maxima annuels de chutes de neige sur des durées de 1 à 3 jours en fonction de la période de retour  $T$ .

On note principalement que le calage d'une loi de valeurs extrêmes sur les maxima annuels donne une image des précipitations extrêmes proche de ce que donne la méthode du renouvellement pour les chutes de neige journalières. On note également :

- il y a un caractère « Weibull » très marqué ( $\xi < -0,2$ ) qui fait que les chutes de neige exceptionnelles sont bien moins probables que ce que tend à prédire un modèle de type renouvellement ;
- les méthodes fournissent des quantiles similaires pour les chutes de neige journalières ;

- des écarts entre les méthodes sont significatifs pour les périodes de retour  $T > 5$  ans et les durées  $d \geq 2$  j.

## 1.4 Épaisseur du manteau neigeux

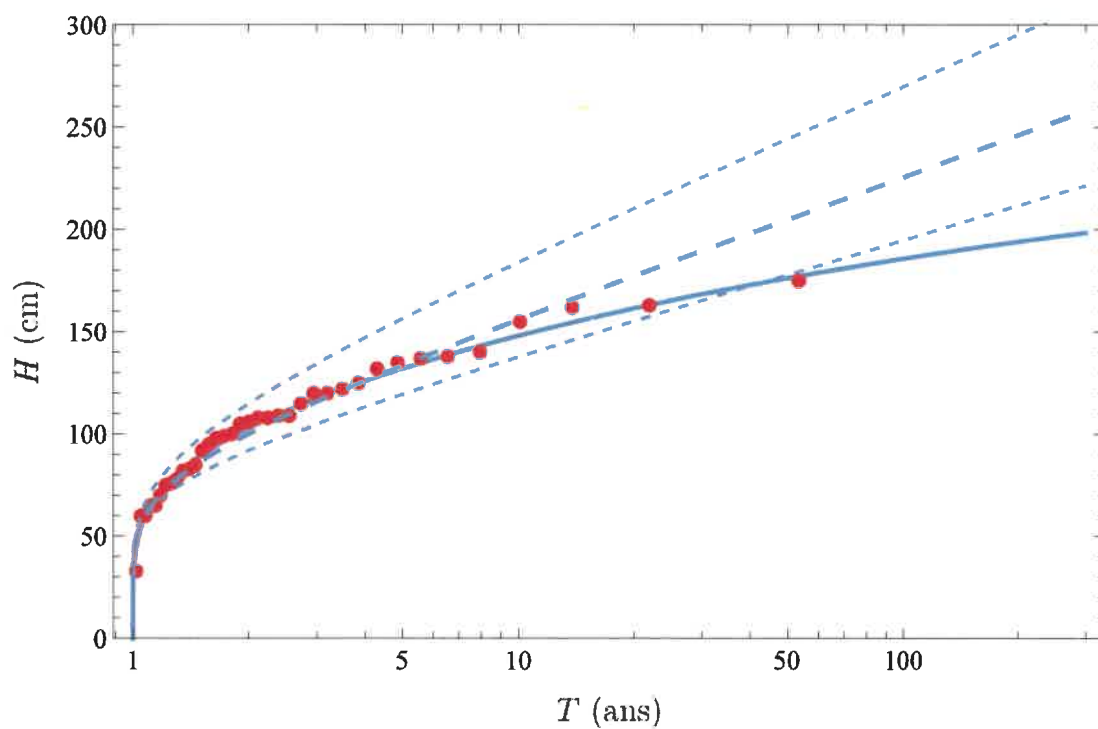
Les valeurs moyennes (moyennes mensuelles) de l'épaisseur de neige au sol depuis 1986 sont reportées sur la figure 1.4. La variation de la hauteur de neige au sol en fonction de la période de retour est reportée sur la figure 1.8. On notera des différences assez faibles d'épaisseur du manteau neigeux entre le modèle de Gumbel et de Weibull aux grandes périodes de retour ( $T > 10$  ans).

Les paramètres de la loi de valeurs extrêmes (équation 1.1) calée sur les données sont reportés dans le tableau 1.5.

**Tableau 1.5** – Estimation par inférence bayésienne des coefficients  $\xi$ ,  $\mu$ , et  $\sigma$  pour la loi des valeurs extrêmes (LVE) et la loi de Gumbel pour les maxima annuels de l'épaisseur journalière du manteau neigeux sur Auris. On a reporté la valeur négative du maximum de vraisemblance et les quantiles (en cm) pour les périodes de retour décennale à centennale. On a aussi indiqué entre parenthèses l'intervalle de confiance à 95 % pour  $\xi$ ,  $\mu$ , et  $\sigma$  et les intervalles de variations pour les quantiles.  $B$  est le facteur de Bayes (probabilité que le modèle LVE soit le plus performant).

	LVE	Gumbel
$\mu$	92,34 ( $\pm 22,0$ )	89,22 ( $\pm 19,8$ )
$\sigma$	30,4 ( $\pm 9,79$ )	29,61 ( $\pm 2,87$ )
$\xi$	-0,19 ( $\pm 0,010$ )	0
$B$	56 %	44 %
$C(T = 10)$	148 (120–185)	156 (134–177)
$C(T = 30)$	168 (129–227)	189 (162–217)
$C(T = 100)$	186 (135–274)	225 (191–260)

On notera l'incertitude (chiffres entre parenthèses) considérable associée à la détermination de  $H(T)$  compte tenu des séries de données courtes. On prendra garde également qu'il s'agit de valeurs journalières maximales, c'est-à-dire des maxima observés sur une journée (les valeurs moyennées sur plusieurs jours sont plus faibles à cause du tassement de la neige).



**Figure 1.8** – Variation de l'épaisseur maximale de neige au sol (sur une journée) en fonction de la période de retour. Les courbes en tireté fin représentent l'intervalle de confiance pour la loi de Gumbel.



## 1.5 Synthèse

Pour les calculs d'avalanche, **nous nous fondons principalement sur les cumuls de neige sur 3 jours pour évaluer le volume de neige mobilisable par l'avalanche et en considérant l'absence (ou une défaillance) de PIDA**. En se fondant sur les valeurs enregistrées sur la station (1600 m), on arrive aux estimations suivantes :

- quantile mesuré pour  $T = 30$  ans,  $C = 90$  cm (modèle de type Weibull),  $H = 170$  cm (modèle de type Weibull);
- quantile extrapolé pour  $T = 100$  ans,  $C = 100$  cm (modèle de type Weibull),  $H = 190$  cm (modèle de type Weibull).

Si on prend en compte un PIDA, on peut considérer que la quantité de neige mobilisable ne dépasse par la quantité de neige journalière pour  $T = 30$  ans, soit  $C = 60$  cm.

Les chroniques de neige sont relativement courtes (36 saisons) et il manque les gros hivers comme 1980-81. Si l'enneigement à  $T = 30$  ans est correctement estimé dans notre étude, il y a beaucoup plus d'incertitudes pour les quantiles estimés à la période de retour  $T = 100$  ans ; en l'état actuel, c'est un comportement de type Weibull qui est prédominant.

# 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 nos visites de terrain ;
- 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 fond topographique, issu d'un levé Lidar récent<sup>1</sup> fourni par la station sur le périmètre de la zone d'étude. Les zones non couvertes par ce levé ont été complétées par le modèle numérique de terrain RGE ALTI de l'IGN<sup>2</sup> ;
- l'orthophotoplan BDOrtho de l'IGN (source [geoportail.fr](http://geoportail.fr)) ;
- la couverture de photographies aériennes : plusieurs missions de l'IGN et l'IFN de 1970 à 2012.

---

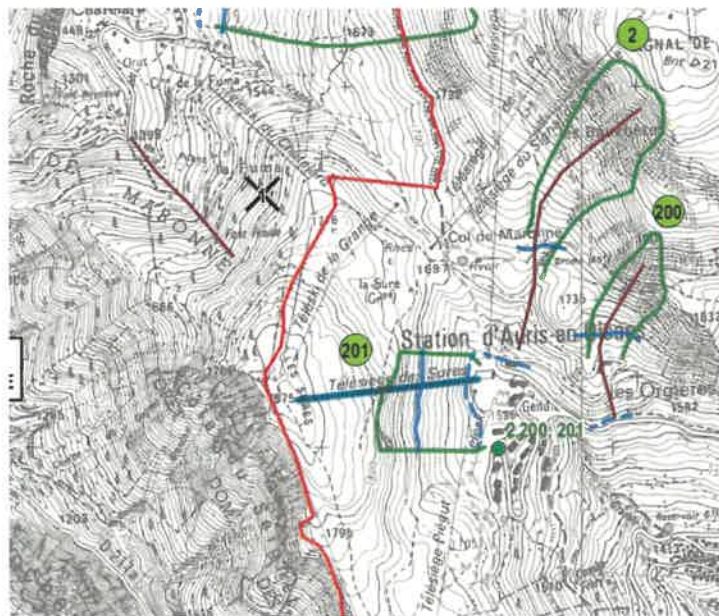
1. Levé réalisé en 2016 par le cabinet Sintegra pour le compte de la SATA.

2. La donnée disponible sur ce secteur est fournie au pas de 1 m mais la résolution effective n'est pas meilleure que 5 m car il s'agit d'une acquisition par interférométrie radar (STAR-3i).

## 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<sup>e</sup> 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<sup>e</sup> siècle), les dégâts éventuels occasionnés, etc. Le secteur étudié figure sur la feuille AZ61 de l'atlas de l'EPA (voir figure 2.1).



**Figure 2.1** – Atlas de la CLPA, extrait de la feuille AZ61, édition 2017. L'appareil est reporté en surimpression. Échelle 1:25 000. © IGN-Paris 2003, © MEDDE-ONF-Irstea 2012.

Notre zone d'étude est concernée par les sites d'observation n<sup>os</sup> 2 et 201 (voir figure 2.1).

- Site n<sup>o</sup> 2 : des trois événements figurant dans la base de données, l'avalanche du 20 janvier 1980 retient notre attention. Outre que l'altitude d'arrêt notée à 1350 m est certainement une erreur, on note néanmoins que l'agent a coché les cases *neige fraîche* (supérieure à 100 cm) et *vent fort* pour caractériser le contexte météorologique du moment ; il signale que des routes et des constructions sont touchées par l'avalanche. Ces informations nous suggèrent qu'il s'agit d'une avalanche de grande ampleur, mais elles ne nous permettent pas hélas de localiser précisément la zone de dépôt de l'avalanche.
- Site n<sup>o</sup> 201 : aucun événement ne figure dans la base de données pour ce site.

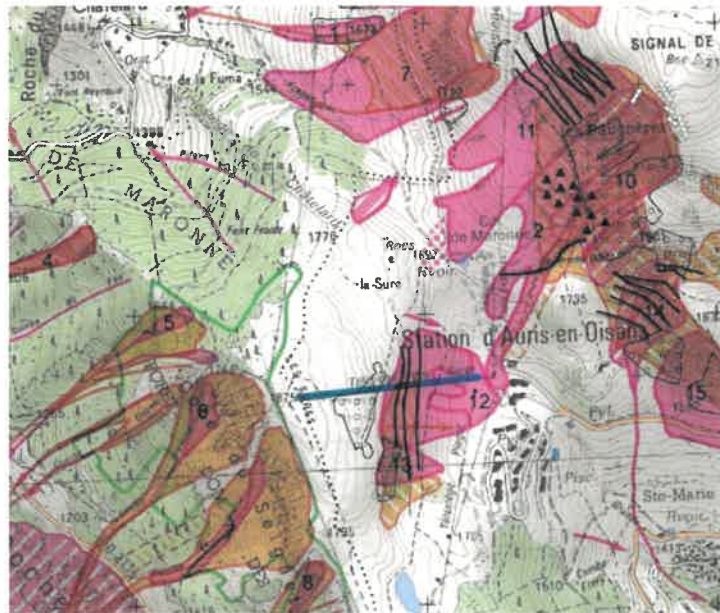
**L'EPA ne nous apporte que peu d'information quant à l'exposition du projet de remontée mécanique aux phénomènes d'avalanches.**

### 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).

Le secteur étudié figure sur la feuille AZ61 de l'atlas de la CLPA. Cette version de la carte dressée en 2017 est une réédition de la feuille *Oisans-Grandes Rousses* réalisée en 1991, elle-même réédition de la feuille *Les Deux Alpes - Alpe d'Huez* datant de 1972. La figure 2.2 fournit un extrait du document à jour.



**Figure 2.2** – Atlas de la CLPA, extrait de la feuille AZ61, édition 2017. L'appareil est reporté en surimpression. Échelle 1:25 000. © IGN-Paris 2013, © MTES-ONF-Irstea 2017.

#### Avalanches reconnues par photo-interprétation

La CLPA fournit ici une photo-interprétation très sommaire, héritée de la première édition de la carte.

Sur le versant des Sûres, le photo-interprète identifie des coulées d'ampleur diverse (hachures orange) à la rupture de pente située entre 1750 et 1800 m ; il n'envisage pas que les phénomènes puissent se propager jusque sur le replat du front de neige, ce malgré l'absence de véritable zone d'arrêt intermédiaire dans le versant.

Sur le versant sud-ouest du Signal de l'Homme, seul le couloir situé le plus au sud de l'escarpement donne lieu à un tracé individualisé, qui parcourt le couloir principal jusque vers 1700 m. Une extension présumée (tracé en hachures à tirets) prolonge ce tracé jusqu'à 1600 m, à proximité des garages du front de neige ; notons à propos de cette extension que la photo-interprétation a été réalisée à une époque antérieure à la confection de la digue qui traverse aujourd'hui le couloir. En absence de cet ouvrage paravalanche et compte tenu de la morphologie du site, il est étonnant que le photo-interprète n'ait pas estimé qu'une avalanche

pouvait probablement emprunter le couloir et s'arrêter au voisinage des bâtiments. Au nord de ce système, les zones de départ sont rassemblées dans une zone d'avalanche d'ampleur diverse dont la délimitation est approximative et, notamment vers l'aval, peu compréhensible.

Ce travail de photo-interprétation fournit une image incomplète du fonctionnement avalancheux des systèmes qui menacent le projet.

### Avalanches reconnues par recueil de témoignages

La projet d'appareil est concerné par l'avalanche n° 12. On distingue deux emprises superposées, l'une dont la zone de dépôt est scindée en trois lobes, l'autre englobant la précédente, et dont la zone de dépôt occupe une partie du replat du front de neige. La fiche signalétique établie en 2010 fournit le commentaire suivant : « Cette avalanche n'a plus été observée depuis plus de 10 ans. Depuis l'application du PIDA et la mise en place de banquettes larges et des plantations, elle n'est plus partie sur toute sa largeur et est allée au maximum en pied de pente. Les contours de l'avalanche, selon son fonctionnement récent, ont été ajoutés. »

La fiche signale aussi une avalanche survenue au cours de l'hiver 1974, déclenchée artificiellement. La figure 2.3 fournit une vue du versant après cet événement. On note que la gare du télésiège des Sûres de l'époque (située au même emplacement que l'actuelle) n'a pas été touchée.



**Figure 2.3** – Vue sur le bas du versant des Sûres après la survenue d'une avalanche au cours de l'hiver 1974. Source : Inrae Grenoble.

L'avalanche n° 2 parcourt le versant sud-ouest du Signal de l'Homme et sa zone de dépôt se situe à proximité du projet. La fiche signalétique d'avalanche établie à l'enquête de 2013 indique : « [L']avalanche du 20/1/1981 a remonté le long de la piste des banchets sans toucher ni le bâtiment de la station à l'est ni le télésiège de Piégut à l'ouest. Il s'agit d'un souffle. »

À l'édition précédente de 2010, l'enquêteur donnait les informations suivantes : « 1ère tourne créée en 1974 et reprofilée en 2009. Avalanche traitée au PIDA et obligation de déneigement dans la tourne si le cône de déjection arrivant dans la tourne fait plus de 2 m de haut. Depuis la création de la tourne, l'avalanche s'est arrêtée dans la tourne. Avalanche, dans son emprise maximale, recalée dans le talweg. Elle est descendue dans le talweg en 1973 et n'aurait jamais atteint ni bâtiments ni la route. »

Retenons de ce travail de recueil de témoignages que :

- le projet est impacté par l'activité avalancheuse du versant des Sûres ;

- les phénomènes provenant du Signal de l'Homme peuvent approcher la gare de départ du projet, c'est pourquoi nous incorporons ce système dans l'analyse des phénomènes pour la suite de l'étude.

### 2.3.3 PIDA et témoignage du service des pistes

La station dispose d'un plan d'intervention pour le déclenchement des avalanches (PIDA). Les avalanches de ce secteur sont déclenchées préventivement par grenadage manuel (secteur des Sûres) et par des explosifs à gaz (secteur du Signal de l'Homme). La figure 2.4 fournit un extrait de la cartographie du PIDA reportée sur notre fond de plan. Elle localise les différents points de tir du secteur ainsi que les emprises habituelles des avalanches déclenchées.

De nos échanges avec le personnel du service des pistes d'Auris nous retenons les points suivants :

- L'activité avalancheuse ordinaire du versant des Sûres se manifeste sous la forme d'avalanches superficielles de neige froide observées lors d'épisodes neigeux accompagnés d'un fort transport de neige par le vent (perturbations de secteur ouest au sens large). Les cassures s'observent au niveau de la rupture de pente franche qui parcourt le versant entre 1750 et 1800 m d'altitude.
- La gare G1 du télésiège de Piégut<sup>3</sup> a été touchée à deux reprises par des avalanches coulantes en phase d'arrêt, au cours des hivers 1991 et 1999 (voir clichés de la figure 2.5). Ces avalanches provenaient du versant est des Sûres.
- L'activité avalancheuse ordinaire du versant sud-ouest du Signal de l'Homme est plutôt associée au passage à l'isothermie du manteau neigeux. Les écoulements sont contenus dans le dispositif paravalanche (tas freineurs, digue).
- La gare G1 du télésiège Auris Express a été touchée par le souffle d'une avalanche de neige poudreuse au cours de son premier hiver d'exploitation (1991-1992) : des éléments de couverture de la gare avaient été arrachés. Cette avalanche provenait du versant sud-ouest du Signal de l'Homme. La gare G1 du télésiège des Sûres n'avait pas été impactée.

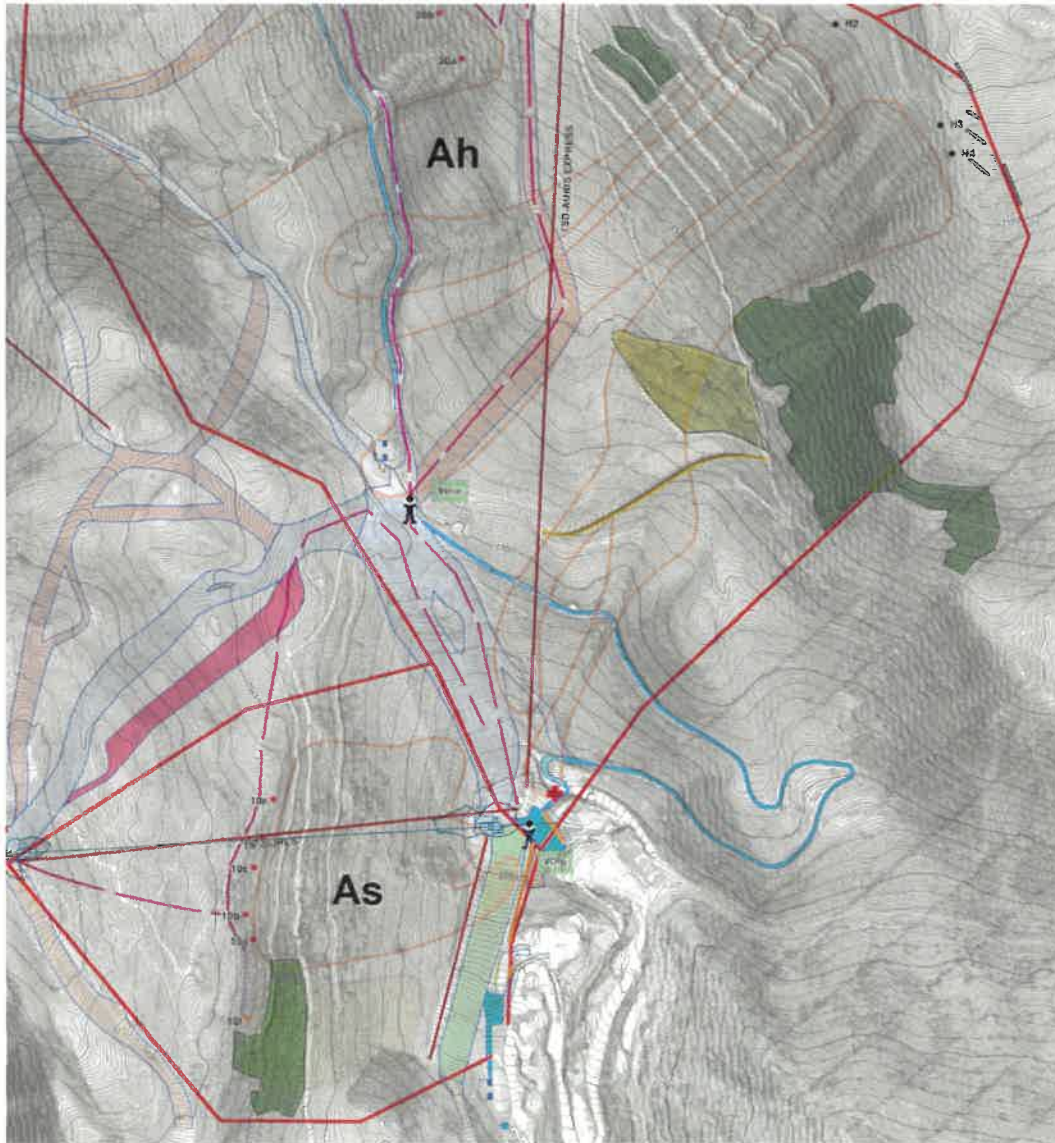
### 2.3.4 Synthèse

**La remontée mécanique est impactée par l'activité avalancheuse connue.** Les phénomènes en provenance du versant des Sûres touchent l'appareil occasionnellement, tandis que ceux provenant du Signal de l'Homme atteignent probablement l'appareil de façon exceptionnelle.

---

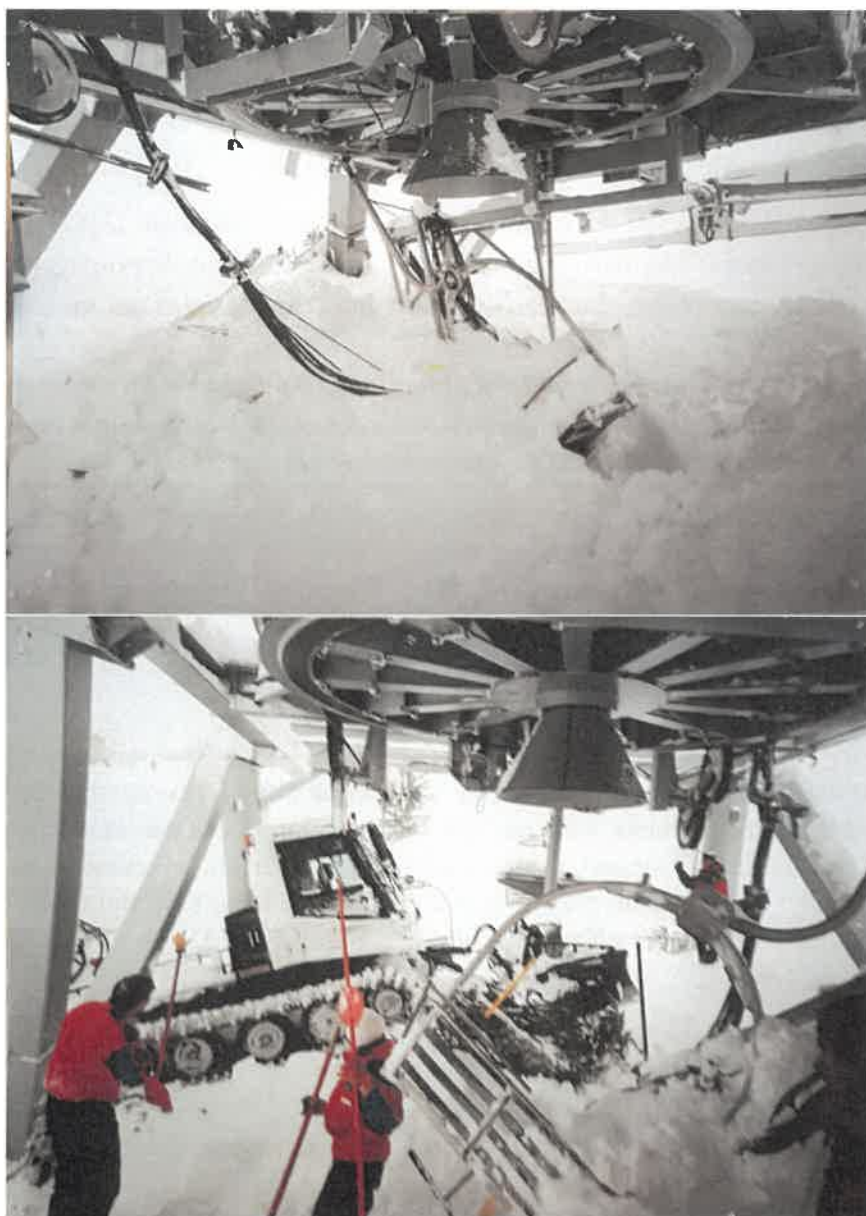
3. Cet appareil a été démonté en 2015, remplacé par le télésiège à enrouleurs du Piégut. La gare se situait à l'emplacement de la G1 du télésiège.





**Figure 2.4** – Extrait du PIDA d'Auris-en-Oisans. Points de tir 10a à 10f: grenadage manuel; points de tir H1 à H4: explosifs à gaz. L'appareil en projet est reporté (tracé bleu). Échelle 1:10 000. Source: service des pistes.





**Figure 2.5** – Vue sur la gare de départ du télésiège de Piégut (qui se situait à l'emplacement de l'actuelle gare G1 du TKE de Piégut) touchée par une avalanche au cours du mois de mars 1999. Source : service des pistes d'Auris-en-Oisans.

## 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'IGN et l'IFN<sup>4</sup> ;
- l'exploitation du levé Lidar ;
- nos observations de terrain effectuées le 27 janvier 2022.

↪ La symbolique utilisée pour les cartes est la suivante :

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

Les schémas de fonctionnement des avalanches présentés figures 2.6 et 2.8 accompagnent les commentaires qui suivent.

### 2.4.2 Secteur des Sûres

#### Morphologie

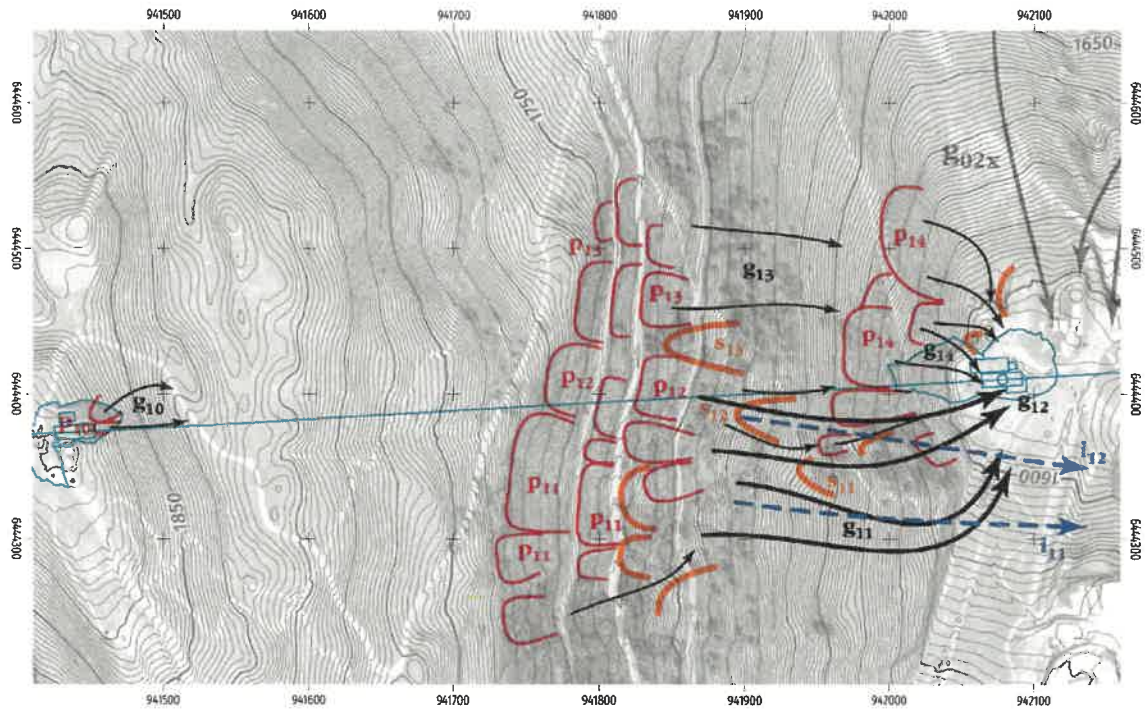
Le versant oriental des Sûres se développe à moyenne altitude, au-dessous de 2000 m. Un boisement très éparé de résineux parsème une pelouse alpine localement dégradée au droit des parties les plus raides du versant. D'allure générale ouverte et légèrement convexe, le site présente deux zones d'inclinaison moyenne distinctes séparées par une rupture de pente nette qui barre le versant en oblique entre 1750 et 1800 m d'altitude. De part et d'autre de cette singularité on identifie :

- la moitié inférieure du versant d'inclinaison moyenne de 30°, présentant des marques évidentes d'une activité avalancheuse fréquente ;
- le haut du versant incliné à une quinzaine de degrés en moyenne, et n'excédant pas localement 25°, c'est-à-dire des pentes où le déclenchement d'avalanches est très peu probable.

Parcourons le versant du haut vers le bas. Avant de s'intéresser à la morphologie de la partie inférieure, nous traitons donc rapidement le cas du compartiment supérieur en apportant

4. Plusieurs missions aériennes ont été examinées :

- mission IGN c3131-0083\_1970\_FR1959 du 26 août 1970, clichés 4520 et 4521 ;
- mission IGN c3335-0211\_1975\_CDP8040 du 30 octobre 1975, clichés 9136 à 9138 ;
- mission IFN c3435-0031\_1980\_F3435-3635 du 24 août 1980, clichés 16 et 17 ;
- mission IGN c93sAA0982\_1993\_FD38 du 27 août 1994, clichés 4786 et 4787 ;
- mission IGN cA98s01232\_1998\_FD38 du 25 juillet 1998, clichés 169 et 170 ;
- mission IGN cP09000252\_FD38F45x047 du 14 août 2009, clichés 2472 et 2473 ;
- mission IGN cP12000312\_FDF38x00058 du 1<sup>er</sup> août 2012, clichés 10513 à 10515.



**Figure 2.6** – Schéma de fonctionnement des avalanches sur le secteur des Sûres. Les tracés bleu clair localisent le projet. Échelle 1:5 000. Fond topographique Lidar Sintegra, orthophotoplan Géoportail © IGN 2022. Système de coordonnées Lambert 93.

la précision suivante : le projet inclut un terrassement pour la gare G2 que nous intégrons dans notre raisonnement. Les talus ainsi créés constitueront deux panneaux d'accumulation escarpés, notés  $p_{10}$  sur la figure 2.6. Leur inclinaison et leur position proche de la crête des Sûres (vents dominants de secteur ouest) en font des zones de départ préférentielles de coulées de neige, les seules pour cette partie haute du versant. Les surfaces concernées demeurent toutefois très faibles.

Au-dessous de 1790 m on entre dans l'escarpement le plus raide du versant. Nous identifions un ensemble de panneaux d'accumulation notés  $p_{11}$  à  $p_{13}$ , dont l'inclinaison est comprise entre 35 et 39°, affichant une superficie cumulée de 2 ha environ. Plusieurs banquettes larges entaillent la pente, formant des plateformes de quelques mètres de largeur. La dénomination des panneaux reflète les regroupements qu'on a opérés transversalement dans le versant, afin de dégager trois groupes modalité de fonctionnement distinctes. Ce découpage est sans doute fragile, notamment sous des conditions de forte instabilité du manteau neigeux favorisant un fonctionnement collectif de ces panneaux, mais il nous aide à ordonner les contributions de chacune des zones de départ aux flux multiples qui peuvent se déverser sur une topographie aussi peu marquée par des éléments structurants tels que couloirs, arêtes, éperons. Ici seules quelques convexités peu acérées, notées  $s_{11}$ ,  $s_{12}$ ,  $s_{13}$  sont susceptibles de jouer un rôle de déviation/chenalisation des flux.

Vers 1650 m une seconde rupture de pente se dessine, formant les panneaux d'accumulation notés  $p_{14}$ . Ils sont à la fois plus courts (une quarantaine de mètres de dénivellation) et moins raides (30 à 32°) que les précédents, et possiblement moins sensibles aux accumulations de neige par le vent.





Figure 2.7 – Vue oblique partielle du schéma de fonctionnement des avalanches sur le secteur des Sûres. Les tracés bleu clair localisent le projet.

### Fonctionnement

Comme précédemment, nous parcourons le versant du haut vers le bas pour caractériser les écoulements.

Les futurs talus de la gare G2 pourront alimenter des coulées de faible ampleur notées  $g_{10}$ , en particulier lors d'épisodes perturbés d'ouest et sud-ouest. Les faibles volumes de neige engagés et la courte dénivellation des portions raides ne permettent pas le développement de grands écoulements. Les sollicitations sur les pylônes d'un appareil de type télésiège sont faibles.

L'ensemble des pentes  $p_{11}$  à  $p_{13}$  voit des déclenchements isolés de panneaux sous des conditions nivo-météorologiques ordinaires. Ce sont des avalanches coulantes de faible volume, qui sont partiellement interceptées par les trois lignes de banquettes. Sous des conditions un peu plus sévères (période de retour  $T \sim 10$  ans), en particulier lorsque se produit un fort transport de neige par le vent, il faut envisager le fonctionnement collectif de panneaux adjacents. Les panneaux  $p_{11}$  alimentent des flux qui suivent les trajectoires  $g_{11}$ . Ils sont déviés vers le sud au franchissement de la convexité  $s_{11}$ , puis orientés vers le nord en arrivant sur le tracé de la ligne du télésiège de Piégut. Ces phénomènes se développent pour l'essentiel au sud de la ligne, ils constituent une menace pour l'appareil seulement au bas du versant : les dépôts de neige peuvent approcher la gare G1.

La purge des panneaux  $p_{12}$  occasionne des écoulements qui suivent les trajectoires  $g_{12}$ . Dès les périodes de retour courtes ( $T \sim 5$  ans) on ne peut exclure que les dépôts de neige se fassent en pied de pente. Le replat situé à la cote 1597 m constitue une singularité très forte qui a un effet de dissipation d'énergie des flux très efficace, c'est-à-dire que les dépôts de neige sont

probablement peu étendus vers l'est mais affichent des épaisseurs atteignant parfois plus de 5 m. La gare G1 est menacée par ces phénomènes. Ce sont surtout des efforts liés à la poussée de la masse de neige en phase d'arrêt qui sont destructeurs (pression hydrostatique de plusieurs dizaines de kPa).

Les panneaux  $p_{13}$  donnent lieu à des écoulements  $g_{13}$  moins volumineux. Sous des conditions d'instabilité marquée ils peuvent atteindre les panneaux  $p_{14}$  et ajouter leur volume aux écoulements  $g_{14}$ . Comme précédemment on peut craindre la formation de dépôts peu étendus vers le sud-est mais de forte épaisseur au voisinage de la gare.

Nous avons jusque là décrit des avalanches coulantes. Signalons que les groupes de panneaux  $p_{11}$  et  $p_{12}$  peuvent aussi alimenter des écoulements rapides qui suivent des trajectoires inertielles, matérialisées sur la carte par les flèches  $i_{11}$  et  $i_{12}$ . Le projet de remontée mécanique n'est pas concerné par ces phénomènes.

### 2.4.3 Secteur du Signal de l'Homme

#### Morphologie

Culminant à plus de 2100 m le versant sud-ouest du Signal de l'Homme constitue un système aux dimensions plus importantes que le précédent : la partie haute du versant est inclinée à environ 40° sur 300 m de dénivellation. Autrefois totalement dépourvu de forêt, le versant a fait l'objet d'un reboisement qui demeure très partiel (voir figure 2.10). Sans qu'on puisse parler de véritable forêt, le boisement s'est toutefois développé sur certaines pentes jusqu'à devenir suffisamment mature et dense pour assurer un rôle de fixation du manteau neigeux. Ailleurs le maigre couvert végétal porte les traces d'une activité avalancheuse fréquente, affectant fréquemment le manteau neigeux jusqu'au sol.

On identifie deux principaux groupes de zones d'accumulation notés  $p_{02}$  et  $p_{03}$  sur la figure 2.8. Elles représentent une superficie d'une dizaine d'hectares inclinés à 38°. Au sud de cet ensemble, à la faveur du reboisement, seule une zone d'accumulation identifiée  $p_{01}$  nous apparaît être encore active.

Vers 1800 m la partie supérieure escarpée du versant se raccorde au col de Maronne par un large épaulement noté  $s_{03}$ . De par ses dimensions il joue un rôle d'étrave naturelle scindant les flux partiellement en direction de l'ouest et principalement en direction du sud, c'est-à-dire vers le front de neige de l'Orgière.

Dès les premières années d'exploitation de la station (début des années 1970), un travail important de terrassement a été entrepris, consistant en la confection d'un réseau de banquettes paravalanche et d'un dispositif combinant tas freineurs (notés  $s_{02}$ ) et digue de déviation ( $s_d$ ) barrant la combe  $s_{01}$  qui domine les premiers bâtiments. La digue a subi des travaux de confortement en 2008-2009. La figure 2.10 fournit une vue chronologique du versant depuis 1975. Nous accordons une efficacité faible au réseau de banquettes, mais nous estimons que la digue paravalanche présente des mensurations et une géométrie qui permettent d'intercepter efficacement la plupart des écoulements volumineux.

#### Fonctionnement

La distinction que l'on opère entre les panneaux  $p_{02}$  et  $p_{03}$  se justifie par un cloisonnement plutôt net entre ces deux zones de départ d'avalanches, de sorte que leur fonctionnement simultané est sans doute rare.



**Figure 2.8** – Schéma de fonctionnement des avalanches sur le secteur du Signal de l’Homme. Les tracés bleu clair localisent le projet. Échelle 1:6 000. Fond topographique Lidar Sintegra, orthophotoplan Géoportail © IGN 2022. Système de coordonnées Lambert 93.





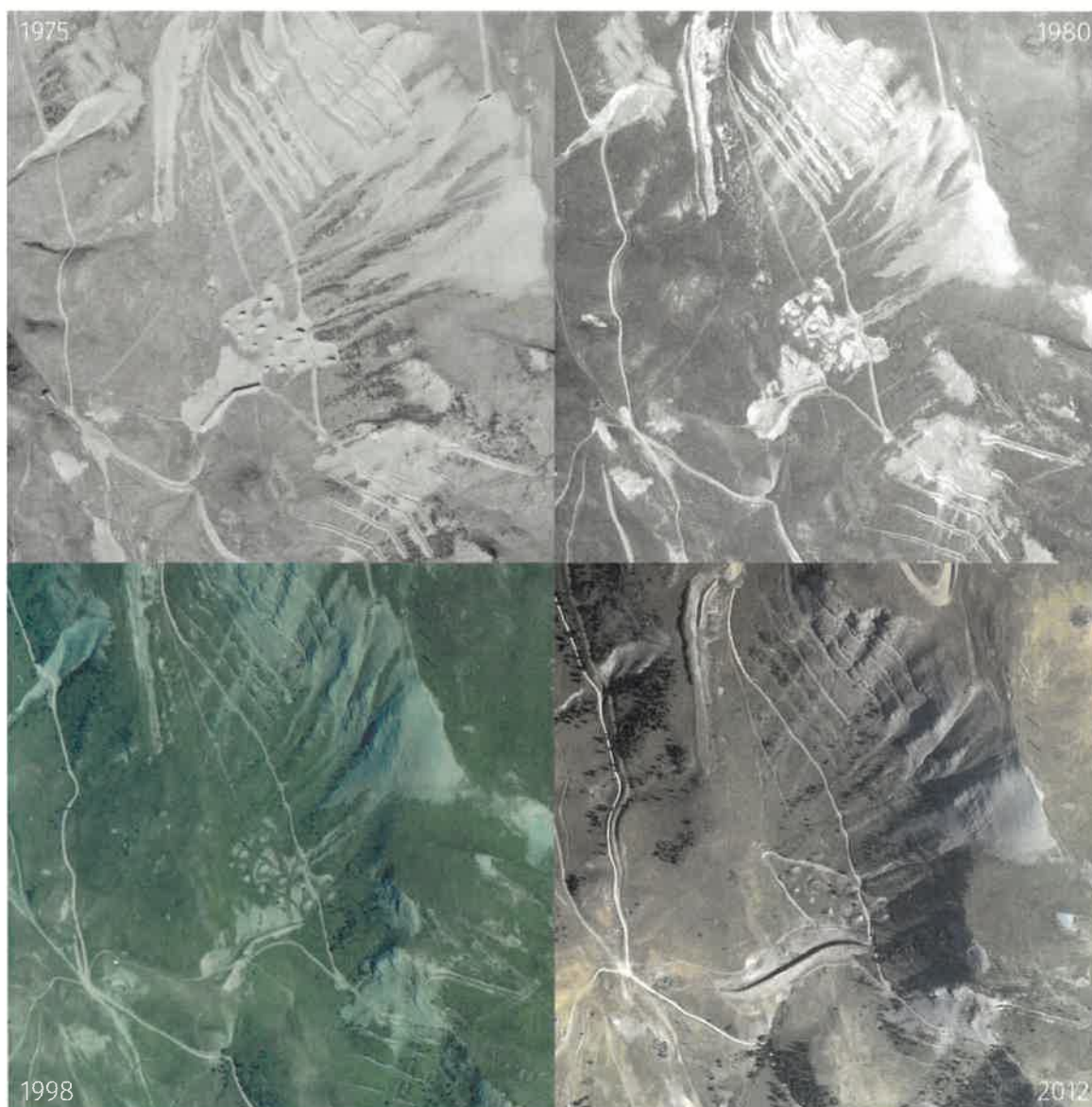
**Figure 2.9** – Vue oblique partielle du schéma de fonctionnement des avalanches sur le secteur du Signal de l'Homme.

Les panneaux  $p_{03}$  sont le lieu d'une activité fréquente, notamment sous la forme d'avalanches coulantes (trajectoires  $g_{03}$ ). Les avalanches s'écoulent en direction du col de Maronne. La forte convexité  $s_{03}$  favorise leur étalement, voire l'arrêt de certains phénomènes vers 1800 m. Ce large épaulement induit aussi et surtout un transfert d'une partie importante des flux en direction du dispositif paravalanche qui domine la station. Sous des conditions nivo-météorologiques exceptionnelles ( $T \sim 100$  ans) les avalanches de ce système peuvent approcher le front de neige en suivant la trajectoire  $g_{03x}$ .

Les panneaux  $p_{02}$  sont aussi des zones d'activité avalancheuse fréquente. Les avalanches coulantes qui s'y produisent traversent le réseau de tas freineurs et atteignent couramment la digue suivant les trajectoires  $g_{02}$ . Si le dispositif n'est pas encombré de dépôts d'avalanches précédentes il remplit sa fonction de contention et de déviation. Sous des conditions nivo-météorologiques extrêmes ( $T \sim 100$  ans) on ne peut exclure que l'ouvrage soit saturé par les grands volumes de neige mobilisés. Les avalanches franchissant la digue sont à nouveau chenalisées et accélérées dans l'entonnement  $s_{01}$ , et peuvent se déposer à proximité des bâtiments, suivant les trajectoires  $g_{01x}$ ,  $g_{02x}$ . La gare G1 du projet est dans l'emprise des dépôts de ces avalanches exceptionnelles.

Le panneau  $p_{01}$  alimente des avalanches de faible volume en comparaison des systèmes voisins. Ce sont des avalanches gravitaires qui s'écoulent majoritairement à l'est de la digue paravalanche, trajectoire  $g_{01}$ . En situation exceptionnelle les flux issus du panneau  $p_{01}$  rejoignent les écoulements  $g_{01x}$ .

Lorsqu'il s'agit d'avalanches de neige froide et sèche, les systèmes  $p_{03}$  et  $p_{02}$  peuvent alimenter des flux rapides qui suivent plusieurs trajectoires inertielles,  $i_{02}$ ,  $i_{03}$ .



**Figure 2.10** – Séquence de prises de vue aériennes montrant l'évolution du boisement du versant sud-ouest du Signal de l'Homme et le dispositif paravalanche, de 1975 à 2012. Prises de vue © IGN Geoportail.



## 2.5 Synthèse

Au terme de cette analyse nous estimons que **l'appareil est moyennement exposé au risque d'avalanche.**

**Les avalanches du secteur du Signal de l'Homme ne constituent pas une menace forte pour l'installation** dans la mesure où l'on estime que seuls les phénomènes de grande période de retour ( $T \sim 100$  ans) peuvent atteindre le front de neige des Orgières.

**Les avalanches du versant des Sûres touchent couramment la remontée mécanique :**

- En situation nivo-météorologique courante à rare ( $T < 30$  ans), la ligne est concernée par des avalanches d'ampleur modeste imposant des efforts modérés pour des pylônes de télésiège. La gare G1 est touchée par des avalanches en fin de vie. Les dommages sur la gare sont essentiellement liés à la poussée de la neige (la pression cinétique n'est pas prédominante dans cette phase d'arrêt). Les hauteurs de neige déposée au droit de la gare sont estimées à 4 m.
- Aux plus longues périodes de retour ( $T > 30$  ans), les avalanches imposent localement des efforts d'intensité moyenne (probablement des pressions cinétiques inférieures à 50 kPa) dans l'intervalle 1600-1780 m. La gare G1 est touchée par des avalanches coulantes en phase d'arrêt. Leur potentiel de dommage à la structure est modéré, mais il est fort sur les parties fragiles telles que véhicules en gare, poste de commande, armoires électriques.

**La gare G2 n'est pas concernée par le risque d'avalanche.**

La conduite d'un PIDA régulier permet de diminuer significativement les volumes de neige engagés dans les avalanches, et par conséquent de voir au voisinage de la gare des dépôts moins massifs que dans le cas d'avalanches naturelles.

# 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 permettent 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 (voir figures 4.2 et 4.3).

### 3.1.1 Modèle utilisé pour le calcul

Pour les **avalanches coulantes**, nous avons utilisé le code de calcul AVAC fondé sur la résolution d'équations du mouvement 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 1994, elle

a été utilisée depuis 1997 tout en connaissant de nombreuses évolutions<sup>1</sup>. Plus d'information sur ce modèle et le calcul des pressions sont disponibles sur le site de [Toraval](http://www.toraval.ch). Le principe général des modèles de calcul est explicité dans l'ouvrage « Dynamique des avalanches » par Christophe Ancey (Presses Polytechniques Fédérales de Lausanne, Lausanne, 2006). Nous utilisons actuellement la version AVAC 3.1. Depuis l'été 2019, le code AVAC a été rendu librement téléchargeable depuis GitHub ; voir le site [www.toraval.ch/avac](http://www.toraval.ch/avac) pour plus d'informations.

AVAC 3.1 est un code bidimensionnel qui permet de calculer l'évolution sur une topographie complexe d'une masse de neige. Les équations du mouvement sont moyennées selon la hauteur : 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 supposée constante et égale à  $\rho = 300 \text{ kg/m}^3$ . L'avalanche est soumise à un frottement de type Voellmy ; la contrainte pariétale  $\tau_p$  est une fonction *ad hoc* censée traduire deux processus : un frottement coulombien (comportement granulaire de l'avalanche) et une résistance inertielle (frottement de l'air, effet centrifuge, etc.) exprimée comme une fonction quadratique de la vitesse

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

avec  $\sigma = \rho g h \cos \theta$  la contrainte normale,  $\theta$  la pente locale,  $\mu$  et  $\xi$  les coefficients de frottement de Voellmy.

### 3.1.2 Paramètres utilisés pour le calcul

Les deux paramètres  $\mu$  et  $\xi$  doivent être ajustés à partir des données de terrain. 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 (l'épaisseur  $d_0$  est l'épaisseur de neige qui sert à estimer l'épaisseur de la cassure<sup>2</sup>). Les calculs ont été réalisés avec une maille de 1 m, mais AVAC permettant le raffinement automatique de maillage en cours de calcul, la maille de calcul a pu être affinée jusqu'à 25 cm localement. On considère deux zones de départ : zone 1 (les Sûres) et zone 2 (Signal de l'Homme).

**Tableau 3.1** – Épaisseur de neige utilisée pour estimer l'épaisseur de la cassure, l'épaisseur totale du manteau neigeux (selon la verticale), les coefficient de Voellmy  $\mu$  et  $\xi$  en fonction de la période de retour.

	zone 1		zone 2			
	$T = 30$ (pida)	$T = 30$	$T = 100$	$T = 30$	$T = 100$	$T > 100$ ans
$d_0$ (cm)	60	90	100	90	100	150
$H$ (cm)	170	170	190	170	190	190
$\mu$	0,40	0,35	0,30	0,30	0,30	0,20
$\xi$ ( $\text{s}^2 \cdot \text{m}^{-1}$ )	800	800	1000	1000	1400	1800

1. 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](http://www.toraval.ch).

2. Elles sont corrigées en tenant compte d'un gradient hypsométrique de 3 cm par tranche de 100 m d'altitude pour estimer les cumuls de neige dans les zones de départ (dans la tranche 1700-1850 m)

### 3.1.3 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 : 30 ans et 100 ans.** Dans les calculs, nous avons considéré que la période de retour de l'avalanche coïncidait avec celle des chutes de neige sur trois jours.
- 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.
- 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.
- 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. La pression cinétique est  $p = \rho \bar{u}^2 / 2$ , (avec  $\bar{u}$  la vitesse moyenne de l'avalanche et  $\rho$  la masse volumique locale);  $c$  est la pression de référence au sein de l'écoulement loin de tout obstacle. **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.
- Dans la plupart des scénarios, l'action du PIDA est ignorée (on se place dans le cas de figure très défavorable où le PIDA n'aurait pu être mené à bien pendant plusieurs jours) pour les avalanches naturelles déclenchées hors PIDA ; dans ce cas, c'est tout le volume de neige accumulée sur trois jours qui est mobilisé. Pour un scénario (signalé par la mention « pida » dans le tableau 3.1), l'action du PIDA est prise en compte ; dans ce cas, c'est tout le volume de neige accumulée sur une journée qui est mobilisé.
- 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 imposer à court terme d'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  $5000 \pm 1000$  kN·m). On sait que de tels efforts sont exceptionnellement possibles et on sait les estimer grossièrement<sup>3</sup>, 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

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

comme des horsains<sup>4</sup>, et en pratique, on ne les a pas considérés. Nous n'avons pas considéré un scénario « Causerets » ici.

---

4. 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.

## 3.2 Résultats des simulations numériques

### 3.2.1 Avalanches rares ( $T \sim 30$ ans) dans le cadre d'un PIDA

↔ Voir cartes 3.1 et 3.2. Coordonnées Lambert 93. Échelle initiale 1 : 3000.

Les simulations montrent que la ligne traverse plusieurs panneaux, dont la purge provoque des avalanches superficielles. Les écoulements sont peu épais (de l'ordre de 50 cm dans la zone d'écoulement, et des dépôts de l'ordre de 2 m dans la zone de dépôt près de la G1). Des effets de souffle légers peuvent plâtrer la gare.

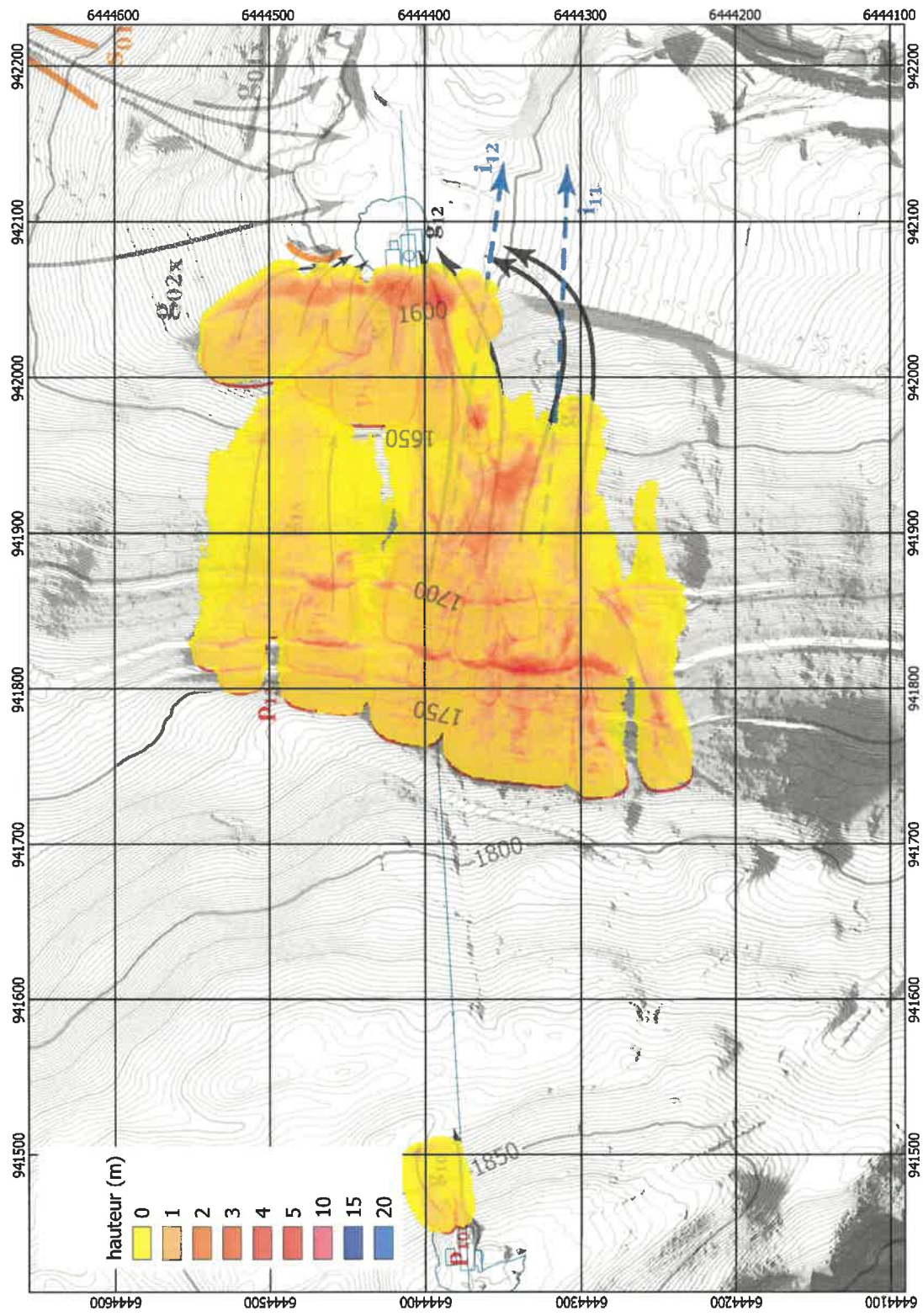


Figure 3.1 – Carte des simulations numériques montrant l’emprise maximale et la variation des hauteurs maximales pour  $T = 30$  ans et des avalanches coulantes dans le cadre d’un PIDA.



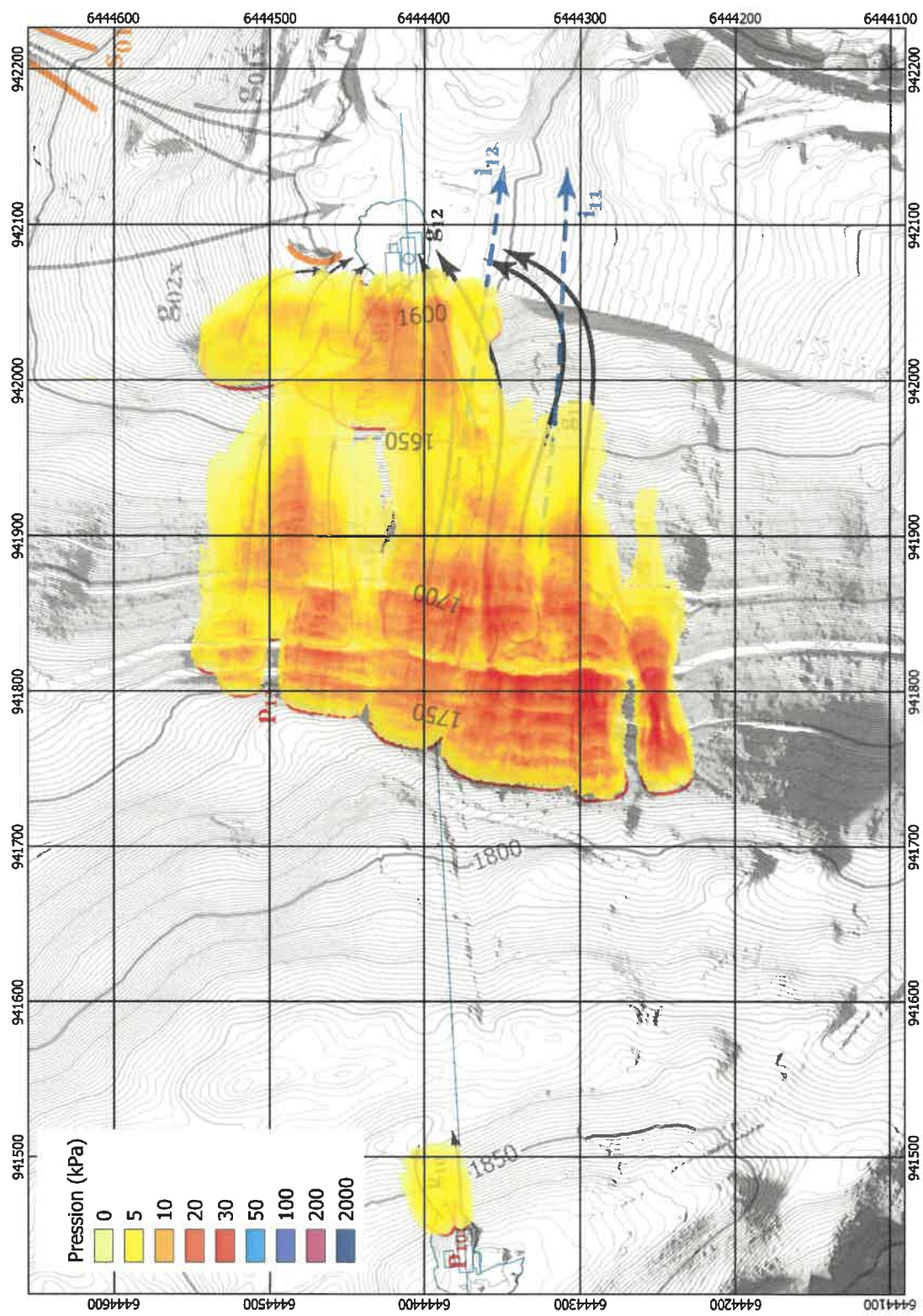


Figure 3.2 – Carte des simulations numériques montrant l'emprise maximale et la distribution des pressions cinétiques  $p = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^2$  maximales au sein de l'avalanche pour  $T = 30$  ans dans le cadre d'un PIDA.



### 3.2.2 Avalanches naturelles rares ( $T \sim 30$ ans)

↪ Voir cartes 3.3 à 3.6. Coordonnées Lambert 93. Échelles initiales 1 : 3000 (zone 1) et 1 : 5000 (zone 2).

Pour des avalanches naturelles hors PIDA, l'épaisseur de la cassure croît un peu, ce qui explique une majoration du risque au niveau de la ligne. Si les hauteurs d'écoulement et les pressions cinétiques restent modérées dans la zone d'écoulement (environ 30 kPa, pour 1 m d'épaisseur), on note qu'en revanche, les dépôts sont plus significatifs dans la zone d'arrêt, avec des épaisseurs de dépôt dans la fourchette 5–7 m dans les environs de la gare (environ 2 m dans la gare) et des pressions cinétiques de l'ordre de 5 kPa. Des dommages sont possibles sur les parties les plus fragiles de la gare.

Les avalanches issues du Signal de l'Homme ne concernent pas le projet.

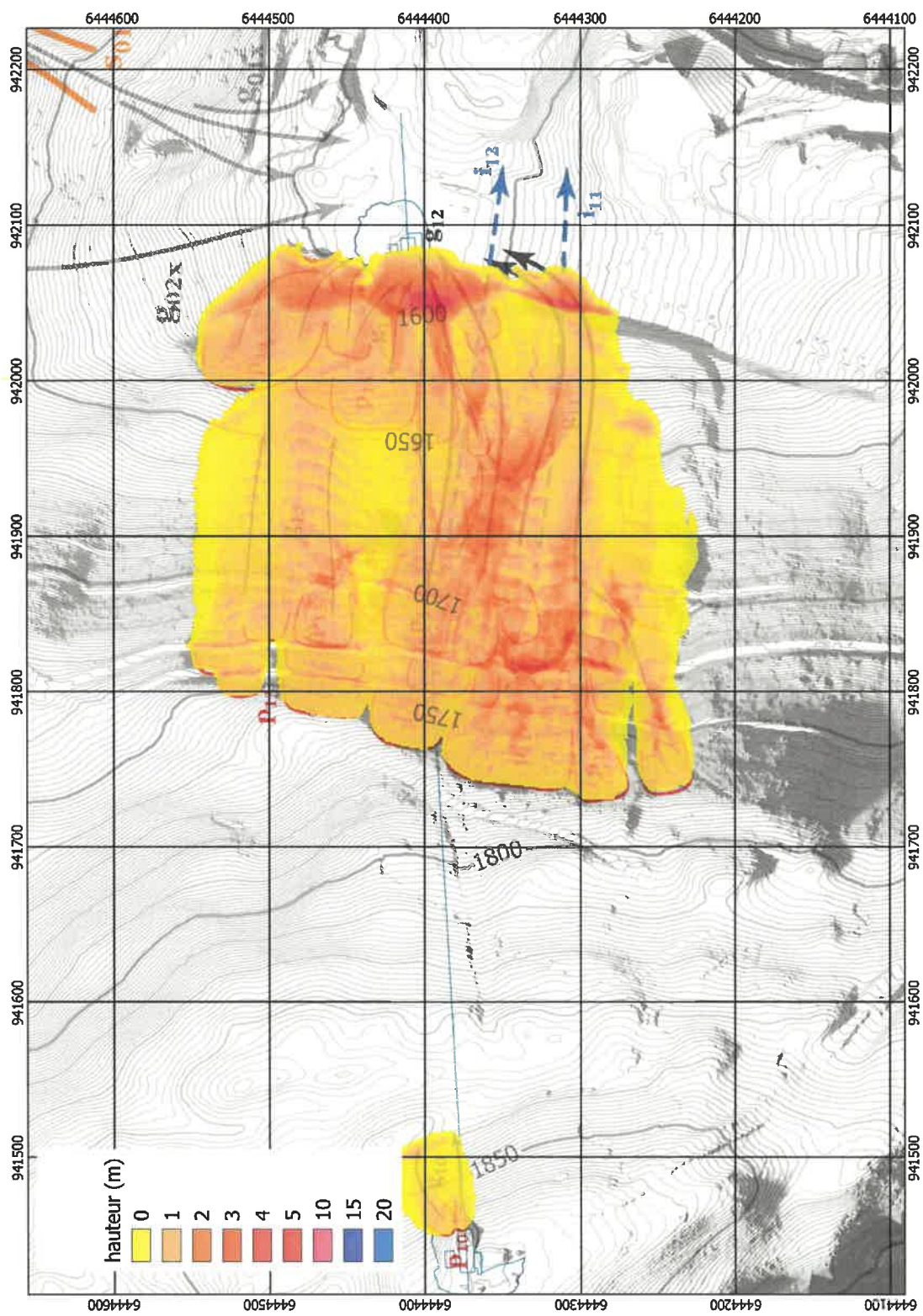
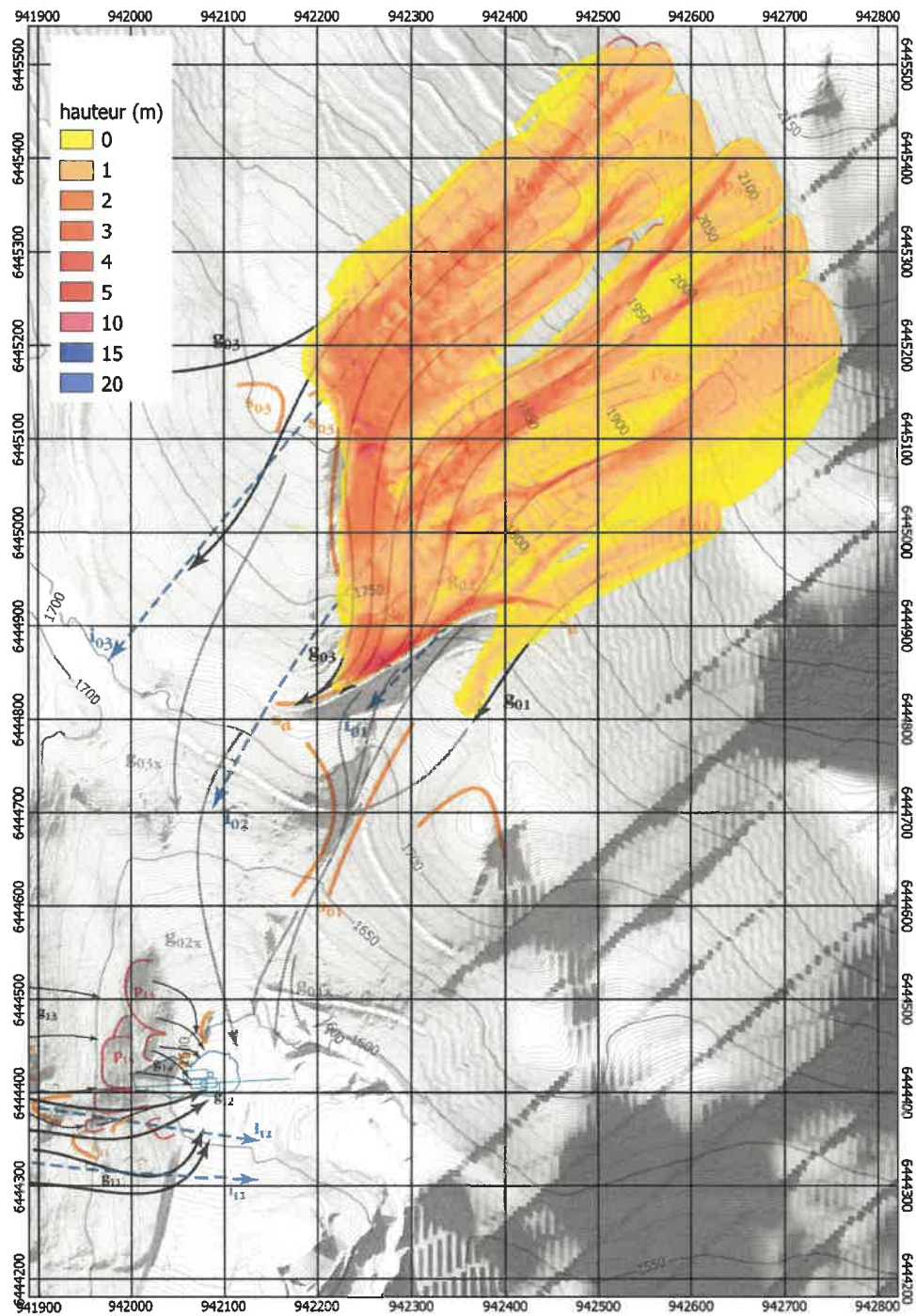


Figure 3.3 – Carte des simulations numériques montrant l’emprise maximale et la variation des hauteurs maximales pour  $T = 30$  ans et des avalanches coulantes pour les avalanches issues de la zone 1 (Sûres).



**Figure 3.4** – Carte des simulations numériques montrant l’emprise maximale et la variation des hauteurs maximales pour  $T = 30$  ans et des avalanches coulantes pour les avalanches issues de la zone 2 (Signal de l’Homme).



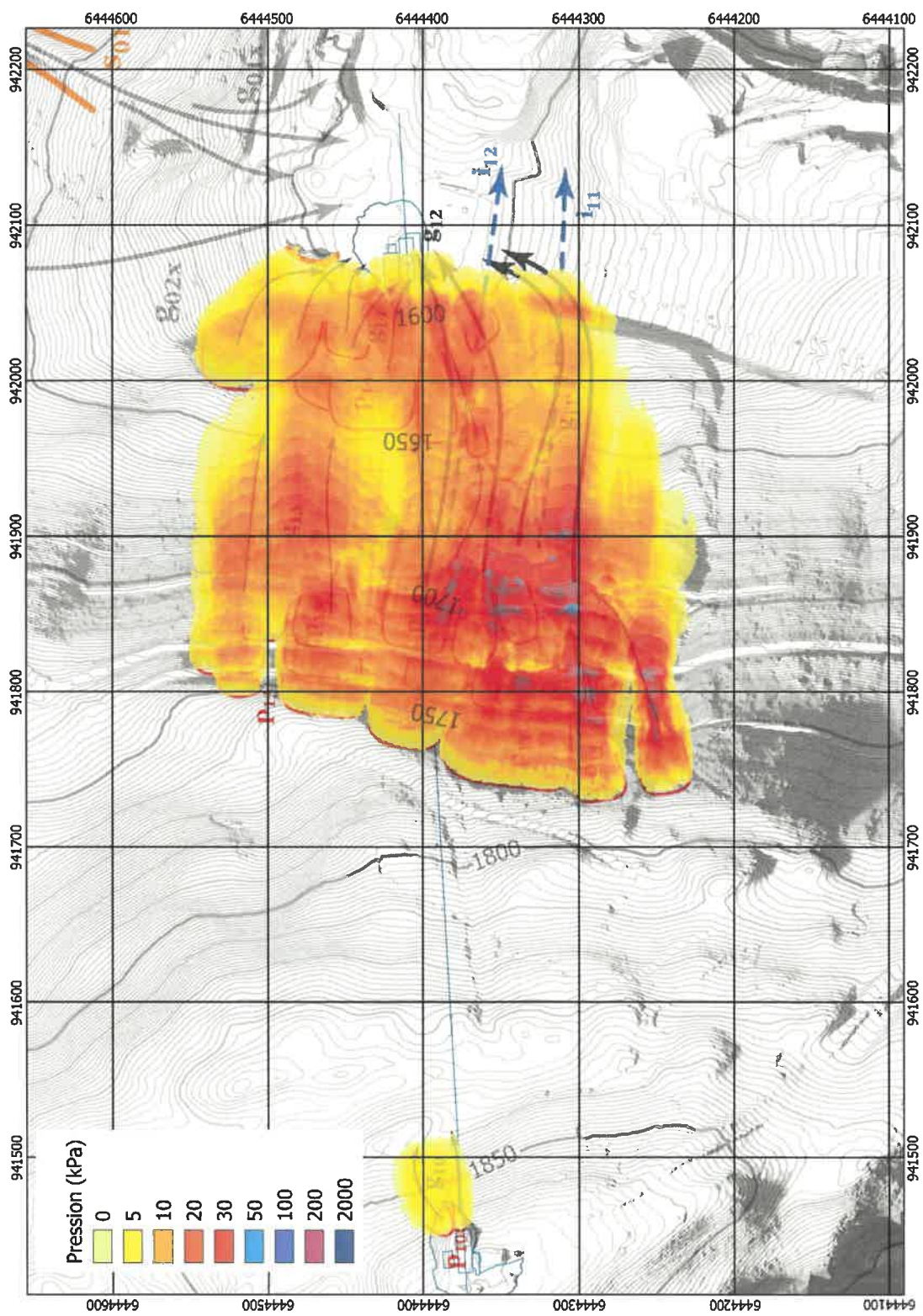
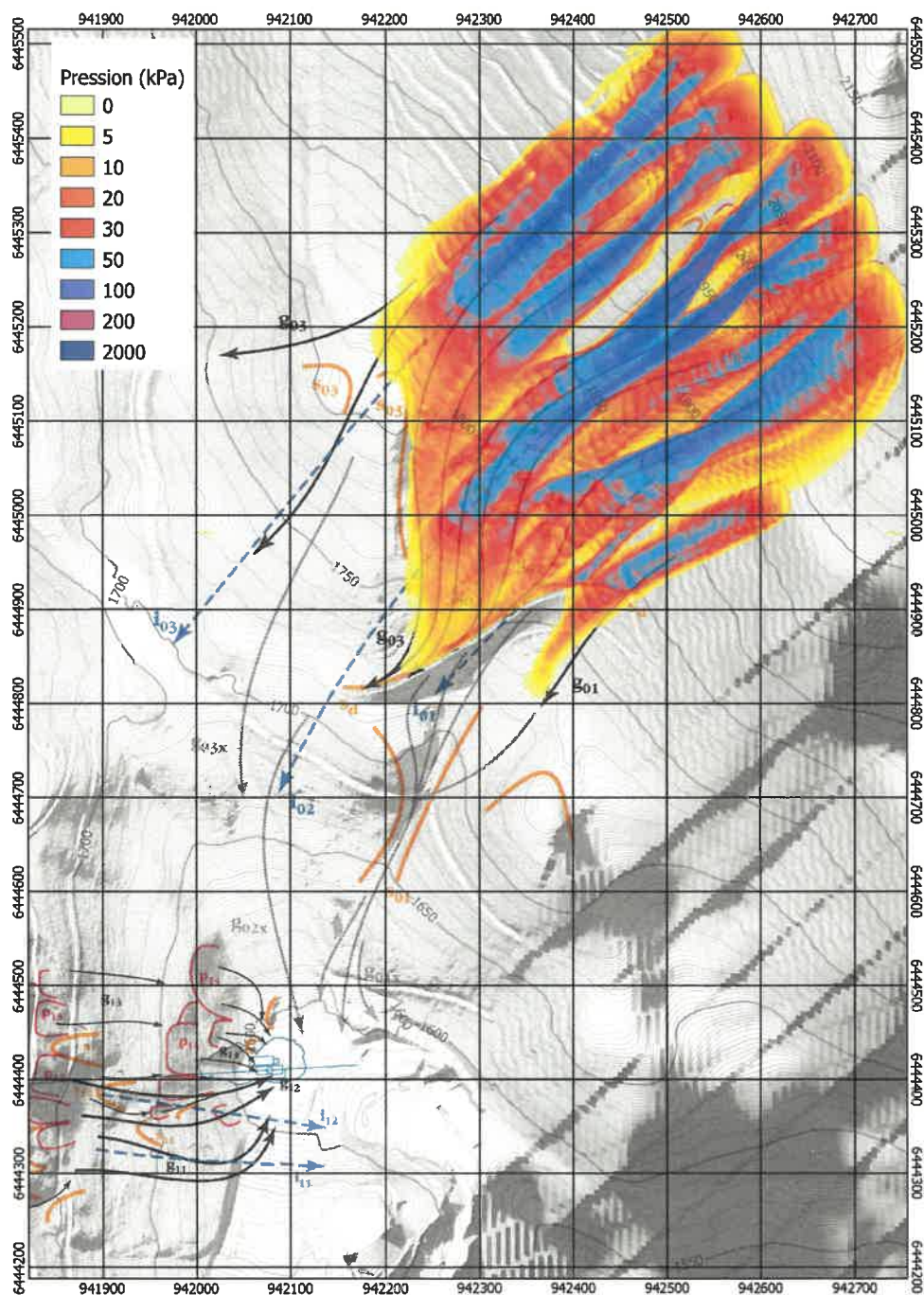


Figure 3.5 – Carte des simulations numériques montrant l’emprise maximale et la distribution des pressions cinétiques  $p = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^2$  maximales au sein de l’avalanche pour  $T = 30$  ans pour les avalanches issues de la zone 1 (Sûres).



**Figure 3.6** – 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 pour les avalanches issues de la zone 2 (Signal de l'Homme).

### 3.2.3 Avalanches naturelles exceptionnelles ( $T \sim 100$ ans)

↪ Voir cartes 3.7 à 3.10. Coordonnées Lambert 93. Échelle initiale 1 : 3000.

Les simulations montrent peu de différences par rapport aux avalanches trentennales en dépit d'un volume de neige mobilisé un peu plus important et d'une fluidité accrue de la neige. Ces faibles différences s'expliquent par le caractère « coulée » (glissement du versant sans parcours significatif du volume de neige).

Les grandeurs calculées pour  $T \sim 100$  ans sont en continuité avec celles obtenues pour les avalanches  $T \sim 30$  ans. Les hauteurs de dépôt et pressions cinétiques aux abords de la gare de départ sont un peu plus élevées que pour les avalanches trentennales (hauteur de l'ordre de 2,3 m dans la gare, 5 m dans les environs, et des pressions cinétiques ne dépassant pas 8 kPa).

Les avalanches issues du Signal de l'Homme ne concernent pas le projet.



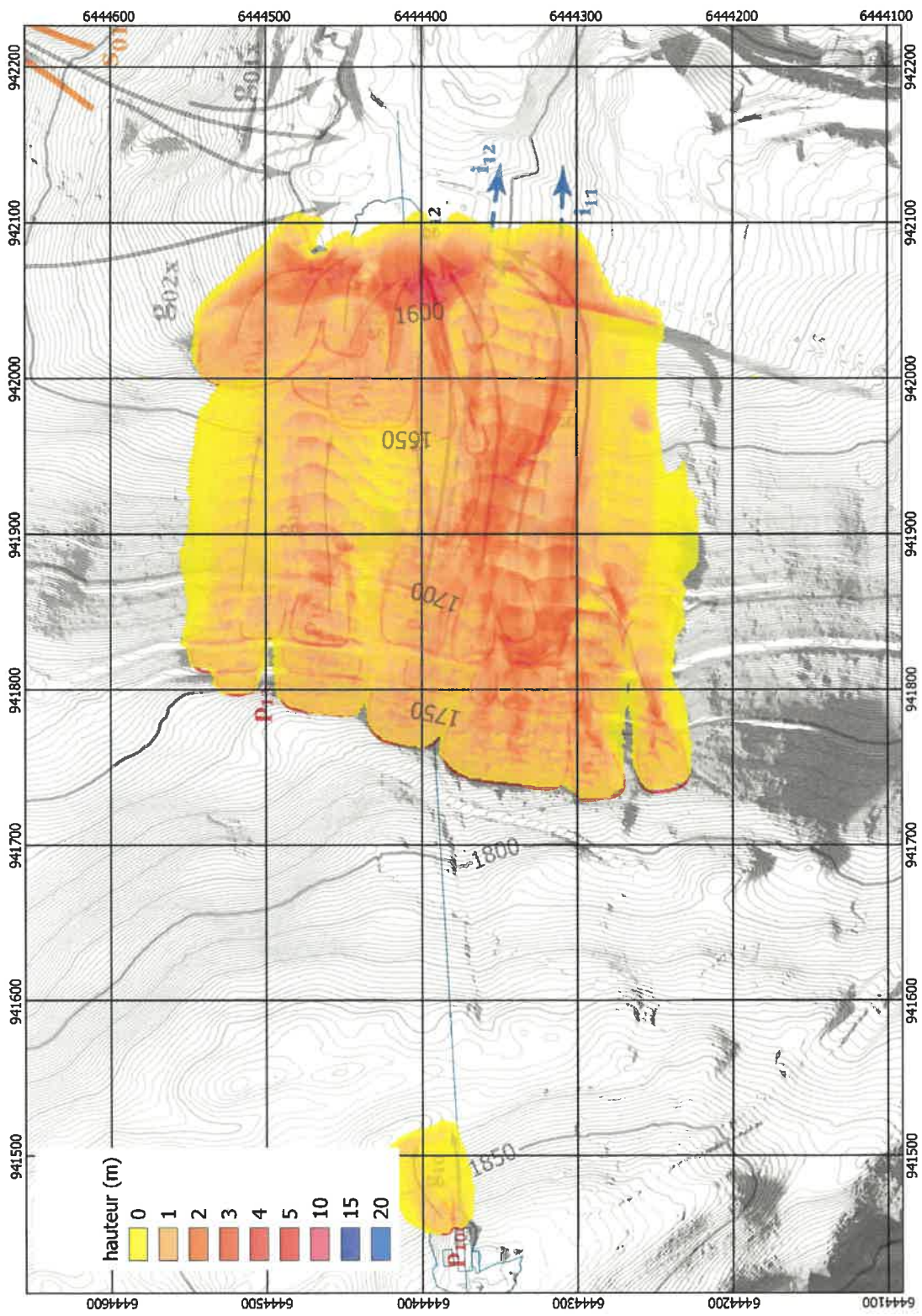
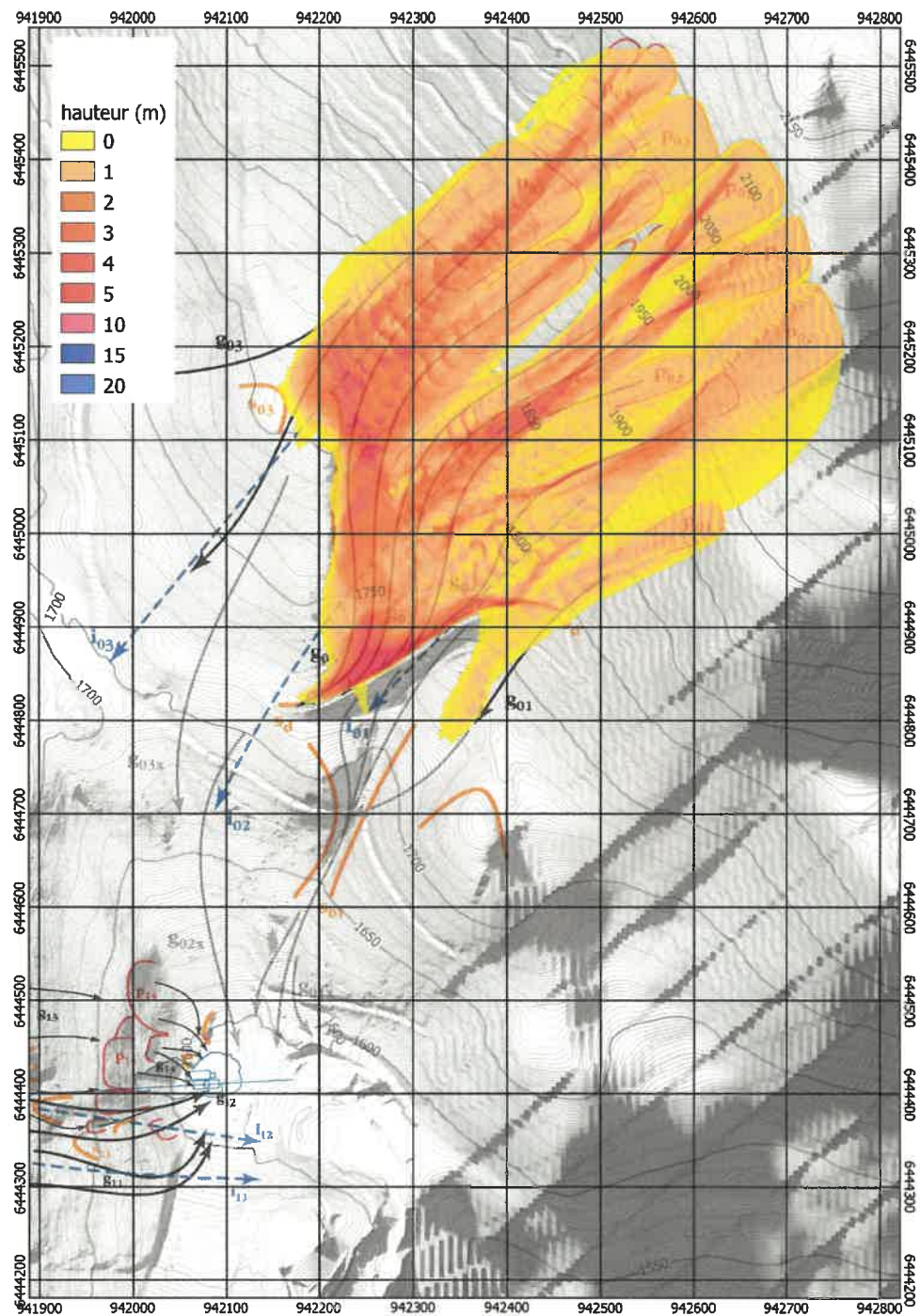


Figure 3.7 – Carte des simulations numériques montrant l’emprise maximale et la variation des hauteurs maximales pour  $T = 100$  ans et des avalanches coulantes pour les avalanches issues de la zone 1 (Sûres).



**Figure 3.8** – Carte des simulations numériques montrant l’emprise maximale et la variation des hauteurs maximales pour  $T = 100$  ans et des avalanches coulantes pour les avalanches issues de la zone 2 (Signal de l’Homme).



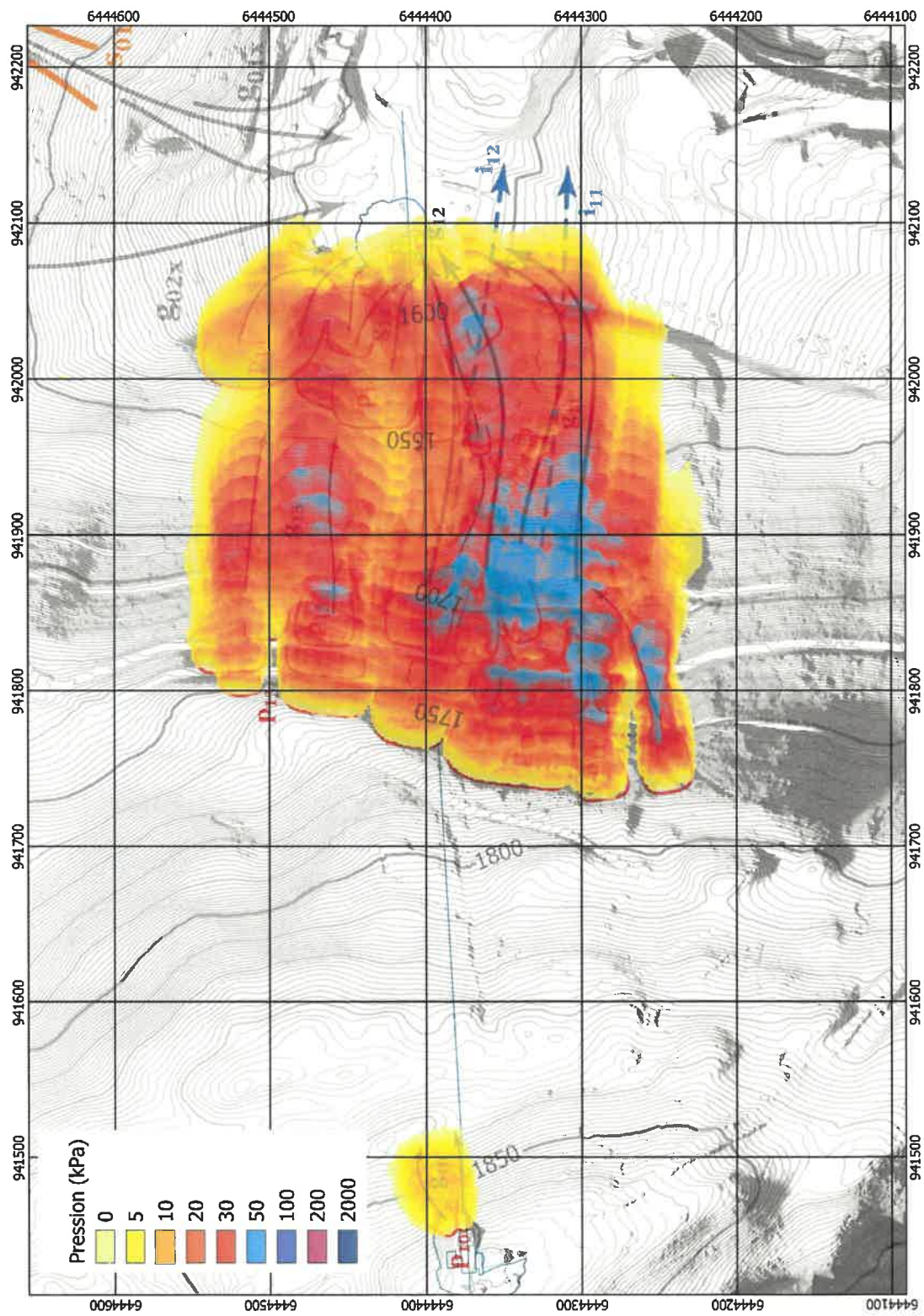
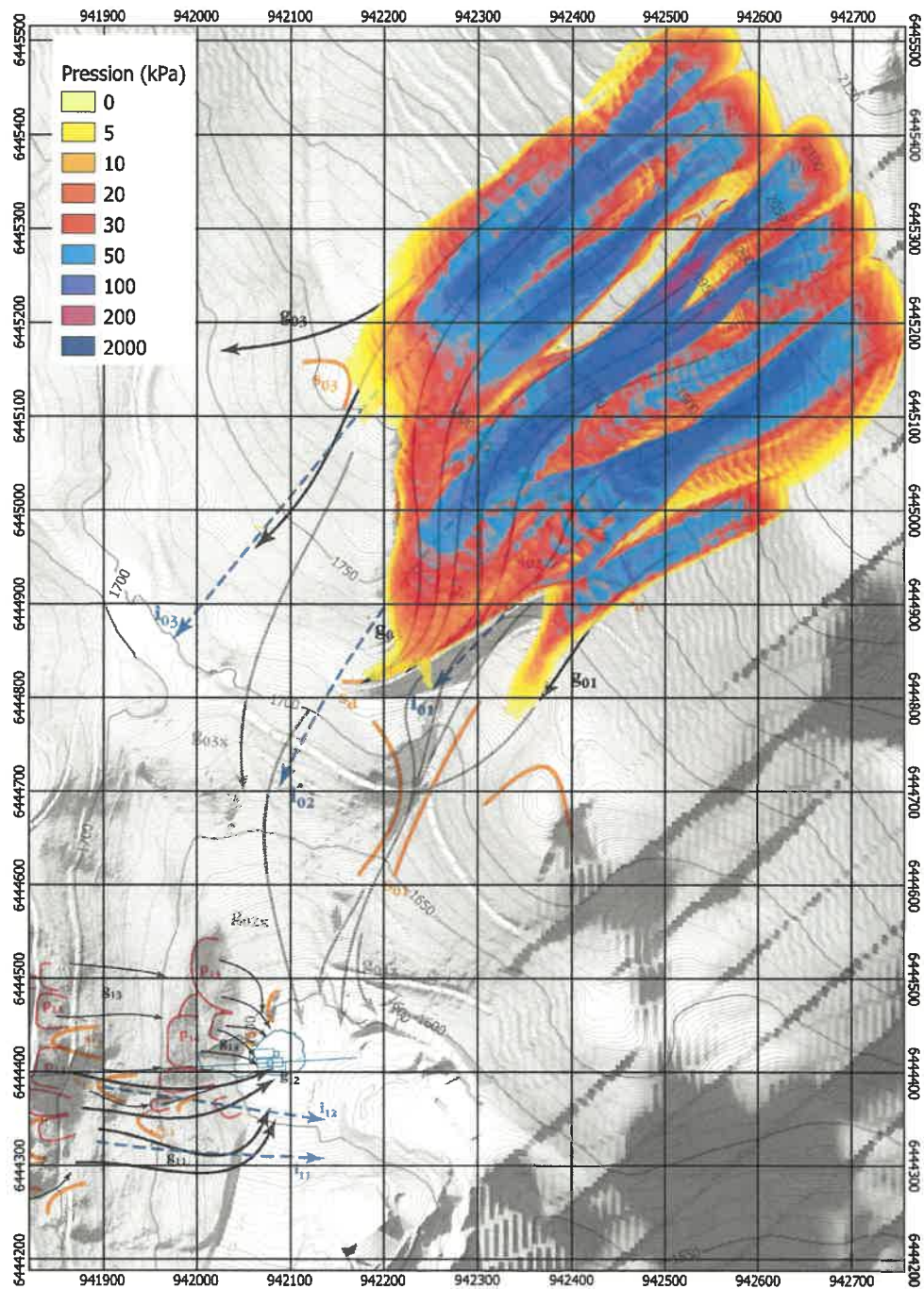


Figure 3.9 – Carte des simulations numériques montrant l'emprise maximale et la distribution des pressions cinétiques  $p = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^2$  maximales au sein de l'avalanche pour  $T = 100$  ans pour les avalanches issues de la zone 1 (Sûres).



### 3.2.4 Avalanches maximales vraisemblables ( $T > 100$ ans)

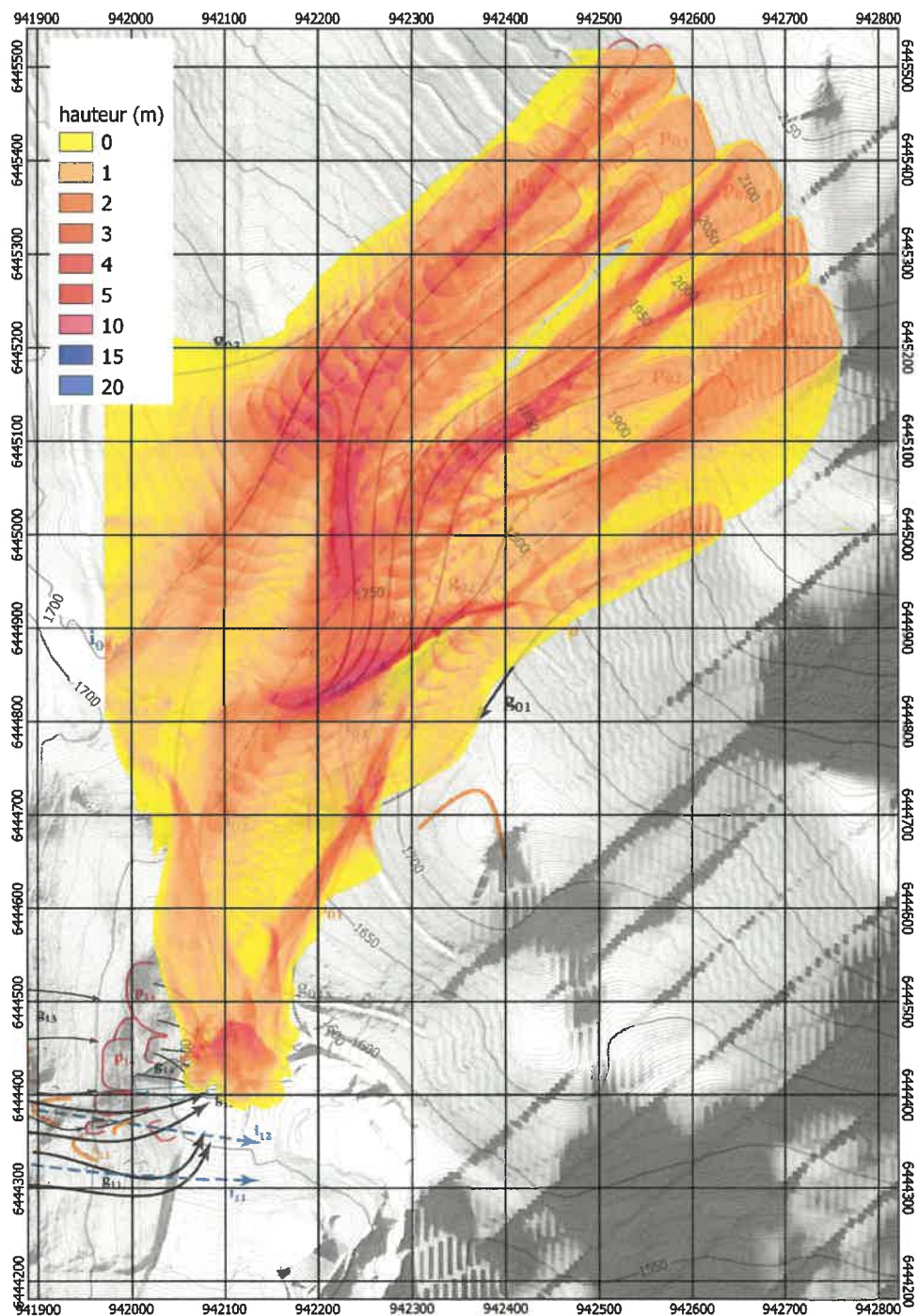
↪ Voir cartes 3.11 et 3.12. Coordonnées Lambert 93. Échelle initiale 1 : 5000.

Les avalanches issues du Signal de l'Homme ne concernent pas le projet pour des périodes de retour  $T \leq 100$  ans. La question se pose de savoir si pour des événements plus rares que ceux retenus en zonage urbain, typiquement dans le cas d'une avalanche de grande ampleur (avalanche maximale vraisemblable  $T > 100$  ans), la remontée mécanique peut être touchée. On prendra garde que pour réduire le coût de calcul, nous n'avons pour poursuivi le calcul dans la zone à l'ouest de l'abscisse  $x = 941\,950$  m (dans le système Lambert 93); cela explique le trait vertical dans les emprises reportées sur les cartes 3.11 et 3.12.

Ce scénario d'avalanche de grande ampleur correspond à un épisode météorologique critique (comme février 1970 dans les Alpes du Nord, ou dans une ampleur moindre février 1999) où une certaine quantité de neige s'accumule sur plusieurs jours et donne naissance à une avalanche mobilisant toute la couche de neige récente. Le plus souvent, ce sont des avalanches de neige froide et sèche qui sont à redouter (pour certains sites, ce sont plutôt des avalanches de neige mouillée dites de fond qui peuvent être le problème). C'est l'hypothèse du calcul ici.

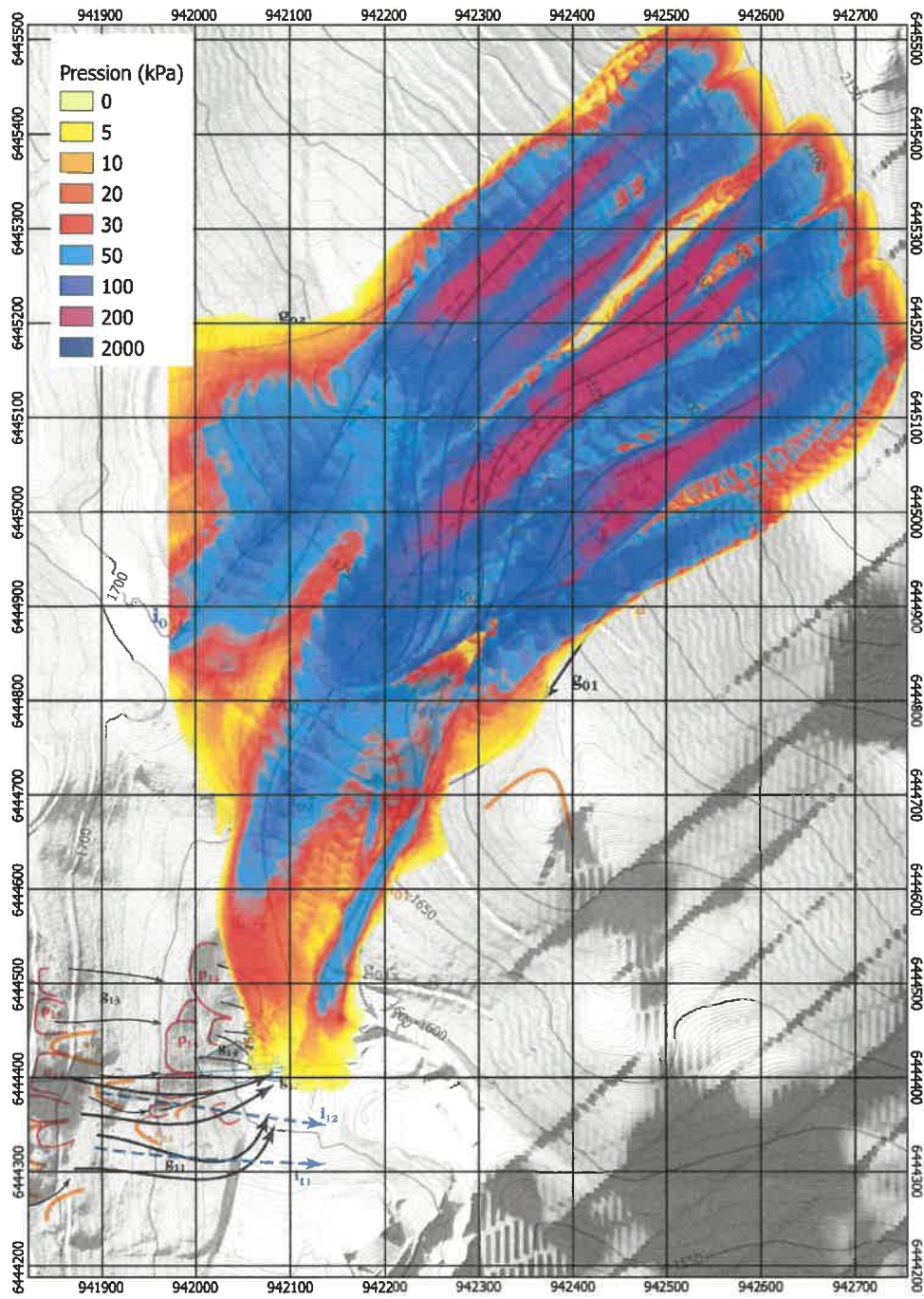
Dans ce scénario, la gare de départ serait touchée par des avalanches de grande ampleur issues du Signal de l'Homme. L'impact resterait modéré (pression cinétique inférieure à 10 kPa), mais les écoulements pourraient être localement épais de plusieurs mètres dans la zone d'arrêt (de l'ordre de 2 m dans la gare). Ces valeurs sont proches de celles observées pour les simulations pour des avalanches  $T = 100$  ans issues des Sûres. Il n'y a donc pas de modification notable du risque si on considère ce scénario.





**Figure 3.11** – Carte des simulations numériques montrant l’emprise maximale et la variation des hauteurs maximales pour  $T = 300$  ans et des avalanches coulantes pour les avalanches issues de la zone 2 (Signal de l’Homme).





**Figure 3.12** – 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  $T = 300$  ans pour les avalanches issues de la zone 2 (Signal de l’Homme).

## Synthèse

Le choix du scénario pour le dimensionnement des pylônes est à la discrétion du maître d'ouvrage. Ce choix est motivé par les deux considérations suivantes :

- 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 ce télémix au cours de sa durée d'exploitation (au moins la période d'amortissement usuelle), alors que 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 ;
- par le degré de confiance apporté par le PIDA actuel. Si le maître d'ouvrage considère que le PIDA est effectif dans toutes les situations critiques, il peut considérer que le scénario pour le dimensionnement implique une avalanche accidentelle. Dans le contraire, si le maître d'ouvrage considère que le PIDA peut connaître une défaillance, alors il faudrait opter pour un scénario d'avalanche naturelle. Cette distinction entre PIDA fonctionnel et PIDA défaillant est importante pour évaluer le volume de neige mobilisable par l'avalanche de projet (voir § 3.1).

L'étude s'est fondée sur trois scénarios d'avalanche de projet :

- avalanche accidentelle rare ( $T \sim 30$  ans) dans le cadre d'un PIDA,
- avalanche naturelle rare ( $T \sim 30$  ans) en cas de défaillance du PIDA, et
- avalanche naturelle rare ( $T \sim 100$  ans) toujours en cas de défaillance du PIDA.

Les tableaux 4.1 à 4.3 fournissent les efforts (pression et hauteur d'écoulement) pour chacun des tronçons de la ligne du télémix. Les profils en long de ces tableaux joignent les points dénommés G1-1 et G2-2 de l'étude de ligne fournie par le maître d'œuvre<sup>1</sup>. Voici le détail des résultats pour chacun des trois scénarios :

- Le projet de télémix des Sûres est soumis à un risque modéré d'avalanche.** Si le PIDA peut être exécuté continûment (c'est-à-dire sans aucune interruption quelles que soient les circonstances), les avalanches ne concernent que les pylônes de la ligne (avec une pression cinétique ne dépassant pas 20 kPa, et une hauteur d'écoulement inférieure à 1 m). La gare de départ peut être soumise à un plâtrage ; la capacité de dommages à la structure est très faible (mais il peut y avoir des dommages légers aux parties les plus fragiles de la gare). Des dépôts épais d'environ 2 m sont vraisemblables. Le tableau 4.1

1. Plan n° 2897-03-00 du 20 janvier 2022.

fournit les valeurs typiques par tronçon des efforts exercés par l'avalanche de projet sur la ligne projetée.

- (ii) L'interruption du PIDA (p. ex. comme en 2020 et 2021 pour des raisons sanitaires) peut conduire à une augmentation du risque. Pour les avalanches trentennales ( $T \sim 30$  ans), l'accroissement du risque concerne surtout la gare de départ, qui peut être touchée de façon plus marquée par une avalanche en fin de vie. Dans la zone d'écoulement, les caractéristiques dynamiques de l'avalanche sont assez voisines de ce qui a été obtenu pour le calcul considérant un PIDA actif : **le projet de télémix des Sûres est soumis à un risque modéré d'avalanche (ligne et gare de départ concernées)**. Le tableau 4.2 fournit les valeurs typiques par tronçon des efforts exercés par l'avalanche de projet sur la ligne projetée. Pour le maître d'ouvrage, opter pour ce scénario implique une plus grande protection de la gare de départ.
- (iii) Toujours dans l'hypothèse d'un PIDA défaillant et d'une avalanche de très grande ampleur (avalanche centennale  $T \sim 100$  ans), on note que les efforts sont un peu plus importants que pour l'avalanche trentennale, mais compte tenu du caractère « Weibull » (phénomène de plafonnement des cumuls de neige aux grandes périodes de retour), les différences entre avalanches trentennale et centennale sont modérées. Elles s'observent essentiellement au niveau de la gare de départ qui se situe dans la zone d'arrêt des avalanches majeures. Ce scénario ne change pas fondamentalement la problématique du risque pour le télémix. Le tableau 4.3 fournit les valeurs typiques par tronçon des efforts exercés par l'avalanche de projet sur la ligne projetée.

L'étude écarte un accroissement du risque résultant d'avalanches majeures issues du Signal de l'Homme. Ce sont les pentes des Sûres qui constituent la menace.

- Pour plus d'informations sur les grandeurs employées ici, télécharger le document [www.toraval.fr/telec/addendum.pdf](http://www.toraval.fr/telec/addendum.pdf).

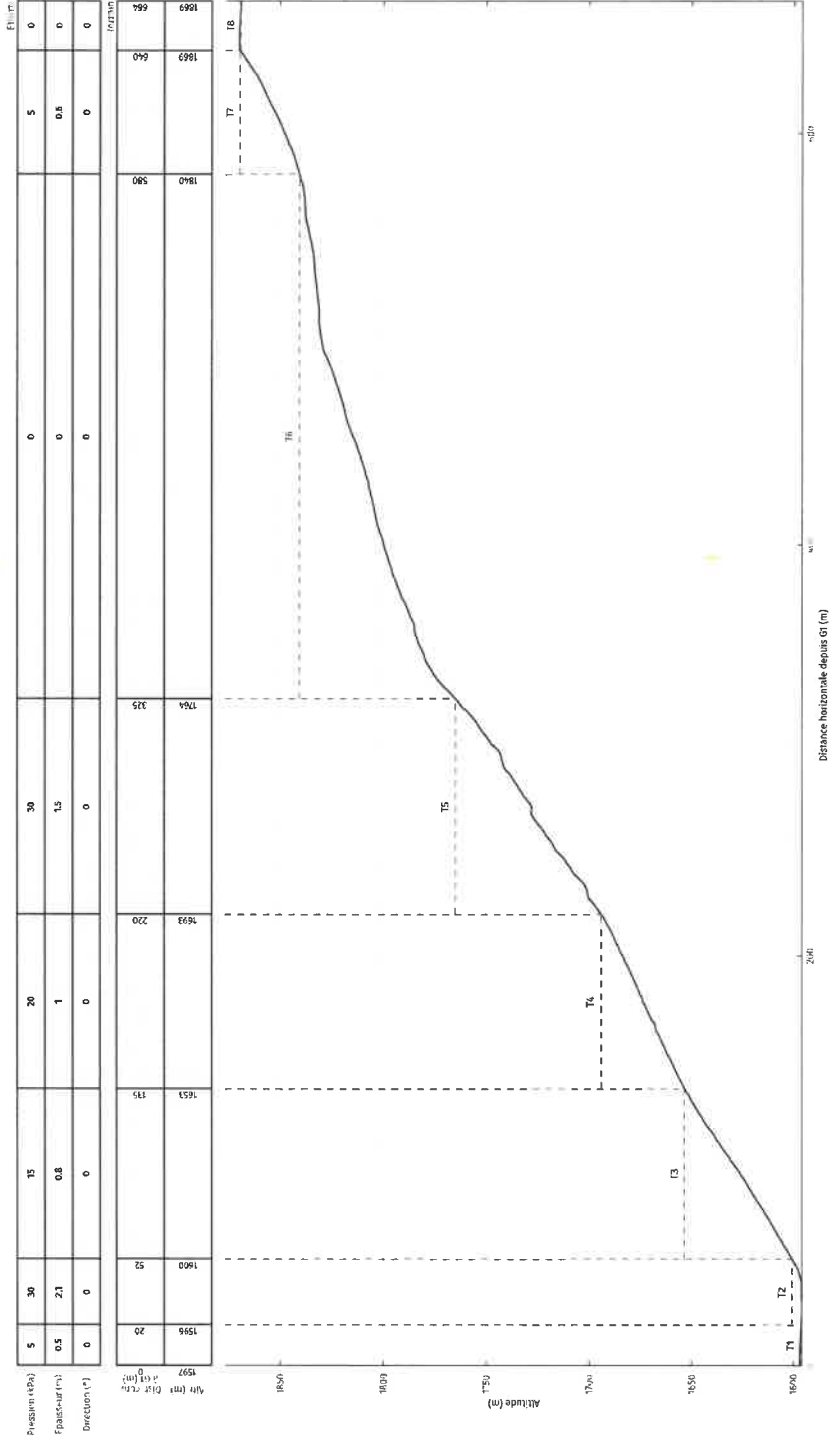


Figure 4.1 – Avalanches rares pour le télémix ( $T \sim 30$  ans) dans le cadre d'un PIDA.

Projet: TSCD des Sûres - Auris-cr-Oisans

Diagramme généré par vulnOSE.sh

Date: 11 mars 2022

Réf: DCE TSCD des Sûres

Sources: Lamac 3.1.5

Système de coordonnées: Lambert93

Position G1: x = 942091, y = 6444411

Position G2: x = 941427, y = 6444373

Hypothèses de calcul:

Période de retour considérée: 30 ans

Défaillance du PIDA

Épaisseur de neige au sol: 170 cm

Type d'avalanche: coulante

Origine des abscisses: point C1-1 profil ERIC

Incertitude sur les épaisseurs au sol: ± 40 cm

Incertitude sur les pressions: ± 5 kPa

Incertitude sur les épaisseurs: ± 30 cm

Incertitude sur les directions: ± 20°

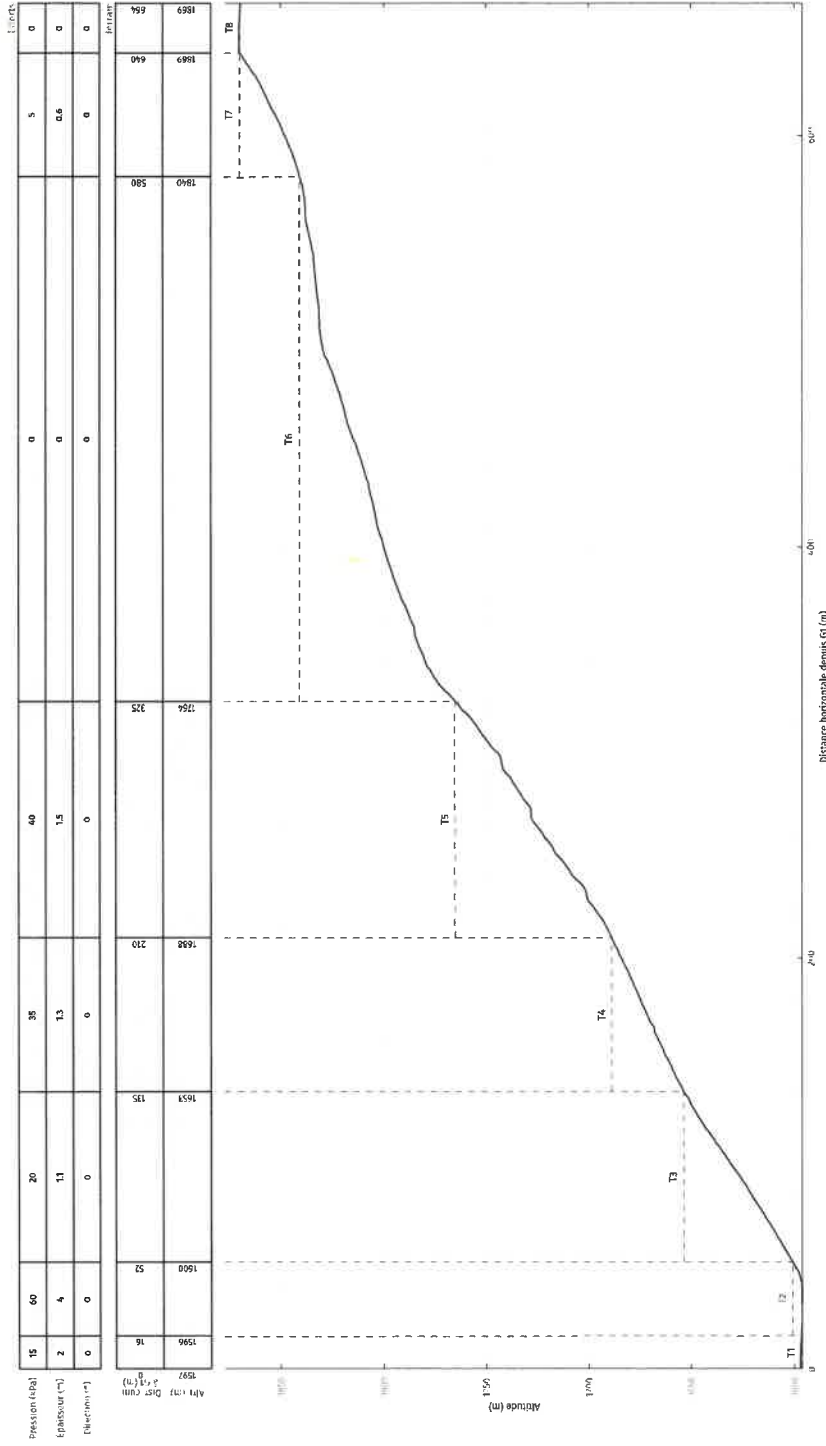


Figure 4.2 – Avalanches naturelles rares pour le télémix ( $T \sim 30$  ans).

Projet: TSCD des Sûres - Auris-en-Oisans

Diagramme généré par vulnOSE.sh

Date: 11 mars 2022

Réf.: DCE TSCD des Sûres

Sources: Lavig 3.1.5

Système de coordonnées: Lambert93

Position G1: x = 942091, y = 6444411

Position G2: x = 941427, y = 6444373

Hypothèses de calcul:

Période de retour considérée: 100 ans

Défaillance du PIDA

Épaisseur de neige au sol: 190 cm

Type d'avalanche: coulante

Origine des abscisses: point G1-1 profil ERIC

Incertitude sur les épaisseurs au sol: ± 40 cm

Incertitude sur les pressions: ± 5 kPa

Incertitude sur les épaisseurs: ± 30 cm

Incertitude sur les directions: ± 20°

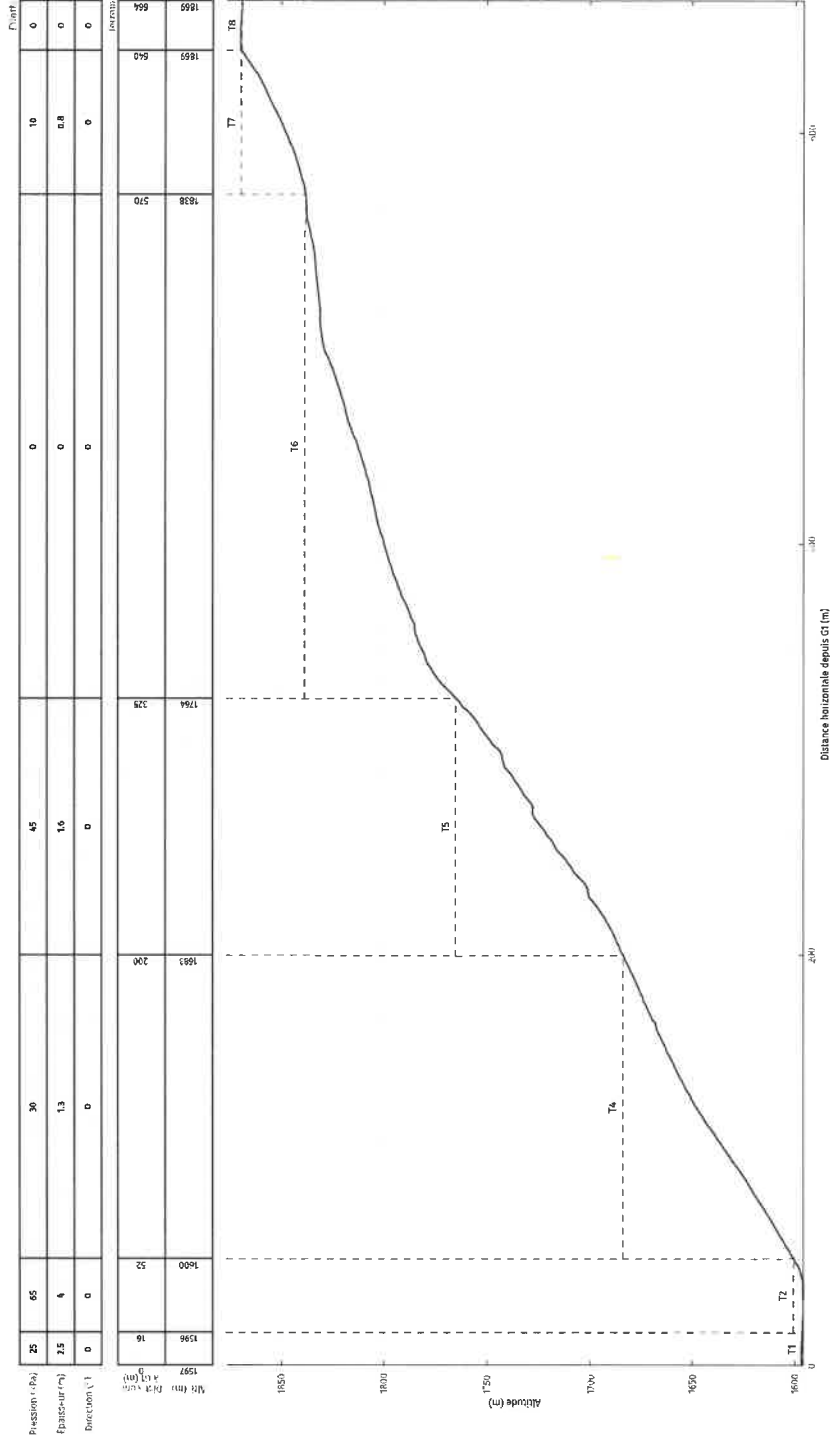


Figure 4.3 – Avalanches naturelles exceptionnelles pour le télémix ( $T \sim 100$  ans).



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 :
  - Prof. Dr Ing. Christophe Ancey ([ancey@toraval.ch](mailto:ancey@toraval.ch))
  - Vincent Bain ([bain@toraval.fr](mailto:bain@toraval.fr))
- commanditaire de l'étude : SATA Établissement Huez
- maîtrise d'œuvre : ERIC
- le corps de ce rapport contient 57 pages.
- pièce annexée : représentation tridimensionnelle

[http://telec.toraval.fr/3d/auris\\_2022.html](http://telec.toraval.fr/3d/auris_2022.html)

