



Ingénieurs-conseils

---

**Étude des risques d'avalanches sur le  
projet de TSD du Linga  
Station de Châtel, Haute-Savoie**

---

Rapport

---

décembre 2023

# Table des matières

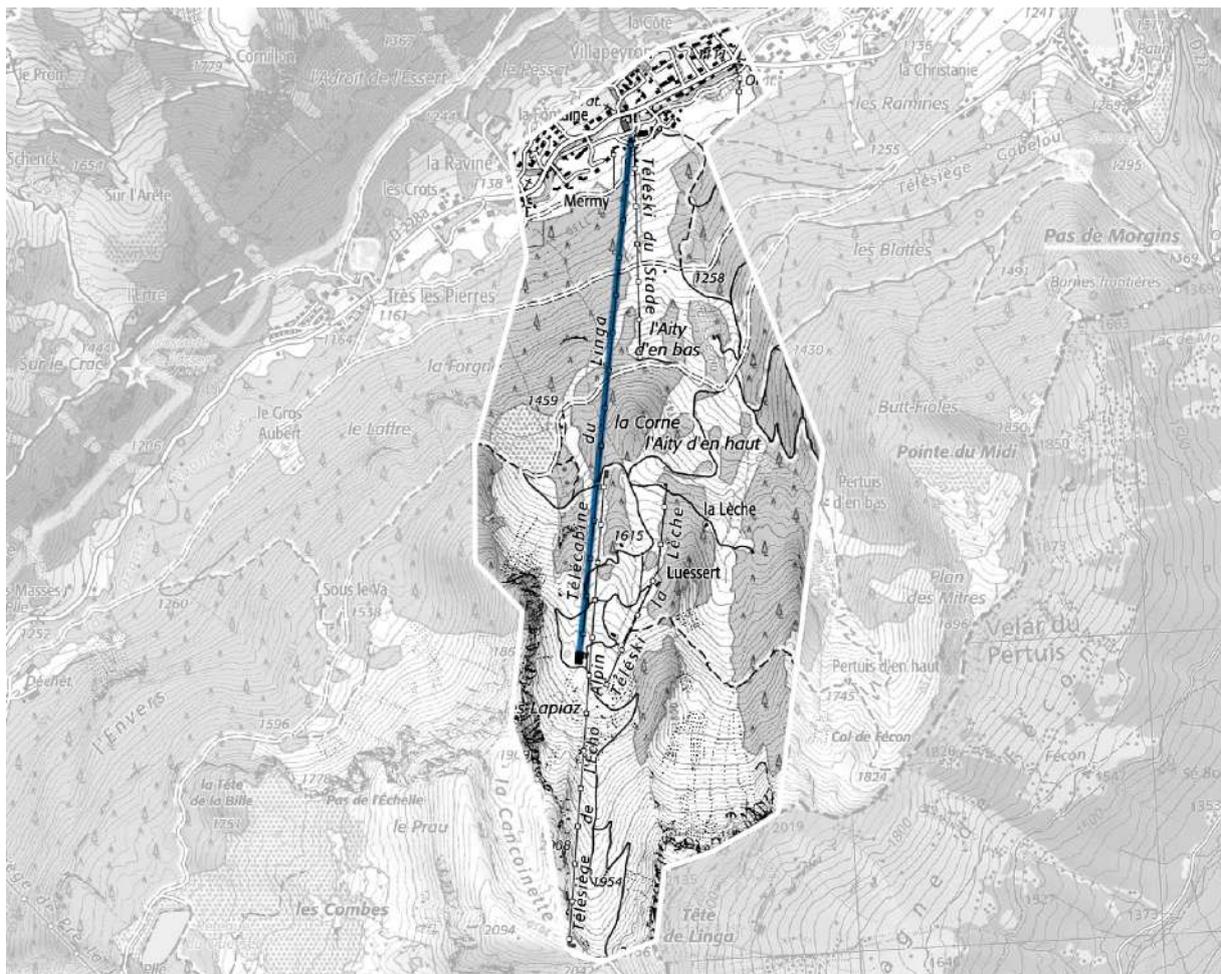
<b>1</b>	<b>Contexte nivo-météorologique</b>	<b>6</b>
1.1	Données . . . . .	6
1.2	Contexte climatique . . . . .	7
1.3	Analyse des précipitations . . . . .	7
1.3.1	Analyse des chutes de neige . . . . .	7
1.3.2	Analyse des chutes de pluie . . . . .	13
1.3.3	Étude des précipitations sur quelques heures . . . . .	17
1.4	Analyse des orages associés à des crues . . . . .	18
1.5	Épaisseur de neige au sol . . . . .	19
1.6	Synthèse . . . . .	21
<b>2</b>	<b>Analyse du risque torrentiel</b>	<b>22</b>
2.1	Données et contexte . . . . .	22
2.1.1	Hydrographie . . . . .	22
2.1.2	Géologie et fourniture en sédiment . . . . .	23
2.1.3	Morphologie du lit . . . . .	23
2.1.4	Type de crue . . . . .	23
2.2	Évaluation hydrologique des crues torrentielles . . . . .	24
2.2.1	Estimation des quantiles de débit rares par des méthodes empiriques . . . . .	25
2.2.2	Estimation des quantiles de débit rares par la méthode QdF . . . . .	26
2.2.3	Modèle GR4 . . . . .	28
2.2.4	Comparaison et synthèse . . . . .	30
2.3	Modélisation hydraulique . . . . .	32
2.3.1	Hypothèses du calcul . . . . .	32
2.3.2	Résultats du calcul . . . . .	33
2.4	Synthèse . . . . .	36

<b>3</b>	<b>Analyse du risque d'avalanche</b>	<b>37</b>
3.1	Méthodes . . . . .	37
3.2	Données . . . . .	37
3.3	Éléments historiques . . . . .	38
3.3.1	Enquête permanente sur les avalanches . . . . .	38
3.3.2	Carte de localisation des phénomènes d'avalanches . . . . .	39
3.3.3	PIDA et témoignage du service des pistes . . . . .	41
3.4	Analyse spatiale du risque d'avalanche . . . . .	44
3.4.1	Principe . . . . .	44
3.4.2	Secteur de la Lèche . . . . .	44
3.4.3	Secteur de la Forgne . . . . .	45
3.4.4	Secteur de la Corne . . . . .	45
3.4.5	Secteur du Linga . . . . .	46
3.4.6	Secteur des Lapiaz . . . . .	46
3.5	Synthèse . . . . .	48
<b>4</b>	<b>Analyse par simulation numérique des avalanches</b>	<b>49</b>
4.1	Principe et hypothèses du calcul . . . . .	49
4.1.1	Modèle utilisé pour le calcul . . . . .	49
4.1.2	Paramètres utilisés pour le calcul . . . . .	50
4.1.3	Hypothèses et rendu du calcul . . . . .	50
4.2	Résultats des simulations numériques . . . . .	53
4.2.1	Avalanches dans le cadre d'un PIDA . . . . .	53
4.2.2	Avalanches naturelles . . . . .	57
<b>5</b>	<b>Synthèse</b>	<b>63</b>

# Objet de l'étude

## Contexte

LA STATION DE CHÂTEL étudie le remplacement de l'actuelle télécabine du *Linga* par un télésiège à pinces débrayables ; la position des gares restera inchangée. L'exploitant souhaite disposer d'une étude des phénomènes d'origine hydrologique menaçant l'installation. La figure 1 localise l'appareil et le périmètre de notre zone d'étude.



**Figure 1** – Localisation de l'appareil (segment bleu) et de la zone d'étude (contour blanc). Échelle 1:25 000. Fond topographique Géoportail © IGN Paris 2023.

## Mission

La station de Châtel demande au groupement Toraval de caractériser le risque torrentiel et le risque d'avalanche affectant le projet. La caractérisation des phénomènes d'avalanches 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 interactive du versant à l'adresse suivante :

[http://telec.toraval.fr/3d/chatel\\_2023.html](http://telec.toraval.fr/3d/chatel_2023.html)

# Contexte nivo-météorologique

## 1.1 Données

L'analyse nivo-météorologique s'est appuyée sur :

- du poste nivo-météorologique 74063405 de Châtel (1635 m, puis 1700 m) sur la période allant de janvier 1985 à avril 2023, mais dont seules les données depuis 2000 sont exploitables. Le poste a changé de place en 2014 (il est actuellement situé au niveau de la gare d'arrivée du télésiège du Queyset). Le fonctionnement du poste a été perturbé lors de la crise covid de 2020–21 ;
- les données météorologiques du poste Météo-France de Châtel de novembre 1972 à juillet 2007. Il manque des données pour dix mois de l'année 1983. La série couvre donc en tout 35 ans de données à peu près continues ;
- des données météorologiques issues de précédentes études de Toraval dans le secteur ;
- la thèse d'A. Kiefer Weisse, « Étude des précipitations exceptionnelles de pas de temps court en relief accidenté (Alpes françaises) », thèse de doctorat INPG, Grenoble (1998) ;
- la thèse d'A. Djerboua, « Prédétermination des pluies et crues extrêmes dans les Alpes franco-italiennes. Préviation quantitative des pluies journalières par la méthode des analogues », thèse de doctorat, INPG, Grenoble (2001).

## 1.2 Contexte climatique

La station de Châtel se trouve à la périphérie de l'une des zones les plus humides des Alpes du Nord tant en ce qui concerne le cumul annuel de précipitations annuelles que l'intensité des précipitations journalières (voir figure 1.1). Ainsi, la pluie journalière de période de retour décennale est supérieure à 70–80 mm environ dans le Chablais (voir figure 1.2). Il faut chercher l'origine de ces valeurs relativement fortes par l'effet de barrière exercé par ce massif sur les flux d'ouest à nord-ouest. Toutefois, on note que :

- les valeurs mesurées sur ce secteur du Chablais sont fortes sans toutefois atteindre les pics observés en Chartreuse ou dans les Bauges. Ainsi, le cumul annuel y est de 1670 mm environ contre 2000 mm à Saint-Pierre-de-Chartreuse. De même, la pluie journalière décennale est de 85 mm contre 89 mm à Thônes et, plus au sud, 102 mm à Aillon-le-Jeune (Bauges) mais seulement 62 mm à Scientrier dans le Faucigny ;
- pour le Chablais et les vallées avoisinantes, la distribution des précipitations montre une forte variabilité spatiale aussi bien en ce qui concerne leur intensité que leur cumul. Ainsi, malgré la différence significative d'altitude, il pleut autant à Saint-Gingolph au bord du Léman qu'à Châtel à 1200 m d'altitude alors qu'Abondance accuse un déficit de l'ordre de 25 % quant au cumul annuel de pluie par rapport à ces deux postes ;
- la distribution spatiale est plus homogène lorsqu'on s'intéresse aux pluies sur de petits pas de temps (quelques heures). On note en effet une assez bonne homogénéité spatiale des pluies sur des temps de 1 h à 6 h sur le Chablais, le Genevois, et le Faucigny.

Nous reportons dans le tableau 1.1 les valeurs caractéristiques des précipitations sur les postes à proximité de Châtel. **On notera que Châtel présente les valeurs les plus fortes du secteur, suivi de près par Saint-Gingolph au bord du Léman.** Comme pour le Jura, l'essentiel des perturbations est amené par des flux de nord-ouest à ouest. La forme du relief et sa disposition par rapport au flux jouent un grand rôle dans la distribution des précipitations, principalement pour les épisodes de longue durée (plus de 12 h de précipitations consécutives), ce qui explique la variabilité des résultats pour cette région. De même, un tel gradient spatial de précipitation tend à rendre moins manifestes les effets de l'altitude sur les précipitations : on ne note ainsi aucune corrélation claire entre pluie journalière décennale et altitude. On analyse les données de Châtel dans ce qui suit.

## 1.3 Analyse des précipitations

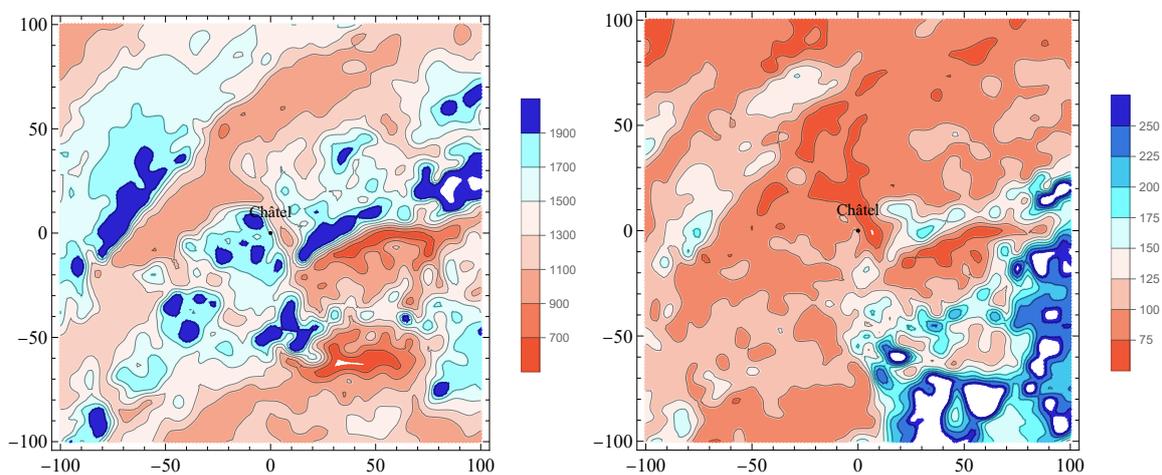
### 1.3.1 Analyse des chutes de neige

Nous avons étudié une série de données couvrant la période janvier 2000 à avril 2023 sur le poste de Châtel à 1635 m d'altitude, puis 1700 m. Le poste, désormais situé au niveau de la gare d'arrivée du TK du Queyset, est distant de 1,5 km à vol d'oiseau des zones de départ d'avalanches menaçant la remontée mécanique projetée (et 300 à 400 m plus bas en altitude que ces zones de départ). Nous considérons qu'en dépit du déplacement et du fonctionnement perturbé durant la crise de la covid 19 en 2020 et 2021, la série de données peut être exploitée comme une série continue de 23 ans.

Nous reportons sur la figure 1.3 la distribution dans le temps de ces chutes de neige journalières. On note que des chutes de neige relativement importantes (proches de 50 cm/j pour le poste de Châtel) se sont produites à plusieurs reprises. Comme le montre la figure 1.4, les

**Tableau 1.1** – Données des différentes stations météorologiques à proximité de Châtel. Sont indiqués : l'altitude de la station, le type de mesures, la période sur laquelle la statistique des mesures a été réalisée, la pluie décennale journalière  $P_{10}$  (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)	Type	Intervalle	$P_{10}$ (mm)	Gradex (mm)
Abondance Froggy	1000	pluviographe	1961–1990	72	11,3
Chamonix	1035	pluviographe	1959–1990	78	14,3
Saint-Paul-en-Chablais	880	pluviographe	1970–1983	67	11,3
Vacheresse	800	pluviographe	1970–1983	71	13,6
Châtel	1210	pluviomètre	1972–2007	86	13,0
Morzine	960	pluviomètre	1955–1995	76	12,2
Le Biot	690	pluviomètre	1959–1994	78	12,4
Les Gets	1200	pluviomètre	1959–1994	81	13,4
Saint-Gingolph	940	pluviomètre	1947–1995	83	12,8



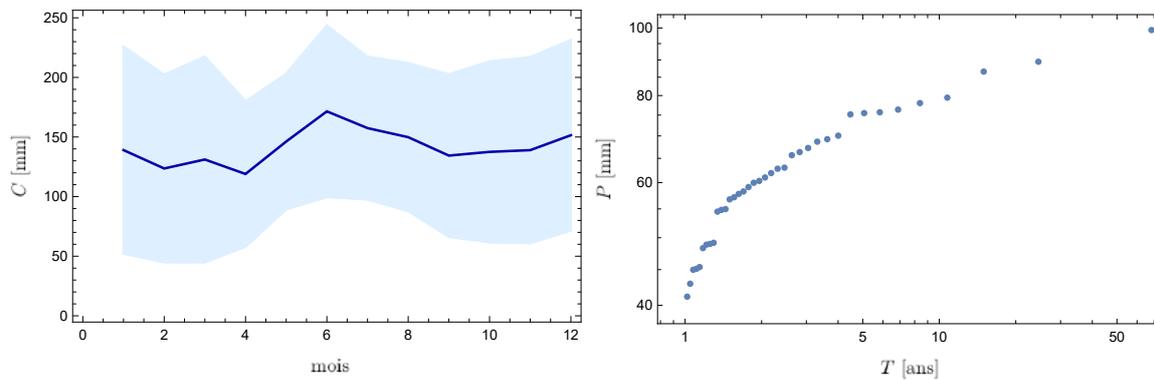
**Figure 1.1** – Carte des isovaleurs des cumuls moyens annuels de précipitation (à gauche) et des plus fortes précipitations journalières observées sur la période 1971–2008 (à droite). Valeurs en mm. Les données ont été cadrées sur Châtel (indiquées par un point en 0). Source : données Alpine Precipitation Grid Dataset (EURO4M-APGD) (doi:10.18751/Climate/Griddata/APGD/1.0).

cumuls mensuels de neige sont également significatifs : avec une moyenne mensuelle de 62 cm à Châtel, le cumul mensuel peut atteindre 290 cm (cumul annuel record de 664 cm en 2012-13) à Châtel à 1700 m.

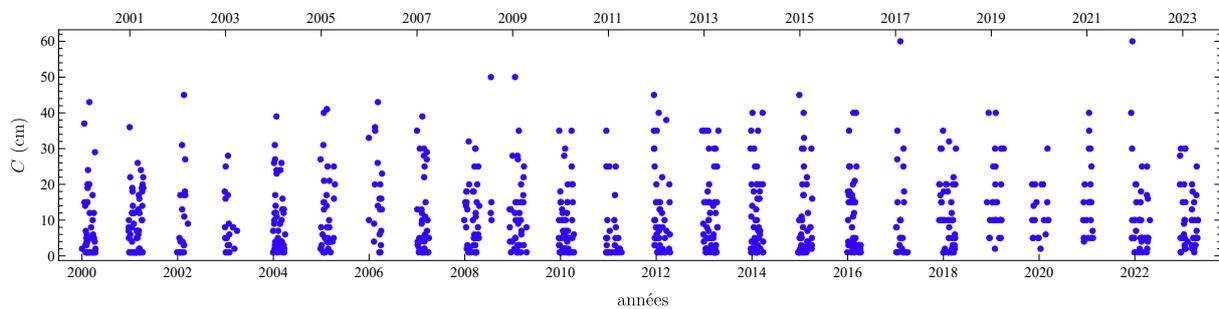
Les épaisseurs du manteau neigeux à 1700 m sont également significatives, avec des valeurs moyennes souvent comprises entre 1 et 2 m de neige au sol (voir figure 2.7). L'enneigement est variable d'une année à l'autre, avec des séries d'années à fort enneigement et d'autres à faible enneigement.

Nous avons également exploité les données nivo-météorologiques pour dégager les principales caractéristiques nivo-météorologiques du site. On retiendra que :

- les gros coups de neige en moyenne observés chaque année amènent des cumuls de neige d'au moins 100 cm sur une période de 4 à 8 jours, parfois bien plus. Le record



**Figure 1.2** – Variation du cumul moyen mensuel de précipitation (à gauche) au fil de l’année et loi intensité-fréquence établie à partir des valeurs journalières des plus fortes précipitations observées annuellement sur la période 1971–2008 (à droite). Valeurs en mm. La zone en aplat coloré représente les minima et maxima des cumuls mensuels observés. Source : données Alpine Precipitation Grid Dataset (EURO4M-APGD) (doi:10.18751/Climate/Griddata/APGD/1.0).



**Figure 1.3** – Répartition dans le temps des chutes de neige journalières sur Châtel (1700 m). 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.

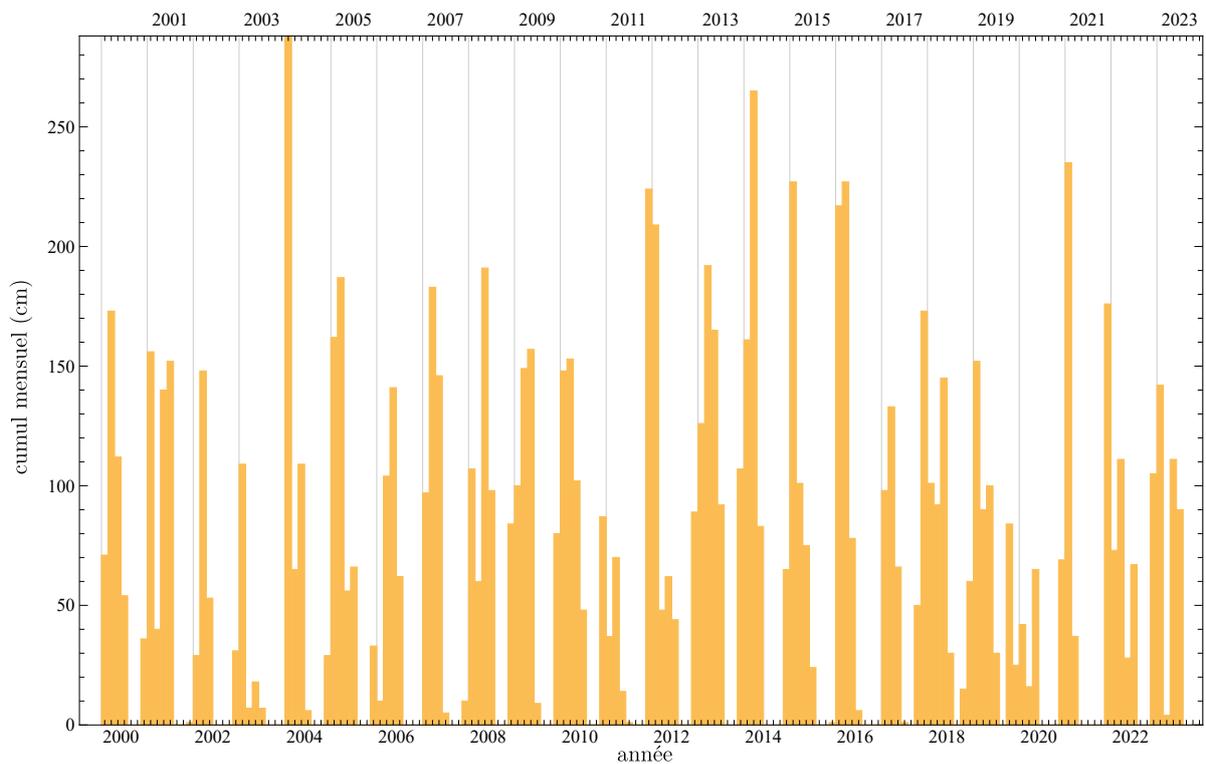
sur le poste nivo-météorologique de Châtel est celui de décembre 2011 avec 183 cm de cumul (en 8 jours) – voir tableau 1.2;

- un nombre extrêmement variable de chutes de neige (en moyenne 17 chutes de neige par an dépassent 10 cm);
- des chutes de neige bien réparties sur janvier et février. Il y a un peu moins de chutes de neige en mars;
- des valeurs d’enneigement qui sont dans la moyenne inférieure des Alpes du Nord aussi bien pour les épisodes courants qu’extrêmes, bien loin des valeurs de certains postes de Haute-Savoie (Aiguilles Rouges et sud Chablais).

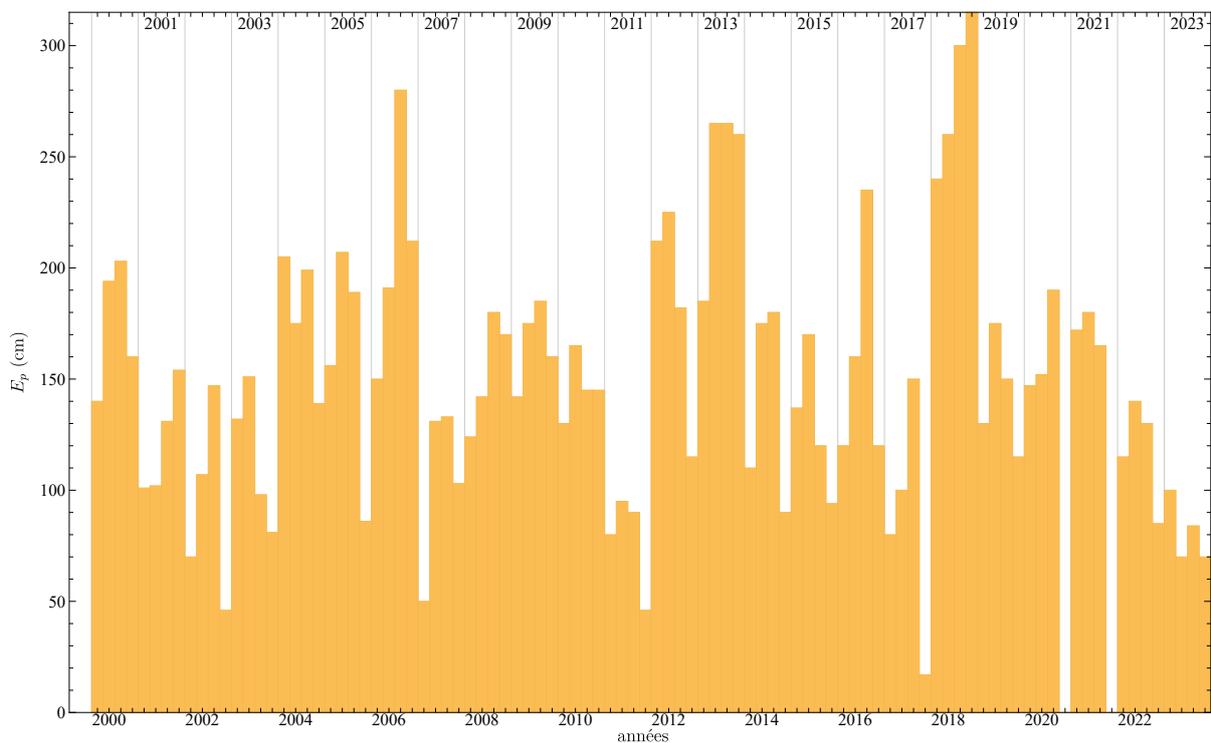
Pour évaluer les quantiles extrêmes, nous avons calé une *loi de valeurs extrêmes* par inférence bayésienne. Cette loi énonce que la probabilité des maxima tend vers une loi générale dont la fonction de répartition s’écrit :

$$P(C|\mu, \sigma, \xi) = \exp \left[ - \left( 1 + \xi \frac{C - \mu}{\sigma} \right)^{-1/\xi} \right] \quad (1.1)$$

Elle dépend de trois paramètres : un paramètre de localisation  $\mu$ , un paramètre de forme  $\xi$ , et un paramètre d’échelle  $\sigma$  ( $\sigma > 0$ ). En fait, cette forme générique synthétise trois distributions



**Figure 1.4** – Cumuls mensuels de neige sur Châtel (1700 m).



**Figure 1.5** – Variation de l'épaisseur maximale de neige au sol (moyenne sur un mois) à Châtel (1700 m). Chaque barre représente un mois de la saison (de janvier à avril).

élémentaires : la loi de Gumbel ( $\xi = 0$ ), la loi de Fréchet ( $\xi > 0$ ), et la loi de Weibull ( $\xi < 0$ ). Le

**Tableau 1.2** – Liste des épisodes de neige ayant amené plus de 100 cm sur Châtel (1700 m) depuis janvier 2000 avec une estimation de la période de retour (par la méthode du renouvellement).

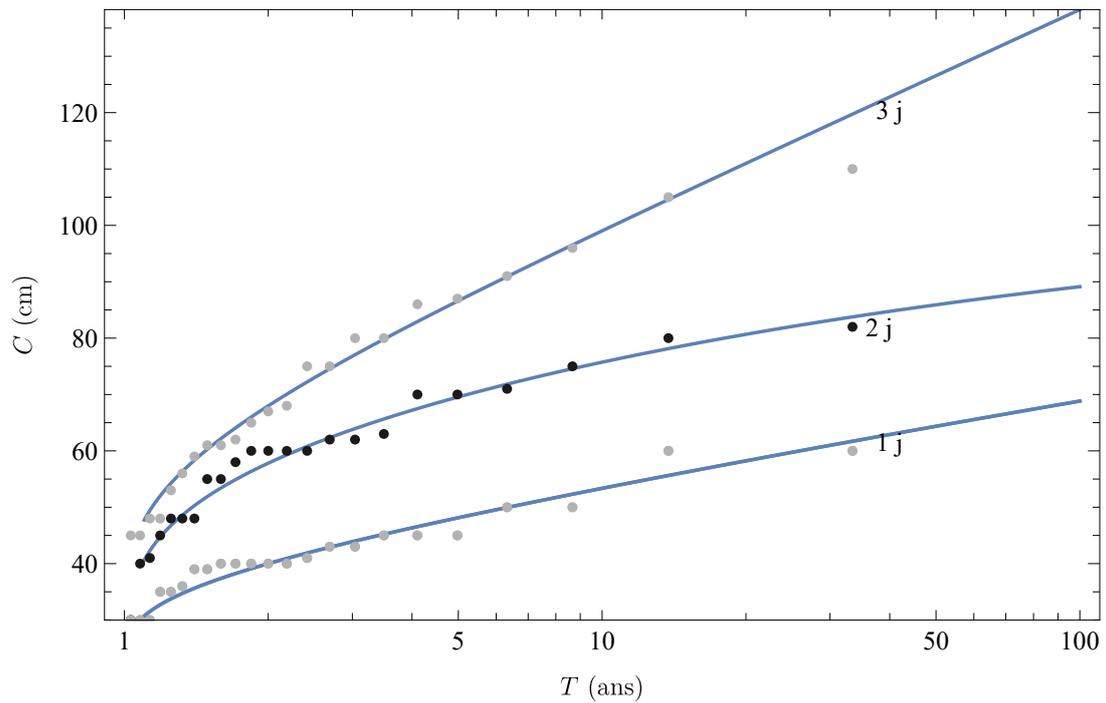
date	durée (j)	$C$ (cm)	$T$ (ans)
8 décembre 2021	4	105	2
11 janvier 2023	8	105	2
4 avril 2001	8	111	2
24 janvier 2004	6	111	2
23 février 2007	8	114	2
7 février 2016	9	115	2
12 janvier 2021	4	120	3
11 février 2005	7	129	4
11 janvier 2016	6	131	4
11 janvier 2004	10	132	4
1 février 2014	13	133	4
31 janvier 2013	9	134	4
17 janvier 2005	8	137	5
6 février 2000	15	139	5
28 janvier 2015	8	149	7
27 janvier 2019	8	152	8
14 décembre 2011	8	183	23

tableau 1.3 reporte les valeurs de cumul de neige en fonction de la période de retour  $T$  et de la durée pour Châtel. La figure 1.6 montre l'adéquation entre les mesures et les lois de valeurs extrêmes calées pour des durées de 1 j à 3 j.

Les calculs montrent que la loi de Weibull est plus adaptée pour décrire les chutes de neige journalières sur Châtel, ce que montre aussi la figure 1.6 avec un aplatissement de la tendance donnée par les mesures aux grandes périodes de retour. Pour les durées de trois jours, on observe un caractère Fréchet modéré, ce qui indique que les chutes de neige extrêmes sont un peu plus fortes que ce que l'on pourrait redouter en faisant une simple extrapolation des valeurs observées.

**Tableau 1.3** – Estimation des cumuls de neige (en cm) tombée sur 1 à 6 jours en fonction de la période de retour (inférence bayésienne sur loi de valeurs extrêmes). Valeurs exprimées en cm pour Châtel (à 1700 m).

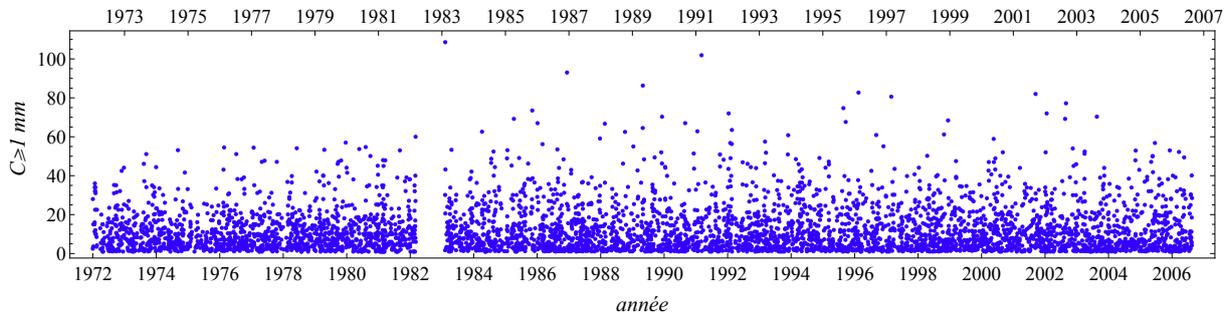
	1 j	2 j	3 j	4 j	5 j	6 j
$\mu$	37,3	53,3	62,0	70,3	77,1	86,6
$\sigma$	7,4	13,0	16,3	21,1	22,7	25,8
$\xi$	-0,035	-0,244	0,006	-0,021	0,001	-0,146
$C(T = 10)$	53	76	99	117	128	136
$C(T = 30)$	61	83	118	139	154	156
$C(T = 100)$	69	89	138	163	181	173



**Figure 1.6** – Variation de la chute de neige de durée 1–3 jours en fonction de la période de retour sur et Châtel (1700 m). Points : valeurs mesurées affectées d’une période de retour empirique ; courbes : loi de Weibull ajustée sur les données.

### 1.3.2 Analyse des chutes de pluie

La chronique des pluies est montrée par la figure 1.7. La plus forte précipitation date du 26 novembre 1983 (108,6 mm), puis la seconde est le 21 décembre 1991 (101,9 mm), et enfin le 26 septembre 1987 (93 mm); les deux premières sont vraisemblablement tombées sous forme de neige.



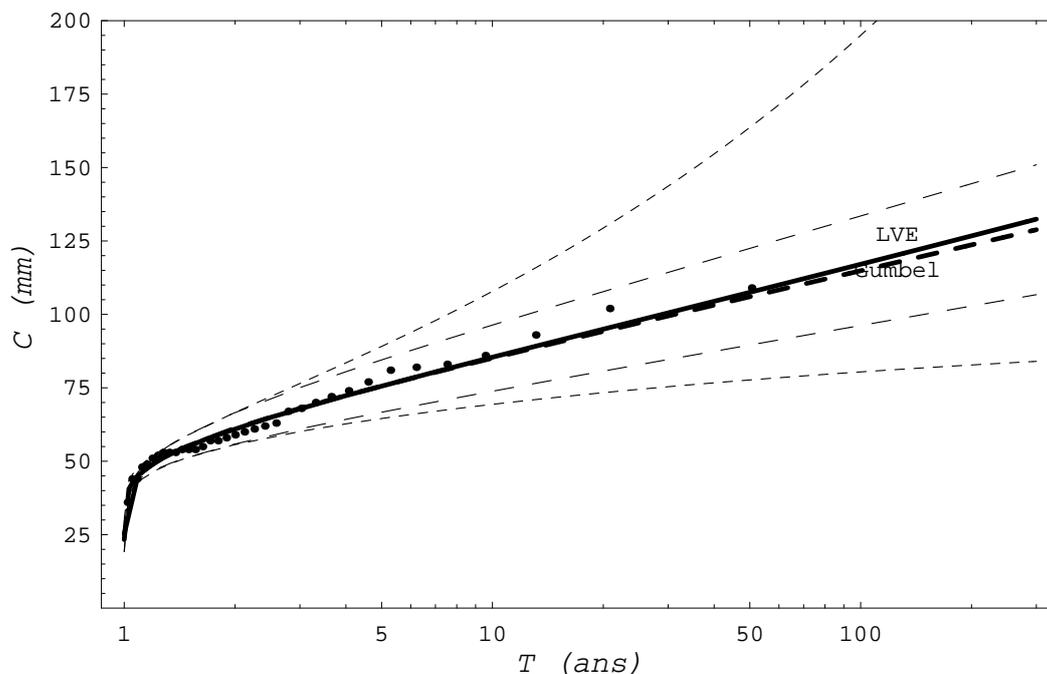
**Figure 1.7** – Distribution des chutes de pluie sur Châtel depuis novembre 1972.

On reporte sur la figure 1.8 le résultat de l'ajustement d'une loi de type (1.1) sur les données. Outre les paramètres de chaque loi, le tableau 1.4 fournit les intervalles d'incertitude dans l'estimation de ces paramètres (intervalle de confiance à 95 %). Il y a assez peu de différences dans la valeur des paramètres. Compte tenu de la faible différence entre la loi de Fréchet et la loi de Gumbel, on peut considérer que la loi de Gumbel reste un bon candidat pour décrire le comportement des précipitations journalières. On note sur la figure 1.8 très peu d'écarts entre les courbes de Fréchet et de Gumbel pour le domaine d'observations (période de retour empirique inférieure à 50 ans). La différence principale entre les deux courbes ne situe pas là, mais plutôt dans leur domaine d'incertitude : relativement restreint pour la loi de Gumbel et très large pour la loi de Fréchet.

**Tableau 1.4** – Estimation par inférence bayésienne des coefficients  $\xi$ ,  $\mu$ , et  $\sigma$  pour la loi des valeurs extrêmes (LVE), la loi de Gumbel pour des chutes de pluie journalières. On a reporté le facteur de Bayes  $B$  pour chacun des modèles et les quantiles (en mm) pour les périodes de retour décennale, centennale, et tri-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.

	LVE	Gumbel
$\mu$	56,55 ( $\pm 5,46$ )	56,56 ( $\pm 5,14$ )
$\sigma$	13,53 ( $\pm 2,99$ )	13,24 ( $\pm 1,62$ )
$\xi$	0,03 ( $\pm 0,0140$ )	0
$B$	38 %	62 %
$C(T = 10)$	88 (70–113)	86 (75–98)
$C(T = 100)$	123 (82–212)	117 (98–137)
$C(T = 300)$	140 (86–283)	132 (110–155)

Nous fournissons ici les principales conclusions utiles à l'étude. Le tableau 1.5 recense l'ensemble des chutes de pluie importantes (cumul de plus de 200 mm) recensées depuis novembre 1972. Il y a un épisode pluvieux important (avec un cumul de plus de 200 mm) en moyenne une fois tous les deux à trois ans et la durée des précipitations peut largement dépasser les deux semaines. Certaines années, comme en 1992, plusieurs cumuls de pluie importants se sont produits. La plupart des épisodes remarquables interviennent durant la saison hivernale, donc vraisemblablement sous forme de neige.



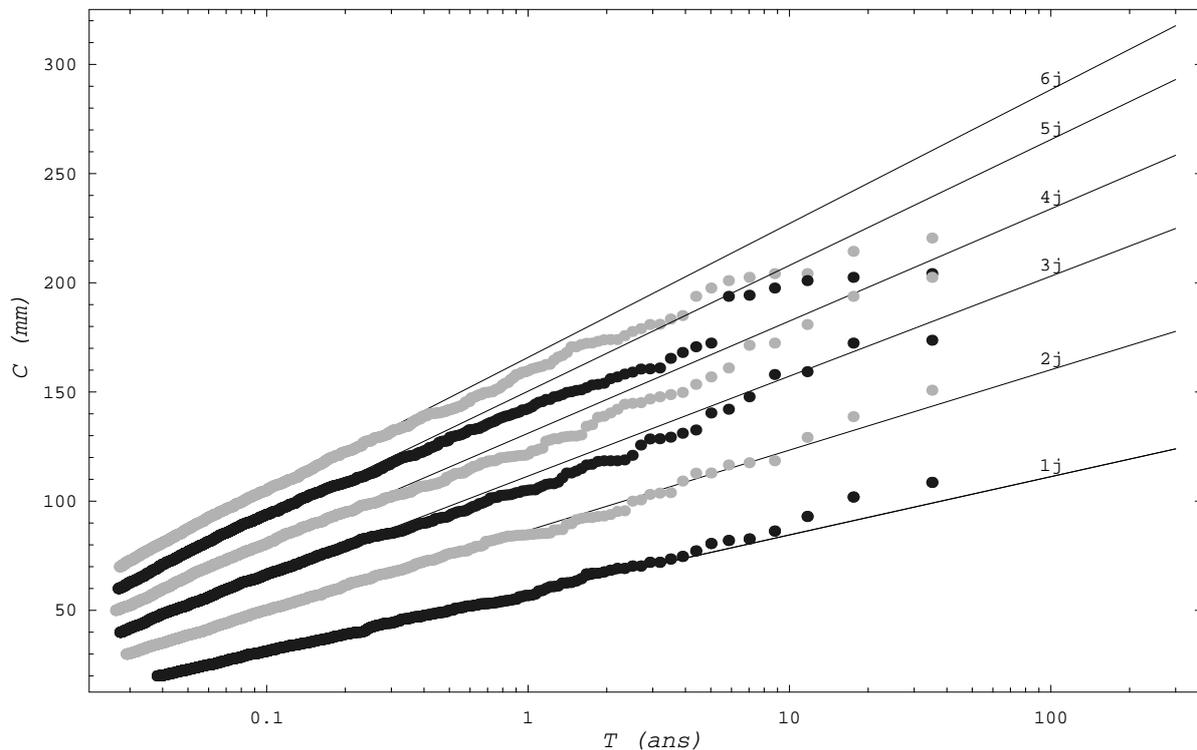
**Figure 1.8** – Variation de la chute de pluie journalière sur Châtel en fonction de la période de retour. Points : valeurs mesurées affectées d’une période de retour empirique. Trait gras continu : loi de Fréchet. Trait gras discontinu : loi de Gumbel. Trait à tiret fin : intervalles d’incertitude à 95 % pour la loi de Fréchet. Trait à tiret long : intervalles d’incertitude à 95 % pour la loi de Gumbel.

**Tableau 1.5** – Liste des cumuls de pluie  $C$  (en mm) sur Châtel depuis novembre 1972, dont la valeur a excédé 200 mm. La période de retour a été estimée à l’aide d’un modèle de renouvellement ajusté sur les données de pluie.

date	durée (j)	$C$ (mm)	$T$ (ans)
23 novembre 1996	10	201	3
24 novembre 1983	5	205	4
2 juin 1990	12	207	4
12 janvier 1984	13	208	4
26 mai 1992	18	212	4
28 février 2006	12	221	5
11 janvier 2004	10	223	5
16 octobre 2002	10	226	6
29 novembre 1976	12	227	6
1 novembre 2002	14	232	7
10 février 1990	7	239	8
15 mars 1988	13	251	10
20 janvier 1995	11	274	18
10 novembre 1992	13	281	21
4 décembre 1981	22	338	77

Nous avons commencé l’étude statistique en ajustant un modèle relativement simple connu sous le nom de *modèle de renouvellement*. La figure 1.9 reporte les valeurs mesurées et classées en fréquence ainsi que les courbes calées (loi exponentielle du modèle de renouvellement) sur ces mesures pour des durées allant de 1 à 6 jours pour Châtel. On note que pour les précipitations ordinaires ( $T < 3 - 5$  ans), le comportement est exponentiel, mais pour les chutes de

pluie plus rares ( $T > 5$  ans), on aurait un comportement qui se démarquerait nettement (précipitations supérieures à la tendance moyenne calée sur les précipitations ordinaires), excepté pour les épisodes de pluie sur 6 jours et plus.



**Figure 1.9** – Variation de la chute de pluie de durée 1–6 jours en fonction de la période de retour sur Châtel. Points : valeurs mesurées affectées d’une période de retour empirique ; courbes : loi exponentielle (modèle de renouvellement) ajustée sur les données.

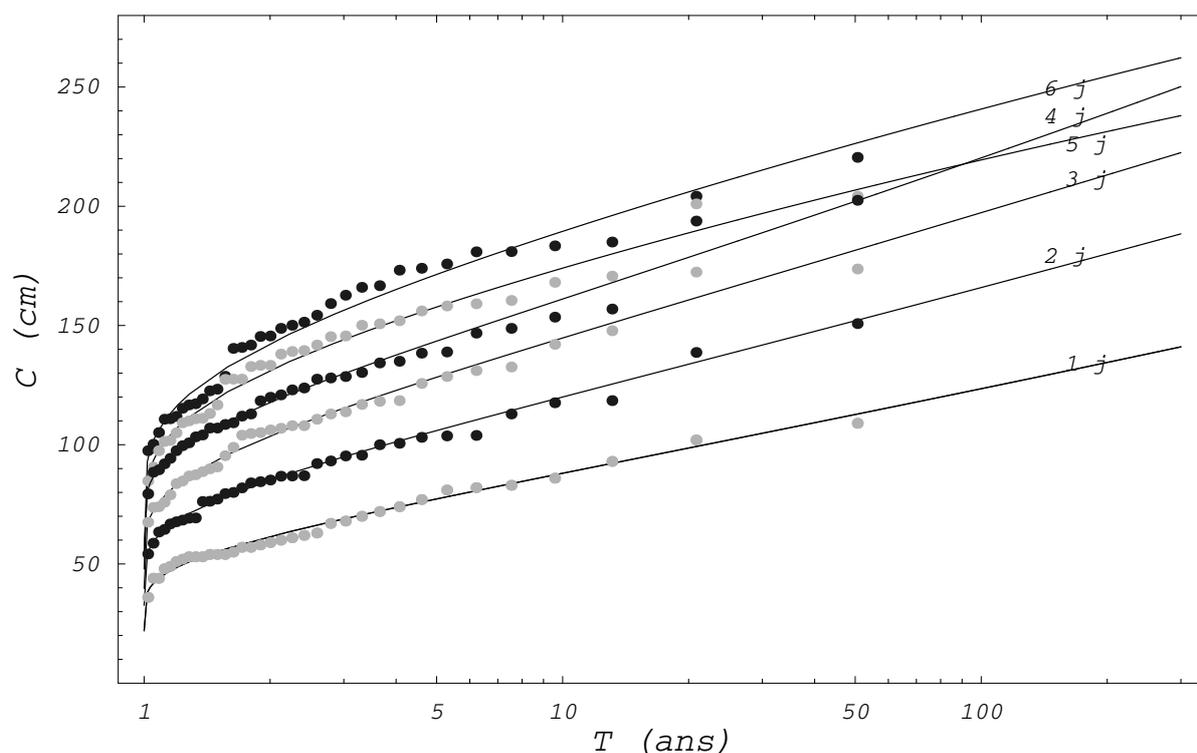
Dans un second temps, nous avons poussé l’analyse en ajustant des lois de valeurs extrêmes (Fréchet, Gumbel, Weibull) données par l’équation (1.1). L’ajustement s’est fait à l’aide d’une méthode appelée inférence bayésienne. Les courbes ajustées sur les maxima annuels de précipitations sont reportées sur la figure 1.10. Le résultat de l’analyse est donné au tableau 1.6 pour la station de Châtel. On note sur la figure 1.10 que les chutes de pluie sur 5 ou 6 jours sont de type Weibull ( $\xi < 0$ ) et se comportent donc très différemment des précipitations sur des périodes courtes de 1 à 4 jours, qui ont un comportement de type Fréchet ( $\xi > 0$ ) ; on note par ailleurs que les courbes une fois extrapolées se croisent, ce qui évidemment n’est pas possible et traduit donc les limites de l’extrapolation vers les quantiles rares.

Comme le paramètre  $\xi$  est faible, on peut considérer que la loi de Gumbel offre une description correcte au moins pour les périodes de retour pas trop grandes ( $T < 50$  ans). On cherche donc maintenant à caler une loi de type Gumbel pour déterminer l’influence de la durée sur les paramètres

$$P(T, d) = \mu(d) - \sigma(d) \ln \left( -\ln \left( 1 - \frac{1}{T} \right) \right), \quad (1.2)$$

avec  $d$  la durée de la précipitation (en h),  $P$  le cumul de précipitations sur cette durée (en mm),  $T$  la période de retour associée (en années),  $\mu$  le paramètre de position (en mm), et  $\sigma$  le gradex. Ces deux derniers paramètres sont fonctions de la durée  $d$  ; une loi empirique de type Montana parvient en général à décrire cette dépendance de façon correcte

$$\mu(d) = ad^{1-b} \text{ et } \sigma(d) = cd^{1-b}. \quad (1.3)$$



**Figure 1.10** – Variation de la chute de pluie de durée 1–6 jours en fonction de la période de retour sur Châtel. Points: valeurs mesurées (maxima annuels) affectées d’une période de retour empirique; courbes: loi de valeurs extrêmes (théorie des valeurs extrêmes) ajustée sur les données.

**Tableau 1.6** – Estimation par inférence bayésienne des coefficients  $\xi$ ,  $\mu$ , et  $\sigma$  pour la loi des valeurs extrêmes (LVE) pour des chutes de pluie de 1 à 6 jours sur Châtel. On a reporté les quantiles (en mm) pour les périodes de retour décennale, trentennale, et centennale.

	1 j	2 j	3 j	4 j	5 j	6 j
$\mu$	55,4	78,5	95,9	110,0	122,0	133,0
$\sigma$	14,2	17,8	21,4	21,8	25,3	27,4
$\xi$	0,006	0,026	0,012	0,046	-0,086	-0,078
$C(T = 10)$	88	120	145	161	174	189
$C(T = 30)$	104	142	170	189	197	214
$C(T = 100)$	122	166	197	221	218	239

On trouve ici  $b = 0,65$ ,  $a = 55$ , et  $c = 14,2$ .

### 1.3.3 Étude des précipitations sur quelques heures

Comme nous n'avons pas de pluviographe sur le site étudié, il faut se servir des résultats précédents pour estimer le comportement des pluies aux courts pas de temps. En se servant de l'équation (1.3) et en l'extrapolant à des durées de quelques heures, on obtient les gradex de pluie récapitulés au tableau 1.7. Le poste de Châtel se comporte de façon similaire aux postes voisins dans le Chablais. Les tableaux 1.8 et 1.9 fournissent les estimations des pluies pour des durées de  $d = 1$  à  $d = 24$  h obtenues par la méthode de Montana pour les périodes de retour  $T = 10$  ans et  $T = 100$  ans; on fournit les valeurs obtenues sur d'autres postes. On note que pour  $d \geq 12$  h, les pluies prennent des valeurs importantes sur Châtel, qui se situent vraisemblablement parmi les maxima de la région.

**Tableau 1.7** – Valeur du gradex  $\sigma(d)$  (en mm) pour des durées d'une à quelques heures. Paramètre de Montana  $b$ . Attention les durées sont en heures.

	$d = 1$	$d = 2$	$d = 3$	$d = 6$	$d = 12$	$d = 24$	$1 - b$
Châtel	1,8	2,8	3,7	5,8	9,0	14,2	0,35
Abondance	4,8	5,8	6,5	7,8	9,2	11,3	0,28
Vacheresse	6,7	7,6	8,5	9,8	11,6	13,6	0,21
Saint-Paul-en-Chablais	4,5	5,5	6,2	7,5	9,2	11,6	0,29
Chamonix	3,2	4,5	5,4	7,4	10,4	14,5	0,48

**Tableau 1.8** – Estimation des pluies d'une à quelques heures pour  $T = 10$  ans. Valeurs en mm.

	$d = 1$	$d = 2$	$d = 3$	$d = 6$	$d = 12$	$d = 24$
Châtel	29	36	42	54	68	88
Abondance	25	32	36	45	57	72
Vacheresse	27	33	38	47	59	71
Saint-Paul-en-Chablais	24	30	34	42	52	67
Chamonix	20	28	33	46	65	92

**Tableau 1.9** – Estimation des pluies d'une à quelques heures pour  $T = 100$  ans. Valeurs en mm.

	$d = 1$	$d = 2$	$d = 3$	$d = 6$	$d = 12$	$d = 24$
Châtel	40	50	58	74	94	120
Abondance	36	45	51	64	78	99
Vacheresse	43	51	58	70	86	103
Saint-Paul-en-Chablais	34	43	49	60	74	94
Chamonix	25	35	42	58	82	116

## 1.4 Analyse des orages associés à des crues

Le tableau 1.10 donne les pluies journalières mesurées sur le chef-lieu pour chaque journée où une crue importante sur la commune a été observée. Les valeurs journalières ne sont pas remarquables, aucune ne dépassant le quantile associé à la période de retour 10 ans. Toutefois, ces pluies ont été associées à des orages, donc se sont produites sur des durées brèves (de l'ordre de l'heure d'après les témoignages) et il est possible qu'à cause du relief, les pics d'intensité ne soient pas mesurés sur le chef-lieu durant de tels orages. Rappelons pour mémoire que la pluie sur une heure est de 28 mm pour  $T = 10$  ans et 37 mm pour  $T = 100$  ans. Les deux crues les plus dommageables (1992 et 2003) ont toutes deux été associées aux orages les plus intenses, dont la période de retour est vraisemblablement grande, c'est-à-dire de quelques dizaines d'années (toutefois, ne connaissant pas précisément la durée des orages et n'ayant pas de mesures de pluviographe sur le secteur, on ne peut guère avancer de période de retour de façon précise).

**Tableau 1.10** – Pluie journalière associée à chaque crue (mesurée à Châtel). Valeurs en mm.

date	pluie journalière
20 juillet 1992	50,9
18 juillet 1999	18,8
5 juin 2000	31,3
2 juin 2003	69,2
5 juin 2003	12,7
16 juillet 2007	25,5

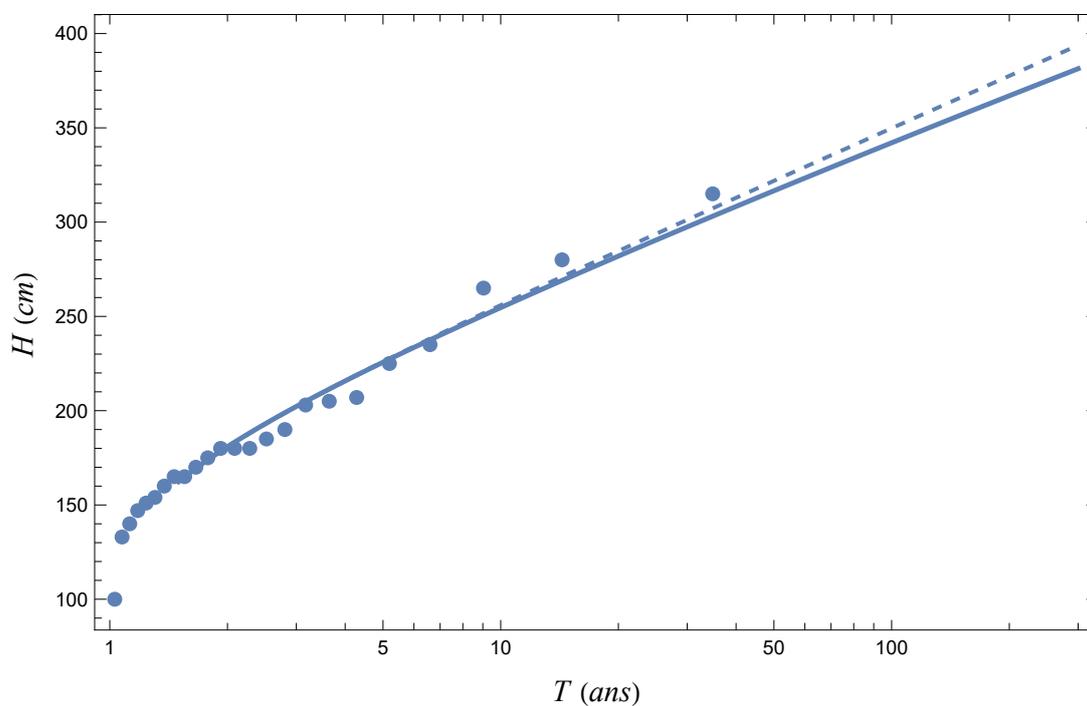
L'examen du tableau 1.5 et de la chronique des pluies montre en revanche que les périodes humides n'ont pas été associées à des crues sur Châtel.

## 1.5 Épaisseur de neige au sol

Les valeurs moyennes (moyennes mensuelles) de l'épaisseur de neige au sol sont reportées sur la figure 2.7. On notera que l'épaisseur du manteau neigeux est importante, ce qui est le cas pour les zones suffisamment hautes en Haute-Savoie.

La variation de la hauteur de neige au sol est reportée en fonction de la période de retour sur la figure 1.11. On notera les différences d'épaisseur du manteau neigeux entre le modèle de Gumbel et de Weibull aux grandes périodes de retour. Les paramètres de la loi de valeurs extrêmes (équation 1.1) calée sur les données sont reportés dans le tableau 1.11.

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 1.11** – Variation de l'épaisseur maximale de neige au sol (sur une journée) en fonction de la période de retour à Châtel (1700 m).

**Tableau 1.11** – 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 Châtel. On a reporté le facteur de Bayes  $B$  et les quantiles (en cm) pour les périodes de retour décennale, trentennale, et 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.

	LVE	Gumbel
$\mu$	166,15 ( $\pm 50,2$ )	166,08 ( $\pm 50,6$ )
$\sigma$	40,42 ( $\pm 19,8$ )	39,93 ( $\pm 4,36$ )
$\xi$	-0,02 ( $\pm 0,0130$ )	0
$B$	41 %	59 %
$C(T = 10)$	255 (207-319)	256 (223-289)
$C(T = 30)$	297 (225-417)	301 (258-344)
$C(T = 100)$	342 (239-550)	350 (296-403)

## 1.6 Synthèse

Pour les calculs d'avalanche, **nous nous fondons sur les cumuls de neige sur des durées de 1 à 3 jours pour évaluer le volume de neige mobilisable par l'avalanche.** Pour les avalanches déclenchées dans le cadre d'un Plan de déclenchement des avalanches (PIDA), le cumul de neige est supposé correspondre à la quantité de neige tombée en 24 h. En se fondant sur les valeurs enregistrées sur Châtel, on arrive aux estimations suivantes des cumuls  $C_1$  de neige sur 1 jour et des hauteurs du manteau neigeux  $H$  (mesurées selon la verticale):

- quantile mesuré pour  $T = 30$  ans,  $C_1 = 100$  cm (modèle de type Weibull),  $H = 300$  cm (modèle de type Gumbel);
- quantile extrapolé pour  $T = 100$  ans,  $C_1 = 120$  cm (modèle de type Weibull),  $H = 350$  cm (modèle de type Gumbel).

Pour les simulations numériques pour les avalanches naturelles (hors PIDA), on prendra les chutes de neige sur trois jours consécutifs:

- quantile mesuré pour  $T = 30$  ans,  $C_3 = 120$  cm (modèle de type Fréchet),  $H = 300$  cm (modèle de type Gumbel);
- quantile extrapolé pour  $T = 100$  ans,  $C_3 = 140$  cm (modèle de type Fréchet),  $H = 350$  cm (modèle de type Gumbel).

Pour les pluies, nous nous servirons des valeurs de cumul en fonction de la durée de précipitations consignées dans les tableaux 1.8 ( $T = 30$  ans) à 1.9 ( $T = 100$  ans).

# Analyse du risque torrentiel

## 2.1 Données et contexte

Nous avons utilisé :

- données LiDAR fournies par le maître d'œuvre ;
- Guide méthodologique édité par le Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement « Plans de prévention des risques naturels (PPR) : risques d'inondation » (La documentation française, Paris, 1999) ;
- le code académique [Iber](#) développé par un consortium d'universités espagnoles<sup>1</sup> pour les calculs de ruissellement ;
- les méthodes décrites dans le cours de master de C. Ancey « Risques hydrologiques et aménagement du territoire » (EPFL, Lausanne, 2023) ;
- extrait du PPR sur le Pré de Joux communiqué par le maître d'œuvre (PPR en date du 3 novembre 2011, révisé le 12 octobre 2015, modifié le 12 février 2019) ;
- les fiches RH11529 et RH11530 de la Dranse d'Abondance établies par INRAE et disponibles dans la base de données Shyreg ;
- les données météorologiques du chap. 1.

### 2.1.1 Hydrographie

La Dranse d'Abondance menace la gare de départ de la télécabine. Elle draine un bassin-versant d'environ 17,8 km<sup>2</sup> (au droit de la gare de départ de la télécabine), constitué par la face ouest de la Tête de Linga (2156 m), le versant nord de la pointe de Chésery (2251 m), la face nord de la Tête de Lindaret (non coté), et le versant oriental du mont de Grange (2432 m). Il n'y a pas une source unique, mais la convergence de plusieurs ruisseaux :

- le ruisseau des Combes qui rejoint la Dranse à l'aval de la Dranse vers la cote 1303 m ;
- les ruisseaux du versant sud-est du mont de Grange (les Rubis, les Masses, le Crac, l'Étrye, le Cornillon, le Perlan, la Ravine, le Pessa, et le Riba) affluents en rive gauche de la Dranse ;

---

1. Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., Coll, A., 2014. Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, **30**, 1–10, 2014. DOI: [10.1016/j.rimni.2012.07.004](https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004).

- des ruisseaux généralement non nommés qui drainent les pentes forestières en rive droite de la Dranse. En rive droite, le plus appareil torrentiel – le torrent de l’Aity – se jette dans les eaux de la Dranse à l’aval de la gare de départ de la télécabine.

## 2.1.2 Géologie et fourniture en sédiment

Le bassin-versant est bien végétalisé, avec une pelouse alpine qui couvre une grande partie de sa surface. Le reste de la végétation est une forêt alpine relativement dense et étendue, surtout en rive droite de la Dranse. Il y a quelques affleurements rocheux sous la forme de cônes d’éboulis, produits par quelques rarement affleurements rocheux. La surface de production sédimentaire est limitée.

## 2.1.3 Morphologie du lit

Le lit de la Dranse est dans l’ensemble peu marqué, mais le torrent a dans le passé incisé profondément le terrain entre les chalets de Plaine Dranse et le pied de pente (vers 1320 m). Le torrent est busé au niveau du parking du Pré la Joux près de la gare de départ du TSD de Pierre-Longue.

Pour le reste de son parcours, il a un cours naturel jusqu’à l’entrée de la zone urbanisée (lieu-dit la Fontaine). Dans la traversée de la zone urbanisée, le lit a été aménagé.

Les berges du lit sont végétalisées (la ripisylve comprend principalement des feuillus) sur l’essentiel du parcours dans le fond de vallée. Le lit est grossièrement pavé dans sa partie supérieure jusqu’à son confluence avec le Crac (1206 m). Il présente une sinuosité importante, sans incision marquée de la plaine alluviale.

La pente du lit est peu soutenue dans la traversée de la zone urbanisée : environ 2,6 % entre 1141 m (un kilomètre à l’amont de la G1) et 1118 m (au niveau de la passerelle face à la gare G1).

## 2.1.4 Type de crue

**Le régime hydrologique du ruisseau est typiquement nivo-pluvial** : une grande partie des débits est liée à la fonte du manteau neigeux, à son infiltration dans le sol, et son drainage. Toutefois cela ne constitue pas le scénario classique de formation de crue.

**La principale cause de crues est liée aux orages : les crues se produisent lors de fortes, mais courtes pluies causées par des cellules orageuses que l’on rencontre durant l’été** (juin à septembre) quand il fait très chaud.

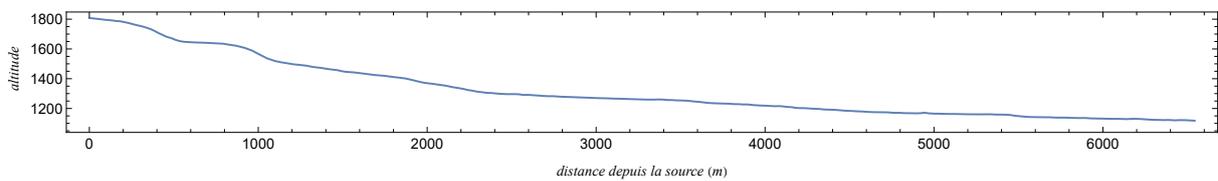
Des épisodes caractérisés par des pluies soutenues sur des durées plus longues que celle des orages sont possibles lorsqu’un fort flux d’ouest ou de sud-ouest circule sur les Alpes durant la saison estivale (ou au début de l’automne). Un tel scénario correspond ce qui a été observé en juillet 1987 et août 2005.

## 2.2 Évaluation hydrologique des crues torrentielles

L'occurrence d'une crue importante est ici fortement limitée par plusieurs facteurs dont la taille du bassin-versant, la forte rugosité (forêt, pré), la forte perméabilité du sol, la forme molle du terrain réduisant la concentration des eaux de ruissellement. Des crues du torrent avec des débordements sont toutefois possibles. **Le scénario critique est ici un passage d'une dépression atlantique durant l'été ou l'automne.**

Un autre scénario (critique pour de nombreux bassins-versants de montagne) pourrait être rencontré lorsqu'il y a

- une forte saturation du sol après une longue période pluvieuse ;
- une cellule orageuse sur le mont de Grange ou la tête de Linga ; et/ou
- une concomitance d'un manteau neigeux épais durant l'hiver (sol saturé) et d'une crue.



**Figure 2.1** – Profil en long de la Dranse entre la ligne de crête et la gare G1 du TSD du Linga.

Nous cherchons ici à quantifier une crue extrême de période de retour 100 ans. La surface drainée par le torrent jusqu'à la gare représente environ 18 km<sup>2</sup>. Comme nous cherchons à établir la borne supérieure des débits de pointe, nous avons considéré des combinaisons particulièrement défavorables des facteurs du calcul, quitte à surestimer les débits. Les données de pluie sont celles du poste de Météo-France à Châtel (série temporelle commençant en 1972). La pluie journalière décennale centrée est  $P_{10} = 88$  mm et la pluie journalière centennale atteint 120 mm. Le gradex des précipitations journalières est moyennement fort ( $\sigma = 14$  mm). Malgré la différence d'altitude (1400 m) entre le village et les sommets ceinturant le bassin-versant, le poste de Châtel permet d'avoir une idée correcte des pluies sur tout le bassin-versant pour des précipitations de courte durée.

Il n'y a pas de mesures de débit à notre connaissance sur le ruisseau, mais dans la base de données Shyreg, des calculs d'estimation des débits ont été conduits sur le bassin de la Dranse jusqu'à Châtel (n<sup>os</sup> RH11529 à RH11531). La fiche RH11530 montre le résultat des simulations pour une superficie de bassin-versant de 16,1 km<sup>2</sup> (juste à l'amont de la gare du TSD du Linga). Cette base de données fournit comme débit de pointe :  $Q_{10} = 12,65$  m<sup>3</sup>/s et  $Q_{100} = 27,0$  m<sup>3</sup>/s.

Compte tenu de la surface réduite du bassin versant, des fortes pentes, et du contexte montagnard, il n'existe pas de méthode unique de calcul des débits dus au ruissellement de fortes précipitations. Pour cette raison, on a choisi trois méthodes conceptuelles d'estimation des débits à partir de la connaissance des pluies :

- les méthodes empiriques,
- la méthode QdF, et
- le modèle GR4.

## 2.2.1 Estimation des quantiles de débit rares par des méthodes empiriques

### Temps de concentration

Le temps de concentration est défini comme le temps que mettrait une goutte de pluie pour parcourir tout le bassin-versant ; c'est aussi un temps critique pour la durée des pluies, qui sert dans de nombreuses formules de transformation pluie-débit. Les méthodes les plus courantes fournissent les valeurs suivantes :

- Turrazza :  $t_c = 39$  h
- Venturi-Passini :  $t_c = 3$  h
- Kirpich :  $t_c = 0,7$  h
- Sogreah :  $t_c = 1$  h
- Izzard-Meunier :  $t_c = 3$  h

Le temps de concentration est trouvé ici varier entre moins d'1 h (formule Kirpich) à 39 h (formule de Turrazza). On prend ici  $t_c = 7$  h compte tenu de la forte couverture végétale.

### Durée spécifique

La durée spécifique de crue  $d_s$  est la durée pendant laquelle le débit est supérieur à la moitié du débit de pointe de la crue. Les différentes méthodes les plus courantes fournissent les valeurs suivantes :

- formule nationale Socose :  $d_s = 47$  h ;
- formule nationale Socose :  $d_s/5 = 9$  h (valeur recommandée pour les petits bassins-versants) ;
- formule calée sur de petits bassins-versants rapides :  $d_s = 2$  h ;
- formule calée sur des bassins-versants à forte pente :  $d_s = 9$  h.

Là encore, on trouve des résultats très variables couvrant une fourchette large entre 2 h et 15 h ; compte tenu de la petite taille du bassin-versant et des pentes fortes, on prend ici  $d_s = 7$  h comme pour le temps de concentration.

### Débit de pointe

Il existe plusieurs formules empiriques donnant le débit de pointe de la crue décennale :

- méthode SCS (petits bassins-versants rapides) :  $Q_p(10) = 5,1 \text{ m}^3/\text{s}$  ;
- méthode Socose (formulation nationale) :  $Q_p(10) = 11,5 \text{ m}^3/\text{s}$  ;
- méthode dite rationnelle :  $Q_p(10) = 12,5 \text{ m}^3/\text{s}$  (avec le coefficient de perméabilité pris à 0,5) ;
- méthode Crupédix :  $Q_p(10) = 15,9 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Les formules de débit de pointe donne une fourchette de  $Q_{10}$  entre  $5 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $16 \text{ m}^3/\text{s}$ . **Une valeur du débit de pointe décennal  $Q_{10} = 12 \text{ m}^3/\text{s}$  semble raisonnable**, soit un débit spécifique décennal de  $0,7 \text{ m}^3/\text{s}/\text{km}^2$ , ce qui est cohérent pour les petit bassins-versants végétalisés dans les Alpes.

### 2.2.2 Estimation des quantiles de débit rares par la méthode QdF

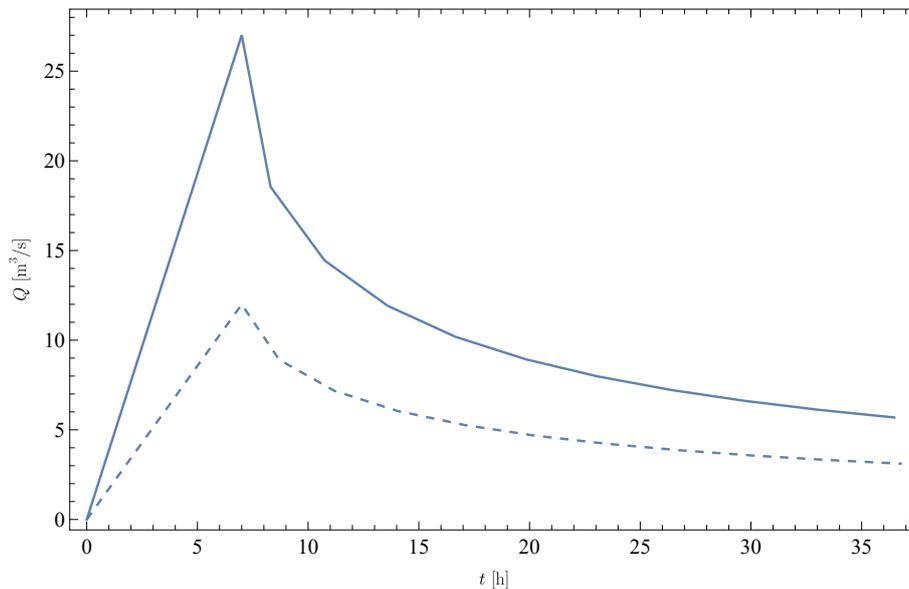
La méthode QdF est une méthode développée par Prudhomme, Galéa, et Javelle au Cemagref (devenu INRAE) de Lyon, qui permet de donner une relation intensité-fréquence pour le débit en fonction du débit décennal (ici fixé  $Q_{10} = 12 \text{ m}^3/\text{s}$ ), de la durée spécifique  $d_s$  (ici fixée à  $d_s = 7 \text{ h}$ ), de la superficie du bassin-versant ( $S = 18 \text{ km}^2$ ), du gradex des pluies, et du type de réponse du bassin-versant. Le comportement du gradex des pluies nous fait prendre la variante hydrologique dite de Soyans pour déterminer la réponse hydrologique du bassin versant aux petits pas de temps compte tenu de la capacité d'infiltration du sol (on a aussi considéré la variante « Florac » pour apprécier l'incertitude sur les débits centennaux).

L'extrapolation à  $T = 100$  ans donne un débit de pointe de  $27 \text{ m}^3/\text{s}$ . On a également comparé le résultat avec les prédictions du modèle Shyreg (bassin RH11530) proposé par l'INRAE et pondérées d'un facteur correctif de surface (extrapolation des valeurs du bassin RH11530 par pondération des débits avec le rapport de surface  $17,8/16,1 = 1,1$ ):  $Q_p = 29,8 \text{ m}^3/\text{s}$  (voir figure 2.2).

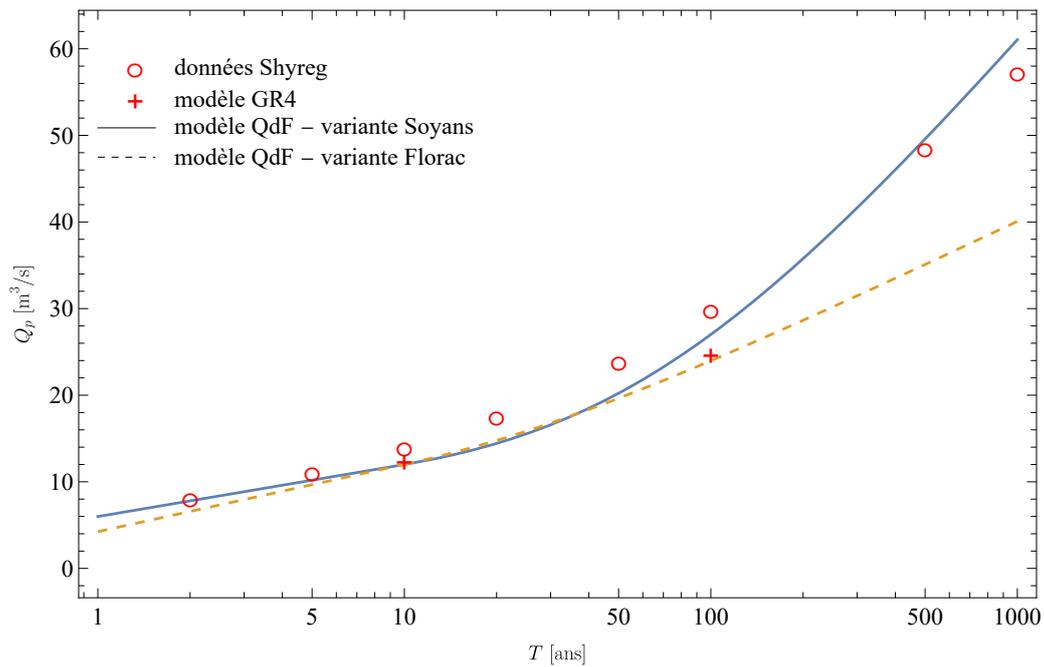
La comparaison montre un très bon accord entre la variante « Soyans » du modèle QdF et le modèle Shyreg.

En résumé, la variante « Soyans » du modèle QdF amène aux quantiles suivantes des débits de pointe :

- le débit décennal de pointe est  $Q_{p,10} = 12,0 \text{ m}^3/\text{s}$  (par construction);
- le débit centennal de pointe est  $Q_{p,100} = 27,0 \text{ m}^3/\text{s}$  (par extrapolation).



**Figure 2.2** – Hydrogrammes prédits par la méthode QdF pour la période de retour  $T = 10$  ans (courbe tiretée) et  $T = 100$  ans (courbe continue).



**Figure 2.3** – Loi donnant le débit de pointe  $Q_p$  en fonction de la période de retour  $T$  selon le modèle QdF : modèle de type Florac (courbe continue) et modèle de type Soyans (courbe discontinue). Les points sont les quantiles de débit de pointe prédits par le modèle Shyreg de l'INRAE pour le bassin RH11530 pondérés d'un facteur  $17,8/16,1 = 1,1$ .

### 2.2.3 Modèle GR4

Il existe plusieurs modèles dits de « transformation pluie-débit » qui visent à reproduire la genèse d'une crue à partir de la pluie. Il s'agit le plus souvent de modélisations conceptuelles où l'on idéalise les processus hydrologiques tels que l'évapo-transpiration, le ruissellement, l'infiltration et les écoulements hyporhéiques.

Nous considérons ici un des modèles qui offre le meilleur compromis entre simplicité et performance : il s'agit du modèle GR4 qui fait partie d'une classe de modèles conceptuels de transformation pluie-débit développés par Claude Michel au Cemagref (INRAE). Il offre une approximation satisfaisante des petits bassins-versants rapides. Nous utilisons ici la variante développée par Benjamin Graff<sup>2</sup>. Les paramètres du modèle GR4 ont été calés sur plusieurs petits bassins-versants à forte pente, dont le débit a été suivi sur plusieurs années. On note qu'ils varient assez fortement en fonction de la couverture végétale, des conditions climatiques, du relief, et de la perméabilité du sol.

Le bassin-versant de la Dranse se comporte comme un bassin de montagne bien végétalisé, à pente moyenne, et de petite taille. Il présente une forte perméabilité.

On a considéré comme valeurs plausibles des paramètres :

- le taux de ruissellement  $X_1$  dans la fourchette 5 – 20 % pour  $T = 100$  ans ;
- l'interception avant infiltration  $X_2$  dans la fourchette 0–5 mm ;
- une vitesse de vidange  $X_3$  dans la fourchette 5 – 20 %/h ;
- un temps de concentration  $X_4$  dans la fourchette 2 h à 5 h.

On a simulé une pluie de période de retour  $T = 10$  ans, puis  $T = 100$  ans, sur une durée  $d$  variable de 3 h à 10 h, dont l'intensité  $I = P/d$  est obtenue à partir de l'équation de Gumbel (1.2) fournissant  $P(d, T)$ .

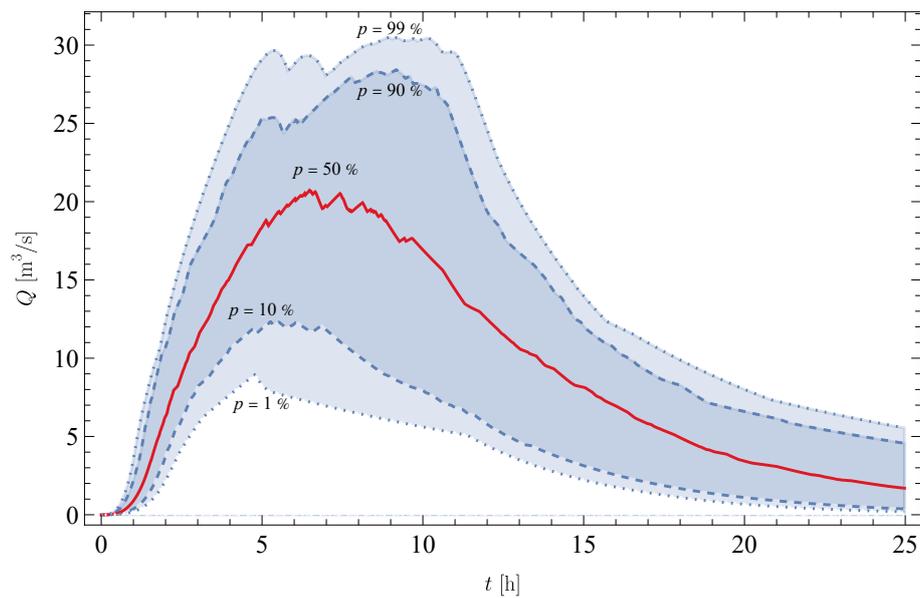
On reporte dans le tableau 2.1 les débits de pointe pour les périodes de retour  $T = 10$  ans et  $T = 100$  ans. On a calculé un débit de pointe  $\bar{Q}_p$  moyenné sur l'ensemble des simulations ainsi qu'un débit de pointe maximal, des quantiles de débit associés à la probabilité 90 % (cela veut dire qu'il y a une probabilité de 90 % que le débit soit inférieur à cette valeur) et 99 %.

**Tableau 2.1** – Débit de pointe calculé à l'aide du modèle GR4.

$T$	$\bar{Q}_p$	max $Q_p$ pour $p = 90\%$	max $Q_p$ pour $p = 99\%$
$T = 10$ ans	12,6 m <sup>3</sup> /s	16,1 m <sup>3</sup> /s	17,5 m <sup>3</sup> /s
$T = 100$ ans	24,9 m <sup>3</sup> /s	26,6 m <sup>3</sup> /s	30,6 m <sup>3</sup> /s

Le débit de pointe estimé par la méthode GR4 est plus faible d'environ 7 % que les prédictions des modèles QdF et Shyreg pour  $T = 100$  ans ; en revanche, il est relativement proche des prédictions des modèles QdF et Shyreg pour  $T = 10$  ans (voir la figure 2.3).

2. Graff, B., *Prédétermination des débits de crue des petits bassins versants torrentiels*, Université de Montpellier II, Montpellier, 2004.



**Figure 2.4** – Quantiles des débits simulés par le modèle GR4 pour  $T = 100$  ans. En tout, 1000 simulations ont été réalisées avec pour chaque simulation des paramètres  $X1$  à  $X4$  variant aléatoirement. Le trait rouge représente la valeur médiane des débits simulés à un temps donné. Les courbes en tireté représentent les quantiles 10 % et 90 %. Les trait en pointillé représentent les quantiles de débit associés aux probabilités 1 % et 99 %.

### 2.2.4 Comparaison et synthèse

Le tableau 2.2 synthétise les différentes estimations obtenues pour le débit de pointe dans la Dranse d'Abondance (au niveau de la gare de départ du TSD du Linga) pour les périodes de retour  $T = 10$  ans et  $T = 100$  ans. L'écart est peu important entre méthodes. Les valeurs obtenues dans l'étude nous fournissent un débit de pointe centennal variant entre  $17,5 \text{ m}^3/\text{s}$  et  $29,8 \text{ m}^3/\text{s}$ . Compte tenu des caractéristiques du bassin-versant, on retient un débit de pointe pour la crue centennale  $Q_p = 27,0 \text{ m}^3/\text{s}$ .

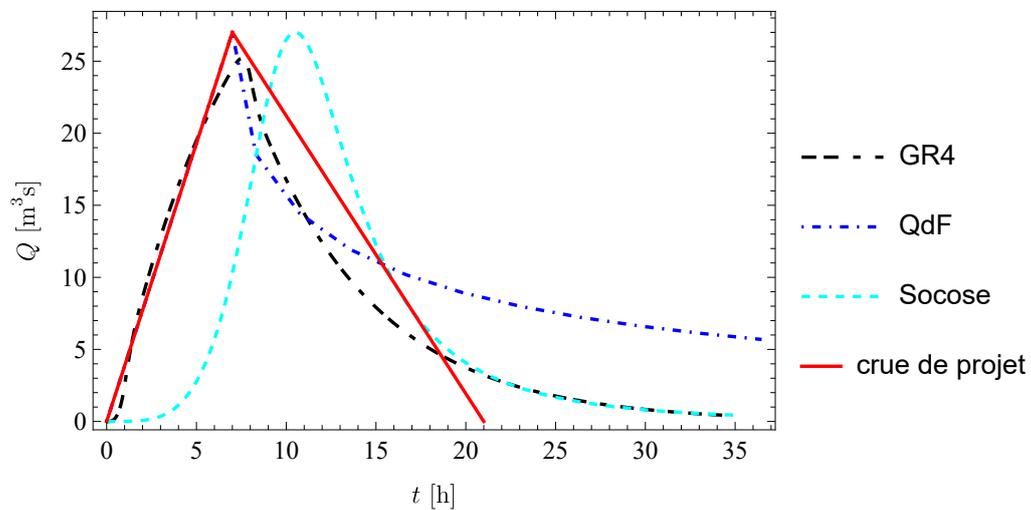
**Tableau 2.2** – Débit de pointe  $Q_p$  en  $\text{m}^3/\text{s}$  pour  $T = 10$  ans et  $T = 100$  ans selon la méthode employée.

	$Q_{p,10}$	$Q_{p,100}$
SCS	5,1	–
Socose	11,5	–
Crupédix	15,9	–
méthode rationnelle	12,5	17,5
modèle QdF	12,0	27,0
modèle GR4	12,6	24,9
modèle Shyreg	13,9	29,8

Nous allons considérer les caractéristiques suivantes pour la crue de projet :

- crue due à une pluie soutenue  $P = 54 \text{ mm}$  pendant  $d = 7 \text{ h}$  – estimée selon l'équation l'équation de Gumbel (1.2) à  $T = 100$  ans – ;
- période de retour  $T = 100$  ans ;
- $Q_p = 27 \text{ m}^3/\text{s}$  ;
- temps de montée : 7 h, temps de décrue 14 h (durée totale 21 h) ;
- volume de crue :  $1,0 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

La figure 2.5 montre l'hydrogramme de la crue de projet à l'échelle du bassin-versant. Comme il est utilisé dans les simulations numériques du chapitre 3, on prend une forme régulière qui est consistante avec les caractéristiques de la crue de projet (débit de pointe, durée, volume de crue).



**Figure 2.5** – Hydrogramme de la crue de projet et comparaison avec des hydrogrammes synthétiques donnés par les méthodes Socose, GR4 ( $X1 = 0,20$ ,  $X2 = 0$ ,  $X3 = 0,2$ ,  $X4 = 1$  h), et QdF (variante « Soyans »). Pluie de projet :  $d = 1$  h,  $I = 29$  mm/h,  $P = 29$  mm.

## 2.3 Modélisation hydraulique

### 2.3.1 Hypothèses du calcul

Le calcul de la propagation d'une crue dans un lit torrentiel reste un problème difficile. Les modèles numériques actuels ou les simulations sur modèle réduit ne permettent que d'obtenir une approximation du phénomène physique réel. En particulier, les problèmes de charriage torrentiel, de couplage entre l'écoulement et le lit (affouillement et atterrissement), de transport de flottant, et d'interactions avec les ouvrages (ponts, passages busés) sont difficiles à prédire avec précision.

Pour évaluer l'impact d'une crue dans le lit de la Dranse, nous avons réalisé des calculs simplifiés en posant les hypothèses suivantes :

- La crue est modélisée à l'aide d'un modèle de Saint-Venant

$$\frac{\partial}{\partial t}h + \frac{\partial}{\partial x}(hu) + \frac{\partial}{\partial y}(hv) = 0, \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}hu + \frac{\partial}{\partial x}hu^2 + \frac{\partial}{\partial y}huv + gh\frac{\partial}{\partial x}h = -gh\frac{\partial z}{\partial x} - \frac{\tau_{p,x}}{\rho}, \quad (2.2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}hv + \frac{\partial}{\partial x}huv + \frac{\partial}{\partial y}hv^2 + gh\frac{\partial}{\partial y}h = -gh\frac{\partial z}{\partial y} - \frac{\tau_{p,y}}{\rho}, \quad (2.3)$$

avec  $h(x, y, t)$  la hauteur moyenne d'eau dans la section d'écoulement,  $z(x, y, t)$  est la cote du fond, et  $\mathbf{u} = (u(x, y, t), v(x, y, t))$  la vitesse moyenne. La contrainte de frottement  $\boldsymbol{\tau}_p = (\tau_{p,x}, \tau_{p,y})$  est choisie de type **Manning-Strickler**

$$\boldsymbol{\tau}_p = \frac{\rho g}{K^2} \frac{u}{h^{1/3}} \mathbf{u}, \quad (2.4)$$

avec  $g$  la gravité,  $\rho$  la masse volumique, et  $K$  le coefficient de Manning-Strickler. Dans le cas présent, compte tenu de nombreux pertes de charge singulières, le frottement de forme est bien supérieure au frottement de peau. Aussi, nous avons pris une valeur relativement basse de  $K$ , typique des torrents à forte pente :  $K = 20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ .

- On ignore le transport solide.
- Nous avons utilisé le code académique **Iber** développé par un consortium d'universités espagnoles. Il est basé sur un solveur bidimensionnel de type volumes finis des équations de Saint-Venant sur des maillages destructurés<sup>3</sup>.
- Pour la topographie, nous avons généré un modèle numérique de terrain (MNT) à partir des données Lidar fournies par le maître d'œuvre. Un maillage de type TIN (triangulated irregular network) a été généré, avec une taille de maille d'environ 1 m (localement 50 cm). Cette taille peut être localement trop grossière pour un calcul hydraulique précis dans le lit mineur de la Dranse (lit étroit et chenalisé, bordé de végétation haute).
- Pour la crue, nous avons considéré qu'elle est consécutive à une pluie de projet de durée  $d = 7 \text{ h}$  de période de retour  $T = 100 \text{ ans}$ , avec un cumul de 54 mm (soit  $I = 18 \text{ mm/h}$  pendant 7 h) selon le tableau 1.9. Le modèle a tourné pour simuler ce qui se passait sur une durée de 15 000 s.
- L'état initial du lit est sec. Aucune infiltration n'est prise en compte.

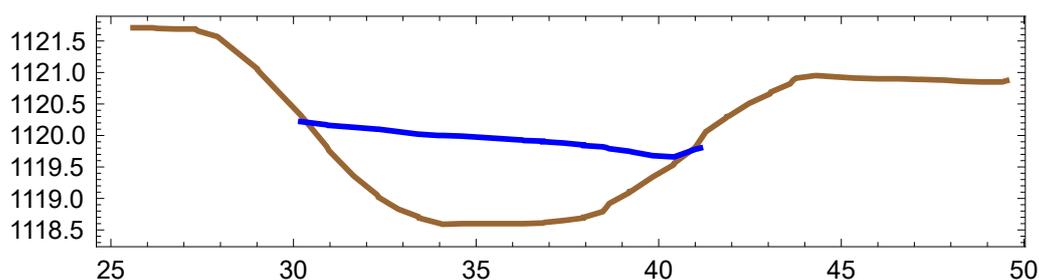
3. Cea, L., and E. Bladé, A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications, *Water Resources Research*, **51**, 5464-5486, 2015.

- Aucun ouvrage hydraulique n'est pris en compte.
- Ni charriage torrentiel, ni transport de flottants ne sont pris en compte. Le calcul est donc réalisé pour une « eau claire ». Il faut garder à l'esprit qu'en montagne, la modification de la section d'écoulement induite par une déposition massive de sédiment ou un embâcle au niveau d'un resserrement peut amener la rivière à quitter son lit mineur et à divaguer à travers son lit majeur. L'image donnée par la simulation correspond au scénario optimiste. **Dans le cas présent, il est vraisemblable que compte tenu de l'importante végétation et du transport probable de flottants, des débordements surviennent au cours de la crue dans la zone urbanisée.**

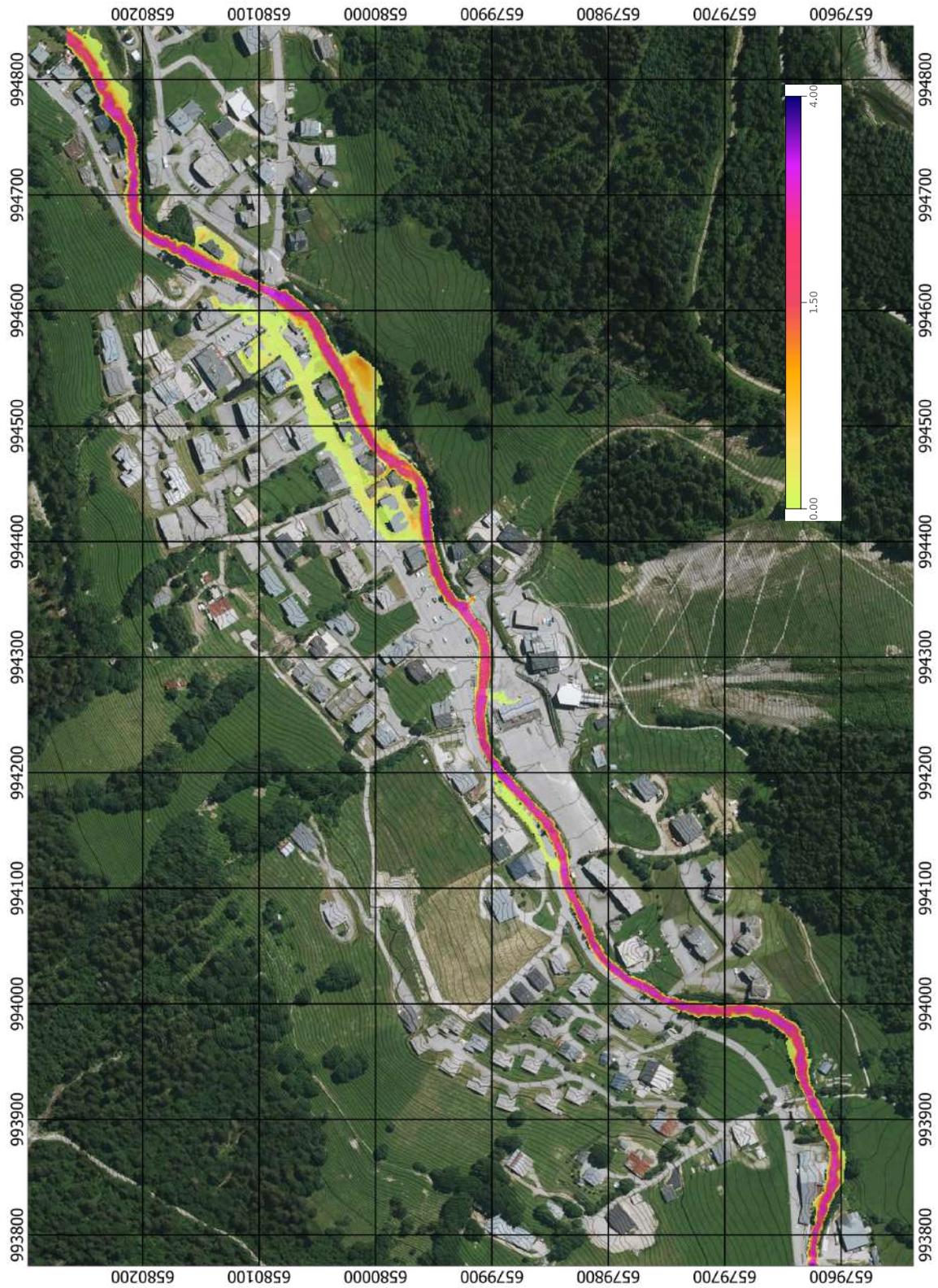
### 2.3.2 Résultats du calcul

Les résultats des simulations sont reportés sur les figures 2.7 et . D'après les simulations, seuls quelques rares et menus débordements seraient à craindre en rive gauche de la Dranse. Le chenal du lit torrentiel serait suffisant à laisser passer le débit de pointe sans souci.

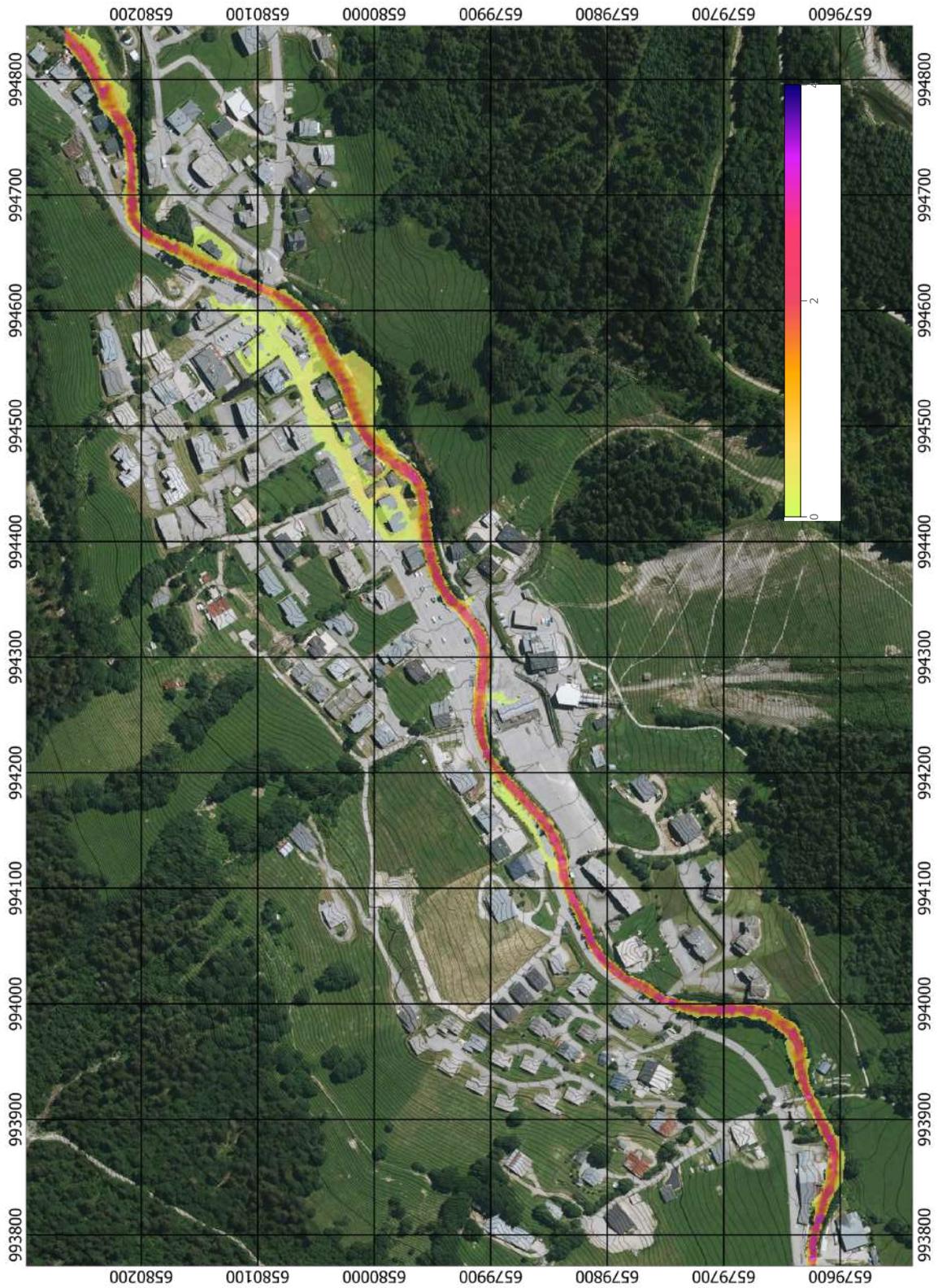
Quand on trace la section mouillée de l'écoulement le long du transect au droit de la gare de départ du TSD du Linga, on trouve que la profondeur maximale d'eau est de l'ordre de 1 m. En rive droite, la berge serait encore suffisamment haute (90 cm au-dessus de la cote des plus hautes eaux), ce qui tend à montrer qu'**il existe encore une marge de sécurité en cas de fort charriage torrentiel.**



**Figure 2.6** – Section en travers du transect au droit de la gare de départ du TSD du Linga. Il s'agit de la valeur maximale atteinte au cours de la crue. La surface libre n'est pas plane compte tenu des différences de hauteur dues aux effets centrifuges (la vitesse étant supérieure dans l'extrados que dans l'intrados du méandre).



**Figure 2.7** – Hauteur maximale (en m) durant la crue centennale dans la Dranse d'Abondance.



**Figure 2.8** – Vitesse maximale (en m/s) durant la crue centennale dans la Dranse d'Abondance.

## 2.4 Synthèse

**Les simulations numériques montrent que la gare de départ du TSD du Linga n'est pas concernée par la crue centennale.** Nous n'avons toutefois conduit qu'une analyse de la crue en « eau claire », c'est-à-dire sans charriage et sans transport de flottants. Le charriage torrentiel ne pose pas de problème particulier compte tenu de la disponibilité limitée de sédiment et du pavage du lit. En revanche, la présence d'une végétation dense sur les berges laisse craindre un transport important de débris végétaux et la formation d'embâcle au niveau des passerelles et constrictions du lit. Des débordements sont probables localement au niveau de la zone urbanisée. Le parking entre la Dranse et la gare peut être engravé. **Le risque d'inondation de la gare est très faible compte tenu de la distance au lit mineur et de la différence d'altitude.**

# Analyse du risque d'avalanche

## 3.1 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 des vingt dernières années, et notamment notre visite de site du 9 décembre 2023 ;
- 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.

## 3.2 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 :

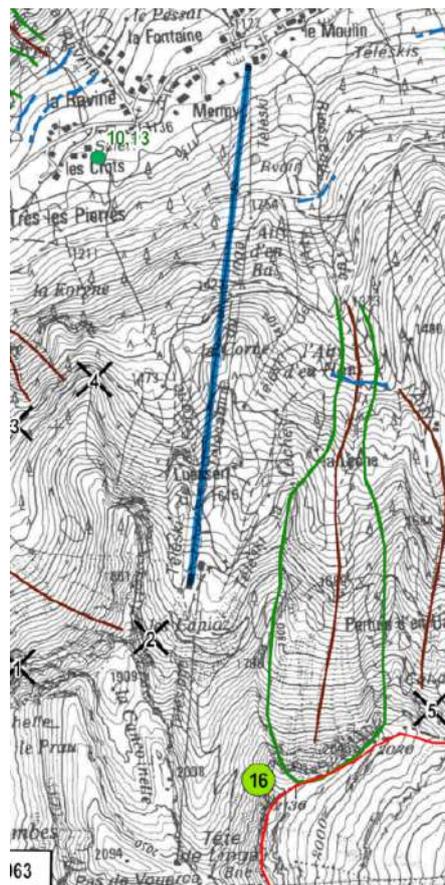
- un levé lidar récent fourni par le maître d'œuvre sur le périmètre de la zone d'étude ;
- l'orthophotoplan BDOrtho de l'IGN (source [geoportail.fr](http://geoportail.fr)) ;
- la couverture de photographies aériennes : plusieurs missions de l'IGN et l'IFN de 1952 à 2012.

Le périmètre de la zone d'étude peut sembler exagérément étendu puisqu'on y incorpore la combe de l'*Aity*, mais cela correspond à la démarche systématique de Toraval qui consiste à mettre à plat le contexte avalancheux de manière exhaustive, notamment en tenant compte des systèmes d'avalanches éloignés qui peuvent, sous les conditions les plus sévères, voir leur extension significativement agrandie par rapport aux situations nivométriques standard.

## 3.3 Éléments historiques

### 3.3.1 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 AD67 de l'atlas de l'EPA (voir figure 3.1).



**Figure 3.1** – Extrait de la feuille AD67 de l'atlas de l'EPA, édition 2012. L'appareil est reporté en surimpression (segment bleu). Échelle 1:25 000. © IGN-Paris 2003, © MEDDE-ONF-Irstea 2012.

Le site d'observation n° 16 figure dans notre zone d'étude (voir figure 3.1). L'enquête fait état de 33 événements observés de 1900 à 2006. Les avalanches de ce site qui pourraient menacer la remontée mécanique sont seulement des phénomènes de grande ampleur qui auraient occasionné des dépôts au bas du versant ; c'est pourquoi nous adoptons ici une lecture succincte de la série d'événements en ne retenant que le critère d'altitude d'arrêt. On note que seules deux avalanches ont eu une cote d'arrêt inférieure ou égale à 1250 m :

- l'avalanche du 2 février 1978 ; l'agent note en remarque que l'avalanche a occasionné des dégâts sur la forêt (80 m<sup>3</sup> de bois) ;

- l'avalanche du 12 mars 1981 ; l'agent note en remarque : « A coupé deux fois une piste ouverte ».

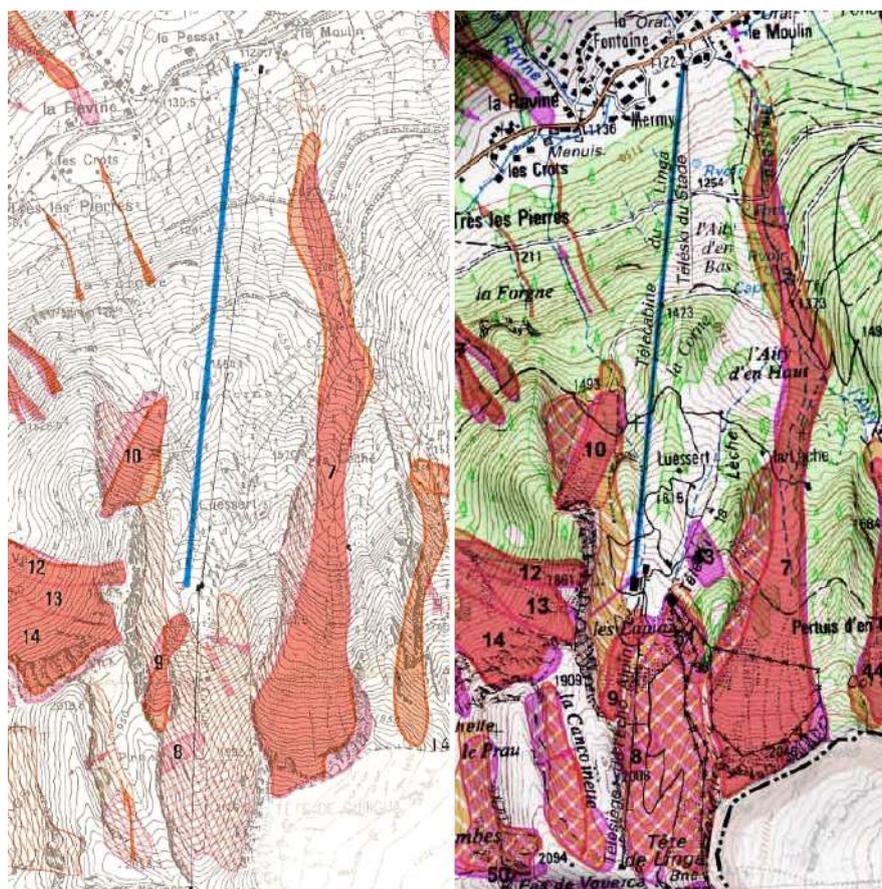
La lecture de l'EPA nous permet de considérer que les grandes avalanches connues de ce site n'ont pas atteint le bas du versant, c'est-à-dire qu'elles ne constituent probablement pas une menace pour la remontée mécanique, notamment la gare aval.

### 3.3.2 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 AD67 de l'atlas de la CLPA. Cette version de la carte mise à jour en mai 2023 est une réédition de la feuille *Châtel - Morzine* réalisée en 1994, elle-même réédition de la feuille *Morzine - Avoriaz* datant de 1971. La figure 3.2 fournit un extrait du document à jour.



**Figure 3.2** – Extrait de la CLPA : à gauche édition Morzine - Avoriaz de 1971 ; à droite feuille AD67 de l'atlas de la CLPA, mise à jour de mai 2023. L'appareil est reporté en surimpression (segments bleus). Échelle 1:25 000. © IGN 2013, © MTECT-ONF-Inrae 2023.

### Avalanches reconnues par photo-interprétation

Le travail de photo-interprétation de la carte est hérité de l'édition de 1971.

Le principal système d'avalanche du versant occupe le vallon de l'Aity: une avalanche partant de la face nord de la Tête du Linga atteint l'altitude de 1200 m et la langue terminale de l'avalanche est prolongée par une extension en hachures à tirets (avalanche présumée) jusqu'à 1140 m. L'appareil, situé à bonne distance de l'emprise, n'est pas concerné par ce phénomène.

Le photo-interprète traite le versant nord-est de la Tête du Linga en zone d'avalanche diverse (hachures oranges) sans distinguer un écoulement en particulier. La même représentation est employée pour les pentes situées sous la barre rocheuse de la *Cancochette*. Là encore la remontée mécanique est située à distance de ces phénomènes.

Le petit couloir nord de la *Cancochette* comporte une avalanche (correspondant au tracé n° 9 des avalanches reconnues par enquête sur le terrain) qui s'arrête dans une dépression marquée du replat des *Lapiaz*; la gare amont de la remontée mécanique est située quelques dizaines de mètres au nord de la zone de dépôt de cette avalanche.

Enfin les écoulements affectant la combe de la *Forniaz* (correspondant au tracé n° 10 des avalanches reconnues par enquête sur le terrain) restent cantonnés au talweg, sans inquiéter la rive droite de la combe où passe la ligne.

À la lecture de cette photo-interprétation, le projet de remontée mécanique n'est donc pas concerné par les avalanches. Nous considérons toutefois que cette représentation minore localement l'extension des phénomènes susceptibles de se produire sous des conditions nivométriques sévères.

### Avalanches reconnues par recueil de témoignages

Comme précédemment pour les avalanches reconnues par photo-interprétation, l'avalanche du vallon de l'Aity est située à bonne distance de l'appareil. La fiche signalétique n° 7 fournit une explication de l'extension présumée de l'avalanche (zone de hachures à tirets et flèche à tirets) en apportant l'information suivante: « Autrefois l'avalanche de la Lèche, descendue en « airin » (avalanche de neige poudreuse avec aérosol), aurait atteint le fond de vallée, déposant un arbre sur le toit d'une maison ».

Le versant nord-est de la Tête du Linga est majoritairement traité en zone d'avalanche diverse (hachures magenta). Plusieurs avalanches sont toutefois bien individualisées:

- avalanche n° 43, dite de Barbossine. La fiche signalétique ne fournit pas d'information supplémentaire;
- avalanche n° 51, dite des *Lapiaz*: la fiche établie lors de l'enquête de 2007 fournit l'information suivante: « Purge de la courte pente située au-dessus du poussard du TK de la Lèche (cassure en plaque, neige fraîche) survenue à la fin du mois de mars 2006. [...] Une planche photographique de la gendarmerie nationale fait état d'un accident d'avalanche ».

L'avalanche n° 9 du petit couloir nord de la *Cancochette* se déverse dans la dépression des *Lapiaz*. La fiche signalétique ne délivre pas d'information supplémentaire. L'avalanche n° 10 occupe la combe de la *Forniaz*. Là non plus la fiche signalétique ne fournit pas de renseignement supplémentaire. La remontée mécanique n'est pas affectée par cette avalanche.

Enfin la CLPA inventorie les dispositifs de lutte paravalanche: le catex du Linga est représenté; il permet de traiter les faces ouest et nord de la Tête du Linga.

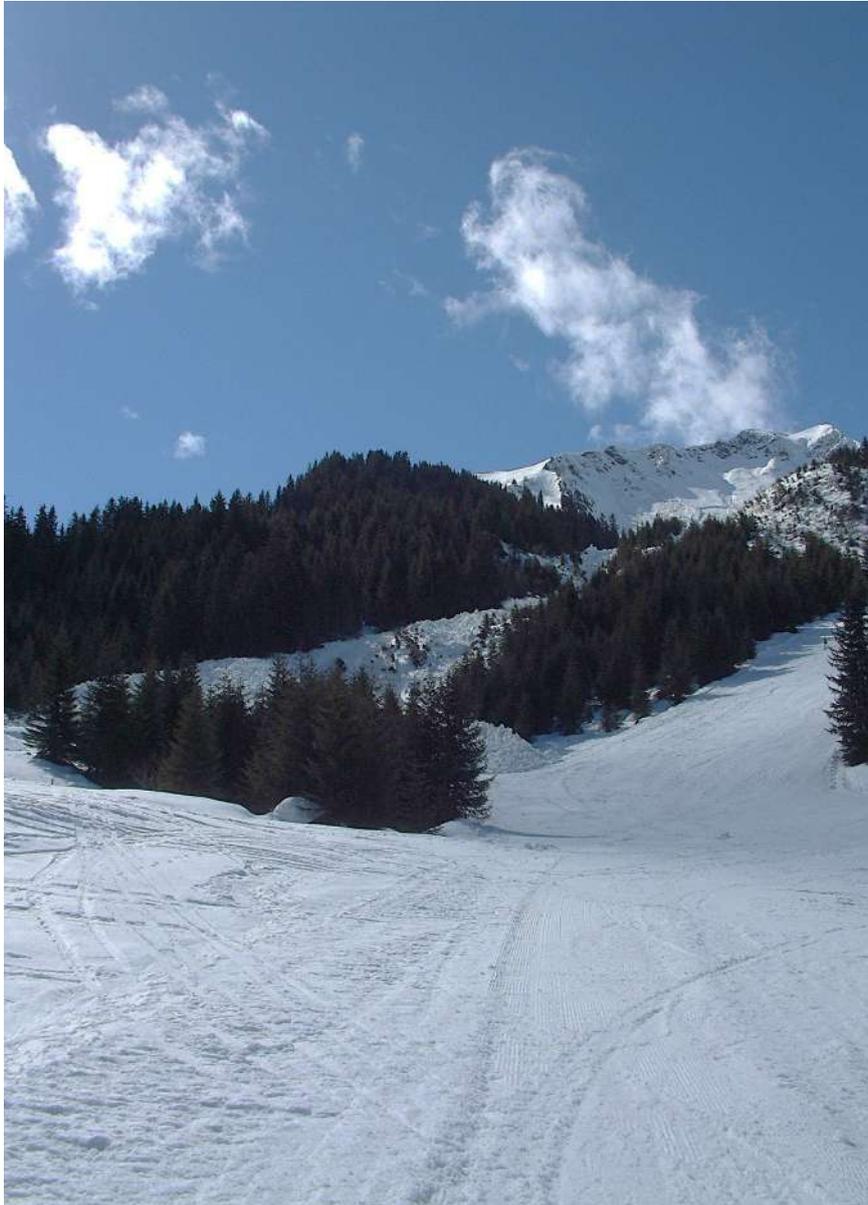
En somme aucun des événements consignés à l'enquête de la CLPA ne rapporte d'éventuels dommages constatés sur la télécabine du Linga.

### 3.3.3 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, grenadage par hélicoptère, et au moyen d'un câble transporteur d'explosifs (catex).

De nos échanges avec le personnel du service des pistes de Châtel nous retenons les points suivants.

- le PIDA prévoit le déclenchement des avalanches dans la combe de la Lèche à l'aide d'un catex. Les événements marquants tels que l'avalanche survenue en mars 2006 ont occasionné des dépôts de neige à proximité de la piste de l'Aity (voir figure 3.3), mais le service des pistes n'a pas observé d'avalanche descendant plus bas dans le vallon ;
- aucune activité avalancheuse n'est connue sur les pentes situées sous la Corne (pentes nommées  $p_{21}$  à  $p_{23}$  dans notre analyse à la section suivante) ;
- la combe du Linga (identifiée zone V au PIDA) fait l'objet de tirs par grenadage manuel sur la rive gauche (pente n° 8) et sur la rive droite (pentes n°s 61 à 62). La rive droite est équipée d'un catex. Les avalanches issues de ces pentes s'arrêtent sur la piste dans le fond de la combe ;
- les pentes dominant l'arrivée du télésiège de la Lèche et la gare du catex (pentes n°s 62 et 63) sont traitées préventivement soit par grenadage manuel soit par le catex. Les coulées restent cantonnées au versant rive droite des Lapiaz. Lors de l'épisode avalancheux de mars 2006 une coulée avait atteint le télésiège (voir figure 3.4) ;
- la petite combe dominant la gare d'arrivée de la télécabine du Linga est traitée par un point de tir manuel (pente n° 9) : les coulées qui s'y produisent se déposent dans la profonde dépression située quelques dizaines de mètres au sud de la gare ;
- les pentes dominant la gare à l'ouest (revers rocheux de la combe de Cancochette) sont traitées également en déclenchement préventif : il s'agit de tirs effectués sur les corniches depuis l'hélicoptère. Les écoulements s'engagent dans le talweg situé à l'ouest de la gare sans l'approcher.



**Figure 3.3** – Vue sur le vallon de l'Aity le 30 mars 2006. L'avalanche s'est déposée en bordure de la piste de l'Aity. Prise de vue service des pistes de Châtel.



**Figure 3.4** – Vue sur le replat des Lapiaz le 30 mars 2006. Une coulée a atteint le télésiégi de la Lèche. Prise de vue service des pistes de Châtel.

## 3.4 Analyse spatiale du risque d'avalanche

### 3.4.1 Principe

Notre analyse spatiale repose sur

- un examen stéréoscopique des couples de photographies aériennes de l'IGN et l'IFN<sup>1</sup> ;
- l'exploitation d'un levé topographique lidar récent ;
- nos diverses observations de terrain effectuées sur le secteur depuis le début des années 2000.

↪ 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 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 3.5 accompagne les commentaires qui suivent.

Notre zone d'étude est localisée en rive droite de la Dranse, c'est-à-dire sur un versant d'orientation générale nord. Culminant à la Tête du Linga les pentes sont étagées entre 1100 et 2100 m d'altitude. Ce sont deux combes, de la *Lèche* à l'est et de la *Forgne* à l'ouest dont la ligne de partage plus ou moins effilée passe par le promontoire de la *Corne*. La remontée mécanique emprunte cette arête puis aboutit dans la combe des *Lapiaz*.

### 3.4.2 Secteur de la Lèche

C'est un vaste vallon dont les pentes sont généralement escarpées au-dessus de 1600 m d'altitude. On note une grande régularité du profil en long, un faible cloisonnement des panneaux d'accumulation, ce qui laisse envisager la possibilité de purges de grande ampleur. L'ensemble des pentes notées  $p_0$  affiche une superficie mobilisable de près de 20 ha. Le chenal ne présente qu'une faible sinuosité, orientant les flux selon une direction nord-nord-est. Entre 1560 m et 1400 m la géométrie du terrain devient nettement moins régulière : le chenal s'élargit, laissant place à un relief bosselé qui contribue sans doute à diviser et ralentir les flux d'avalanches. Au-dessous de 1400 m le chenal se resserre et vers 1250 m le ruisseau de l'Aity entaille profondément le terrain jusqu'au bas du versant. Les forts épaulements notés  $s_{01}$  et  $s_{02}$  contribuent à orienter les écoulements vers l'est.

1. Plusieurs missions aériennes ont été examinées :

- mission IGN c3528-0041\_1952\_F3528-3531 du 27 juillet 1952, clichés 309 à 311 ;
- mission IGN c93SAA0881\_1993\_FD74 du 20 août 1993, clichés 670 et 671 ;
- mission IGN CA00S00932\_2000\_FD0174\_250 du 1<sup>er</sup> août 2000, clichés 1301 et 1302 ;
- mission IGN CP12000122\_FD74x00046 du 11 août 2012, clichés 5168 et 5169.

Le vallon de la Lèche peut produire des avalanches de grande dimension. Sous des conditions nivométriques standard ce sont des avalanches gravitaires qui affectent la partie supérieure du système. Elles s'arrêtent couramment au-dessus de 1550 m. Lorsque les volumes de neige mobilisée sont grands, les avalanches descendent au-dessous de 1400 m, suivant la trajectoire  $g_0$  pour les écoulements gravitaires. Les avalanches qui mobilisent un manteau neigeux récent sont en mesure de développer une phase inertielle rapide qui suit alors la trajectoire principale  $i_0$ . Ces phénomènes sont naturellement très éloignés de la remontée mécanique.

Sous des conditions nivo-météorologiques exceptionnelles (période de retour  $T = 100$  ans), des avalanches coulantes peuvent atteindre le pied du versant, en suivant la trajectoire  $g_{0x}$ . Nous estimons que la gare aval de la remontée mécanique n'est pas menacée par ces phénomènes.

### 3.4.3 Secteur de la Forgne

La combe de la Forgne présente plusieurs panneaux d'accumulation raides sur ses deux flancs. Les pentes orientées au nord-est, notées  $p_1$ , constituent une zone de départ d'avalanche dont la superficie mobilisable est d'environ 4 ha. Elles peuvent alimenter des avalanches volumineuses qui suivent la trajectoire  $g_1$ . Ces phénomènes ne menacent pas l'appareil. La rectitude du profil en long et sa raideur soutenue (environ  $40^\circ$  dans le couloir central) laissent penser que des avalanches rapides peuvent s'y propager, en suivant la trajectoire  $i_1$ . Ces avalanches non plus ne menacent pas l'appareil.

Les pentes orientées au nord et au nord-ouest, notées  $g_{11}$ , sont un peu moins escarpées (dans la fourchette  $30-35^\circ$ ). Elles sont occasionnellement le lieu de coulées de neige, matérialisées par les trajectoires  $g_{11}$ . La remontée mécanique emprunte la partie haute de ces pentes, c'est-à-dire que la section des pentes qui dominant l'appareil est courte, tout au plus une vingtaine de mètres de dénivellation. Les efforts imposés aux pylônes de la remontée mécanique par ce type d'écoulement sont faibles.

### 3.4.4 Secteur de la Corne

L'activité avalancheuse de ce secteur est probablement rare compte tenu de la végétalisation du panneau  $p_{21}$  et de la fréquentation intensive des pentes  $p_{22}$  et  $p_{23}$  par les skieurs. Une instabilité très forte du manteau neigeux (neige très froide sans cohésion en début d'hiver ou manteau neigeux passant à l'isothermie au printemps) peut toutefois donner naissance à des coulées de neige. Si nous incorporons ces zones dans les systèmes à prendre en considération pour l'appareil, c'est surtout en ayant à l'esprit que :

- la pérennité de la forêt est aujourd'hui menacée par les attaques parasitaires (scolyte) dans les massifs des Alpes du Nord ;
- une fermeture prolongée du domaine skiable à la clientèle est possible, redonnant à ces pentes leur statut de versant vierge potentiellement lieu d'avalanches naturelles.

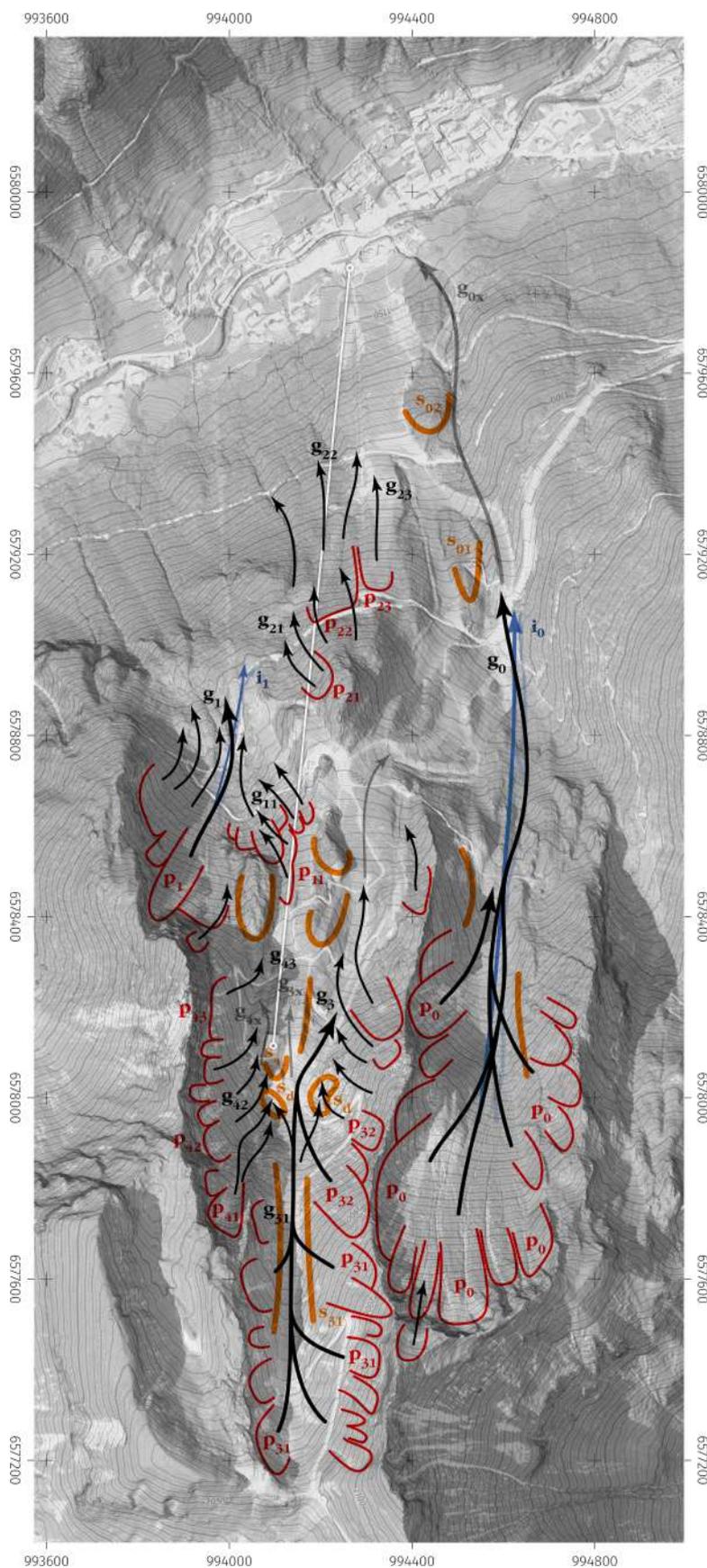
Des avalanches coulantes empruntent les trajectoires identifiées  $g_{21}$  à  $g_{23}$ . La ligne est concernée par ces écoulements.

### 3.4.5 Secteur du Linga

Le vallon issu du *Pas de Vouerça* forme un chenal rectiligne  $s_{31}$  où passe la piste du Linga. Les nombreux panneaux  $p_{31}$  alimentent de multiples coulées qui peuvent se déclencher plus ou moins simultanément, donnant parfois des avalanches volumineuses qui sont conduites jusque sur le replat des Lapiaz et au-delà. Une part des écoulements est interceptée par les dépressions notées  $s_d$ . La topographie en contrebas de ces zones de dépôt intermédiaire déverse les flux en direction du nord-ouest, suivant la trajectoire  $g_3$ . Un large panneau  $p_{32}$  retient notre attention : sous des conditions d'instabilité marquée il est possible qu'il produise un écoulement dense rapide qui emprunte la trajectoire  $g_{3x}$ . La présence du relief  $s_4$  qui fonctionne comme une étrave, et la distance importante qui sépare la gare du pied de pente nous conduisent à considérer que la remontée mécanique n'est pas menacée par ce phénomène.

### 3.4.6 Secteur des Lapiaz

Ce sont de courtes pentes, à la superficie modeste. Il s'y produit des coulées de faible volume. Celles provenant du couloir  $p_{41}$  se déposent dans le replat  $s_d$ . Les coulées  $g_{42}$  se déposent à proximité de la gare amont de l'appareil en situation nivométrique courante. La position de la gare à proximité immédiate du pied de pente expose à ce que les plus grosses coulées puissent exceptionnellement toucher le bâtiment sur sa façade ouest, suivant la trajectoire  $g_{4x}$ .



**Figure 3.5** – Schéma global de fonctionnement des avalanches. Le tracé blanc localise le projet. Échelle 1:15 000. Fond topographique Lidar station, complété des données LiDAR HD de l'IGN pour les zones non couvertes ; orthophotoplan Géoportail © IGN 2023. Système de coordonnées Lambert 93.

## 3.5 Synthèse

**Le projet de remontée mécanique est faiblement impacté par l'activité avalan-**  
**cheuse.**

Sous des conditions nivo-météorologiques rares à exceptionnelles, la principale vulnérabilité de l'appareil se situe sans doute sur la gare amont : le bâtiment pourra être touché par des coulées en phase d'arrêt provenant des courtes pentes qui la dominent.

Sous des conditions nivométriques standard, la gare n'est pas menacée. La ligne est touchée par des avalanches dans la tranche d'altitude 1300 m–1600 m : les sollicitations attendues y sont modérées vis-à-vis d'une structure de type pylône de télésiège.

# Analyse par simulation numérique des avalanches

## 4.1 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 3);
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.

### 4.1.1 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 1993, 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. 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.

#### 4.1.2 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 4.1 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 dans les zones de départ, c'est-à-dire dans la tranche 1950–2550 m)<sup>2</sup>. 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 pu être affinée jusqu'à 50 cm localement.

#### 4.1.3 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  $T$  :**
  - **avalanches rares**,  $T \sim 30$  ans. Cette période de retour correspond à la durée usuelle d'amortissement d'une remontée mécanique.
  - **avalanches exceptionnelles**,  $T \sim 100$  ans. Cette période de retour est celle considérée dans le zonage avalanche pour les secteurs urbanisés.

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. Les épaisseurs de neige au sol sont corrigées en tenant compte de la pente et d'un gradient hypsométrique de 3 cm par tranche de 100 m d'altitude. Le principe du calcul est explicité dans la note suivante : Burkard, A., und B. Salm, *Die Bestimmung der mittleren Anrissmächtigkeit  $d_0$  zur Berechnung von Fließlawinen*, Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos, 1992. Dans AVAC, l'épaisseur  $d_0$  est calculée pour chaque maille selon la méthode du SLF. L'épaisseur  $d_0$  reportée ici correspond à la valeur obtenue pour un sol horizontal (sans correction de pente).

**Tableau 4.1** – Épaisseur de neige utilisée pour estimer l'épaisseur de la cassure, l'épaisseur totale du manteau neigeux (selon la verticale), les coefficients de Voellmy  $\mu$  et  $\xi$ , et masse volumique  $\rho$  en fonction de la période de retour.

	<i>avec pida</i>		<i>sans pida</i>	
	$T = 30$	$T = 100$	$T = 30$	$T = 100$
$d_0$ (cm)	100	120	120	140
$H$ (cm)	300	350	300	350
$\mu$ (-)	0,30	0,25	0,25	0,20
$\xi$ ( $s^2 \cdot m^{-1}$ )	600	800	1000	1200
$\rho$ ( $kg \cdot m^{-3}$ )	300	300	300	300

Prendre une période de retour  $T = 30$  ans implique que le maître d'ouvrage accepte la survenue d'une défaillance majeure sur l'appareil au cours de sa durée d'exploitation, 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. Dans les calculs, nous avons considéré que la période de retour de l'avalanche coïncidait avec celle des chutes de neige.

- 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.
- La résistance à l'écoulement de la forêt n'est pas prise en compte.
- 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.
- **On considère deux types de scénarios prenant en compte ou non le PIDA :**
  - *avalanche naturelle*: 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); dans ce cas, c'est tout le volume de neige accumulée sur trois jours qui est mobilisé. Pour un scénario (signalé par la mention « naturelle » dans le tableau 4.1), l'action du PIDA n'est pas prise en compte;
  - *avalanche déclenchée dans le cadre d'un PIDA*: dans ce cas, on considère que c'est le cumul de neige journalier peut qui est mobilisé par l'avalanche (signalé par la mention « pida » dans le tableau 4.1).
- 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.

- Pour les efforts des avalanches, on distingue<sup>3</sup> :
  - *pression cinétique* : c'est la pression d'impact

$$p_c = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^2$$

exercée par l'avalanche quand elle est dans un régime inertiel et rencontre un obstacle de petites dimensions ;

- *pression « hydrostatique »* : c'est une poussée de type hydrostatique

$$p_h = C_d \rho g h$$

exercée par l'avalanche quand elle est dans un régime gravitaire. Elle dépend d'un coefficient de traînée  $C_d$ .

Nous ne reportons ici que les pressions cinétiques.

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>4</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 comme des horsains<sup>5</sup>, et en pratique, on ne les a pas considérés. Nous n'avons pas considéré un scénario « Cauterets » ici.

3. Voir 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.

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

5. 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.

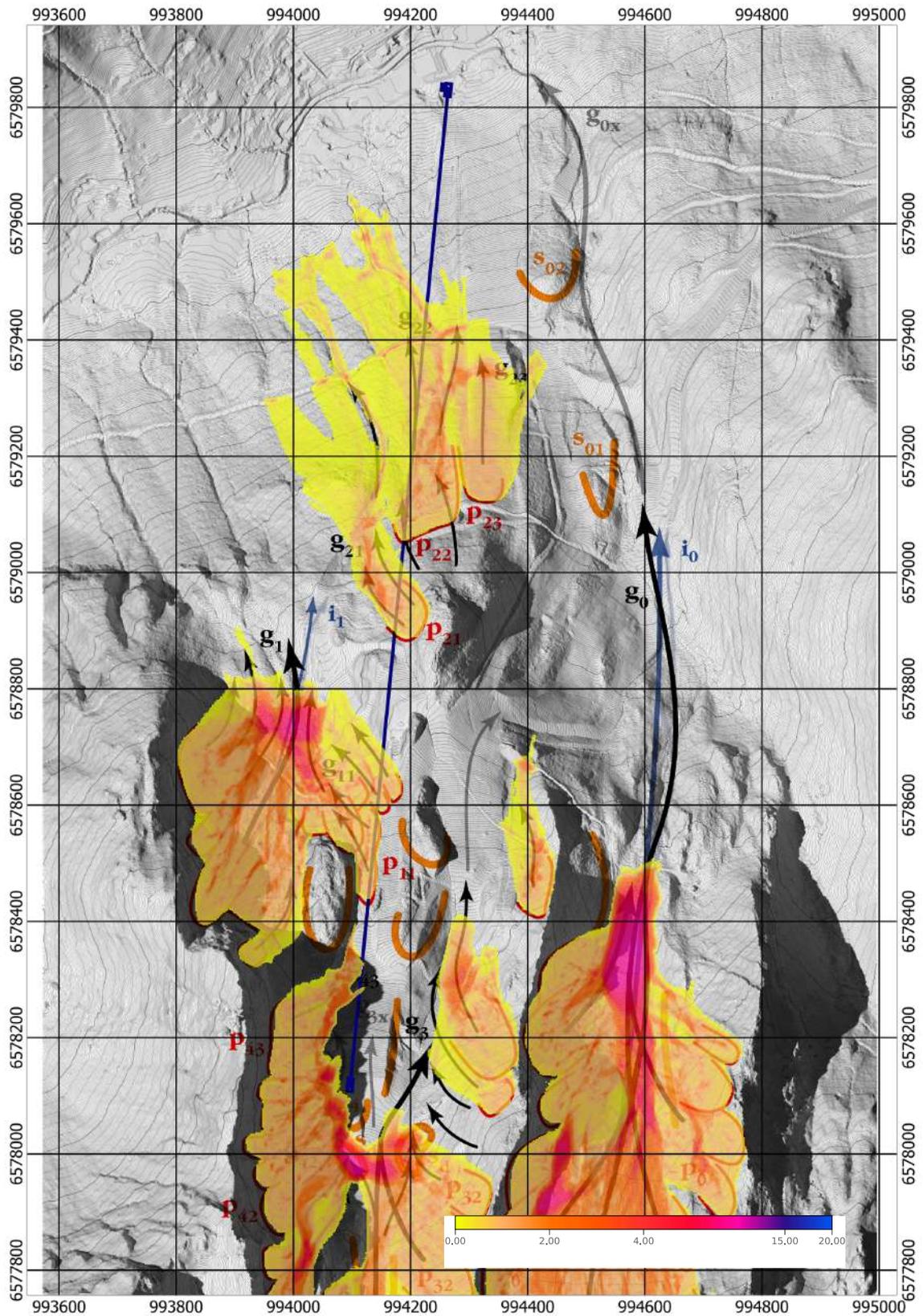
## 4.2 Résultats des simulations numériques

### 4.2.1 Avalanches dans le cadre d'un PIDA

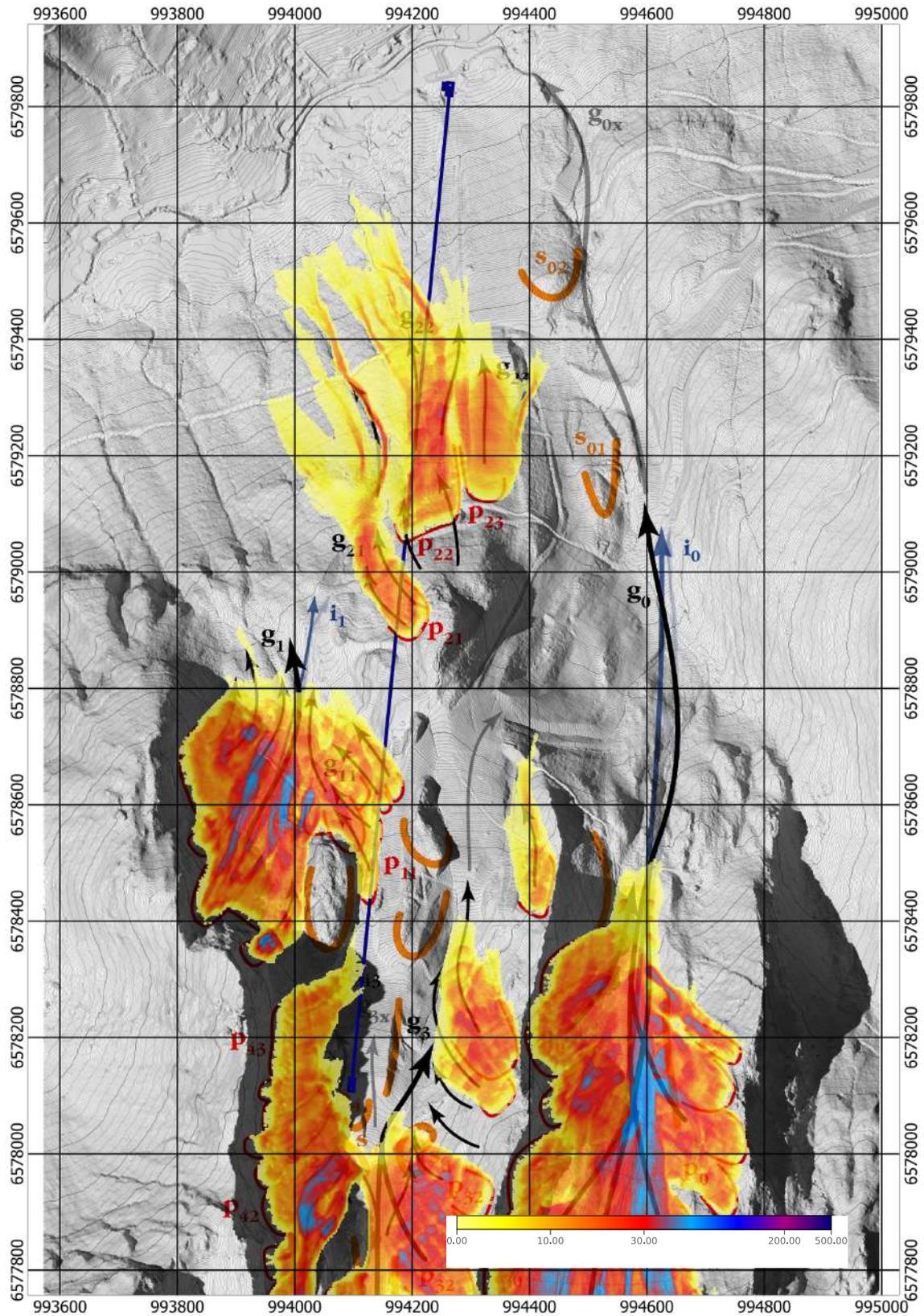
↪ Voir : cartes 4.1 et 4.2 pour  $T = 30$  ans ; cartes 4.3 et 4.4 pour  $T = 100$  ans. Coordonnées Lambert 93. Échelle 1 : 8000.

Les simulations montrent que la ligne traverse plusieurs panneaux, dont la purge provoque des avalanches de petite taille. Les écoulements sont peu épais (de l'ordre de 50 cm à 80 cm dans les différentes zones d'écoulement) et génèrent des pressions de faible intensité ( $p < 10$  kPa pour  $T = 30$  ans et  $p < 20$  kPa). La gare d'arrivée peut être plâtrée. Pour les grandes périodes de retour ( $T \sim 100$  ans), cette gare se situe à la marge de gros dépôts ; des dommages à la structure sont possibles du fait du remplissage de la gare par une partie de ces dépôts.

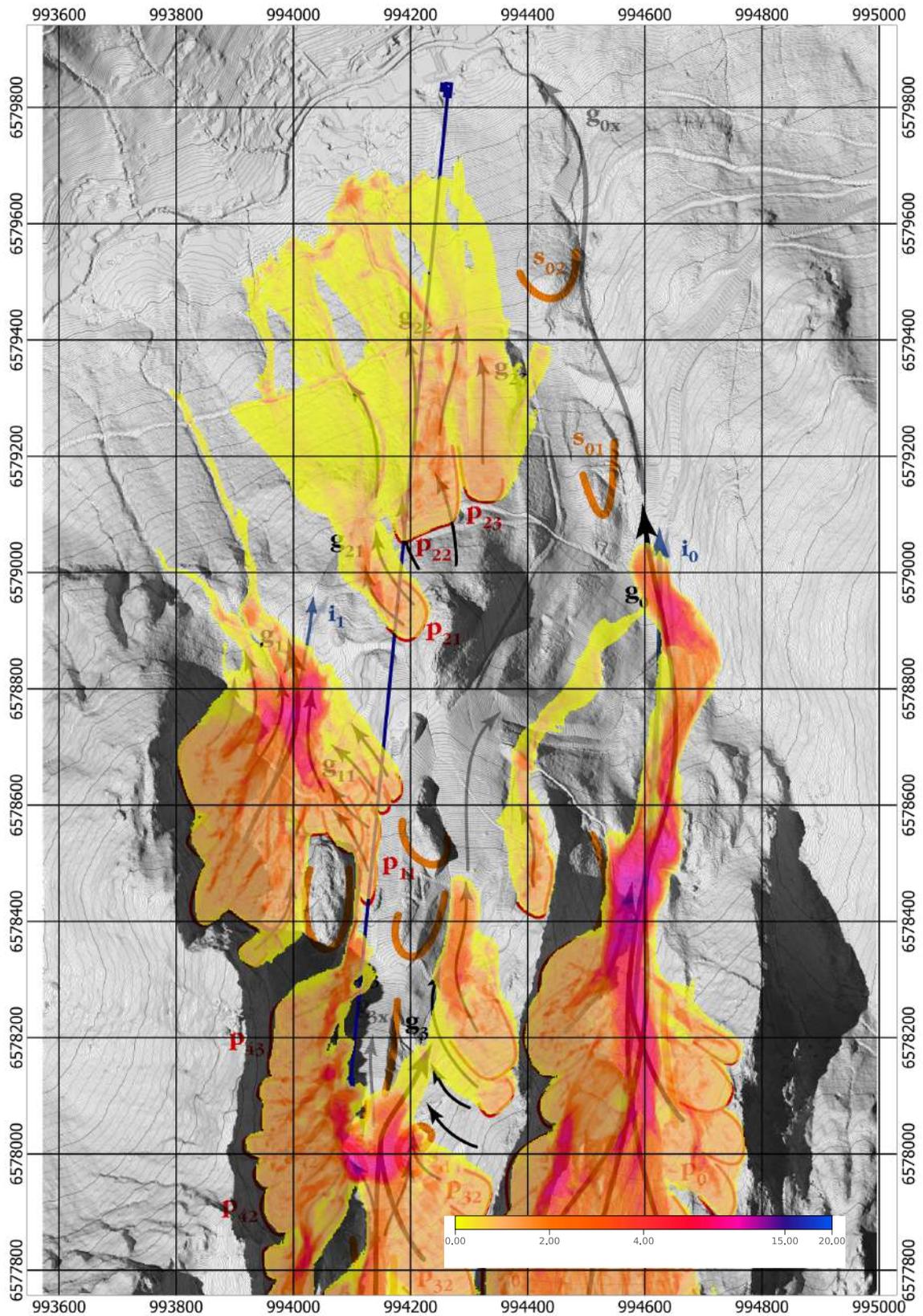
Comme le rôle de la forêt n'est pas pris en compte dans les simulations, il faut considérer que les résultats numériques surestiment significativement le niveau de pression cinétique dans la forêt sous 1400 m d'altitude.



**Figure 4.1** – 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 4.2** – 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.

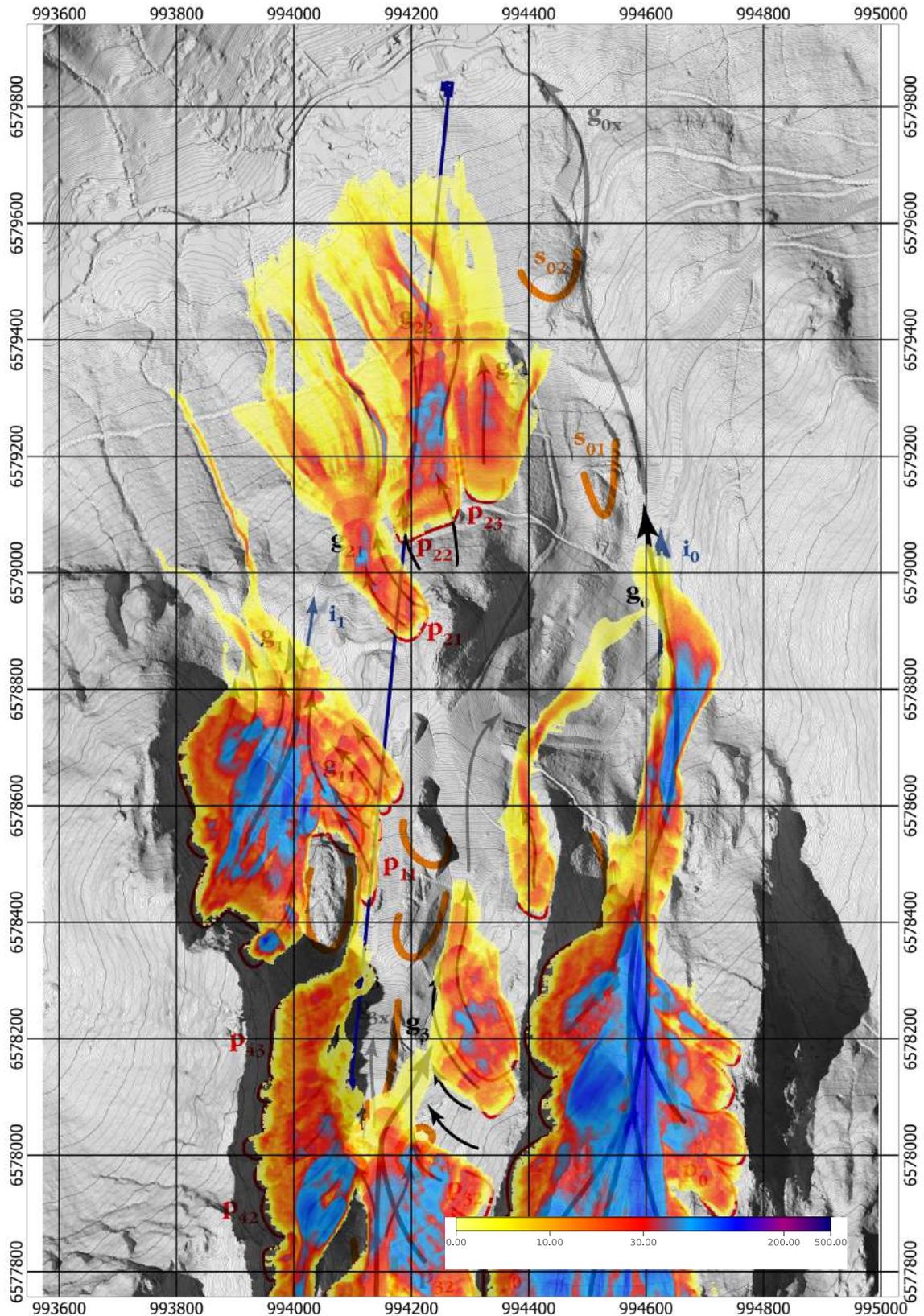


**Figure 4.3** – Carte des simulations numériques montrant l’emprise maximale et la variation des hauteurs maximales pour  $T = 100$  ans et des avalanches coulantes dans le cadre d’un PIDA.

### 4.2.2 Avalanches naturelles

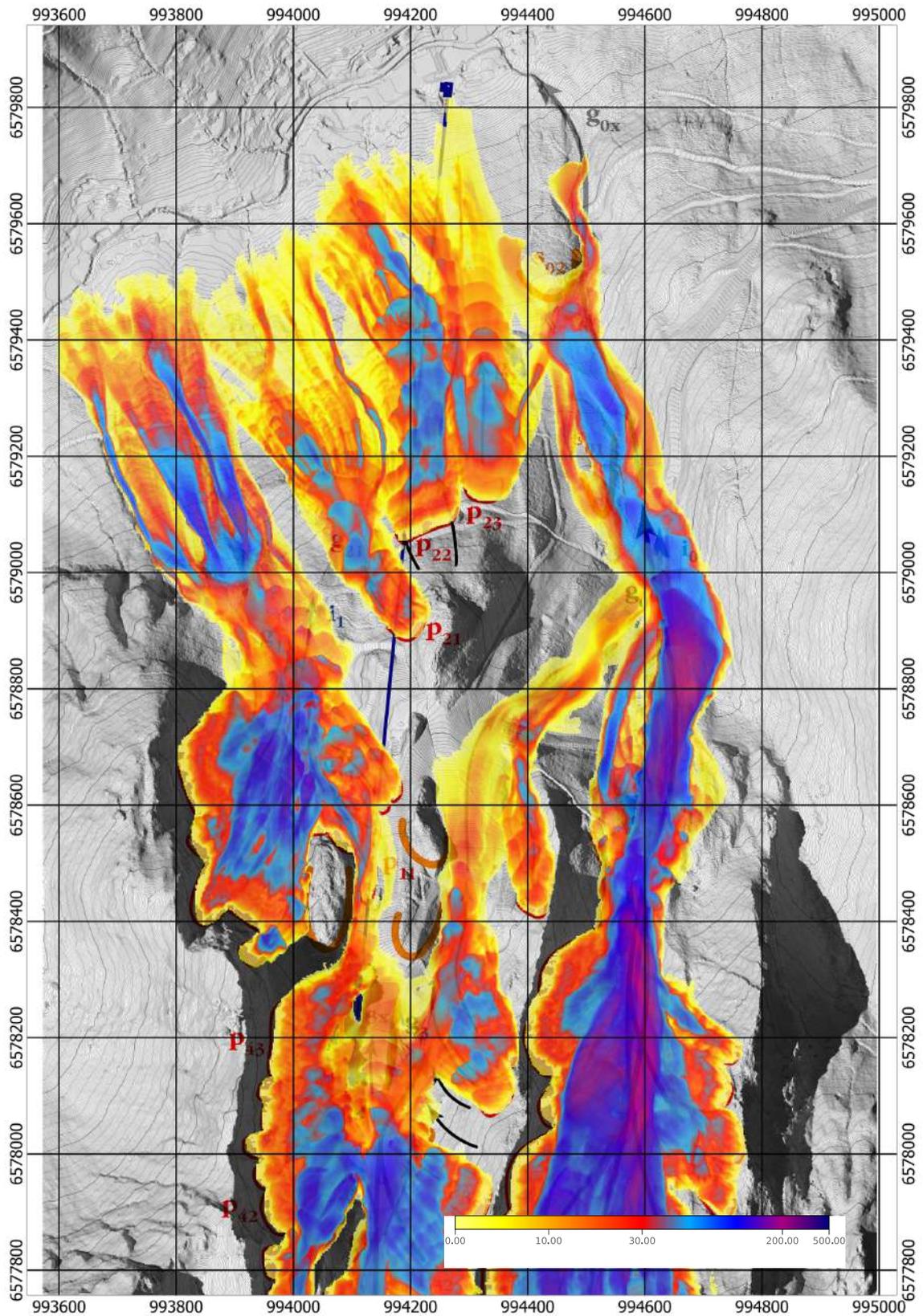
↔ Voir : cartes 4.5 et 4.6 pour  $T = 30$  ans ; cartes 4.7 et 4.8 pour  $T = 100$  ans. Coordonnées Lambert 93. Échelle 1 : 8000.

En mobilisant des volumes de neige un peu plus importants (de l'ordre de 20 %), les avalanches naturelles génèrent des pressions cinétiques (jusqu'à 80 kPa) dans certains secteurs. La gare d'arrivée est exposée, avec un risque important de dommages de la structure (pression cinétique dans la plage 30–40 kPa, fort flux de neige à travers la gare). Les emprises sont également plus étendues que pour les avalanches déclenchées dans le cadre du PIDA.



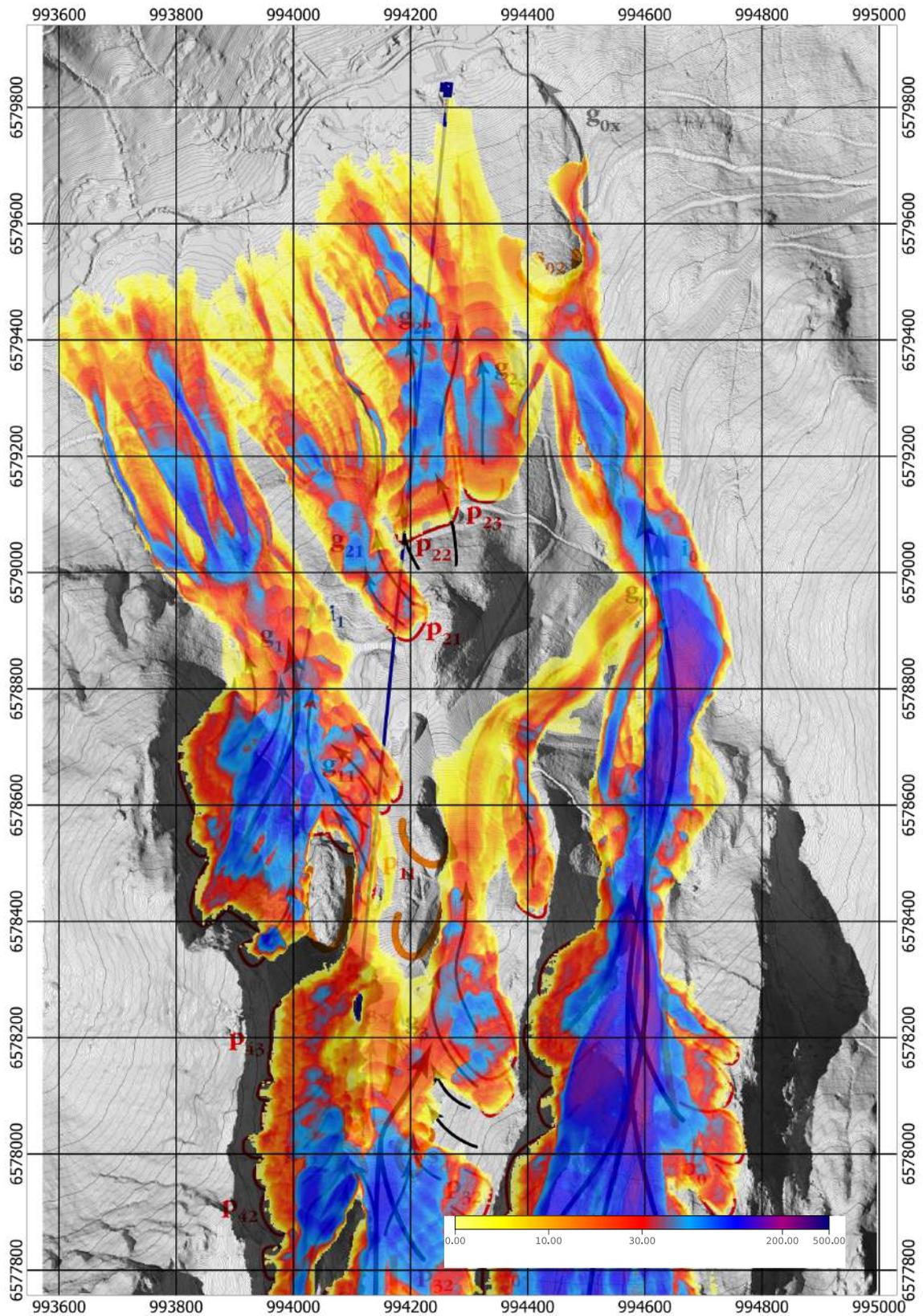
**Figure 4.4** – Carte des simulations numériques montrant l'emprise maximale et la distribution des pressions cinétiques  $p = \frac{1}{2} \rho \bar{u}^2$  maximales au sein de l'avalanche pour  $T = 100$  ans dans le cadre d'un PIDA.





**Figure 4.6** – Carte des simulations numériques montrant l'emprise maximale et la distribution des pressions maximales pour  $T = 30$  ans et des avalanches coulantes naturelles.





**Figure 4.8** – Carte des simulations numériques montrant l’emprise maximale et la distribution des pressions maximales pour  $T = 100$  ans et des avalanches coulantes naturelles.

## Synthèse

**Le projet de TSD est soumis à un faible risque d'inondation pour la crue centennale au niveau de la gare de départ.** Ce risque se traduit par un engravement possible du parking attenant et à de la présence d'eau sur toute la surface du sol. Il n'y a pas de risque sur la structure.

**La ligne du TSD et la gare d'arrivée sont soumises à un risque d'avalanche localisé.** L'ampleur et l'intensité du risque dépendent foncièrement de la bonne conduite du Plan d'intervention pour le déclenchement des avalanches (PIDA). Nous nous plaçons ici dans l'hypothèse où ce PIDA est réalisé en toutes circonstances, assurant ainsi la sécurisation des pistes et des remontées mécaniques.

Les tableaux 5.1 à 5.2 fournissent les efforts (pression et hauteur d'écoulement) pour chacun des tronçons de la ligne du TSD identifiés selon le degré de risque. On a supposé que le PIDA peut être mené pleinement et efficacement quelles que soient les conditions.

Il faut rappeler que 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 TSD 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 cas 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 § 4.1).

En matière de dimensionnement des pylônes, il y a peu d'écart entre les deux scénarios  $T = 30$  ans et  $T = 100$  ans dès lors que le PIDA est effectif. La gare d'arrivée peut être touchée par des coulées en fin de vie (plâtrage, envahissement de la gare par de la neige).

En cas de faillite du PIDA, les pressions peuvent localement être plus importantes (jusqu'à 80 kPa). La gare d'arrivée peut être endommagée par des langues d'avalanche en fin de vie. Si

le maître d'ouvrage souhaite prendre en compte un scénario considérant la faillite du PIDA, il faut actualiser les tableaux 5.1 à 5.2.

- 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).



**Projet : TSD du Linga - Châtel**

Diagramme généré par vulnOSE.sh

Date : 10 décembre 2023

Réf. : DCE TSD du Linga

Sources : r.avac 3.1.5

Système de coordonnées : Lambert93

Position G1 : x = 994265, y = 6579833

Position G2 : x = 994097, y = 6578116

Hypothèses de calcul :

**Période de retour considérée: 30 ans**

**PIDA opérationnel**

Épaisseur de neige au sol: 300 cm

Type d'avalanche: coulante

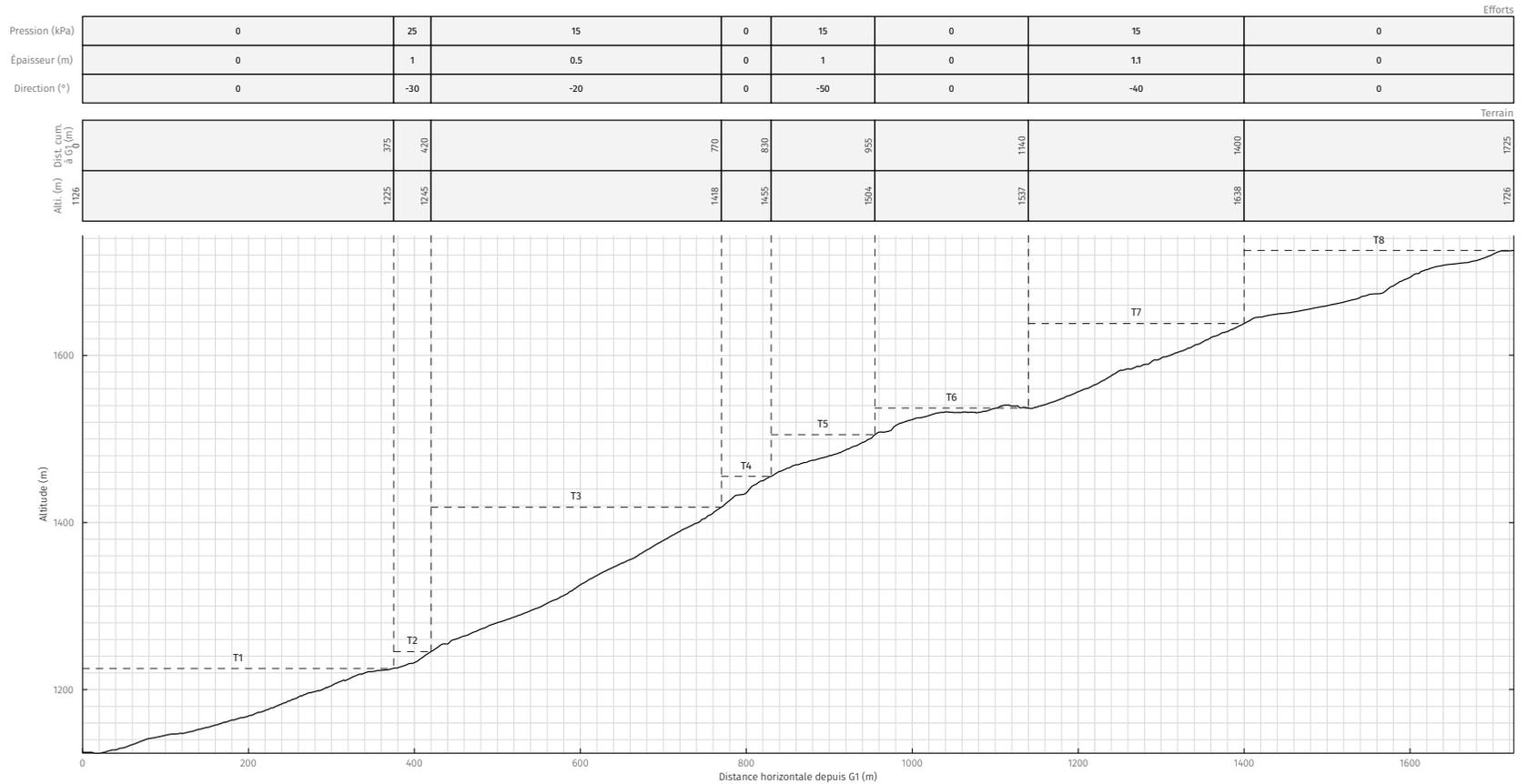
Origine des abscisses: axe poulie gare aval

Incertitude sur les épaisseurs au sol: ± 40 cm

Incertitude sur les pressions: ± 5 kPa

Incertitude sur les hauteurs: ± 30 cm

Incertitude sur les directions: ± 20°



**Figure 5.1 – Avalanches rares pour le TSD ( $T \sim 30$  ans) dans le cadre d'un PIDA.**



**Projet : TSD du Linga - Châtel**

Diagramme généré par vulnOSE.sh

Date : 10 décembre 2023

Réf. : DCE TSD du Linga

Sources : r.avac 3.1.5

Système de coordonnées : Lambert93

Position G1 : x = 994265, y = 6579833

Position G2 : x = 994097, y = 6578116

Hypothèses de calcul :

**Période de retour considérée : 100 ans**

**PIDA opérationnel**

Épaisseur de neige au sol : 350 cm

Type d'avalanche : coulante

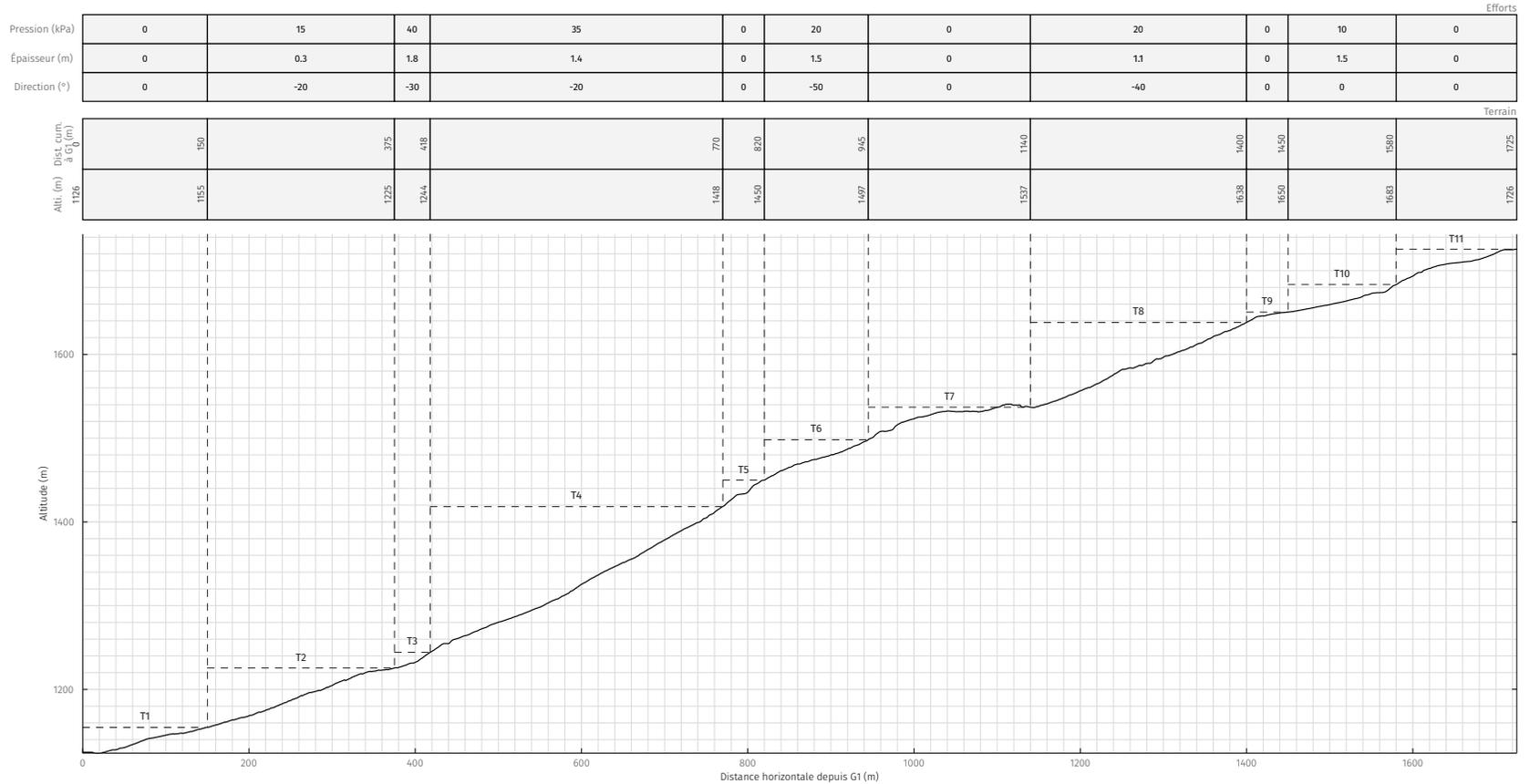
Origine des abscisses : axe poulie gare aval

Incertitude sur les épaisseurs au sol : ± 40 cm

Incertitude sur les pressions : ± 5 kPa

Incertitude sur les hauteurs : ± 30 cm

Incertitude sur les directions : ± 20°



**Figure 5.2 – Avalanches exceptionnelles pour le TSD ( $T \sim 100$  ans) dans le cadre d'un PIDA.**

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](mailto:ancey@toraval.ch))
  - Vincent Bain ([bain@toraval.fr](mailto:bain@toraval.fr))
- commanditaire de l'étude : SAEM Sports et Tourisme
- maîtrise d'œuvre : CNA
- le corps de ce rapport contient 66 pages.
- pièce annexée : représentation tridimensionnelle

[http://telec.toraval.fr/3d/chatel\\_2023.html](http://telec.toraval.fr/3d/chatel_2023.html)