

Concertation sur le projet Funiflaine du 24 janvier au 8 mars 2019

Bilan des associations : Association Flainoise – Amoureux des Carroz

Annexe A2

Dimensionnement de l'aspect « remontée mécanique »

Version v4

-Réduction du dimensionnement de l'infrastructure à 2000 passagers/h.

-Les possibilités de virages sur des pylônes, que nous avons cherché à approfondir (il y a un exemple sur le 3S Penkenbahn de Tux/Mayrhofner) ne nous apportent pas ce que nous attendions, la conclusion est placée en annexe.

Version v5 (simulations effectuées à partir du 1^{er} octobre 2019)

Pas de simulations réduit à 1m, pour une meilleure précision géographique.

Profil du relief provenant de Google Earth, à partir des coordonnées GPS (la meilleure restitution parmi les offres gratuites).

Table des matières

1 - Tracés de référence pour cette analyse.....	2
2 - Caractéristiques prises en compte pour la remontée mécanique.....	3
3 - Capacité de transport.....	4
4 - Simulation du câble par éléments finis.....	5
5 - Résultats – cas 3S.....	8
6 - Pente des câbles au départ des stations aval.....	11
7 - Déviation horizontale des câbles en fonction du vent.....	11
8 - Déviation verticale des câbles.....	11
9 - Exemples de dimensions de gares 3S.....	14
10 - Conclusion.....	15
ANNEXE - Virages en ligne pour les 3S.....	16

1 - Tracés de référence pour cette analyse

Le tracé de référence, le tracé 19, est divisé en deux tronçons:
Ces deux tronçons sont raccordés à l'intérieur de la gare des Carroz.

Le tableau ci-dessous donne leurs caractéristiques, et compare au tracé actuel (tracé 20).

	Magland (Riand)-Les Carroz (Les Feux)-Flaine P3	Tronçon 1 Magland – Les Feux	Tronçon 2 Les Feux – Flaine P3	Tronçon 2 jusqu'au point haut (dimensionnement câble tracteur)	Projet du Syndicat pour ce que nous en savons
Longueur en plan	5100m	1385 m	5100-1385=3785 m	5100-3942= 1158 m	5270 m
Altitude Départ (au sol)	510 m	510 m	1295 m	1295 m	510 m
Altitude Arrivée (au sol)	1703 m (point haut 1915 m)	1295 m	1703 m	Point haut 1915 m	1570 m
Dénivelé	1703-510 = 1193 m	770 m	1703-1295=408 m	1915-1295=620 m	1570-510=1060 m
Longueur développée	5462 m	1607 m	5462-1607=3890 m	4282,88 -1605-2677 m	5620 m
Pente moyenne		53 %		26 %	

Les plans et les profils ont été tracés, à partir des informations du Géoportail IGN, et de Google Earth.

La tension des câbles est ajustée séparément pour les 2 tronçons, la longueur, le nombre de cabines et la pente sont différents.

2 - Caractéristiques prises en compte pour la remontée mécanique

CAS DU 3S

Cabines. Capacité de 2000 passagers/h.

Cabines de 35 places assises (type Sigma comme sur le 3S des Prodains à Avoriaz).

Poids à vide : 3550 kg Charge utile : 2900 kg / cabine (80 kg / passager cf. STRMTG cas de l'hiver). Masse unitaire totale max : 6 050 kg

Câbles références (source Forum des Remontées Mécaniques) :

3S d'Avoriaz (câbles Fatzer), câble porteur 57 mm charge de rupture 350 000 daN et câble tracteur 45 mm charge de rupture 146 600 daN

3S d'Ischgl. (câbles Fatzer), câble porteur 58 mm, masse 74 t, et câble tracteur 55 mm 85 t (L=3 424 m)

On prend en compte les câbles porteurs du 3S des Prodains car on connaît la résistance mécanique, et le câble tracteur de Ischgl car la masse des cabines à déplacer est proche de celle du Funiflaine (la ligne du 3S des Prodains est bien plus courte que celle du Funiflaine).

	Masse kg/m pour 1 câble.	Longueur totale environ	Résistance à la rupture	Effort statique maximal pour 1 câble avec prise en compte des phénomènes vibratoires et dynamiques.
Porteur 57 mm	20 kg	22,6 km pour 4 câbles	350 kdaN (forum des remontées Mécaniques pour le 3S des Prodains)	111 kdaN (coefficient 3,15)
Tracteur 55 mm	18 kg	11,3 km pour 2 câbles	220 kdaN. Valeur extrapolée du chiffre des Prodains qui a un câble de 45 mm.	48 kdaN (coefficient 4,5)
TOTAL				270 kdaN

On trouve également sur la ligne des cavaliers, Ils soutiennent le câble tracteur, évitent que les câbles puissent se frotter ou s'emmêler, et réduisent le balancement des câbles. Nous évaluons leur masse à 0,5 tonne. On prend un espacement de 250 m comme sur le 3S de kitzbühel (2004, c.f. Forum des Remontées Mécaniques).

CAS DU MONOCÂBLE

En phase d'analyse, sur la base du D-Line de Doppelmayr (Flégère et Orelles)..

3 - Capacité de transport

Nous évaluons dans plusieurs configurations, le nombre de cabines, l'intervalle entre cabines, et la masse linéique suspendue correspondante

Hypothèses :

- 3S - On prend 8 m/s comme vitesse nominale, et une capacité de transport de 2000 passagers/h / sens, avec des cabines de 35 passagers
- Monocâble - à venir ultérieurement.

La capacité de 2000 passagers/h est celle indiquée dans l'appel à candidature du Funiflaine,.

Tracé	Magland (Riand) – Les Carroz (Les Feux) - Flaine P3			
Longueur Développée A/R	10 900 m			
Données d'exploitation, pour 3 cas	Temps de rotation des cabines, hors temps en gare à chaque arrêt.	Espacement des cabines, nombre de cabines nécessaire,	Distance moyenne développée entre cabines (m) sur chaque sens,	Masse moyenne des cabines / m de ligne développée par sens en kg / m
6 m/s (cabines 35 places) 3S à 2000 p/h	1 816 s (avec temps en gare, à corriger)	2000 / 35 = 57 cabines/h 3600/57 = 63 s entre cabines 1816/63 = 29 cabines en ligne	63 x 6 = 378 m	6050/378 = 16 kg/m Masse totale suspendue = 58+16=74 kg/m
8 m/s (cabines 35 places) 3S à 2000 p/h	1 602 s (avec temps en gare, à corriger)	2000/35 = 57 cabines/h 63 s entre cabines 26 cabines en ligne	63x8=504 m	6050/504=12 kg /m Masse totale suspendue = 58+12=70 kg/m
6 m/s (cabines 10 places) Monocâble à 1500 p/h	1 816 s	150 cabines/h 24 s entre cabines 1816/24=76 cabines en ligne.	24 x 6 = 114 m	Masse cabines : 1800/114 = 15,8 kg / m Masse totale suspendue = 35,8 kg/m
7 m/s (10 places) Monocâble à 1300 p/h	1 557 s	130 cabines/h (1300/10) 27s (3600/130) entre cabines 1557/27= 58 cabines en ligne	27x7= 190 m	Masse cabines : 1800/190 = 9,5 kg/m Masse totale suspendue : 29,5 kg/m
7 m/s (10 places) Monocâble 2000 p/h 140 ldaN	1 557 s	200 cabines/h (2000/10) 18 s (3600/200) entre cabines 1557/18 = 86 cabines en ligne	18 x 7 = 126 m	Masse cabines : 1800/126 = 14,3 kg/m Masse totale suspendue : 34,3 kg/m

Nota : sur le monocâble, les cabines sont lestées, nous ne connaissons pas la masse du lest, avec 1 passager de moins par tranche de 80 kg. Cependant, nous avons une marge avec la tension maximale du câble, calculée à 110 kdaN et qui est annoncée à 140 kdaN pour le projet de la Flégère.

4 - Simulation du câble par éléments finis

Les profils verticaux des câbles porteurs et des câbles tracteurs sont très proches, ils sont mis au même niveau :

- à chaque pylône
- à chaque cabine
- pour le 3S, à chaque cavalier de ligne.

La ligne est divisée, au plan des efforts, en éléments sur lesquels on combine les forces représentées par des vecteurs :

Les efforts considérés sont :

- la tension des câbles porteurs aval et amont, dans leur axe, à chaque extrémité du segment,
- le poids des câbles porteurs, des câbles tracteurs (éventuels), et des cabines.
- le poids des cabines et des cavaliers,
- et aux cavaliers et aux cabines, un échange d'efforts verticaux entre câbles porteurs et tracteurs, cavaliers et cabines, les amenant au même niveau.

Forces	Conséquence
- le poids de la cabine est repris :	la part du vecteur Poids dans l'axe du câble tracteur est reprise par ce câble. Le restant est repris par les câbles porteurs.
- le poids du câble tracteur est repris :	Par lui-même et par les câbles porteurs.
- le poids des câbles porteurs est repris :	Par lui-même et par le câble tracteur.

La difficulté est de déterminer la part d'efforts repris par chaque câble. Cela dépend de la tension des deux câbles, et doit être recalculé en continu.

Dans cette évaluation, on procède ainsi :

La simulation ne distingue pas les efforts sur les câbles porteurs et tracteurs, on raisonne en tension globale.

La répartition n'a pas d'incidence sur le profil. En revanche, cela ne permet pas le dimensionnement mécanique des câbles.

La masse des cabines et des cavaliers est ajoutée en valeur moyenne à la masse des câbles.

Masse des câbles pour une ligne de montée ou descente de 5 à 6 km :

- 2 câbles porteurs : 40 kg/m

- 1 câble tracteur : 18 kg/m

- 13 cabines de 6,050 tonnes par sens, une tous les 504m en montée et en descente, soit 12 kg/m/sens..

- 15 cavaliers par sens (espacés de 250m) de masse unitaire estimée à 0,5 tonnes, soit 1,5 kg/m/sens

Le total est de 71,5 kg/m.

L'approche est purement statique.

Le STRMTG définit les marges de dimensionnement des câbles (page 85 du guide 2016) :

Cas du monocâble : marge de 4,00.

Cas du 3S : marge 3,15 pour les câbles porteurs, et 4,5 pour le câble tracteur.

Notre simulation est réalisée comme si on avait un seul câble, et pour le 3S la tension sur le câble tracteur pour la fonction traction est analysée ci-après.

Cas du 3S : calcul approximatif de la tension sur le câble tracteur pour la seule fonction traction des cabines, et conséquence sur la tension totale.

	Nombre de cabines en moyenne sur chaque tronçon, jusqu'au point haut (la partie descendante ne s'ajoute pas).	Tension du câble tracteur au point haut
Tronçon 1. L = 1460 m (développée 1687 m), Dénivelé 770 m Pente 53 %	En moyenne $1687/300 = 6$ cabines	$6 \times 6050 \times 53 \% = 19,5$ kdaN
Tronçon 2. Jusqu'au point haut L = 2500 m (développé 2600 m), Dénivelé 420 m Pente 16 %	En moyenne $2600/300 = 9$ cabines	$9 \times 6050 \times 26 \% = 14,2$ kdaN.

La charge maximale est compatible avec la capacité de 48 kdaN des câbles tracteurs, et on ajustera la tension maximale de ces câbles à 48 kdaN au point haut pour soulager les câbles porteurs. On bénéficiera alors de la capacité totale en statique des câbles de $222 (2 \times 111) + 48 = 270$ kdaN.

On vise donc une tension maximale totale de **270 kdaN/sens** pour l'ensemble des trois câbles de chacun des tronçons.

Le pas de calcul sur les câbles est de 10m. (1m pour les simulations effectuées à partir d'octobre 2019. Cela permet un positionnement plus précis des pylônes et gares.)

Cas du monocâble.

En phase d'étude.

Tableau de résultats du logiciel, ci-après.

Pour chaque pylône, on obtient :

-la charge verticale et horizontale

-la variation de pente entre amont et aval,

ce qui permet de calculer l'inclinaison des efforts sur le pylône (ainsi que la longueur du sabot pour assurer le confort des passagers, mais ce n'est pas fait).

Le positionnement des pylônes est réalisé avec le minimum de pylônes. La tension des câbles est

Version 3S : - départ gare aval 208 kdaN et départ gare intermédiaire 220 kdaN.

Pour ne pas dépasser la limite de 270 kdaN aux points haut.

5 - Résultats – cas 3S

Singularité	Gare 1	Pylône 1	Pylône 2	Gare 2				Pylône 4		Pylône 5		Pylône 6		Gare 3
	G1	P1	P2	S Sabot aval	Extrémités de la construction		S Sabot amont	P4		P5		P6		G3
Abscisse m	0	500	940	1330	1350	1420	1440	1555	1585	3280	3320	3942	3970	5100
Altitude câble m	519	759,58	1126,81	1287,02	1294,02	1294,12	1300,12	1357,00	1362,54	1902,83	1904,89	1918,74	1917,97	1722,70
Pente câble <i>radians</i>	0,370	0,63	0,337	0,330	0,000	0,280	0,411	0,180	0,040	0,040	-0,050	0,062	0	0,000
Longueur m	0	556,03	1129,44	1551,28	1572,47	1642,47	1663,36	1791,65	1822,16	3620,2	3660,67	4283,56	4311,57	5463,13
Tension câbles kdaN	218,0	236,0	263,4	220,0	220,5	220,5	220,9	225,1	225,5	265,3	265,3	267,0	267,0	252,2
Tension Vert kdaN	78,8	139,6	86,6	71,3	0,0	52,4	88,0	44,7	6,8	0,0	-13,0	0,0	-87,8	0,0
Tension Horiz kdaN	203,2	190,3	248,7	208,1	220,5	214,2	202,6	220,6	225,4	265,3	265,0	267,0	252,2	252,2

On a détaillé la gare intermédiaire, et 3 pylônes très chargés.

Le profil établi par la simulation est donné ci-après On voit 4 traits ou marques :

- noir: le relief du sol

- rouge : pylônes, et trait droit entre les sommets des pylônes Funiflaine ou HT

- vert : position du câble en charge maximale.

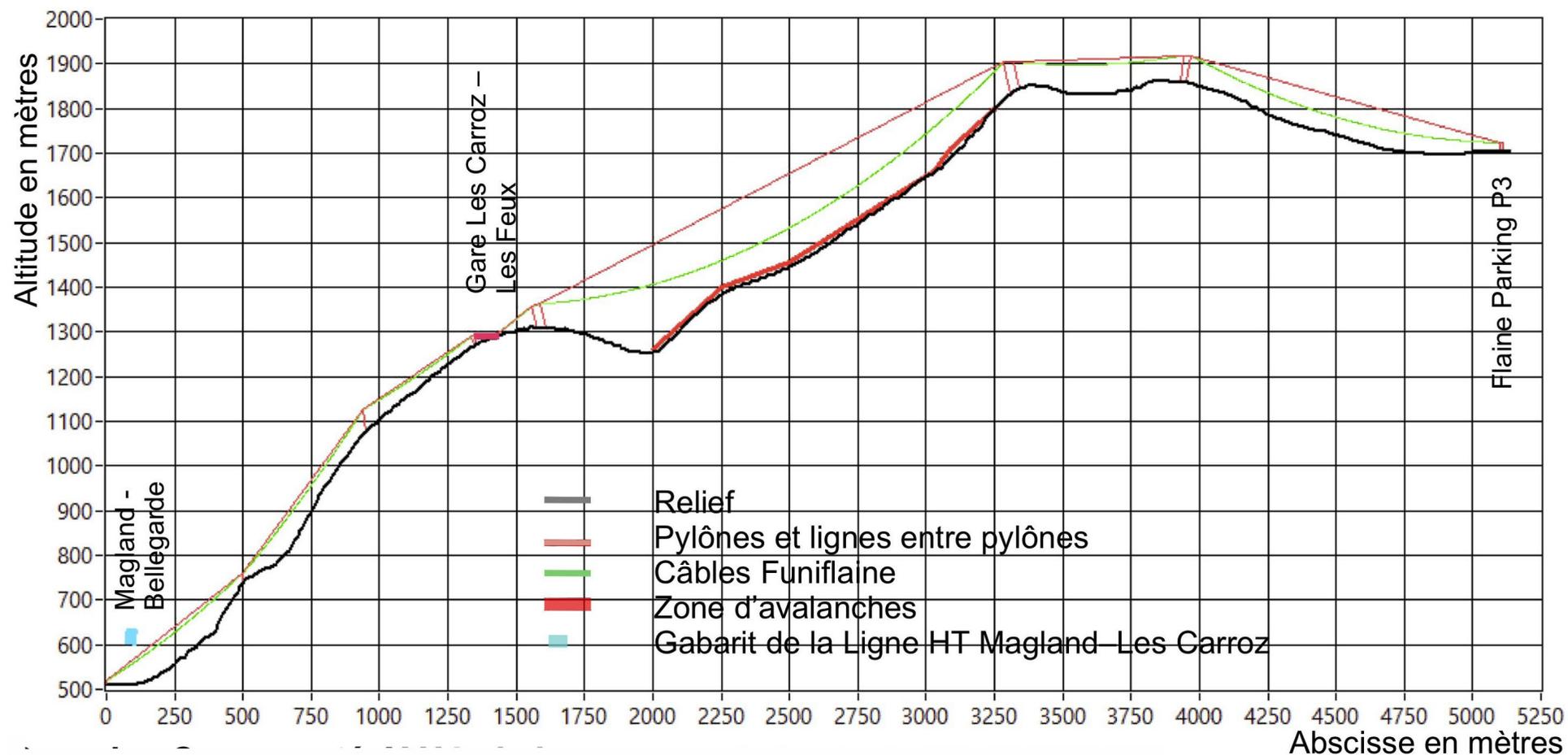
- bleu : proximité avec des lignes HT

Ce dimensionnement n'est peut-être pas optimal, il peut être plus intéressant d'ajouter des pylônes pour réduire les efforts dans les câbles porteurs et les pylônes.

Les forces indiquées lignes 5 à 9 sont à multiplier par 2 pour les pylônes car les chiffres ne concernent qu'un sens de liaison

Cela permet de vérifier la tension des câbles, et de déterminer les efforts sur les pylônes.

9-Tracé des Asso (19) : Magland – Les Carroz – Flaine P3



6 - Pente des câbles au départ des stations aval

Sur les installations 3S, il n'est pas possible de réaliser des pylônes de compression, de façon satisfaisante.

Cependant, une fonction similaire est réalisée au départ des gares aval. Les câbles sont à l'horizontale à l'intérieur de la gare, et il faut prendre rapidement une pente importante, en général entre 10° et 30°. La sortie de gare permettant de réaliser cette prise de pente est proche d'un pylône de compression, avec la différence que les câbles porteurs ne peuvent pas coulisser.

7 - Déviation horizontale des câbles en fonction du vent

Nous ne sommes pas à même de réaliser une évaluation. Nous nous reposons sur les réalisations 3S jusqu'à des portées de 3000m.

8 - Déviation verticale des câbles

Pour les longues portées, les déplacements verticaux des câbles et des cabines sont un élément important. Les cabines ne doivent pas se rapprocher à moins de 4m du sol, contrainte du STRMTG.

Un calcul complet, par exemple dans le cas d'un arrêt brutal de l'installation ou de rafales de vent est complexe, et fait partie du dossier de réalisation, et prenant en compte les conditions d'exploitation, notamment le vent.

Nous avons cependant effectué des vérifications **sur notre tracé 19**, au milieu de la plus grande portée :

- nous avons fait une approche reposant sur la longueur du câble, dans les conditions de nos simulations
- pour chaque intervalle entre gare et pylône ou entre pylônes, notre logiciel de simulation calcule la longueur rectiligne entre appuis, et la longueur du câble.
- la longueur du câble excède la longueur rectiligne entre pylônes de 18,8m sur la portée la plus longue et de 26,6m sur la totalité de la longueur.

Ce n'est pas assez pour que les cabines s'approchent du sol à moins de 4m, même si la totalité du « mou » était reportée sur la travée la plus longue. La situation est représentée sur la figure ci-après.

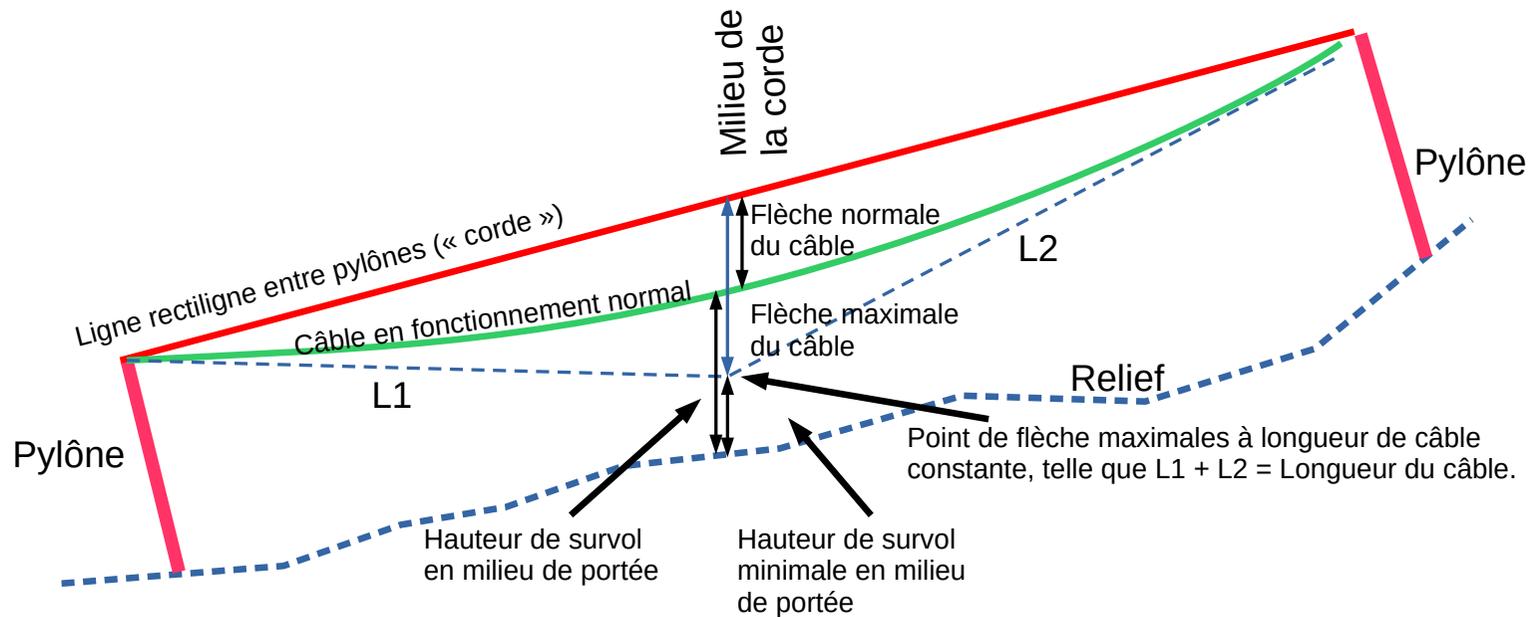
On est très éloigné de cas de situations réelles, et nous avons cependant une marge significative.

Voir les tracés dans la partie 2 du dossier. Tracés 19 et 17 pour la portée qui survole la zone d'avalanche de l'Arbaron :

- Tracé 19 (gare en aval de la route) : Flèche 120m et hauteur de survol normale 90m. La hauteur de survol minimale est de 51m (marge 46m).
- Tracé 17 (gare en amont de la route) : Flèche 120m et hauteur de survol normale 75m. La hauteur de survol minimale est de 15m (marge 11m).

Le tracé 20, projet du Syndicat, (traversée de la zone d'avalanche de l'Arbaron), n'est pas analysé car on ne connaît pas les limites de la zone rouge

Flèche maximale en milieu de portée entre deux pylônes.



	TRONCON 1						TRONCON 2											
SINGULARITES	G1	P1	P2	Sabot	G2	Axe G2	G2	Sabot	P4		P5		P6		G3			
CARACTERISTIQUES DES TETES DES PYLONES						Aval	Début	Fin	Amont	aval	amont							
Abscisse en plan m	0	500	950	1350	1350	1385	1420	1420	1575	1608	3310	3340	3930	3950	5100			
Inclinaison des pylônes m	0	0	-10	-20	0	0	0	20	-20	-23	-30	-20	12	20	0			
Abscisse Tête Pylône	0	500	940	1330	1350	1385	1420	1440	1555	1585	3280	3320	3942	3970	5100			
Altitude pied pylône	509	737,58	1076,81	1270,02	1270,02	1281	1285,12	1285,12	1309	1307,54	1832,83	1844,89	1858,74	1857,97	1702,7			
Hauteur pylône m	10	22	50	17	24		9	15	48	55	70	60	60	60	20			
Altitude Tête Pylône	519	759,58	1126,81	1287,02	1294,02		1294,12	1300,12	1357	1362,54	1902,83	1904,89	1918,74	1917,97	1722,7			
Long. câble depuis le départ m	0	556,03	1129,44	1551,28	1572,47		1642,47	1663,36	1791,65	1822,16	3620,62	3660,67	4283,56	4311,57	5463,13			
															longueurs totales			
CARACTERISTIQUES ENTRE TETES DE PYLONES															Tronçon 1	Tronçon2	Total	
Variation d'Altitude		240,58	367,23	160,21	7		0,1	6	56,88	5,54	540,29	2,06	13,85	-0,77	-195,27			
Longueur en Plan		500	440	390	20		70	20	115	30	1695	40	622	28	1130	1 350,00	3 750,00	5 100,00
Longueur rectiligne (Corde)		554,87	573,11	421,62	21,19		70,00	20,88	128,30	30,51	1 779,03	40,05	622,15	28,01	1 146,75	1 570,79	3 865,68	5 436,47
Longueur de Câble		556,03	573,41	421,84	21,19		70	20,89	128,29	30,51	1798,46	40,05	622,89	28,01	1151,56	1 572,47	3 890,66	5463,13
Longueur de Câble - Corde		1,16	0,30	0,22	0,00		0,00	0,01	-0,01	0,00	19,43	0,00	0,74	0,00	4,81	1,68	24,98	26,66

Flèche maximale en milieu de portée avec la longueur de câble de 1779,03 m + 19,43 m = 1798,48 m
avec la longueur de câble de 1779,03 m + 26,66 m = 1805,69 m
Tracé 19 hauteur du tracé rectiligne par rapport au sol en milieu de portée tracé 19
Tracé 17 hauteur du tracé rectiligne par rapport au sol en milieu de portée tracé 17

136 m	Marge très significative. Les pylônes pourraient être abaissés. Il y a encore un peu de marge.
160 m	
210 m	
195 m	

Ce tableau se réfère au tracé décrit page 10, et aux données page 8.

9 - Exemples de dimensions de gares 3S

Nous donnons ci-après des Caractéristiques d'implémentation de gares sur 2 projets : Les Prodains / Avoriaz et Eisgrat / Stubaier Gletcher

Remontée / gare	Dimensions de la gare	
Prodains Gare de départ	Inscrite dans une surface de 63 x 40 m. Un sabot dépasse sur 10 m, la longueur de la partie entraînement des cabines est de 30m.	Pente en sortie de gare : environ 30° Hauteur fin de sabot : 10 m
Eisgrat Gare de départ	La largeur est de 20m, pour la gare seule.	Pente en sortie de gare : environ 10°. Hauteur fin de sabot : 10 m
Gare intermédiaire	Inscrite dans un rectangle de 100m x 40m. Un sabot dépasse sur 10m à chaque extrémité. La longueur de la partie entraînement est de 30m environ à chaque extrémité. La part restante, 2 fois 10m a une largeur de bâtiment de 20m.	

Modélisation sur les plans :

Gare simple 3S Total 70m	Bâtiment en dur :50m x largeur 20m	Extension 10 m largeur 15m	Sabot : 15m se terminant à 10m de hauteur par rapport au sol. largeur 10m
1/2 gare double 3S Total 50m	Bâtiment principal 25m x largeur 20 m	Extension 10 m largeur 15 m	Sabot 15m largeur 10m

A Stubaier Gletcher, il y a un bâtiment secondaire à coté de la gare, probablement garage à cabines, de dimensions 70 x 20.

10 - Conclusion

Nous avons passé en revue les critères de dimensionnement possibles pour une ligne 3S appliquée au Funiflaine. Nous n'avons pas tous les éléments que nous souhaiterions, certains sont obtenus de façon indirecte, par exemple les caractéristiques de câbles qui doivent se négocier avec les fournisseurs, mais nous pensons que l'ensemble des choix constitue des critères de dimensionnement crédibles.

Nous avons défini un dimensionnement qui pourrait être appliqué à une réalisation en TC monocâble. Les premières simulations effectuées sont très positives.

Il nous manque encore un peu de recul, et quelques caractéristiques, particulièrement celles des cabines avec lest. Etant donné qu'un projet est en construction à la Flégère, nul doute qu'on aura bientôt d'autres informations.

Les informations diffusées sur des projets en cours semblent montrer un accroissement de performance des câbles, ce qui pourrait augmenter les marges de fonctionnement sur les grandes portées. Nous intégrerons ces valeurs lorsqu'elles seront confirmées.

ANNEXE - Virages en ligne pour les 3S

Nous avons analysé la possibilité de faire un virage sur un pylône.

Notre analyse des efforts était encourageante, il y a au moins une réalisation, mais les fournisseurs sont très réticents, et un d'entre eux nous a donné une explication reproduite ci-après.

Les courbes qui peuvent être réalisées sont faibles. **Cela relève de défauts d'alignement, pour s'écarter de quelques mètres d'un obstacle ou d'un survol de bâtiment.**

Avis d'un fabricant de remontées mécaniques sur les possibilités de virages en ligne.

Les virages en ligne sont un point controversé. Nous n'avons pas les éléments techniques permettant de justifier le bon roulement du chariot dans les virages, mais le vent a exactement le même effet sur le roulement du chariot avec des efforts bien supérieurs, alors que pour le passage des virages on peut optimiser le sabot (clothoïde, dévers).

Nous avons cependant eu un retour négatif indirect de la part des constructeurs. Un d'entre eux a donné une explication.

A chaque passage de cabine sur un pylône, il se produit un glissement des câbles porteurs sur le sabot des pylônes, avec usure.

Pour limiter l'usure des câbles, ceux-ci sont périodiquement décalés d'une longueur du sabot le plus long, pour répartir l'usure. Cette opération est complexe et coûteuse. On ne peut la faire qu'un nombre de fois limité, après quoi il faut remplacer le câble.

Notre interlocuteur nous a indiqué que la réalisation de virage sur un pylône accroît l'usure. C'est d'autant plus marqué que l'installation fonctionne plus longtemps chaque année, donc ce n'est pas indiqué pour les transports publics.

Ainsi, l'installation du Penkenbahn avec son virage de 6,5° ne fonctionne que 1500h / an et est acceptable.

Pour un service public, on ne peut pas aller au-delà de 2° à 4° sans impacter de façon significative les coûts d'entretien.

Photos de pylônes du Penkenbahn (Doppelmayr)



Pylône avec virage de 6°. L'inclinaison latérale éventuelle n'est pas visible, alors que la ligne est comparable aux tronçons du Funiflaine (longueur 3km, dénivelé 1100m, 3 pylônes). La longueur du sabot est de 50m.



Pylône « normal » avec fort changement de pente. Ce pylône est très massif.