



Proposition de tracé alternatif du Funiflaine

Dimensionnement du Funiflaine Magland–Les Carroz–Flaine

Résidence Pollux Appt 407
Flaine Forêt
74300 Arâches la Frasse
associationflainoise.fr
info@associationflainoise.fr

Le but de cette analyse est de déterminer les éléments principaux du tracé proposé : dimensions, nombre de cabines, masses, efforts sur les câbles et les pylônes, flèche des câbles, possibilités de virages sur des pylônes qu'on cherche à approfondir (il y a un exemple sur le 3S Penkenbahn de Tux/Mayrhofner).

L'exemple présenté est un tronçon Les Carroz – Flaine avec arrivée sur le parking P1, le plus long, mais les autres tracés sont comparables.

Table des matières

- 1 – Hypothèses de tracé
- 2 - Caractéristiques de la remontée mécanique
- 3 – Capacité de transport
- 4 - Simulation par éléments finis
- 5 - Résultats (tracé n°6)
- 6 - Dimensionnement des pylônes

Dossier soutenu par l'Association Flainoise, les Amoureux des Carroz, et l'Association des Résidents des Carroz et de La Frasse (ARECAL)

1-Hypothèses de tracé

Ce tracé est divisé en deux segments :

- le premier, entre Magland et Les Carroz(Les Feux). Dénivelé 771 m
- le second, entre Les Carroz (Les Feux) et Flaine. Dénivelé 425m

Ces deux segments sont supposés raccordés par un petit tronçon horizontal.

	Tronçon 1 Magland-Carroz	Tronçon 2 Carroz-Flaine	Partie montante jusqu'à l'Arbaron tronçon 2	TOTAL
Longueur en plan	1320 à 1350m selon tracé	3690 à 3960m selon tracé	2500 m	5000 à 5300 m
Altitude Départ (au sol)	510 (Riand) à 520m (Anthoine)	1278 m	1278 m	
Altitude Arrivée (au sol)	1278 m	1703 m (Parking P3) 1570 m (Parking P1)	1800 à 1850m	
Dénivelé (au sol)	771 m	292 à 425 m	425 m	1063 à 1196 m
Pente Moyenne	58 %	10,8 %	17 %	
Longueur développée	1610 m (tracé 1) 1487 (tracé 5)	3800 à 4070 m		5300 à 5700 m

Un plan a été tracé sur un fond de plan du cadastre, et le relief utilisé dans cette pré étude a été trouvé dans Google Earth et le Géoportail IGN.

2 - Caractéristiques de la remontée mécanique

Cabines

Cabines de 35 personnes (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). Masse unitaire totale max : 6 050 kg

32 cabines en première phase, et dimensionnement de l'infrastructure pour 45 cabines afin de pouvoir accroître la capacité à 3000 passagers/h.

Masse totale max de 45 cabines en charge : 272,25 tonnes.

Cette charge maximale est probablement pessimiste : On suppose que la capacité journalière est étalée sur une heure, et que c'est en même temps à la montée et à la descente. On pourrait probablement réduire cette capacité, mais sans incidence majeure sur le dimensionnement de la ligne.

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 mécaniques, 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 plus petite que celle du Funiflaine).

	Masse kg/m pour 1 câble.	Longueur totale environ	Masse totale en kdaN (tonnes)	Résistance à la rupture	Effort statique maximal pour 1 câble sans prise en compte des phénomènes vibratoires et dynamiques.
Câble porteur 57 mm	20 kg	23,2 km pour 4 câbles	460 kdaN	350 k daN (forum des remontées Mécaniques pour le 3S des Prodains)	111 k daN (coefficient 3,15)
Câble tracteur 55 mm	18 kg	11,6 km pour 2 câbles	225 kdaN	220 k daN. Valeur extrapolée du chiffre des Prodains pour un câble de 45 mm	48 k daN (coefficient 4,5)

3 - Capacité de transport

Examinons les choix de capacité de transport.
Pour une longueur aller-retour de environ 12 km.

Vitesse des cabines	Temps de rotation sur 12 km avec 1 minute de traversée de chaque gare (soit 240s)	Nombre de passages de cabines/h	Intervalle entre cabines	Capacité de transport horaire
7,5 m/s	$12000/7,5+240=1840$ s soit 31 minutes	$45 \times 3600 / 1840 = 88$	41 secondes	$88 \times 35 = 3080$ personnes/h
8 m/s	$12000/8+240=1740$ s ou 29 minutes	$45 \times 3600 / 1740 = 93$	38 secondes	$93 \times 35 = 3255$ personnes/h
8;5 m/s	$12000/8,5+240=1652$ s ou 27 minutes30s	$45 \times 3600 / 1652 = 98$	37 secondes	$98 \times 35 = 3430$ personnes/h

Ce débit de cabines est assez important, il faudra vider et remplir une cabines de 35 personnes toutes les 37 ou 45 secondes secondes, ce qui n'est pas évident. Il faut plusieurs cabines en même temps dans les gares.

La capacité de transport annoncée dans la brochure de la SAEM en 2015 était de 2000 passagers/h pour 45 cabines, mais pouvant être étendue à 3000 passagers/h ce qui aurait nécessité de passer à 60 cabines. La différence vient de la longueur, elle était de 8 km pour 5,5 km aujourd'hui, Pour conserver le même débit, on considère 32 cabines initialement, puis 45 à terme donc pour le dimensionnement de l'infrastructure.

4 - Simulation par éléments finis

Notons d'abord que les profils des câbles porteurs et tracteurs sont très proches, ils sont mis au même niveau :

- à chaque pylône
- à chaque benne
- à chaque cavalier de ligne, présent toutes les quelques centaines de mètres (ce n'est pas leur seul rôle, ils évitent aussi que les câbles puissent se frotter ou même s'emmêler. Il réduisent aussi le balancement des câbles.

La ligne est divisée, au plan des efforts, en segments 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, et des cabines.

- le poids des cabines et des cavaliers, et aux cavaliers un échange d'efforts verticaux entre câbles porteurs et tracteurs 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 en soi 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 5,8 km :

- 2 câbles porteurs : 40 kg/m

- 1 câble tracteur : 18 kg/m

- 45 cabines soit 272 tonnes sur 2x5,8 km de câbles, soit 25 kg/m. Une cabine tous les 250m en montée et en descente.

- 5 cavaliers de masse totale estimée 5 tonnes, soit 0,5 kg/m

Le total est de 83,5 kg/m, arrondis à 85 kg/m.

L'approche est purement statique. Le STRMTG définit les marges de sécurité dans ce cas : 3,15 pour les câbles porteurs, et 4,5 pour le câble tracteur.

La tension sur le câble tracteur pour la fonction traction est évaluée ci-après.

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, en montée ou en descente (cela ne s'ajoute pas).	Tension du câble tracteur au point haut
Tronçon 1. L = 1758m Pente 43 %	En moyenne $1755/250 = 7$ cabines	$7 \times 6000 \times 42\% = 18$ kdaN
Tronçon 2. L=3850 Dénivelé 420m Développé : 3984 pente 11 % En montée entre P5 et P8 L = 2680m Dénivelé 420m Pente 15 % Développé 2788m	En moyenne $2800/250 = 12$ cabines	$12 \times 6000 \times 15\% = 10,8$ kdaN.

La charge minimale est compatible avec la capacité de 48 kdaN des câbles tracteurs, et on ajustera la tension maximale de ces câbles à 48 kdaN 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 268 kdaN pour les deux câbles porteurs des tronçons 1 et 262 kdaN.

Le pas de calcul sur les câbles est de 10m.

Résultats

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 optimale du pylône (ainsi que la longueur du sabot pour assurer le confort des passagers, mais nous ne le faisons pas).

Cela permet aussi d'évaluer les efforts transversaux si on fait une courbe sur un pylône, dus à la tension sur les câbles et d'évaluer ce que cela implique.

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

- sur le tronçon aval 215 kdaN en aval et 100 kdaN en amont.

- Sur le tronçon amont 239 kdaN en aval et 267 kdaN au point haut (Arbaron).

5- Résultats

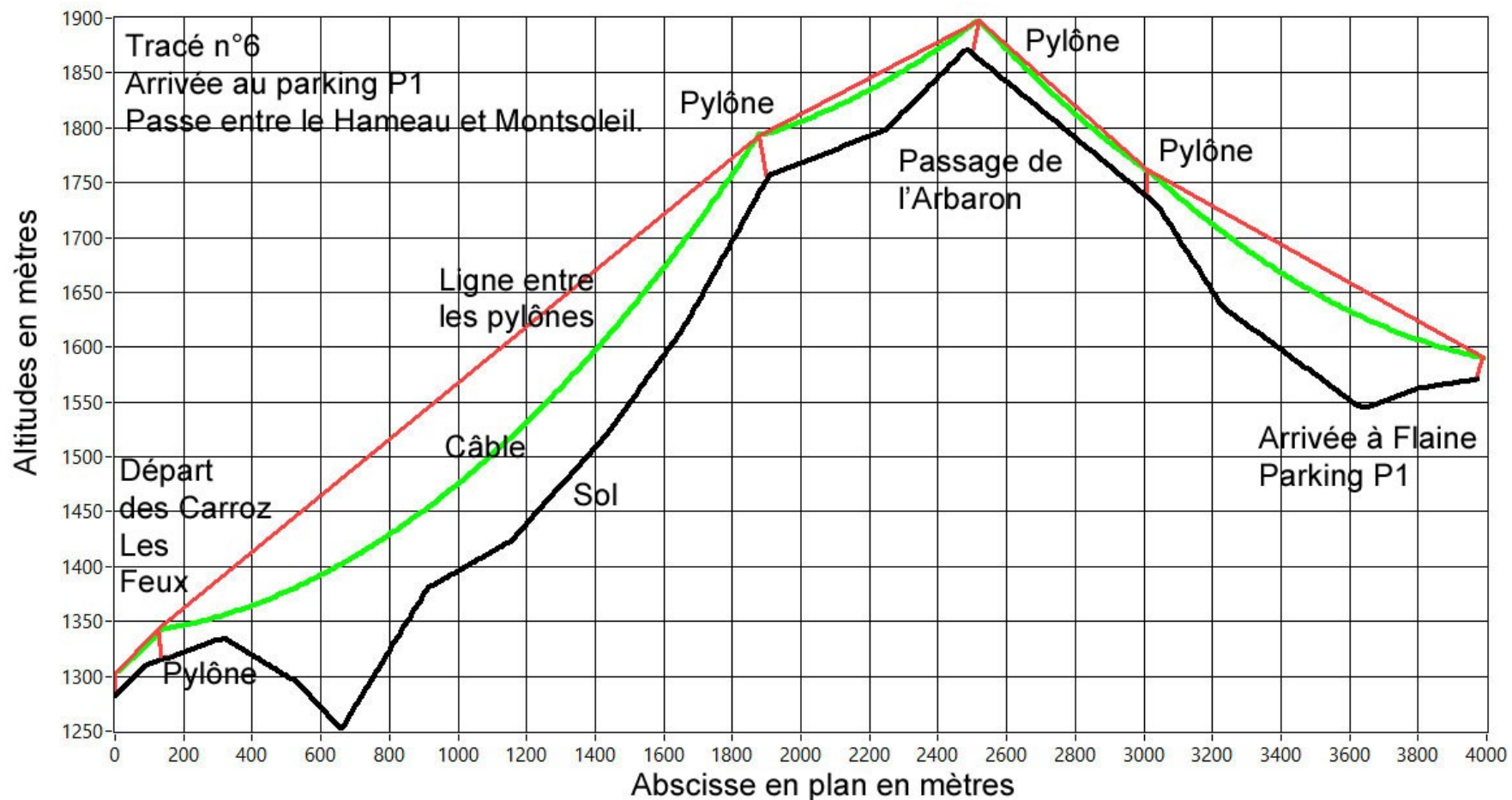
Singularité:	Gare	Pylône 1		Pylône 2		Pylône 3		Pylône 4		Flaine
		10m avant	Amont	10m avant	Amont	10m avant	Amont	10m avant	Amont	
1-Abscisse m	0	110	120	1810	1880	2510	2520	3000	3010	3980
2-Altitude du câble	1302	1334	1342	1790	1793	1896	1898	1763	1762	1591
3-Pente câble radians	0,27	0,293	0,053	0,44	0,100	0,228	-0,320	-0,222	-0,275	-0,037
4-Longueur du câble	0	114	125	1943	1954	2593	2603	3102	3112	4099
5-Tension câble kdaN	215,0	216,4	216,6	239,06	239,3	244,4	244,6	238,0	237,9	229,5
6-Composante Verticale de la tension des câbles kdaN	57,4	63,07	11,5	102,38	23,9	55,8	76,9	51,99	64,6	15,26
7-Composante Horizontale de la tension des câbles kdaN	207,2	207,21	216,3	216,3	238,1	238,1	232,1	232,1	229,0	228,96
8-Somme des composantes verticales des tensions sur le câble de part et d'autre de chaque pylône kdaN		64,6		126		132,7		116,6		
9- Différence des composantes horizontales des tensions sur le câble de part et d'autre de chaque pylône kdaN		9,09		21,8		-6		-3,1		

Un 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
- 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 (aller et retour).

Tracé n°6 - Profil



6 - Dimensionnement des pylônes

La différence des composantes verticales de la force de tension des câbles de part et d'autre de chaque pylône donne la force verticale sur le pylône. La différence des composantes horizontales de part et d'autre de chaque pylône donne la force horizontale sur le pylône, qui peut être compensée en l'inclinant. On voit sur les résultats de la simulation que les pylônes sont bien chargés.

Le pylône 3 est le plus chargé, avec un appui vertical de 132,7 kdaN (tonnes). L'effort horizontal de 21,8 kdaN sur le pylône 2 peut être compensé par une inclinaison longitudinale de 10° environ

Evaluation de l'impact d'un virage sur les pylônes de l'Arbaron, avec le même profil en long.

On ne considère ici que les configurations symétriques, et les calculs sont effectués sur une seule moitié.

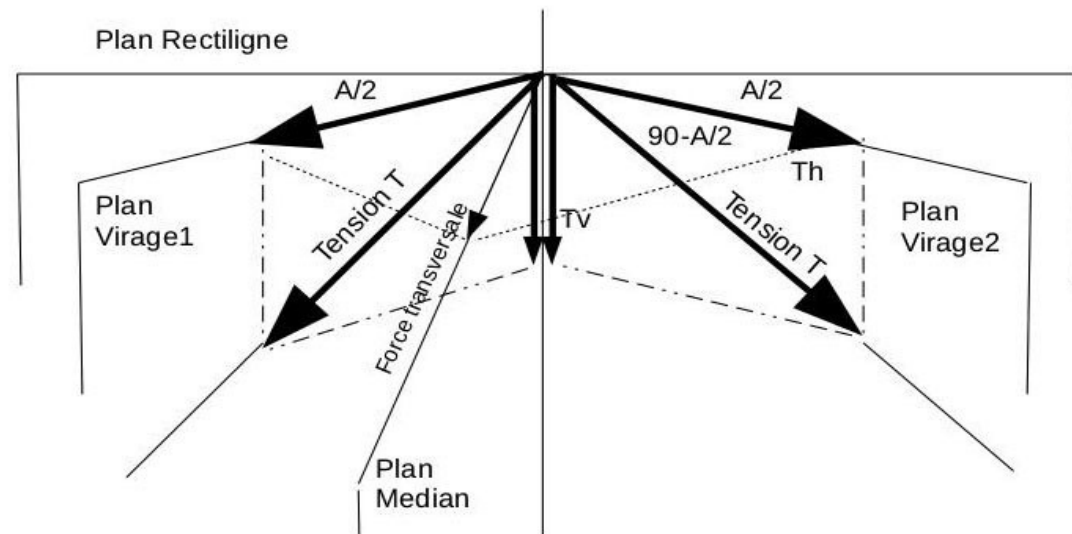
Les deux câbles induisent des tensions T qui sont en partie compensées par le pylône. En situation rectiligne, les tensions des deux câbles sont sur un même plan Rectiligne.

Les simulations fournissent la valeur des projections Horizontale Th et Verticale Tv de la tension T .

Avec un virage d'un angle A , la différence est que les tensions des câbles se trouvent dans des plans verticaux différents Virage1 et Virage2.

Nous définissons un plan médian M du virage, à un angle $90 - A/2$ du plan rectiligne.

Pour connaître l'impact sur le pylône, les tensions Th doivent alors être projetées sur le plan Médian. L'angle est égal à $90 - A/2$, et la valeur est donc égale à $Th \times \sin(A/2)$, ceci de chaque côté.



Composition des forces sur un pilône avec un virage.

Si les tensions T_h des deux cotés ne sont pas égales, le plan Médian n'est pas vertical, mais nous allons rester dans l'hypothèse de la symétrie. La valeur totale de la composante médiane de T_h est égale à .2 fois $T_h \times \sin(A/2)$.

Il est intéressant et représentatif de déterminer l'inclinaison nécessaire du pylône pour être équilibré.

L'angle I (inclinaison transversale du pylône) est tel que $\tan(I) =$ rapport de la composante des forces horizontales et verticales dans le plan médian.

Application. $T_h = 230 \text{ kdaN}$ $T_v = 70 \text{ kdaN}$, valeurs proches des conditions du pylône de l'Arbaron.

Angle	T_h	T_{hM}	T_v	T_{hM}/T_v	Inclinaison transversale I du pylône pour compenser l'effort transversal
6,5°	230 kdaN	23 kdaN	70 kdaN	0,37	20,46°
11°	230 kdaN	44 kdaN	70 kdaN	0,63	32,17°
19	230 kdaN	75 kdaN	70 kdaN	1,07	47°
20	230 kdaN	79 kdaN	70 kdaN	1,13	48,4°

On voit qu'au-delà de 6 à 10°, il va y avoir une influence sur le dimensionnement mécanique du pylône, particulièrement si le pylône est haut..

Cependant, la compensation des efforts transversaux n'est pas indispensable si la structure du pylône est dimensionnée pour cela.

Sur l'exemple du Penkenbahn, l'inclinaison latérale n'est pas visible, alors que la ligne est comparable aux tronçons du Funiflaine (longueur 3km, dénivelé 1100m, 3 pylônes).

Il est probable que l'ensemble du pylône ne serait pas incliné, il y aurait des appuis latéraux.

Le sabot ne devrait pas être plus long que pour les pylônes en ligne droite, mais il est beaucoup plus compliqué à calculer. En effet, il y aurait certainement pour des raisons de confort un introduction progressive de la courbure (clothoïde), du dévers introduit lui aussi progressivement. C'est similaire au tracé des rails dans les virages ferroviaires, on fait cela depuis 100 ans, on en parle toujours, et il y a des spécialistes.

Sur un tracé à plusieurs points hauts, l'effort vertical est réparti, et on peut aussi répartir la courbure du virage entre les deux pylônes (si c'est compatible avec le tracé).

Association Flainoise

Photos de pylônes du Penkenbahn
Pylône avec virage

Dimensionnement du Funiflaine Magland–Les Carroz–Flaine - v2



Pylône normal avec fort changement de pente

Ces éléments montrent qu'il ne faut faire une montagne des problèmes de virages. C'est un problème à analyser avec attention, comme bien d'autres. Tous les fournisseurs doivent savoir faire, mais bien sûr ils préfèrent vendre une gare intermédiaire de quelques M€ plutôt qu'un pylône.

