

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

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

Table des matières

1 - Hypothèses de tracé 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.....	10
7 - Exemples de dimensions de gares 3S.....	11
8 - Conclusion.....	12
ANNEXE - Virages en ligne pour les 3S.....	12

1 - Hypothèses de tracé pour cette analyse

Le tracé est divisé en deux tronçons:

- le premier, entre Magland et Les Carroz (Les Feux). Dénivelé 770 m
- le second, entre Les Carroz (Les Feux) et Flaine parking P3. Dénivelé 290 m, avec un point haut vers 1900 m

Ces deux tronçons sont raccordés à l'intérieur de la gare des Carroz.

Nous avons analysé 3 tracés alternatifs Magland-Les Carroz-Flaine, et le tableau ci-dessous permet de comparer au tracé actuel.

	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 actuel (pour ce que nous en savons)
Longueur en plan	5100m	1460 m		2410 m	5270 m
Altitude Départ (au sol)	510 m	510 m	1280 m	1280 m	510 m
Altitude Arrivée (au sol)	1703 m (point haut 1900 m)	1280 m	1703 m	Point haut 1915 m	1570 m
Dénivelé	1193 m	770 m	290 m	635 m	1060 m
Longueur développée	5435 m	1687 m		2500m	5620 m
Pente moyenne		53 %		26 %	

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

Les calculs liés à la tension des câbles sont différents pour les deux tronçons. La tension des câbles est ajustée séparément, le nombre de cabines et la pente ne sont pas les mêmes.

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 pour 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 1 tonne. On prend un espacement de 250 m comme sur le 3S de kitzbühel (2004, c.f. Forum des Remontées Mécaniques).

CAS DU MONOCÂBLE

Ultérieurement.

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 -

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 57 du guide) :

Cas du monocâble : marge de 4,00.

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

La 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.

Non réalisé.

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 5		Pylône 5		Pylône 6		Gare 3
	G1	P1	P2	S Sabot aval	Extrémités de la construction		S Sabot amont	P4		P5		P6		G3
Abcisse m	0	500	940	1330	1350	1410	1430	1555	1585	3280	3320	3942	3970	5100
Altitude câble m	519	760	1127	1287	1294	1295	1300	1357	1364	1903	1905	1919	1918	1723
Pente câble <i>radians</i>	0,370	0,633	0,335	0,330	0,000	0,240	0,410	0,200	0,030	0,000	-0,049	0,000	-0,335	0,000
Longueur m	0	557	1133	1554	1576	1636	1656	1794	1824	3623	3663	4286	4314	5467
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 :

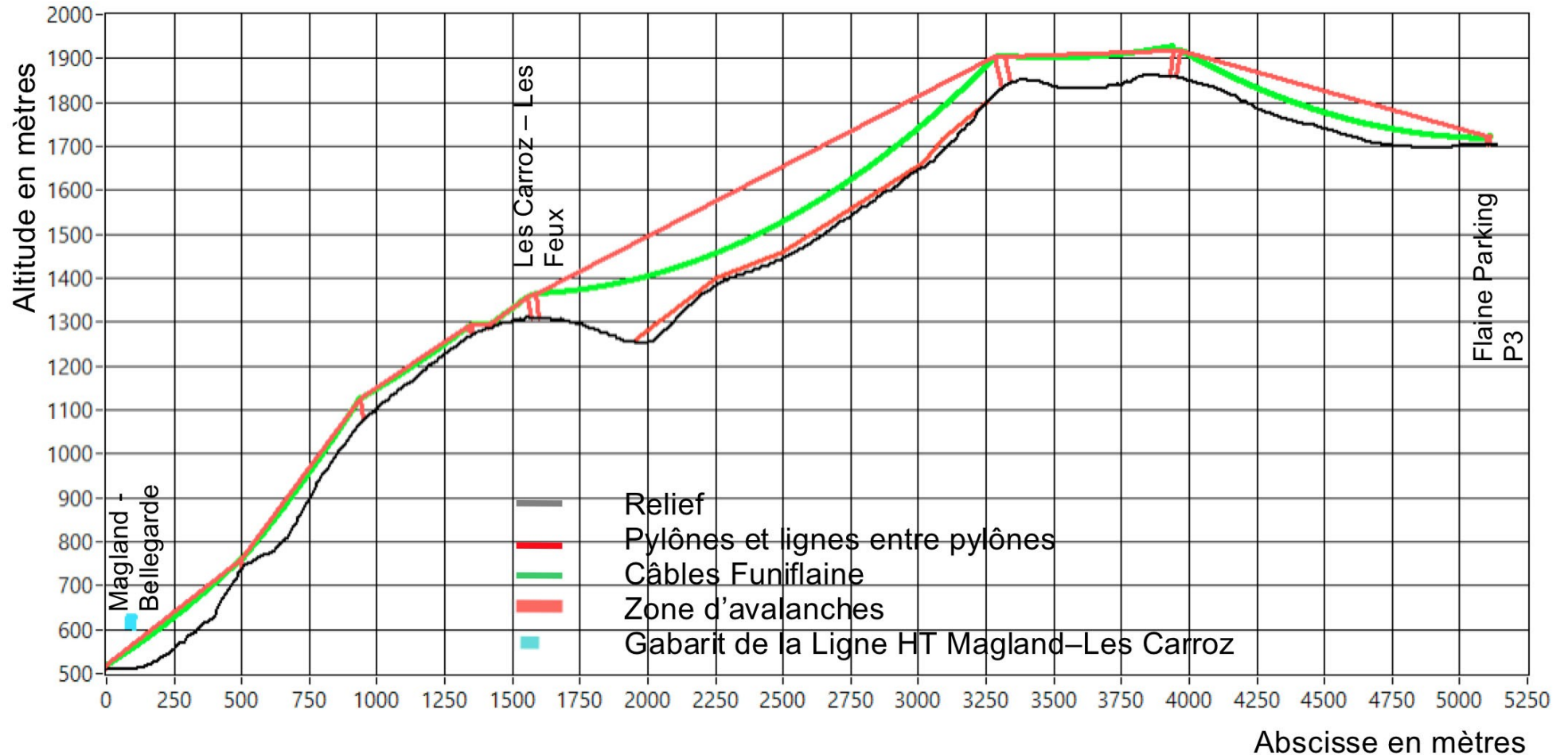
- noir: le relief du sol
- rouge : pylônes, et trait droit entre les sommets des pylônes Funiflaine ou HT
- vert : position du câble en charge maximale.
- bleu : proximité avec des lignes HT

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.

8-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 - 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	Bâtiment 50m x largeur 20m	Extension 10 m largeur 15m	Sabot : 15m se terminant à 10m de hauteur par rapport au sol. largeur 10m
Demi gare double 33	Bâtiment principal 25m x largeur 20 m Bâtiment secondaire, probablement garage à cabines, de dimensions équivalentes au bâtiment principal.	Extension 10 m largeur 15 m	Sabot 15m largeur 10m

8 - 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 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.

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.