

# Remontées mécaniques : présentation, technologie et construction

Culture Sciences  
de l'Ingénieur

Raphaël PELENC - Clément DESODT  
Hélène HORSIN MOLINARO

Édité le  
06/03/2023

école  
normale  
supérieure  
paris-saclay

Élève de l'ENS Paris-Saclay, Raphaël Pelenc, lors de sa première année en Sciences pour l'Ingénieur (année SAPHIRE) a suivi le parcours « Ingénierie civile ». Dans ce cadre les élèves ont, sur un thème imposé, à réaliser un état de l'art, un mémoire et à présenter une courte leçon. Cette ressource est issue de ce dossier.

Les remontées mécaniques les plus connues sont celles utilisées aux sports d'hivers pour monter les pratiquants en haut des pistes. C'est en effet grâce à cet usage que les remontées mécaniques se sont développées passant de la simple corde tractant les skieurs au téléphérique 3S débrayable tout confort, perché à des dizaines de mètres et fonctionnant par des vents de plus de 120 km/h.



Figure 1 : Le Jandri Express des Deux Alpes, double monocâble à attaches débrayables qui, en deux tronçons, permet de relier la station, 1800 m d'altitude, au pied du glacier situé à 3200 m, source [23]

Cependant l'usage des remontées mécaniques existait bien avant les premiers skieurs. Par exemple une première version du funiculaire à câble (cabine tractée par un câble, roulant sur le sol ou des rails) était en fonctionnement en Autriche dès 1515 connu sous le nom du *funiculaire du Reisszug*. Il était tracté par des hommes ou par des animaux, et desservait la forteresse d'Hohensalzburg à Salzbourg.

Après un bref historique et une présentation des différents types de remontées mécaniques du funiculaire au téléski, cette ressource s'intéresse aux téléportés en exposant les différentes étapes et points clés de leur construction. La ressource « Téléportés Urbains : des remontées mécaniques en ville - L'exemple du téléphérique de Toulouse » [21] développe les utilisations des téléportés en ville en se penchant en particulier sur le téléphérique 3S de Toulouse, mis en service en 2022.

## 1 – Petit historique

C'est au XIX<sup>e</sup> siècle avec l'avènement du chemin de fer que se sont réellement développés les funiculaires tels que nous les connaissons aujourd'hui, c'est-à-dire ceux tractés par un moteur et roulants sur des rails. On retient notamment le premier funiculaire fait pour le transport de passagers mis en service en 1825 en Angleterre sur la ligne de chemin de fer Stockton - Darlington.

Datées du XIV<sup>e</sup> siècle, de premières traces de téléportés (transports par câble aérien) sont rapportées au Japon dans l'histoire, relatée par la gravure Taiheiki<sup>1</sup>, du siège d'une forteresse dont l'empereur se serait échappé au moyen d'un téléporté. Nombre de textes et de gravures datant du Moyen-Âge mentionnent des transports de marchandises, hommes ou bêtes à l'aide de telles machines sur de courtes distances (comme des franchissements de fleuves). Au milieu du XVII<sup>e</sup> siècle à Gdańsk en Pologne, un téléporté plus élaboré est mis au point par Adam Wybe<sup>2</sup>. Ce système de plusieurs centaines de mètres, destiné au transport de matériaux, nécessitait plusieurs poteaux en bois équipés de doubles poulies permettant le passage de l'unique câble en chanvre (figures 2 et 3) [1]. Ce téléporté est resté le plus grand construit jusqu'à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle.



Figure 2 : Premier téléporté longue distance par Adam Wyde, Gdańsk, Pologne (1644), source [1]

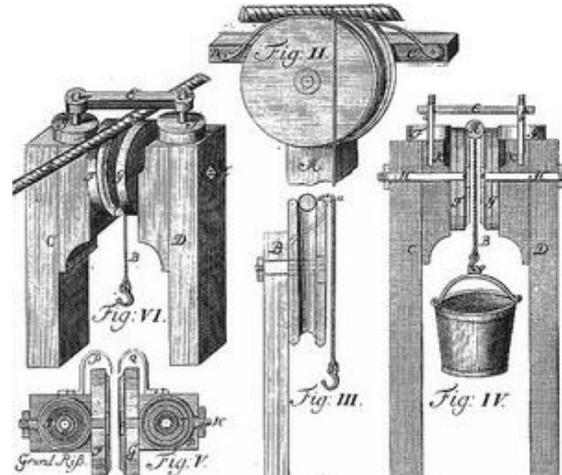


Figure 3 : Principe des supports intermédiaires pour les téléportés par Adam Wyde (1644), source [1]

Au XIX<sup>e</sup>, la révolution industrielle avec le développement du câble en acier permet un réel essor des téléportés. En particulier au Royaume-Uni, le transport par câble de matériaux s'est développé dès les années 1860. En 1869, le britannique Charles Hodgson construit le premier transporteur monocâble à Richmond près de Londres sur le brevet, déposé en 1856, de son compatriote Henry Robinson. Le premier téléphérique bi-câble, employant donc deux câbles un tracteur et l'autre porteur, est inventé par Fritz Franz von Dücker<sup>3</sup> à Bad Oeynhausen en Allemagne en 1861. Les téléportés pour le transport de matériaux industriels se sont ensuite développés en Europe, notamment pour le transport de minerai dans les mines de calcaire ou de charbon. En France par exemple, le premier téléphérique bi-câble à va-et-vient fût installé en 1874 sur le mont Jalla près de Grenoble pour le transport de matériaux de cimenterie de la Porte-de-France (figure 4) [1].

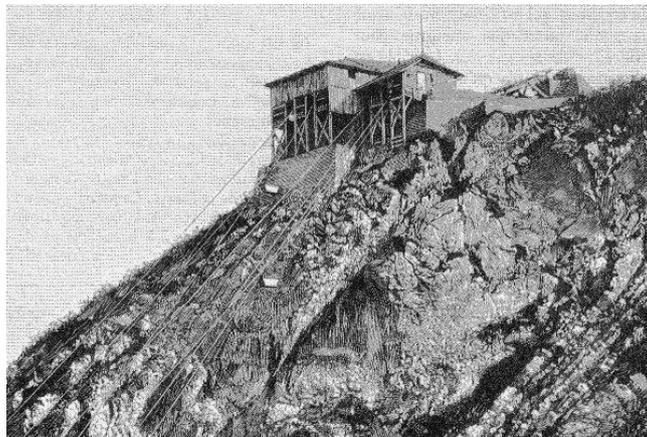


Figure 4 : Premier téléphérique français au mont Jalla près de Grenoble (1874), source [1]

<sup>1</sup> Grand récit composé de 40 rouleaux et relatant cinquante années de guerre au XIV<sup>e</sup> siècle au Japon

<sup>2</sup> Adam Wybe (1584-1653), Ingénieur et inventeur hollandais

<sup>3</sup> Fritz Franz von Dücker (1827-1892), conseiller des mines et membre du Reichstag allemand

Le transport de passagers s'est développé à la toute fin du XIX<sup>e</sup> siècle. Les premiers téléphériques pour passager sont en fait des adaptations de téléportés prévus pour un usage industriel. Les premiers téléphériques dédiés au transport de passagers, c'est-à-dire comportant les organes de sécurités nécessaires, sont des transbordeurs. Construits initialement aux États-Unis puis développés en Europe, les transbordeurs sont des téléphériques sans dénivelé, ils servaient par exemple au passage d'une vallée à une autre comme le transbordeur du Devil's Dyke, près de Brighton en Angleterre construit en 1894 (figure 5). Le premier téléphérique pour passagers servant à gravir les montagnes est connu pour être celui de Wilhelm Feldmann construit en 1903 sur les pentes du Wetterhorn en Suisse. Ce téléphérique, appelé « ascenseur de montagnes », est une prouesse technique pour l'époque, il atteint un sommet à 1617 mètres et gravit une pente moyenne de 116% soit 50° (figure 6).

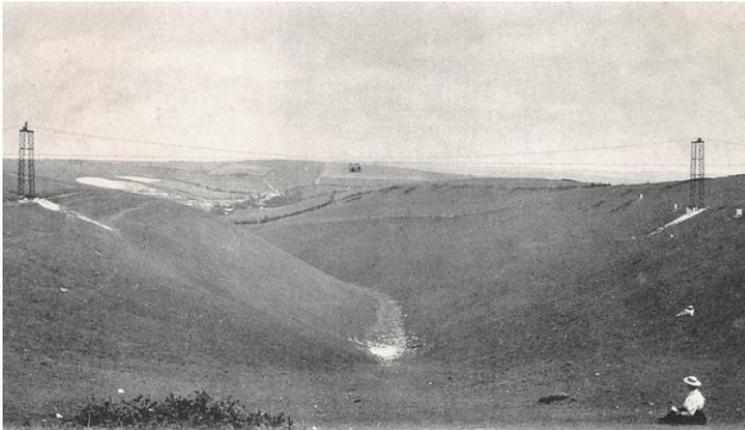


Figure 5 : Transbordeur du Devil's Dyke, Brighton, Angleterre (1894), source [1]



Figure 6 : « Ascenseur des montagnes » par Wilhelm Feldmann, Suisse (1903) source [1]

Le télésiège et la télécabine sont apparus avec l'essor du ski alpin au XX<sup>e</sup> siècle. Ces deux téléportés ont été popularisés à partir des années 1930-1940 initialement aux États-Unis pour le télésiège et dans les Alpes pour la télécabine. La technologie débrayable a grandement participé à son développement, permettant un débit de passagers bien plus important que les téléphériques alors utilisés à l'époque. Voici quelques exemples des premiers télésièges et télécabines utilisés pour le ski alpin :



Figure 7 : Un des premiers télésièges à Alta, USA (1939), source [1]



Figure 8 : Un des premiers télésièges à Timberline Lodge, USA, (1939), source [1]



Figure 9 : Télécabine de la Cote 2000, premier télécabine français, Villard-de-Lans, Isère (1951), source [1]

De nombreux types de remontées mécaniques existent, présentant des caractéristiques adaptées aux critères de relief, de longueur, de conditions climatiques de fonctionnement mais également de critère de débit de passagers, de coût, etc. Dans les sections suivantes, seront présentées les différentes remontées mécaniques avec quelques exemples et conditions d'exploitation.

## 2 – Les remontées mécaniques avec contact au sol

### 2.1 - Funiculaire

Le funiculaire est une remontée mécanique constituée d'une cabine se déplaçant le plus souvent sur des rails du type chemin de fer. Cette cabine est soit tractée par un câble en acier (figure 10) soit mue par un système type pignon crémaillère (figure 11), la crémaillère étant fixée au sol et le pignon monté sur la cabine.



Figure 10 : Funiculaire à câble de Montmartre, Paris, source [2]

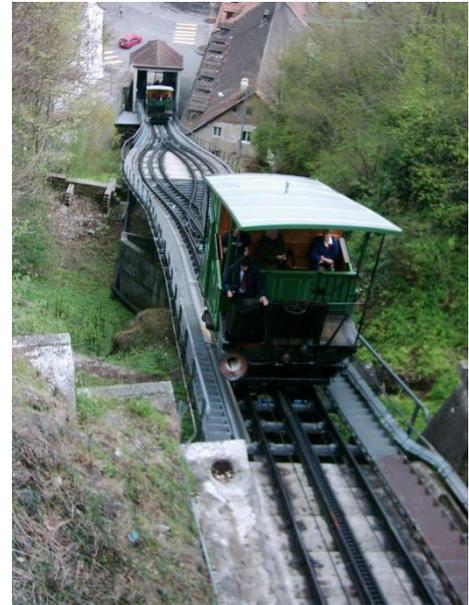


Figure 11 : Funiculaire à crémaillère, Fribourg, source [3]

### 2.2 - Télési

Le télési est la remontée mécanique la plus simple à mettre en œuvre et la moins onéreuse. Souvent débrayables, les télésis permettent de remonter les skieurs sur une distance courte avec un dénivelé peu important. Deux types de perches sont couramment utilisées : les perches simples constituées d'une barre métallique et d'une assise fixée à son extrémité (figure 12), et les perches doubles, dites « pioches » par leur forme, permettant le transport de deux skieurs simultanément (figure 13).



Figure 12 : Télési débrayable avec des perches simples, source [4]



Figure 13 : Télési non débrayable avec des pioches, source [5]

### 3 – Les remontées mécaniques téléportées

Les deux remontées mécaniques de la section précédente, funiculaire et télési, ont la caractéristique de maintenir un contact avec le sol, avec la cabine dans le premier cas, ou le skieur dans le second. L'utilisation de ces remontées mécaniques est par conséquent grandement limitée par le relief. Les remontées mécaniques téléportées permettent de s'affranchir de reliefs aux dénivelés nettement plus importants. Elles sont composées de cabines ou de sièges suspendus à quelques mètres voire quelques dizaines de mètres du sol.

#### 3.1 - Point de vocabulaire propre aux téléportés

Tous les téléportés comportent des *sièges* ou des *cabines* pour les usagers. Ces sièges ou cabines sont suspendus à un ou plusieurs câbles par l'intermédiaire d'une *suspente*. Les câbles peuvent avoir deux rôles : ils sont *porteurs*, c'est-à-dire qu'ils assurent le maintien de la cabine ou du siège à bonne distance du sol, ils sont *tracteurs*, c'est-à-dire qu'ils assurent le mouvement de la cabine ou des sièges entre les gares de départ et d'arrivée. Les câbles peuvent avoir le double rôle porteurs et tracteurs. Lorsque la remontée mécanique présente des câbles porteurs et tracteurs (rôles distincts), le ou les câbles porteurs sont fixes et tendus entre les gares de départ et d'arrivée, le ou les câbles tracteurs sont fixés à un *chariot* nécessaire entre la suspente et les câbles, afin que cabines ou sièges roulent sur les câbles porteurs.

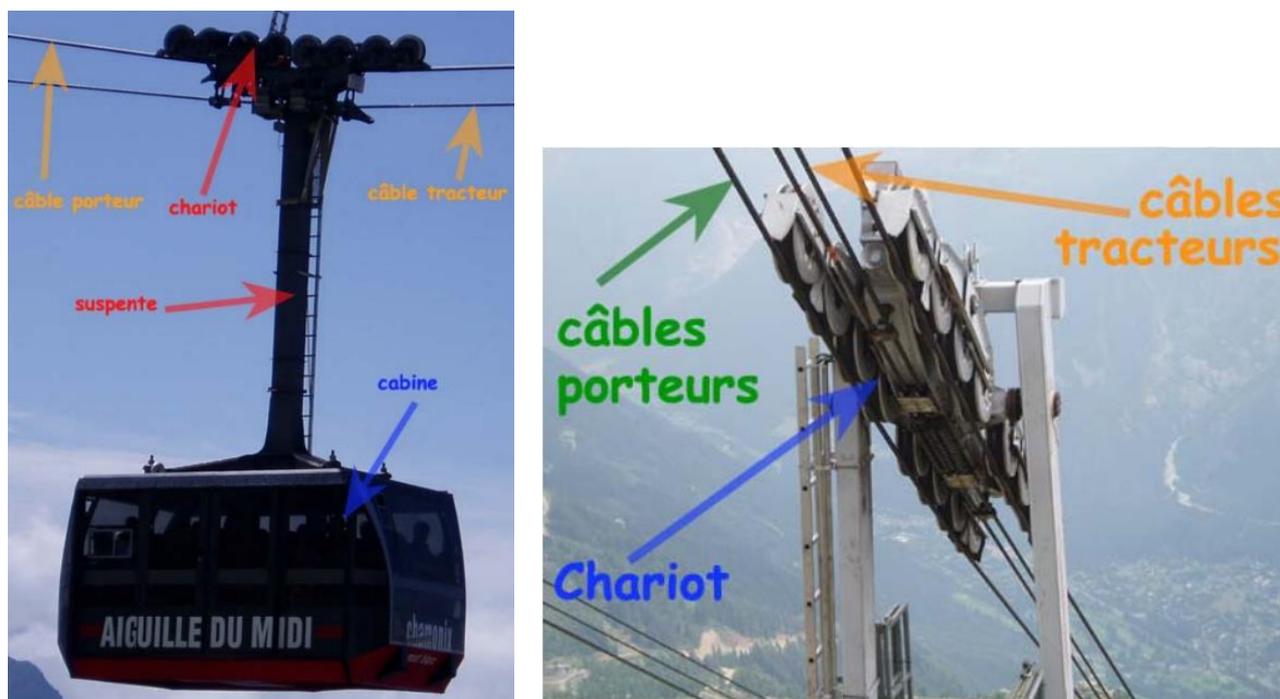


Figure 14 : Les éléments d'un téléporté téléphérique de l'aiguille du Midi (à gauche) et téléphérique du Brévent (à droite), Chamonix, source [1]

#### 3.2 - Remontées mécaniques débrayables ou non

Les remontées débrayables se différencient des autres remontées par le fait que lors du passage en gare du module (perche, siège ou cabine, la section 4 les détaille) celui-ci n'est plus solidaire du câble et est entraîné par un système annexe. Ces remontées sont donc équipées de pinces débrayables permettant de maintenir solidement ou bien de relâcher le lien entre le câble et le module. Ce système permet au câble tracteur de circuler plus rapidement et donc d'augmenter le débit de passager tout en conservant une vitesse raisonnable des modules en gare afin de faciliter l'embarquement.

Par exemple les télésièges à pinces fixes circulent habituellement à une vitesse de 2 m/s ce qui permet un débit d'environ 2400 personnes par heure pour un télésiège à 4 places ; les télésièges débrayables circulent à une vitesse de 5 m/s (vitesse réglementairement limitée à 6 m/s mais souvent plus basse pour des raisons de confort des usagers) ce qui permet pour un télésiège 4 places un débit de plus de 4000 personnes par heure.

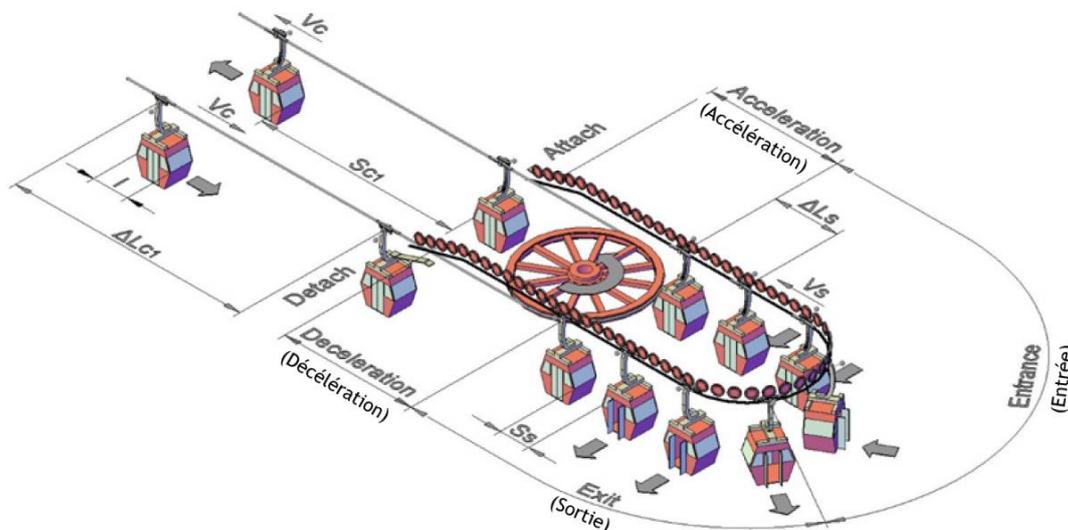


Figure 15 : Schéma des phases de décélération, sortie puis entrée des passagers et accélération en gare pour un système débrayable, source [24]

### 3.2.1 - Les pinces débrayables, différentes technologies

Il existe deux types majeurs de pinces débrayables. Le premier est la pince à ressort de compression, c'est la pince la plus courante que l'on retrouve sur une grande majorité des remontées mécaniques débrayables. La seconde est la pince à barre de torsion, non homologuée en France elle est utilisée notamment en Autriche, aux États-Unis et au Canada.

#### Pince à ressort en compression

Ce type de pince a été mis au point dans les années 1980 par Leitner (figure 16). Elle est encore utilisée de nos jours sous la même forme et le concept a été repris par les autres fabricants (Poma, Doppelmayr, Garaventa).



Figure 16 : Pince à ressort en compression Leitner, source [1]

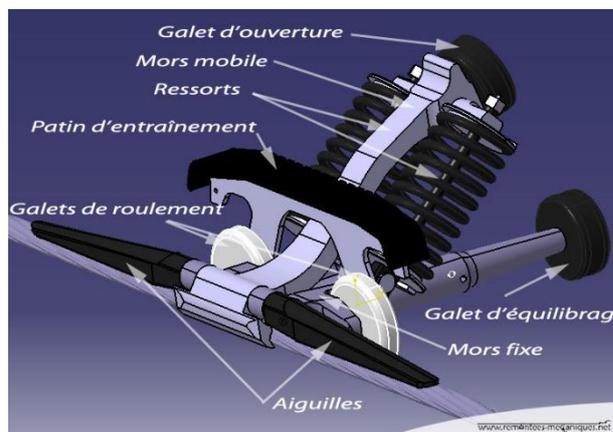


Figure 17 : Les différents éléments de la pince à ressort en compression, source [1]

Lors du trajet, la pince (sur la gauche des figures 16 et 17) est maintenue fermée sur le câble par les ressorts installés entre les deux mors de la pince. Lors de l'arrivée en gare, un rail métallique

appuie sur le galet d'ouverture (en haut figure 17 et le galet blanc en haut figure 16) ouvrant les mors de la pince et libérant ainsi le pincement du câble. Après débrayage, la pince reposant sur les rails de guidage est entraînée par un circuit de pneus via le patin d'entraînement. Les aiguilles fixées sur le mors mobile permettent de faciliter le passage de la pince au niveau des pylônes

Les constantes de raideurs des ressorts à compression doivent être très importantes afin de serrer convenablement le câble. Pour une pince débrayable classique il faut appliquer une force de 5 kN. À noter que la législation française impose que les ressorts de compression soient relâchés une fois que le câble n'est plus entre les mors et que la pince est débrayée, ceci n'est pas le cas dans les autres pays.

### Pince à barre de torsion

Le fonctionnement de la pince à barre de torsion est assez similaire mais c'est une tige en torsion qui assure le maintien en position fermée du mors et du levier.

Afin de limiter les cycles de fermeture et d'ouverture, les pinces à barre de torsion ne sont pas relâchées une fois débrayées en gare afin de limiter l'usure par fatigue des barres de torsions. Cet usage est donc contraire à la législation française ce qui explique donc l'usage général des pinces à ressort en compression en France.

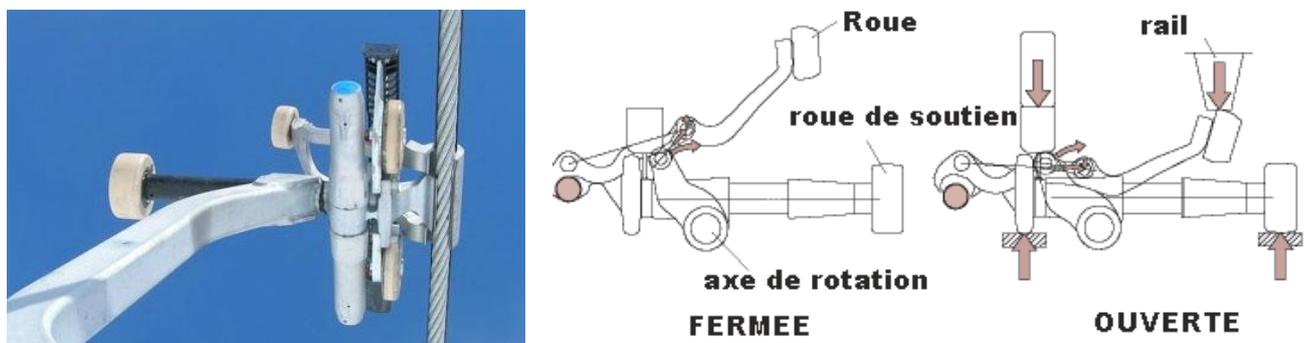


Figure 18 : Pince à barre de torsion, mécanisme d'ouverture, source [1]

Comme les pinces à barre de torsion ne sont pas relâchées en gare, leur encombrement est minime par rapport aux pinces à ressort de compression qui ont des hauteurs de l'ordre de 60 cm après relâchement en gare.

### 3.2.2 - Les gares débrayables

Il existe deux types de gares, la gare de départ, ou gare aval, et la gare d'arrivée, ou gare amont. Une de ces gares, souvent la gare d'arrivée, est une gare motrice. L'autre gare est dite gare de tension, elle assure la tension de la ligne, la poulie de retour étant fixée sur un vérin qui maintient une tension permanente du ou des câbles, cette tension peut atteindre quelques centaines de kilo Newton. Quel que soit le type de gare, le passage en gare d'un module se déroule en plusieurs étapes :

#### 1. Arrivée du module en gare

L'arrivée du module en gare est assurée par un système nommé « trompettes d'entrées » (figure 19) qui permettent de guider les pinces et de les remettre à l'horizontale si celles-ci ne l'étaient pas.



Figure 19 : Trompette d'entrée de gare Doppelmayr, source [1]

## 2. Débrayage de la pince

Arrivés en gare les modules sont débrayés du câble tracteur en quelques secondes. Des pneus assurent l'entraînement du module en appuyant sur un patin, ou peigne, situé sur la pince. Un rail-came (en rouge figure 20) appuie sur le levier de la pince qui s'ouvre et libère ainsi le câble. Ces actions ont un double effet : le module est débrayé du câble et simultanément ralenti passant d'une vitesse de 5 m/s sur la ligne à une vitesse de 1 m/s en gare.



Figure 20 : Rail de débrayage appuyant sur le levier de la pince, source [1]

## 3. Guidage sur le contour et embarquement des passagers

Le module est entraîné par un système pneumatique (figure 21) qui est couplé au mouvement du câble par l'intermédiaire de courroies afin d'assurer la synchronisation de la vitesse des modules sur la ligne et en gare. Sur des installations plus anciennes, le système d'entraînement est réalisé par une chaîne plus bruyante et à l'usure plus importante. La vitesse étant moindre, les passagers peuvent embarquer.

## 4. Accélération du module

Pour le retour sur la ligne, le module doit être accéléré via les pneumatiques. Le rail de guidage pneumatique est conçu pour augmenter linéairement la vitesse de rotation des pneus jusqu'à atteindre la vitesse de la ligne. Ainsi, les pneus sont entraînés par le système de courroie déjà mentionné, cependant les diamètres des poulies liées aux pneus diminuent (figure 22).

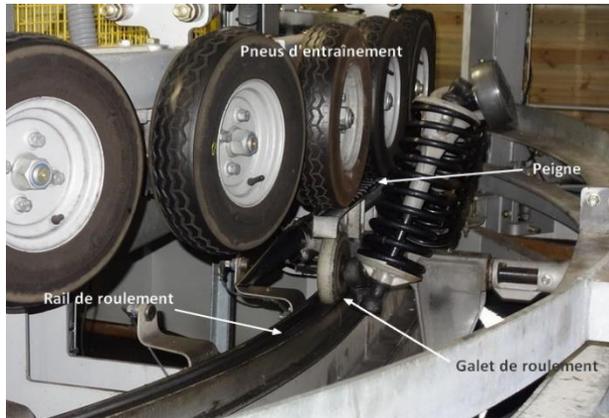


Figure 21 : Système pneumatique d'entraînement des modules débrayables en gare, source [1]



Figure 22 : Courroies d'entraînement des pneus en gare avec évolution des diamètres poulies, source [1]

## 5. Embrayage de la pince

Enfin l'embrayage de la pince sur le câble se fait de la même manière que le débrayage mais à l'inverse. Le levier de la pince est écrasé afin d'ouvrir la pince, puis lorsque le câble est à l'intérieur, le levier est relâché afin de laisser la pince serrer le câble.

De nombreuses vidéos sont disponibles en ligne montrant le passage d'un télésiège débrayable en gare, comme [les coulisses des remontées mécaniques - les sécurités en gare](#) (durée 7 minutes 32) ou encore [le débrayage d'une pince Oméga T de type Leitner](#) (durée 15 secondes).

## 4 – Les différents types de remontées mécaniques téléportées

### 4.1 - Télésiège : TSF & TSD

Les télésièges sont des remontées mécaniques téléportées composées de sièges allant de 1 à 8 places, les plus courants étant 4 et 6 places. Ces sièges peuvent être solidaires du câble, ce sont alors des TSF pour Télésiège Fixe (figure 23). Les sièges peuvent également être désolidarisés du câble, la remontée est dite débrayable ou TSD pour Télésiège Débrayable (figure 24). Le plus souvent unique, le câble est à la fois porteur et tracteur et repose sur des pylônes positionnés en fonction du dénivelé et du relief. Un télésiège peut être composé de plus d'une centaine de sièges régulièrement espacés faisant des aller-retours entre les gares de départ et d'arrivée par la boucle continue formée par le câble.



Figure 23 : TSF 4 places, Ax 3 Domaines, Ariège, source [6]



Figure 24 : TSD 6 places, Isola 2000, Alpes-Maritimes, source [7]

Les télésièges de technologie non débrayable transportent de l'ordre de 2500 personnes par heure. Le débit passager des télésièges de technologie débrayable est de 4500 personnes par heure pour une vitesse de l'ordre de 5 m/s.

## 4.2 - Télécabine : TCD

Le fonctionnement est en tout point similaire au fonctionnement d'un télésiège, cependant ce ne sont pas des sièges mais des cabines fermées. Les télécabines ont donc l'avantage de protéger les usagers des intempéries et permettent donc un survol plus important du relief montagneux. Les cabines ont une capacité de 4 à 16 places pour les plus grandes, les plus courantes étant de 8 places (figures 25 et 26). Le débit de passager est similaire à celui d'un télésiège débrayable et la vitesse est légèrement supérieure, typiquement de 6 m/s.



Figure 25 : TCD 8 places de la Kedeuze, Carroz d'Arèche, Haute-Savoie, source [25]



Figure 26 : TCD 8 places de Beauregard, la Clusaz, Haute-Savoie, source [6]

## 4.3 - Téléphérique : TPH

Les téléphériques à va-et-vient sont composés de deux cabines effectuant des aller-retours en opposition entre les gares de départ et d'arrivée. La plupart du temps, aucun pylône intermédiaire n'est nécessaire et les câbles sont simplement reliés aux gares de départ et d'arrivée.

Les téléphériques sont composés de câbles porteurs et de câbles tracteurs distincts. Les câbles porteurs sont indépendants d'une voie à l'autre alors que le ou les câbles tracteurs forment une boucle à la manière des remontées précédentes. Les câbles porteurs sont tendus très fortement de sorte à limiter la flèche au maximum. Ils peuvent être fixés à des ancrages en gare ou bien tendus à l'aide de contre-poids (figure 27). Le ou les câbles tracteurs sont également tendus mais moins fortement, la tension est souvent réalisée par des contre-poids (figure 28).



Figure 27 : Ancrage des câbles porteurs du Vanoise Express, Suisse, source [1]



Figure 28 : Dispositif de tension des câbles tracteurs, TPH du Brévent, Chamonix, source [1]

Grâce à leur hauteur de survol et leur portée importante les téléphériques sont souvent utilisés pour des reliefs particulièrement escarpés où la mise en place de pylônes intermédiaires est difficile (figures 29 et 30).



Figure 29 : TPH du Pic Blanc, Alpe d'Huez, Isère, source [26]



Figure 30 : TPH de l'Aiguille du Midi, Chamonix, Haute-Savoie, source [27]

Il existe des variantes du téléphérique à va-et-vient. Les **téléphériques pulsés** présentent des groupes de cabines. Ces cabines sont débrayables et font des boucles au lieu de faire des aller-retours. En voici quelques exemples :



Figure 31 : TPH Pulsé, Grenoble, Isère, source [9]



Figure 32 : TPH Pulsé, La Grave, Hautes-Alpes, source [10]

Les **téléphériques 2S** et **3S**<sup>4</sup> sont des technologies de pointe, donc rares, à un câble tracteur et un câble porteur (2S - figure 33) ou deux câbles porteurs (3S - figure 34). Leurs cabines régulièrement espacées sur la ligne sont débrayables et font des boucles. Ces téléphériques permettent une hauteur de survol et une portée entre pylônes importantes, avec l'avantage d'une télécabine débrayable avec un débit de passager continu. En voici deux exemples :



Figure 33 : TPH 2S de la Massana, Andorre, source [6]



Figure 34 : TPH 3S de l'Olympique, Val d'Isère, Savoie, source [6]

<sup>4</sup> S comme « Seile », câble en allemand. 2S : 1 câble porteur et 1 câble tracteur ; 3S : 2 câbles porteurs et 1 câble tracteur.

## 4.4 - DMC et Funitel

Les DMC (pour Double-Mono-Câble) et Funitels sont deux types de téléportés présentant une différence notable avec les téléphériques présentés précédemment. Les DMC et Funitels sont composés de deux câbles à la fois porteurs et tracteurs, et motorisés par deux machines différentes.

Usuellement, les DMC et Funitels ont un fonctionnement similaire à celui d'une télécabine débrayable classique, les cabines réalisent une boucle entre les gares de départ et d'arrivée. Ils présentent cependant l'avantage d'avoir une hauteur de survol non limitée par la réglementation<sup>5</sup> (du fait de la présence de deux câbles porteurs) et une portée importante entre pylônes. Il arrive exceptionnellement que les Funitels aient un fonctionnement à va-et-vient. Les Funitels diffèrent des DMC par le fait que leurs deux câbles tracteurs/porteurs sont espacés d'une distance supérieure ou égale à la largeur de la cabine, et la suspente est très courte (figures 35 et 36). Cette particularité leur confère une robustesse très importante face au vent puisqu'ils peuvent fonctionner par des vents allant jusqu'à 120 km/h. À titre de comparaison, une télécabine monocâble fonctionne par des vents allant jusqu'à 70 km/h [11].



Figure 35 : DMC des Grandes Rousses, Alpe d'Huez, Isère, source [12]



Figure 36 : Funitel Gletscherbahn III, Hintertuxer Gletscher, Autriche [28]

## 5 – Construction d'un téléporté

### 5.1 - Étapes de construction

#### Phase d'étude et de conception (environ 3 mois) [11]

- Lancement du projet par la station ou l'exploitant : constitution d'un dossier avec les emplacements des gares d'arrivée et de départ, les emplacements des pylônes, les aménagements éventuels autour des gares, etc. Ces choix sont souvent faits à l'aide d'un bureau d'étude spécialisé [6] ;
- Dossier déposé pour recevoir un accord de l'UTN (Unité Touristique Nouvelle) donné par le Préfet et par la commission spécialisée du comité de massif ;
- Appel d'offre pour trouver un maître d'œuvre et un constructeur : une fois choisis et une fois les propositions finales faites au maître d'ouvrage, celui-ci choisit le type d'installation

<sup>5</sup> La réglementation de la STRMTG (Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés) stipule que pour un téléphérique, une télécabine double-monocâble / bicâble ou plus, la hauteur de survol maximale n'est pas limitée. Par contre pour une télécabine monocâble celle-ci est limitée à 30 m sauf dérogations (limitée à 60 m si franchissement d'une courte dépression, non limitée "s'il y a au maximum cinq véhicules sur toute la longueur de chaque brin de câble simultanément concernés par le franchissement de courtes dépressions") [11]

souhaitée. Puis, le constructeur et le maître dimensionnent l'installation proposée. Ils déterminent entre autres l'emplacement et le type de pylône, le diamètre des câbles, la puissance installée etc.

### Phase de construction (de 6 à 9 mois) [11]

- Marquage du sol / Décaissement / Coulage de massifs en béton pour les gares et pylônes ;
- Construction des pylônes et des gares par hélicoptères (figure 37) : les pylônes sont équipés de *langues de chat* et de *fentes* (figure 38) afin de faciliter l'emboîtement et l'orientation des pylônes. La partie *langue de chat* est située sur le pylône qui arrive par hélicoptère ce qui permet aussi aux ouvriers de manipuler le pylône suspendu plus facilement.



Figure 37 : Installation d'un pylône par hélicoptère, source [21]



Figure 38 : Système permettant de faciliter l'emboîtement des pylônes, source [1]

- Pose du ou des câbles : installation d'un filin par hélicoptère puis treuil du ou des câbles grâce à ce filin ;



Figure 39 : Filin installé sur la ligne et câble définitif accroché à l'extrémité du filin, source [1]

- Épissure des câbles pour en faire une boucle continue. C'est un travail manuel long et technique qui est détaillé dans la section suivante ;
- Tests avant ouverture, c'est-à-dire la ligne à vide, puis avec quelques remontées et enfin avec une première saison à capacité réduite.

## 5.2 - Épissure du câble

Toutes les remontées mécaniques possèdent au moins un câble tracteur qui réalise une boucle continue qu'il va falloir réaliser avec un câble qui possède deux extrémités. Après la pose du câble sur les pylônes, il y a donc une étape technique qui consiste à raccorder les deux bouts d'un câble afin d'obtenir une boucle sans début ni fin. Cette étape est l'épissure. Un câble est composé de plusieurs torons, eux-mêmes réalisés avec plusieurs fils en hélice (figure 40). L'épissure d'un câble consiste donc à « marier » deux extrémités de câble en mélangeant les torons d'une extrémité avec les torons de l'autre extrémité.

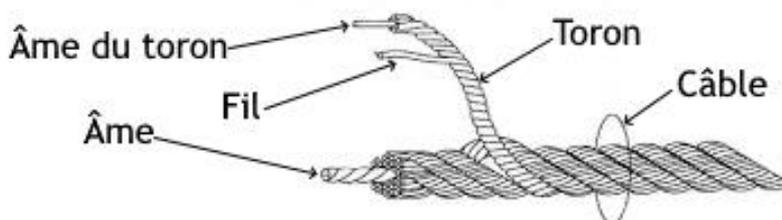


Figure 40 : Composition d'un câble de remontée mécanique, source [14]

Lors d'une épissure il faut relier les 6 torons d'une extrémité du câble aux 6 torons de l'autre extrémité en respectant la disposition des torons dans le câble. Cette opération laborieuse et extrêmement technique nécessite une dizaine d'opérateurs. Globalement chaque extrémité est détournée sur une longueur suffisante (figure 41), puis elles sont mariées entre elle, c'est-à-dire qu'un des torons prend la place d'un toron de l'autre extrémité selon des techniques fonction de l'utilisation et du fabricant. L'extrémité du toron est alors insérée dans l'âme du câble, c'est un nœud. Chaque nœud doit être distant d'au moins 8 mètres par rapport à son voisin et l'épissure totale doit avoir une longueur d'au moins 1200 fois le diamètre nominal du câble. Par exemple pour un câble de diamètre 45 mm l'épissure totale doit se faire sur une longueur d'au moins 54 m. Il faut de plus faire attention à ce que l'augmentation de diamètre du câble causée par la rentrée des torons dans le câble lors du nœud n'excède pas 10% (figure 42).



Figure 41 : Réalisation l'une épissure de câble de remontée mécanique, source [14]



Figure 42 : Vue en coupe d'un nœud d'épissure, source [15]

## 5.3 - Quand le sol perd ses propriétés mécaniques

### 5.3.1 - Le Pergélisol

Le pergélisol (ou permafrost en anglais) est un sol dont la température en profondeur se maintient en dessous de 0°C pendant plus de 2 ans. Cela représente 20% de la surface terrestre, mais 90% du Groenland, 80% de l'Alaska et 50% du Canada ou de la Russie. En 2012, on estimait que le pergélisol des Alpes françaises concernerait environ 700 km<sup>2</sup>, soit 10% des 6800 km<sup>2</sup> situés au-dessus de 2000 m d'altitude. Cette proportion est non négligeable quand on la compare à celle des glaciers émergés qui ne représente que 4% des surfaces situées au-dessus de 2000 m d'altitude avec moins de 270 km<sup>2</sup> (52% de la superficie englacée a disparu entre 1970 et 2009 et le retrait s'accélère cette dernière décennie) [16].

Le pergélisol est constitué des roches habituelles retrouvées en montagne (notamment des roches granitiques pour les Alpes), mais aussi de glace qui joue le rôle de liant permettant la cohésion des roches. On distingue plusieurs couches dans un pergélisol (figure 43). La première dite *couche active* peut mesurer jusqu'à cinq mètres selon les années, sa température varie, elle peut fondre et geler alternativement [17]. Puis vient une couche dont la température est constamment en dessous de 0°C mais admet des variations saisonnières. C'est la couche de *pergélisol stricto sensu*, elle s'étend sur 10 à 20 mètres. Enfin la dernière couche, constamment gelée également, voit sa température constante au cours de l'année. Elle peut s'étendre sur des milliers de kilomètres comme par exemple en Yakoutie, République de Sakha au Nord-Est de la Sibérie.

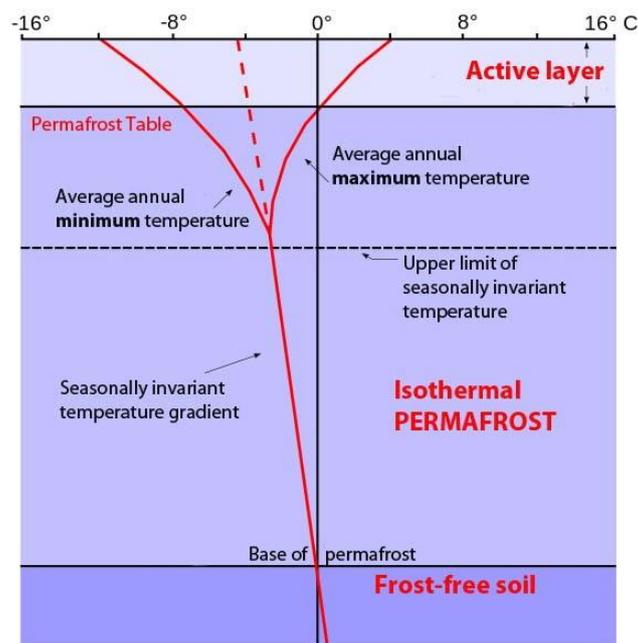


Figure 43 : Exemple de profil de température dans le pergélisol, source [18]

### 5.3.2 - Fonte du Pergélisol

Les mécanismes de fonte du pergélisol font d'objet de nombreuses recherches. La fonte de la couche active du pergélisol est un mécanisme complexe qui reste difficile à appréhender par les nombreux paramètres à prendre en compte. Le manque de données expérimentales sur la température dans les roches rend difficile la validation de modèles.

Toutefois l'étude de Gruber et Haeberli [19] a permis notamment de montrer que la fonte du pergélisol était plus rapide sur les pics et arrêtes par rapport aux pentes plus classiques. En effet sur les pics et arrêtes l'échange thermique se fait à travers des surfaces plus importantes. Sur les

pententes classiques, la couche de pergélisol stricto sensu permet de maintenir une source de froid sur la partie intérieure de la roche, alors que cette couche de pergélisol est inexistante sur les pics et arrêtes trop fins.

Une autre étude portée plus précisément sur le pergélisol de l'Aiguille du midi [20] a montré l'impact de la couche de neige présente sur les surfaces rocheuses. Une couche de neige fine, sans rôle isolant, aura tendance à protéger les surfaces exposées au rayonnement solaire grâce au fort albédo<sup>6</sup> de la neige. Au contraire les surfaces non recouvertes d'une couche de neige comme des pentes trop abruptes par exemple, absorbent le rayonnement solaire qui réchauffe le sol et donc l'épaisseur de la couche active de pergélisol y sera maximale. Cette étude a aussi montré que les pentes à l'ombre ont une température moyenne annuelle de surface plus importante lorsqu'elles sont recouvertes d'une épaisse couche de neige jouant le rôle d'isolant. Ce qui a donc tendance à favoriser localement la fonte du pergélisol.

Ces deux études relèvent aussi que les échanges thermiques menant à la fonte du pergélisol sont principalement la conduction et l'advection induite par l'eau sous forme liquide due à la fonte notamment ou encore induite par l'air dans les failles ouvertes de la roche. Des deux échanges, celui qui accélère le plus la fonte du pergélisol est l'advection (l'eau ruisselante dans la roche entraîne la fonte de la glace). Le degré de fracturation de la roche et donc la capacité de la paroi à laisser circuler l'eau, est donc un paramètre influent de la fonte du pergélisol.

Mais d'autres paramètres sont également influents. Une étude réalisée sur l'affaissement du refuge des Cosmiques du Mont-Blanc a montré l'impact des travaux de gros œuvre sur le pergélisol. En effet lors de l'excavation puis du coulage des fondations en béton, une grande quantité d'énergie thermique est dissipée dans la roche. Cette énergie peut initier la fonte du pergélisol localement autour des fondations du bâtiment construit, et les microfissures induites par cette fonte augmentent ensuite le degré de fracturation du milieu et donc le risque de fonte du pergélisol. Ainsi la construction même d'infrastructures en montagne peut causer ou accélérer les phénomènes de fontes du pergélisol et de déstabilisation des sols.

Toutefois la construction et la validation de modèles de ces phénomènes restent difficiles tant ces derniers sont complexes par les nombreux paramètres et couplages. Les modèles de température sont tributaires de mesures de données thermiques en haute montagne, l'installation de capteurs sur des parois abruptes ou difficilement accessibles reste périlleuse.

### 5.3.3 - Situation actuelle

La fonte du pergélisol impacte fortement la stabilité des infrastructures alpines, souvent des remontées mécaniques exploitées pour le ski alpin notamment mais aussi quelques dizaines de refuges ainsi que des installations électriques. Les fondations de ses infrastructures sont majoritairement installées sur le pergélisol alpin, l'entretien et l'exploitation de ces infrastructures doit tenir compte de la fonte du pergélisol.

Une étude a permis d'estimer, en 2015, que 1769 infrastructures se situaient dans les secteurs à permafrost probable et/ou potentiellement affectés par le retrait glaciaire : leur stabilité était jugée préoccupante [16]. Dans un contexte de réchauffement climatique (voir ressource « *L'effet de serre, c'est quoi ?* » [22]), le retrait du pergélisol et son rythme continuent d'être l'objet de recherches, on peut aisément estimer que 7 ans plus tard la situation ne s'est pas améliorée.

---

<sup>6</sup> L'albédo caractérise la capacité d'une surface à réfléchir le rayonnement incident. La neige fraîche a un albédo de 0,8 à 0,9, un sol sombre de 0,05 à 0,15.

Cette étude a été confirmée sur dix cas d'études où des dégâts liés à la stabilité du pergélisol ont été relevés lors d'inventaires sur des infrastructures classées en indice de risque Fort (tableau 1), ces dégâts sont majoritairement des déformations importantes des éléments de structure voire même des fissures.

| Indice de Risque | Définition du Risque                                      | Analyse du risque                              |
|------------------|---|--|
| Faible           | Infrastructure stable                                     | Aucune analyse nécessaire                      |
| Limité           | Faible déstabilisation possible                           | Analyse qualitative conseillée                 |
| Marqué           | Déstabilisation partielle possible                        | Réalisation d'une analyse qualitative          |
| Fort             | Déstabilisation considérable possible de l'infrastructure | Réalisation d'une analyse quantitative limitée |
| Très Fort        | Déstabilisation généralisée possible de l'infrastructure  | Surveillance indispensable de l'ouvrage        |

Tableau 1 : Risque en fonction du niveau d'indice

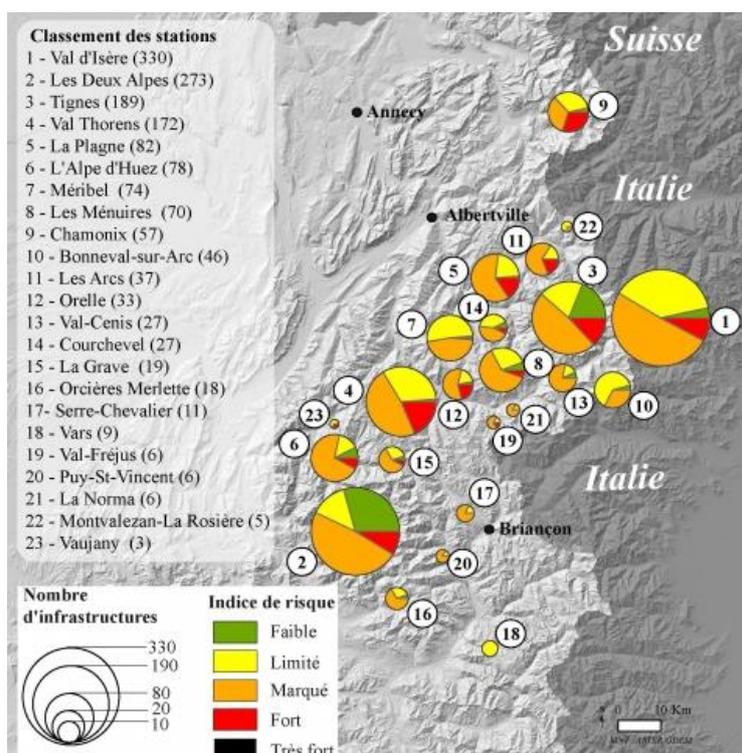


Figure 44 : Carte des risques d'instabilité des infrastructures alpines, source [18]

Après ce bref historique et cette présentation des différents types de remontées mécaniques ainsi que des étapes et points clés de leur construction, la ressource « *Téléportés Urbains : des remontées mécaniques en ville - L'exemple du téléphérique de Toulouse* » [21] développe les utilisations des téléportés en ville en se penchant en particulier sur le téléphérique 3S de Toulouse, mis en service en 2022.

## Références :

- [1]: Remontées mécaniques, <https://www.remontees-mecaniques.net/>
- [2]: Robert Breuer – Travail personnel, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=792602>
- [3]: CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=4594996>
- [4]: Manuco – Travail personnel, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3744294>

- [5]: Wirkola – Travail personnel, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=25544217>
- [6]: Stations de ski, <https://forum.stationsdeski.net/>
- [7]: Informations générales sur les stations et les remontées mécaniques, <https://www.skiresort.fr>
- [8]: Téléphérique de l'Aiguille du Midi : un nouveau câble de 42 tonnes a été installée, novembre 2017, <https://radiomontblanc.fr/article/telepherique-de-laiguille-du-midi-un-nouveau-cable-de-42-tonnes-a-ete-installe-27052>
- [9]: Téléphérique de Grenoble Bastille, <https://www.grenoblepass.com/fr/11-telepherique-de-grenoble-bastille>
- [10]: Troisième tronçon du téléphérique de la Grave : « Des incertitudes de partout », relaye un collectif, septembre 2022, <https://www.ledauphine.com/hautes-alpes/2016/02/17/une-reunion-pour-evoquer-l-avenir-du-telepherique>
- [11]: Certu : Transport par câble aérien en milieu urbain - Service Techniques des remontées Mécaniques et des Transports Guidés (STRMTG), collection Références n°125, YVES SCHNEIDER, CÉCILE CLÉMENT-WERNY (CER), <https://docplayer.fr/53126305-Certu-transport-par-cable-aerien-en-milieu-urbain-service-technique-des-remontees-mecaniques-et-des-transports-guides-strmtg-collection-references.html>
- [12]: Vacances au ski entre ami(e)s : Les 6 meilleures stations, <https://www.i-travelled.com/meilleures-stations-ski>
- [13]: Die Seilbahn kommt mit russischem Mega-Helikopter angefliegen, juillet 2012, <https://www.aargauerzeitung.ch/schweiz/die-seilbahn-kommt-mit-russischem-megahelikopter-angeflogen-ld.1928152>
- [14]: Le transport par les airs, tout commence avec le câble, Poma, <https://www.poma.net/actualites/quest-ce-que-epissure/>
- [15]: Epissure longue sur les câbles de remontées mécaniques, 1<sup>ère</sup> partie, Revue Internationale des téléphériques, ISR, <https://fr.isr.at/singleview/article/epissure-longue-sur-les-cables-de-remontees-mecaniques-1iere-partie>
- [16]: Evaluation du risque de déstabilisation des infrastructures de haute montagne engendré par le réchauffement climatique dans les Alpes françaises, Pierre-Allain Duvillard, Ludovic Ravel et Philip Deline, Journal of Alpine Research, sept. 2015, <http://journals.openedition.org/rga/2816>
- [17]: La face ouest des Drus (massif du Mont-Blanc) : évolution de l'instabilité d'une paroi rocheuse dans la haute montagne alpine depuis la fin du petit âge glaciaire, Ludovic Ravel et Philip Deline, Géomorphologie : relief, processus, environnement, 2008, n° 4, p.261-272
- [18]: Original contributor, German Wikipedia user, "HylgeriaK", translation by User:HopsonRoad, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=30524042>
- [19]: S. Gruber and W. Haeberli, « Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change », JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 112, F02S18, 2007
- [20]: F. Magnin, P. Deline, L. Ravel, J. Noetzli, and P. Pogliotti, « Thermal characteristics of permafrost in the steep alpine rock walls of the Aiguille du Midi (Mont Blanc Massif, 3842ma.s.l) », The Cryosphere, 9, 109-121, 2015
- [21]: Téléportés Urbains : des remontées mécaniques en ville - L'exemple du téléphérique de Toulouse, R. Pellenc, C. Desodt, H. Horsin Molinaro, [https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/teleportees-urbains-des-remontees-mecaniques-en-ville](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/teleportees-urbains-des-remontees-mecaniques-en-ville)

- [22]: L'effet de serre c'est quoi ? H. Horsin Molinaro, O. Villain, novembre 2021,  
[https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources\\_pedagogiques/l-effet-de-serre-c-est-quoi](https://eduscol.education.fr/sti/si-ens-paris-saclay/ressources_pedagogiques/l-effet-de-serre-c-est-quoi)
- [23]: Double monocâble débrayable DMC20 Jandri Express, mai 2022  
<https://forum.stationsdeski.net/t3671-double-monocable-debrayable-dmc20-jandri-express>
- [24]: Increasing the Capacities of Cable Cars for Use in Public Transport, S. Težak, D. Sever, M. Lep, Journal of Public Transportation, Vol. 19, No. 1, 2016,  
<https://digitalcommons.usf.edu/jpt/vol19/iss1/1/>
- [25]: Télécabine de la Kédeuze, Les carroz, haute-Savoie - Mont-Blanc,  
<https://www.lescarroz.com/equipement/telecabine-de-la-kedeuze-les-carroz-daraches/>
- [26]: Le Pic Blanc, Oz en Oisans, <https://www.oz-en-oisans.com/hiver/decouvrir/nos-incontournables/le-pic-blanc/>
- [27]: TPH Plan de l'aiguille, Chamonixnet, juillet 2018,  
<https://www.chamonix.net/francais/actualite/tph-plan-de-laiguille-aiguille-du-midi-fermeture-prolongee>
- [28]: Remontées mécaniques Hintertuxer Gletscher (Glacier d'Hintertux), skiresort.fr,  
<https://www.skiresort.fr/domaine-skiable/hintertuxer-gletscher-glacier-dhintertux/remontees-mecaniques/>