

Gare supérieure, vue d'ensemble.

SALÈVE

**Téléphérique du Salève :
essais de rupture grandeur nature**

Pour la première fois en France, le Service Technique des Remontées Mécaniques a pu réaliser des essais de rupture d'un câble tracteur de téléphérique en « expérimentation directe », grandeur nature, sur le téléphérique du Salève en Haute-Savoie. Les résultats de ces essais auront, c'est certain, une incidence sur la conception d'appareils futurs. J.P. Larquetout et J. Dubuisson, responsables de l'opération, nous décrivent ici les moyens mis en œuvre et l'ensemble du dispositif de mesure.

Même s'il n'en existe pas dans toutes nos stations, les téléphériques à va et vient classiques n'en sont pas moins des engins bien connus du public, qui les apprécie pour leur confort, leur rapidité, et leur relative indifférence aux conditions atmosphériques.

Yves Barjon, Ingénieur divisionnaire des TPE au S.T.R.M. a décrit, dans le dernier numéro d'Aménagement et Montagne, les principaux dispositifs qui permettent de garantir la sécurité de deux des plus récentes réalisations : les téléphériques de l'Aiguille Rouge aux Arcs, et de la Cime Caron à Val Thorens.

L'un des plus importants – mais ils le sont tous – était jusqu'à présent le frein de chariot.

On sait, en effet, que les téléphériques à va et vient comportent toujours 2 grosses cabines reliées par un ou deux (exceptionnellement 3) câbles tracteurs montés en parallèle et passant sur une ou plusieurs poulies

motrices. Chaque cabine est suspendue à un chariot qui roule sur un ou deux câbles porteurs et auquel sont attachés les tracteurs. La rupture de ces derniers serait évidemment catastrophique puisque les cabines, n'étant plus retenues, partiraient à la dérive et iraient s'écraser dans la gare inférieure, à moins qu'elles ne dérailent en route.

Nos règlements techniques prévoient donc que, s'il n'y a qu'un ou deux tracteurs, le chariot doit être muni d'un frein susceptible de s'agripper sur le ou les porteurs en cas de rupture de l'un des premiers.

Ce dispositif a déjà permis d'éviter, de par le monde, un certain nombre d'accidents. Mais, avec l'augmentation de la vitesse des appareils - qui voisine maintenant 40 km/h -, et de la capacité des cabines - 150 personnes à Val Thorens - les freins de chariot deviennent des mécanismes lourds relativement complexes, assortis parfois de dispositifs de pilotage électronique, et dont le poids n'est pas négligeable.

Comme on n'arrête pas le progrès, nous avons donc imaginé, en France, de nous affranchir du frein de chariot. Ainsi simplifié, le système devient d'ailleurs plus sûr, à condition naturellement de prendre un certain nombre de précautions. La première consiste à imposer la présence de 2 câbles tracteurs, formant chacun une boucle épaissurée, ce qui élimine ou réduit sérieusement du même coup les risques de rupture d'un câble au voisinage d'une attache. Si l'un des deux venait néanmoins à se rompre, le freinage de la cabine serait assuré en station par l'intermédiaire du second. Encore faut-il que ce dernier soit apte à supporter le choc initial, que l'adhérence sur la poulie motrice soit maintenue, et que les effets secondaires de la rupture apparaissant en d'autres points de l'installation soient maîtrisés, afin de ne pas risquer de compromettre la sécurité.

Après étude approfondie de l'ensemble de ces problèmes, et sur avis favorable de la Commission des Téléphériques, trois appareils de ce type ont été réalisés à titre expérimental durant ces dernières années : La Clusaz en 1979, Auron en 1980 et l'Alpe-d'Huez en 1981.

Sur demande du Ministère des Transports, le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées à Paris a développé des méthodes de calcul permettant de déterminer les effets dynamiques d'une rupture de câble. Au fur et à mesure des besoins, cette étude a été poursuivie et approfondie au plan théorique.

Un certain nombre de précautions constructives ont, en outre, été prises pour éviter dans toute la mesure du possible la rupture d'un câble tracteur qui, même si elle ne compromet pas la sécurité sur ce type d'installation, présente évidemment de sérieux inconvénients pour l'exploitation.

Le comportement des trois engins expérimentaux s'est révélé, jusqu'à ce jour, tout à fait satisfaisant, et leur généralisation est donc à l'ordre du jour. Encore était-il souhaitable d'obtenir auparavant par l'expérience des éléments permettant d'affiner les premiers calculs, et de disposer de bases solides pour dimensionner plus économiquement les installations suivantes.

Ceci peut être envisagé, avec certaines difficultés, sur modèle réduit. Mais rien ne saurait dans ce domaine, où le choix des hypothèses de calcul revêt une importance considérable, remplacer l'expérimentation directe.



Gare inférieure - vue d'ensemble

Une opportunité exceptionnelle à cet égard s'est présentée en l'espèce du téléphérique du Salève.

Construit en 1932 et rénové en 1952, cet engin établi en France aux portes de Genève a dû être retiré définitivement du service en 1976 à la suite d'une usure excessive de certains éléments de tension. Il sera remplacé par un engin moderne dont la construction devrait être entreprise très prochainement. Il s'agit d'un va-et-vient classique, à 2 câbles tracteurs, muni d'un frein de chariot et sans pylône intermédiaire. Sa portée est de 1180 m et il permet de franchir une dénivellée de 666 m. Il pouvait être facilement remis en marche pour les besoins de l'expérience. Il appartient à la Ville d'Annemasse qui a bien voulu autoriser le Ministère des Transports à l'utiliser pour les besoins de l'expérience.

L'essai a consisté à supprimer, grâce à des boulons explosifs, la liaison entre l'un des câbles tracteurs et le chariot. On a mesuré ensuite les déplacements et les balancements des cabines et ceux des contrepoids, ainsi que les tensions dans les câbles tracteurs au niveau des chariots et de la poulie motrice. Des photos des câbles tracteurs ont également été prises pour permettre de reconstituer leurs mouvements.

Le câble rompu était retenu par un câble auxiliaire relié à un treuil de façon à permettre de le raccorder à nouveau au chariot après l'essai. Ce qui a permis de répéter l'opération plusieurs fois dans des conditions différentes.

L'objectif de l'expérience n'était pas, en effet, de voir si l'installation résistait à la rupture d'un câble, ce qui avait été vérifié au préalable par le calcul, mais bien de mesurer l'importance des divers phénomènes consécutifs à une telle rupture, afin d'en tenir compte pour dimensionner les appareils futurs. Les essais se sont déroulés de façon tout à fait satisfaisante, et nous sommes d'ores et déjà assurés de pouvoir en tirer les enseignements escomptés. Mais le dépouillement des résultats sera long, et ce n'est pas avant plusieurs mois que ceux-ci pourront être réellement utilisables.

C'est la première fois, en France du moins, qu'une expérience de cette nature est réalisée. Il est vrai qu'il fallait disposer pour cela d'un téléphérique destiné à la démolition, mais encore en état de marche convenable. Tel était le cas du Salève. Encore fallait-il également trouver un propriétaire et un futur exploitant qui soient coopératifs. La Ville d'Annemasse et la Société d'Etudes pour la reconstruction du téléphérique du Salève

l'ont été et doivent être à cet égard tout particulièrement remerciées.

L'importance des moyens mis en œuvre apparaît à la lecture de l'article de M. Dubuisson, qui était le responsable de l'opération. Les problèmes auxquels nous sommes confrontés pour garantir la sécurité sont nombreux et complexes, notamment lorsqu'il s'agit d'engins de type nouveau. Il faut, pour les résoudre, de l'imagination, mais aussi du temps et de l'argent. La réalisation de l'expérience du Salève montre que le Ministère des Transports est tout à fait déterminé à ce que la France se situe dans ce domaine au niveau que ses réalisations passées lui assignent.

J.P. LARQUETOUT

Ingénieur en Chef des Ponts et Chaussées
chargé du Service Technique des
Remontées Mécaniques

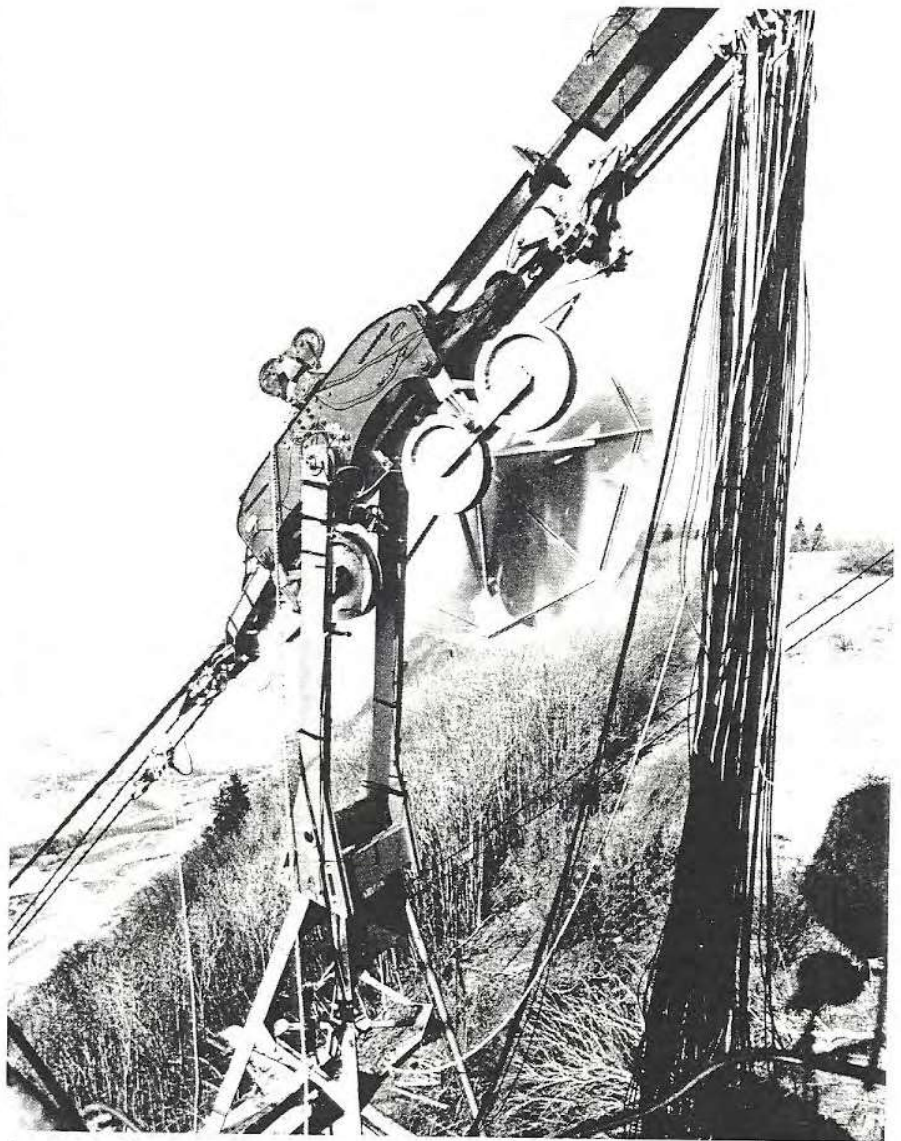
L'objectif de la campagne d'expériences qui vient d'être réalisée sur le téléphérique du Salève peut se résumer comme suit : provoquer artificiellement la rupture de l'un des deux câbles « tracteurs » de l'appareil, et enregistrer les divers phénomènes consécutifs à cette rupture afin de pouvoir, entre autres, les comparer aux résultats donnés par le calcul.

Mais l'opération n'était relativement simple qu'en apparence. Sa réalisation posait, en vérité des problèmes difficiles, aussi bien en ce qui concerne les techniques de mesure, qu'en raison des précautions à prendre pour assurer la sécurité des expérimentateurs et des tiers. Les solutions retenues seront décrites ci-après, en même temps que l'ensemble du dispositif de mesure mis en place.

Le téléphérique du Salève

Il a été construit en 1932. Rénové en 1952, il a été alors modifié et se présente maintenant comme un va et vient classique à deux câbles « tracteurs » dont les principales caractéristiques sont les suivantes :

- dénivellation : 666 m
- longueur horizontale : 974 m
- pente moyenne : 68,4 %
- pente maximale : 100 %
- altitude station supérieure : 1146 m
- câble porteur :
 - ancrage fixe par culot en gare supérieure.
 - tension par contrepoids unique pour les 2 câbles en gare inférieure (masse 64 tonnes)
 - type clos, de diamètre 42 mm.
- câble « tracteur » :
 - poulie motrice à deux gorges en gare inférieure
 - type LANG à droite, de diamètre 18 mm
 - charge de rupture expérimentale 205 kN
- câble « lest » :
 - tension par l'intermédiaire d'un lorry et d'un contrepoids (masse 9 tonnes) pour chaque câble boucle « lest ».
 - type LANG à droite, de diamètre 22 mm
 - charge de rupture calculée 302 kN.
- **Chariot** : Les deux câbles « tracteur » et les 2 câbles « lest » sont reliés à chaque chariot par l'intermédiaire de culots coulés.



Vue d'ensemble des modifications apportées à chaque cabine.

Comme l'appareil n'était plus exploité depuis 5 ans, il était indispensable de s'assurer qu'il pourrait être remis en marche sans danger pour les expérimentateurs, ni pour les tiers. Une inspection générale, portant notamment sur l'état des câbles et des attaches a donc été faite, avec le Service de contrôle de la Haute-Savoie (B.D.A.R.M.). Elle a montré que l'installation était globalement saine ; et même que, mis à part quelques problèmes d'alimentation électrique, elle pouvait être remise en route sans réfections majeures.

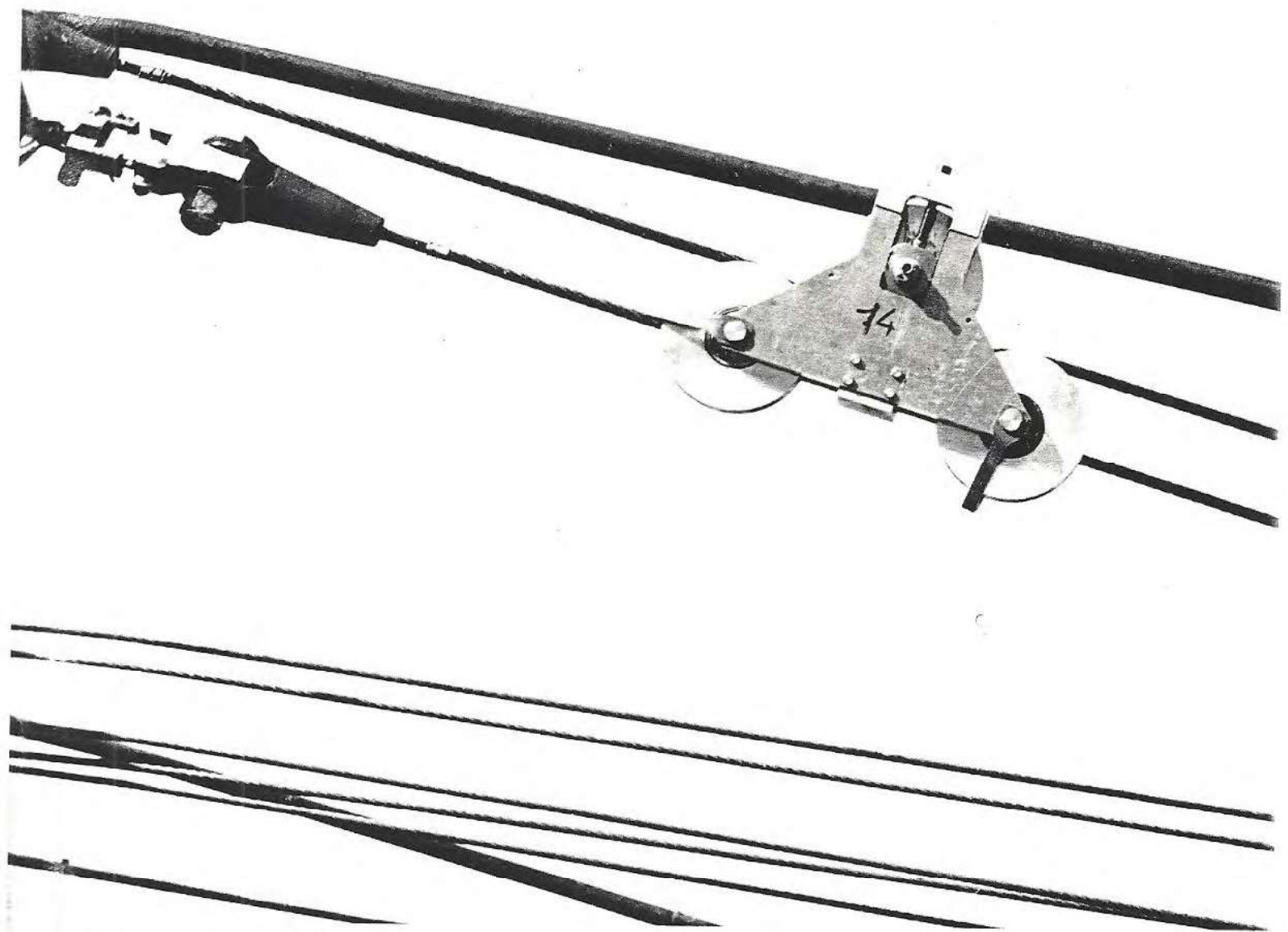
Programme des essais

Avant de le décrire, on rappellera les caractéristiques principales du modèle mécanique de calcul mis au point par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (L.C.P.C.), et que l'un des objectifs des essais était de tester dans la réalité.

Ce modèle permet de calculer les différentes grandeurs caractéristiques de l'installation dans les instants suivant la rupture de l'un des deux câbles « tracteurs » ou « lest ». Il ne concerne, dans son état actuel que les appareils à motrice inférieure et contrepoids supérieurs. L'engin du Salève répondait justement à cette définition.

Les autres particularités du modèle peuvent être résumées comme suit :

- Il est plan, tous les déplacements sont supposés s'effectuer dans le plan vertical.
- Les mouvements du porteur sont négligés. On assimile la trajectoire du chariot à un parabole et celle-ci est même, pour les déplacements suivant immédiatement la rupture, remplacée par sa tangente.
- Les cabines sont assimilées à des points matériels mobiles sur ces tangentes. D'autres études menées depuis concurremment avec celle du L.C.P.C. tendent d'ailleurs à montrer que cette hypothèse est majorante, et que le balancement des cabines entraîne une certaine atténuation des déplacements et des pics de tension.
- L'installation est supposée initialement au repos, cette hypothèse simplificatrice étant, aux yeux du L.C.P.C. justifiée par l'importance des phénomènes dynamiques, relativement au régime permanent antérieur.
- La poulie d'entraînement est fixe et le câble ne glisse pas sur elle. Le modèle fournissant les tensions du câble en entrée et en sortie de poulie motrice permet de vérifier a posteriori si cette condition reste bien remplie.



Capteur de tension sur câble libre.

- Les contrepoids ont des caractéristiques constantes pendant le mouvement, mais le modèle tient compte de l'intervention éventuelle d'un contrepoids additionnel et de son amortissement.
- Pour le calcul, chaque câble est assimilé à une succession de poutres travaillant en traction et en flexion et encastrées les unes dans les autres.
- La rupture est représentée par la suppression instantanée d'une demi-boucle (cette hypothèse a paru critiquable, dans la mesure où la propagation de l'onde de détension n'est pas instantanée).
- Un amortissement visqueux peut être introduit.
- Les pylônes peuvent être pris en compte.
- Les calculs sont faits sur un ordinateur de puissance moyenne (C.I.I IRIS 80).
- Le modèle fournit les tensions en tout point des câbles subsistants, leurs déplacements et ceux des éléments qui leur sont liés : chariots, cabines, contrepoids.

L'amortissement des effets dynamiques d'une rupture de câble, du fait des frottements en différents points de l'installation peut influencer notablement sur l'importance des phénomènes observés. Il convenait donc de tenter d'approcher un coefficient d'amortissement global du système. Tel a été l'objet d'une première manipulation, qui a consisté

à soulever les contrepoids des câbles « lest », l'installation étant évidemment à l'arrêt, et à les laisser retomber naturellement en observant leur mouvement.

Pour le reste, l'expérience devait permettre, après avoir provoqué la rupture de l'un des « tracteurs » de mesurer :

- les déplacements des 2 chariots le long du porteur
- les mouvements d'oscillation des cabines
- les déplacements des câbles subsistants, des contrepoids et des poulies (notamment de la poulie motrice pour détecter les éventuelles pertes d'adhérence)
- les tensions dans les câbles subsistants en divers points de l'installation.

Le comportement du système dépend non seulement des caractéristiques de l'installation, décrites plus haut, mais aussi de son état initial avant la rupture. Le calcul ayant montré que les effets dynamiques sont maximum lorsque les cabines vides se trouvent à 50 m des gares, c'est cette configuration qui a été retenue pour les essais.

L'hypothèse selon laquelle une rupture peut être valablement traduite par la suppression instantanée d'une boucle de câble méritait, en outre, d'être vérifiée. Deux essais avaient donc été prévus :

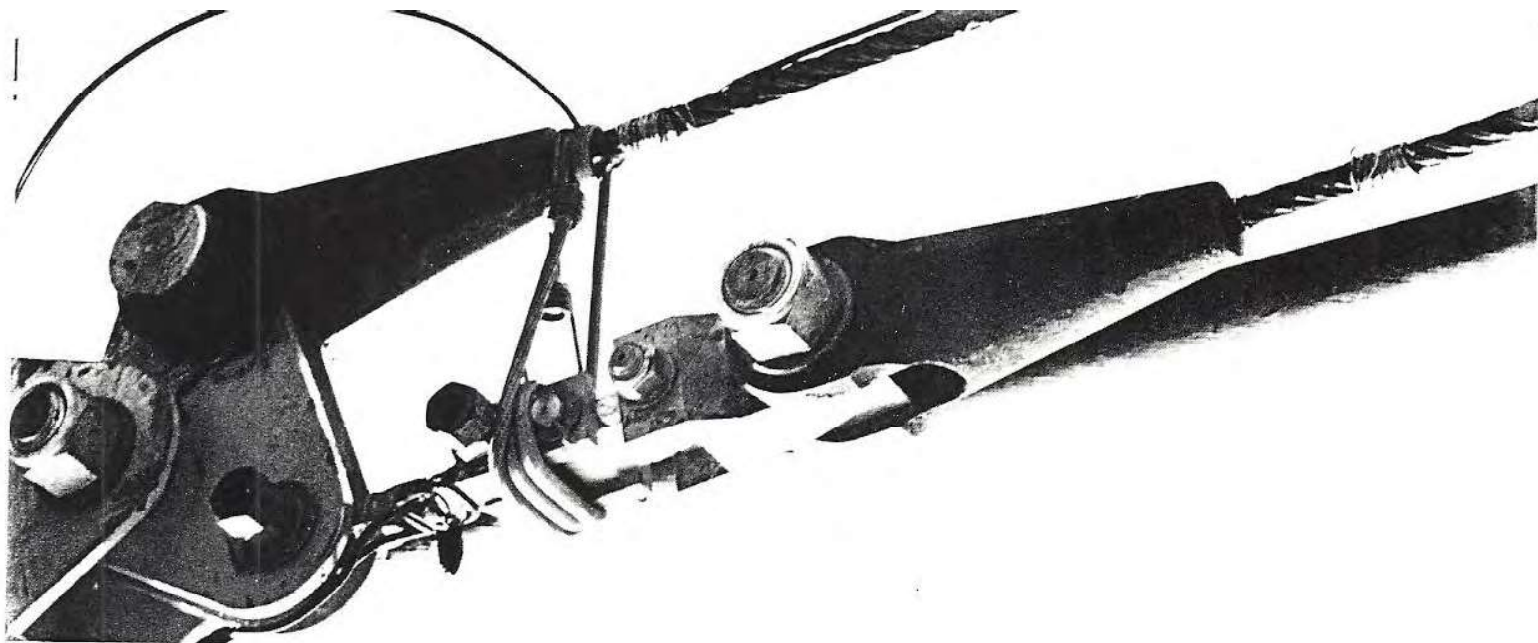
- l'un dans lequel les deux attaches de l'un des câbles « tracteur » étaient simultanément séparées des 2 chariots.
- l'autre dans lequel les deux ruptures devaient être décalées d'un intervalle de 0,3 sec correspondant au temps de parcours de l'onde de détension le long du câble rompu.

Il convenait enfin de prendre des précautions particulières pour assurer le succès de l'expérience, la démolition prochaine de l'installation nous ôtant tout espoir d'en recommencer une partie en cas de mauvais fonctionnement du dispositif de mesure. Outre une certaine redondance de celui-ci, il avait donc été prévu de faire deux fois chaque essai, en se plaçant dans des conditions identiques, et c'est ce qui rendait nécessaire le dispositif de récupération de câble qui sera décrit plus loin.

Dispositif expérimental

Liaison entre le câble à rompre et les deux chariots

Elle a été réalisée au moyen d'une manille pyrotechnique PYROMECA reliant le culot d'extrémité du câble tracteur à une nouvelle chape montée sur chaque chariot. Cette manille a pour apparence extérieure un



Dispositif d'équilibrage des tensions sur le chariot.

barreau percé à chaque extrémité de deux trous pour le passage des axes de liaison avec le culot et la chape ; une charge explosive montée dans sa partie centrale permet sa rupture. L'explosion est déclenchée par un signal électrique, le temps de réponse étant inférieur à 5 milliseconde, le signal était transmis par fil.

Dispositif de retenue du câble rompu

Il avait été conçu par les Câbleries de Bourg (C.C.G.) et devait permettre de retenir chaque extrémité de la boucle du câble « tracteur » rompu, pour permettre de la raccrocher respectivement en gare supérieure pour le chariot supérieur et en gare inférieure pour le chariot inférieur. Pour y parvenir, le câble à rompre était relié à deux élingues par l'intermédiaire de deux mordaiches ; l'autre extrémité de ces deux élingues étant retenue sur un ancrage fixe par l'intermédiaire de 2 treuils installés l'un en gare supérieure et l'autre en gare inférieure.

Dispositifs de mesure

Les divers points de mesure sont indiqués sur la figure n° 1. Les déplacements des câbles et des poulies (points : 2 - 3 - 11 - 23 - 31 - 32 - 33 - 34 - 35) ont été mesurés au moyen d'un détecteur de proximité comptant les tours faits par un galet pressé sur le câble ou la poulie, selon le système dit de la « roue codeuse ».

Le soulèvement éventuel des chariots (points : 10, 21) pouvait être mis en évidence grâce à un détecteur de proximité. Les mouvements de rotation de la cabine (points : 12, 24) ont été mesurés au moyen de potentiomètres angulaires.

Deux capteurs de traction à jauges de déformation permettaient de déterminer la tension du câble à rompre, en ses deux extrémités avant l'explosion (points : 13 - 25).

Pour mesurer la tension des câbles subsistants (points : 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 14 - 19 - 20 - 26 - 29 - 30), il a été nécessaire d'imaginer et de mettre au point un capteur nouveau susceptible d'être monté directement sur une portion libre du câble. La mesure est possible que le câble se trouve à l'arrêt ou qu'il soit en mouvement par rapport au capteur. (Voir photographie 2).

Les grands mouvements des câbles « tracteur » et « lest » sont enregistrés par photographie à cadence élevée (5 images/seconde).

Enfin, un appareillage spécial de visée optique, mis en œuvre par le L.C.P.C., a permis d'enregistrer directement le mouvement des chariots dans le plan vertical des câbles (points : 16 - 17 - 36 - 37).

L'ensemble des données a été enregistré sur 3 magnétophones différents, installés en gare supérieure, en gare inférieure, et dans la cabine inférieure. Un signal envoyé simultanément par fil sur les 3 magnétophones avant les essais doit permettre la synchronisation ultérieure des mesures.

L'appareillage de visée optique mentionné plus haut mis à part, l'ensemble des mesures a été réalisé par le Centre Technique des Industries Mécaniques de Saint-Etienne (C.E.T.I.M.).

Modifications apportées à l'installation

Les calculs laissaient prévoir une possibilité de soulèvement des chariots, et un balancement des cabines susceptible de les amener à heurter les câbles porteurs. Nous avons donc prévu la mise en place de contre galets destinés à prévenir le déraillement du chariot, et d'un prolongateur de suspente. Ces dispositifs sont bien visibles sur la photo n° 3.

Nous avons également jugé nécessaire d'installer à l'aval des chariots un dispositif permettant l'auto-alignement des 3 câbles « tracteur et lest » subsistants, afin d'éviter que le chariot ne puisse se mettre en travers du câble porteur. (Voir photo n° 4)

Les calculs avaient mis en évidence des possibilités de déraillement des câbles sur les poulies. Nous avons donc été conduits à prévoir un certain nombre de guides et de dispositifs anti-déraillement.

Quant à la mise en évidence par photographie rapide du mouvement complet des nappes de câble, elle a nécessité leur matérialisation par des cibles de 1,25 m de côté, implantées tous les 180 mètres.

Déroulement des essais

Six équipes différentes intervenaient en gare inférieure : C.E.T.I.M. (mesure et photographie), L.C.P.C. (mesure et photographie), gendarmerie, C.C.G. ; quatre autres en gare supérieure : C.E.T.I.M. (mesure et photographie) L.C.P.C. C.C.G. Toutes ces équipes étaient reliées à deux postes de

commandement installés l'un en gare inférieure, l'autre en gare supérieure et reliés par une ligne téléphonique directe. Le système de « topage » des magnétophones et le coffret de mise à feu des manilles étaient installés en gare supérieure.

Pour éliminer tout risque d'accident, la circulation était interrompue sur l'autoroute « Annemasse-Bellegarde » durant chaque essai.

La totalité des manipulations prévues ont pu être réalisées dans des conditions en général satisfaisantes.

Les essais de balancement des cabines et de soulèvement des contrepoids n'ont donné lieu à aucune difficulté particulière.

A la première rupture de câble, l'une des manilles explosives n'a pas fonctionné, si bien que les conditions prévues pour l'expérience n'ont pas été réalisées exactement. Mais comme nous nous sommes ainsi rapprochés des conditions d'une rupture réelle, les résultats des mesures sont tout de même attendus avec beaucoup d'intérêt.

Cet incident ne s'est pas répété pour les 3 autres essais. Deux d'entre eux se sont parfaitement déroulés. Au 3^e, le câble tracteur restant s'est accroché au porteur, ce qui le rendra plus difficilement exploitable ; et montre l'importance qui s'attache à prévoir la répétition d'essais de ce genre, particulièrement délicats à réaliser. Cela avait été fort heureusement le cas.

Aucune conclusion définitive ne peut être tirée très rapidement de l'ensemble de l'opération car il faut attendre de pouvoir disposer de tous les résultats des mesures, ce qui demandera plusieurs mois.

Il a néanmoins été possible de constater que les déplacements des chariots et des contrepoids sont moins importants que ceux qui avaient été déterminés par le calcul, qui ne prenait en compte aucun amortissement. L'influence des amortissements sur le comportement du système est donc indéniable. Il est vrai que dans le cas du Salève, la complexité des renvois de câbles entraîne très vraisemblablement un amortissement important.

Ce n'est pas nécessairement le cas partout, et il serait donc prématuré d'en tirer des conclusions générales.

J. DUBUISSON

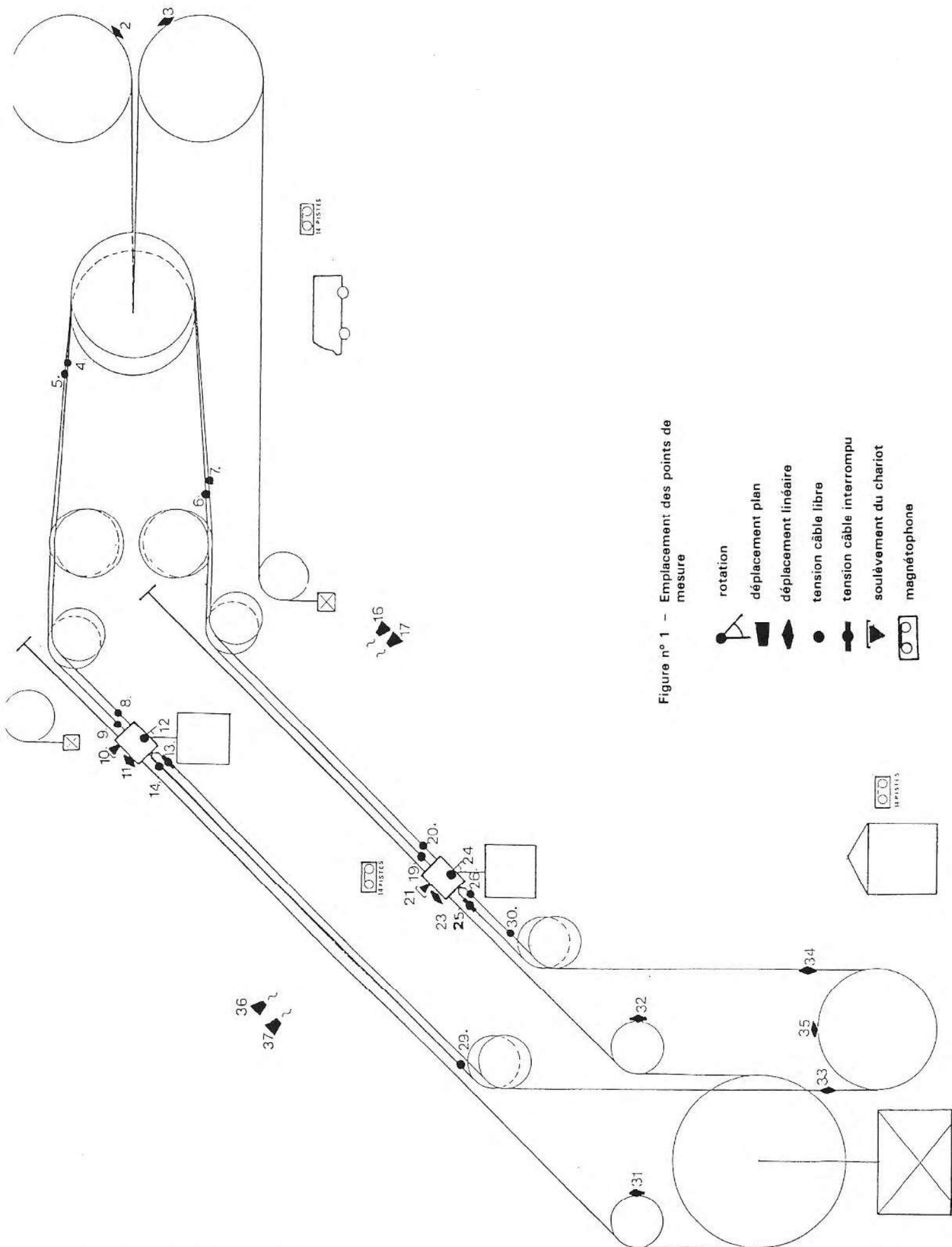


Figure n° 1 - Emplacement des points de mesure

- rotation
- déplacement plan
- déplacement linéaire
- tension câble libre
- tension câble interrompu
- soulèvement du chariot
- magnétophone