

La Très Grande Tyrolienne

(The Vertaco Traverse)

Présentation du projet

Description de l'ouvrage

Note de calcul



Table des matières

1	Présentation du projet	3
1.1	Introduction	3
1.2	Un précédent en 1996	3
1.3	Sélection du site	3
1.3.1	Avantages du site de la Combe Laval	3
1.3.2	Inconvénients du site de Combe Laval	4
1.3.3	Avantages du site de Valchevrière	4
1.3.4	Inconvénients du site de Valchevrière	4
1.4	Choix des méthodes de calcul	4
1.5	Dispositions constructives envisagées pour La Très Grande Tyrolienne	5
1.6	Considérations règlementaires	7
1.7	Variantes de La Très Grande Tyrolienne dans la Reculée de Combe Laval	7
1.8	Variantes de La Très Grande Tyrolienne à Valchevrière	8
1.9	Retombées médiatiques et économiques de La Très Grande Tyrolienne	8
2	Méthode de calcul	9
2.1	Considérations sur le calcul du poids linéique des câbles	9
2.2	Notations et conventions	9
2.3	Hypothèses de calcul	10
2.4	Efforts et géométrie dans un tronçon de câble	10
2.4.1	Calcul par les formules de Thibault	10
2.4.2	Calcul par la méthode de Jippé	11
2.5	Equilibre d'un câble avec une charge roulante	14
2.5.1	Principe du calcul	14
2.5.2	Résultats à obtenir	14
2.5.3	Condition d'arrêt	15
2.5.4	Algorithme	16
2.6	Calcul au vent	17
2.6.1	Calcul de la pression dynamique de base	17
2.6.2	Calcul de la force de poussée sur les câbles	17
3	Technologie et Mise en oeuvre	18
3.1	Principes généraux	18
3.2	Ancrages	18
3.3	Câbles de traction	19
4	Note de calcul de l'installation	21
4.1	Variantes envisagées	21
4.2	Variante : Tyrolienne de test de Lans	22
4.2.1	Données	22
4.2.2	Résultats câble seul	22
4.2.3	Résultats câble chargé	22
4.3	Variante : Tyrolienne de Combe Laval, variante CL 02 (fond de la reculée)	23
4.3.1	Données	23
4.3.2	Résultats câble seul	23
4.3.3	Résultats câble chargé	23
4.3.4	Diagramme enveloppe de la trajectoire du chargement	24
4.3.5	Configuration à mi-travée	25
4.4	Variante : Tyrolienne de Combe Laval, variante CL 03 (fond de la reculée)	26
4.4.1	Données	26
4.4.2	Résultats câble seul	26
4.4.3	Résultats câble chargé	26

4.4.4	Diagramme enveloppe de la trajectoire du chargement	27
4.4.5	Configuration à mi-travée	28
4.5	Variante : Valchevrière 1 (câbles lourds)	29
4.5.1	Données	29
4.5.2	Résultats câble seul	29
4.5.3	Résultats câble chargé	29
4.5.4	Diagramme enveloppe de la trajectoire du chargement	30
4.5.5	Configuration à mi-travée	31
4.6	Variante : Valchevrière 2 (câbles lourds)	32
4.6.1	Données	32
4.6.2	Résultats câble seul	32
4.6.3	Résultats câble chargé	32
4.6.4	Diagramme enveloppe de la trajectoire du chargement	33
4.6.5	Configuration à mi-travée	34
5	Instrumentation et mesures	35
5.1	Mesures environnementales	35
5.2	Mesures d'efforts et déplacements	35
5.3	Relevés topographiques	35

Chapitre 1

Présentation du projet

1.1 Introduction

Une idée osée

Après la soirée de gala qui a clôturé le congrès national de Périgueux en 2006, une idée folle est née dans la tête de quelques spéléologues.

Il s'agit de mettre en place une animation originale dans le cadre du congrès européen Vercors 2008 qui se tiendra en Août 2008 en France, à Lans-en-Vercors. Cette animation prendrait la forme d'une tyrolienne de très grande portée, conçue et mise en place par les spéléologues en utilisant le matériel et les méthodes de la spéléologie.

Le but de cette animation est de battre le record mondial de la plus longue tyrolienne en corde, qui est actuellement détenu par la **Velk'y Traversz** avec 847 .47 m de portée horizontale [Stibranyi, 1996], et de dépasser le kilomètre de portée horizontale.

1.2 Un précédent en 1996

Une tyrolienne de 847 .47 m avait été lancée en 1996 en Slovaquie dans le cadre du XIIe congrès international de spéléologie de la Chaux de Fonds (Suisse). Cette installation constituée d'une corde unique de 12 mm de diamètre franchissait les gorges de Zadiel à une hauteur maximale de plus de 300 m. Cette tyrolienne très médiatisée (plus de 15 000 spectateurs) a été franchie par une trentaine de personnes et un parachutiste s'en est élancé.

1.3 Sélection du site

Le massif du Vercors a l'avantage de posséder des gorges et des reculées bordées de falaises de grande hauteur propices à l'établissement de tyroliennes de grande portée et de hauteur de survol importante. Beaucoup de ces sites sont d'accès facile et certains ne survolent aucune voirie ni ligne électrique.

Le concepteur de **La Très Grande Tyrolienne** a une très nette préférence pour le site de la Reculée de Combe Laval, un site qualifié d'idéal pour l'installation de grandes tyroliennes puisque les têtes d'ancrage envisagées sont facilement accessibles, l'endroit est protégé du vent ¹ et aucune voirie n'est survolée. De plus, pas moins de 4 variantes peuvent être envisagées.

Un autre site est actuellement étudié et a les faveurs du comité d'organisation. Il s'agit du site de Valchevrière, un cirque bien protégé du vent et dénué de survol de voirie.

1.3.1 Avantages du site de la Combe Laval

1. Il s'agit d'une reculée, ce qui confère l'avantage de ne pas constituer un couloir aérien. Ceci peut être déterminant pour l'obtention des autorisations.
2. Cinq variantes de la tyrolienne sont envisageables. Les portées possibles vont de 1 050 m à 1 612 m.
3. La Reculée de Combe Laval comporte sur une de ses rives une falaise surplombante de plus de 250 m de hauteur. Cette caractéristique permet une très importante course pour les contrepoids.
4. Toutes les têtes d'ancrage des câbles envisagées pour les différentes variantes de la TVT sont très facilement accessibles.
5. Aucune voirie n'est survolée (pas de route ni de câbles EDF) dans une zone comprise entre le fond de la reculée et le monastère de Combe Laval. Ceci est un des atouts maîtres de ce site.

¹Le calcul montrera que les effets du vent conditionnent le dimensionnement de l'ouvrage, surtout pour les grandes portées

6. Les hauteurs de survol sont considérables, ce qui permet de réduire l'effort de mise en tension initiale des câbles et apporte une forte valeur ajoutée en termes de médiatisation. Pour la variante CL 04 du projet, le survol maximal pour une charge roulante de 220 kg dépasse 300 m.
7. De nombreux belvédères facilement accessibles et répartis le long de la reculée permettent au public d'observer l'installation. Un belvédère situé au fond de la reculée permet des mesures de hauteurs précises par méthodes topographiques.
8. La facilité de mise en oeuvre de la solution contrepoids et les importantes courses autorisées par la grande hauteur de la falaise et son dévers évitent d'avoir à utiliser une autre méthode de calcul beaucoup plus difficile à mettre au point.

1.3.2 Inconvénients du site de Combe Laval

1. Il est impossible de lancer les câbles par déroulage au sol : présence de broussailles
2. La sécurisation de la tête d'ancrage côté falaise doit être sans faille : la « marche » dépasse 250 m !
3. Un sauvetage vers le sol est impossible (survol importants).

1.3.3 Avantages du site de Valchevrière

1. Le maire de la commune abritant ce site est très favorable au projet
2. Aucune voirie n'est survolée
3. Deux variantes sont possibles
4. L'endroit est abrité du vent
5. Pas de couloir aérien
6. Les travées sont très longues : plus de 1300 m
7. Les ancrages sont très facilement accessibles

1.3.4 Inconvénients du site de Valchevrière

1. La ligne survole un couvert forestier important
2. La travée envisageable la plus courte dépasse 1200 mètres
3. Contrairement à Combe Laval, le déroulage des câbles impose l'utilisation d'un moyen hélicoptère
4. Les hauteurs de survol sont relativement faibles (une vingtaine de mètres à 200 m d'un ancrage)
5. La masse maximale de la charge roulante est de 250 kg
6. Le déroulage des câbles est plus difficile à Valchevrière qu'à Combe Laval

1.4 Choix des méthodes de calcul

Les méthodes de calcul diffèrent selon le choix des solutions techniques, et la préférence de l'équipe de conception est indiscutablement l'étude de la solution à contrepoids. En effet, la méthode de calcul pour cette disposition est à la portée du technicien supérieur ; les formules sont très facilement démontrables et les paramètres sont soit connus, soit compensables automatiquement. Il est démontré (ce que l'on fera dans l'analyse complète de l'ouvrage) que lorsque les contrepoids ne sont pas bloqués, les efforts aux ancrages des câbles restent constants quels que soient la position et le poids de la charge roulante. Cette possibilité de maîtrise complète des paramètres est en mesure d'emporter la décision pour l'obtention des autorisations ainsi que vis-à-vis des assurances.

La solution des ancrages passifs, bien qu'utilisable partout, passe par une méthode de calcul extrêmement difficile à mettre au point et à utiliser (équations intégrales de type Fredholm [Joie, 1982]², méthode des éléments finis) et qui nécessite de connaître avec une grande précision les caractéristiques internes des câbles (loi effort-allongement) puisque une légère variation d'un des paramètres peut influencer considérablement sur le résultat final : une variation de longueur du câble de moins d'un mètre se traduit par une variation de flèche de plusieurs mètres ... De plus, le fait de ne pas maîtriser le calcul n'est pas de bon augure pour l'obtention des autorisations. Ce n'est pas pour rien que les téléphéristes privilégient l'usage de contrepoids pour l'ancrage des câbles porteurs, et les téléphériques dépourvus de contrepoids sont relativement rares, surtout pour les lignes établies sur pylônes.

Dans le cadre du projet, nous allons utiliser deux méthodes de calcul :

1. La méthode utilisée par Montaz-Mautino (formules de Thibault) [Montaz-Mautino, 1985]
2. Une méthode développée spécialement pour le projet (« Méthode de Jippé »)

²La thèse de Mr JOIE présente une méthode de calcul d'arc pouvant être appliquée aux câbles en considérant ceux-ci comme des arcs à chargement non-suiveur négatif ; nous ferons une étude utilisant cette méthode dans le cadre du calcul au vent.

qui sont valables uniquement pour des tyroliennes à contrepoids. Il s'agit de méthodes itératives qui nécessitent l'usage d'un ordinateur. Le programme *GHTyro* développé spécialement calcule les efforts et la géométrie d'une installation pour toutes les configurations de chargement et de position de la charge roulante.

1.5 Dispositions constructives envisagées pour La Très Grande Tyrolienne

Le principe roi de **La Très Grande Tyrolienne** est celui de la redondance et du fonctionnement en parallèle.

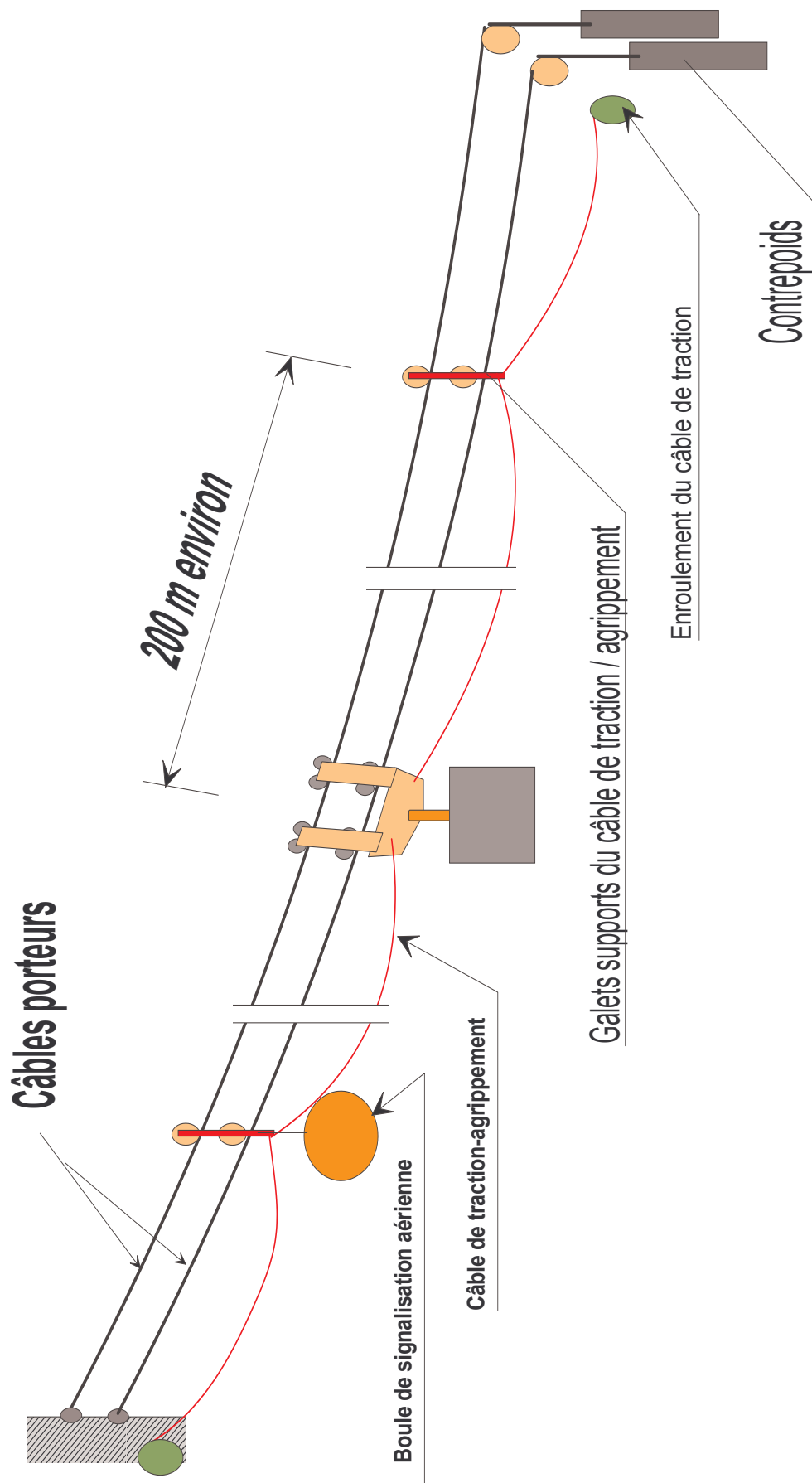


FIG. 1.1 – Schéma de principe de la tyrolienne

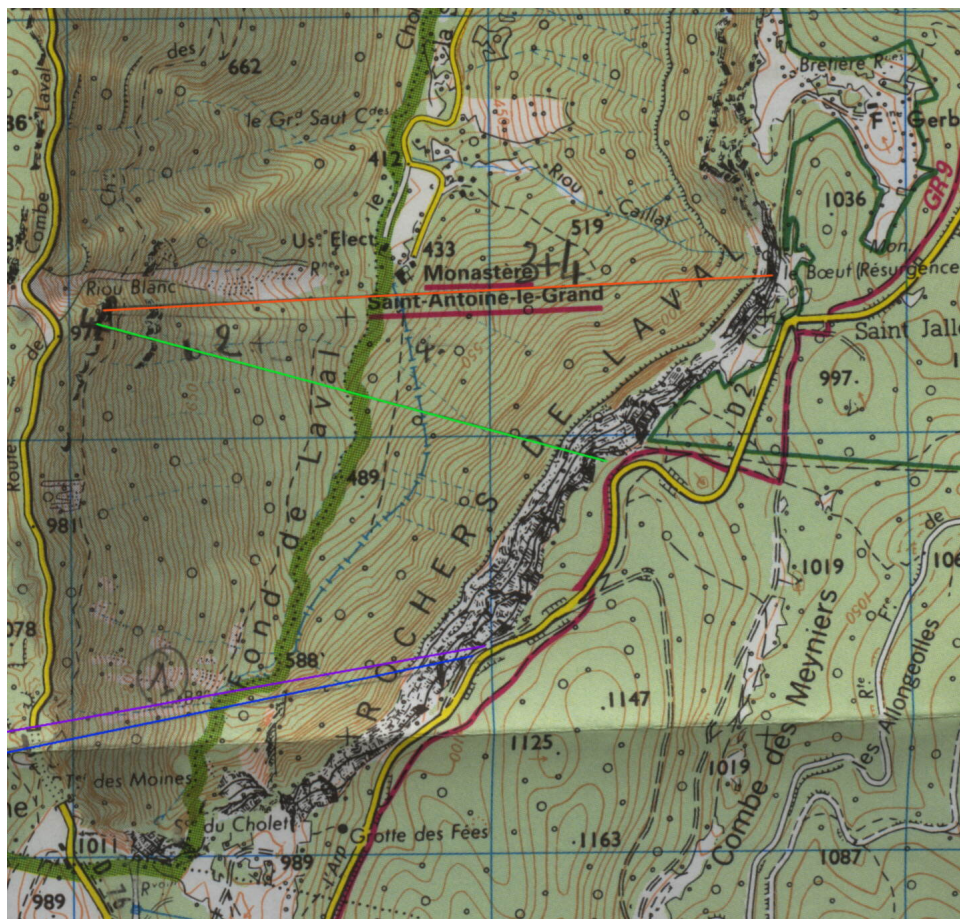


FIG. 1.2 – Tracés possibles de la La Très Grande Tyrolienne

1.6 Considérations règlementaires

Faute de réglementations adaptés pour la conception des grandes tyroliennes non ouvertes au public, trois textes servent de fil directeur :

- Le règlement du STRM-TG [STRM, 1990] pour les hypothèses de calcul et les coefficients de sécurité ;
- Les normes EPI concernant le matériel utilisé [EPI, 2003].
- Les recommandations de la Direction Générale de l'Aviation Civile pour la signalisation des ouvrages de grande hauteur. [DGAC, 2000]

1.7 Variantes de La Très Grande Tyrolienne dans la Reculée de Combe Laval

Plusieurs variantes de tyroliennes sont envisageables dans cette reculée. Les portées vont de 900 à 1 612 mètres. La plus symbolique mais aussi la plus audacieuse est la variante **CL05** dont une des extrémités se situe à l'intérieur de la *Grotte de l'Oeil du Boeuf*, en plein milieu d'une falaise de 255 m. Cependant, le calcul au vent nous amène à rejeter toutes les variantes excédant 1 500 m. Aussi, toutes les variantes désormais étudiées se situent en fond de reculée et n'excèdent pas 1 250 m.

Variante	Portée	Dénivelé	Remarques
CL01	400 m	10 m	Tyrolienne d'essai
CL02	1 250 m	90 m	En fond de reculée
CL03	1 050 m	55 m	En fond de reculée

1.8 Variantes de La Très Grande Tyrolienne à Valchevrière

Deux variantes de tyroliennes sont envisageables dans ce cirque. Les portées sont de 1 250 à 1 450 mètres.

Variante	Portée	Dénivelé	Remarques
VC01	1 250 m	220 m	Chemin de terre survolé
VC02	1 450 m	230 m	Départ au belvédère de Valchevrière

1.9 Retombées médiatiques et économiques de La Très Grande Tyrolienne

Le projet TVT, de par son caractère audacieux et spectaculaire, peut profiter aux différents protagonistes : fédérations spéléologiques, organisateurs, sponsors (notamment cordiers), collectivités locales, médias. Ne pas oublier que l'enjeu de **La Très Grande Tyrolienne** est de battre deux records du monde : celui de la plus longue tyrolienne en corde et celui de plus importante charge roulante supportée par une tyrolienne en corde.

Le succès du projet **La Très Grande Tyrolienne** est à porter au crédit de leurs organisateurs, qui sont avant tout des spéléologues.

Les fabricants de cordes peuvent voir en **La Très Grande Tyrolienne** une vitrine de leur savoir-faire. De plus, un tel projet peut avoir des retombées publicitaires considérables (ex : La corde « **La Très Grande Tyrolienne** » 11 mm de chez « Cordier », « Vertaco Traverse, la corde du record du monde », etc ...). Le sponsor qui acceptera de fournir les cordes de la tyrolienne³ est assuré de bénéficier d'une publicité plus efficace que des encarts dans des magazines, tout en étant moins coûteuse pour lui.

Les collectivités locales et particulièrement les communes qui « hébergeront » la tyrolienne seront ravies de pouvoir annoncer qu'elles ont été le théâtre d'un record du monde. Il faut avoir à l'esprit que la tyrolienne **Velk'y Traversz** a attiré 15 000 spectateurs [Stibranyi, 1996] pendant 10 jours.

Enfin, la TVT est susceptible d'attirer les médias (presse, internet, TV), très friandes de sensationnel et d'originalité.

³Il est intéressant de noter que l'équipe de **La Très Grande Tyrolienne** ne sollicite que le *prêt* de matériel.

Chapitre 2

Méthode de calcul

En ce qui concerne l'étude avec sollicitations verticales, le calcul de la **La Très Grande Tyrolienne** utilise deux méthodes différentes : la méthode de Thibault et la méthode de Jippé. Etant donné la prépondérance des effets du vent transversal devant les sollicitations de gravité, le calcul au vent doit être conduit en considérant la tyrolienne ancrée aux deux extrémités. Ce calcul très compliqué (effets du second ordre) peut utiliser la méthode aux équations intégrales [Joie, 1982] ou bien effectué par simulations sur code de calcul.

2.1 Considérations sur le calcul du poids linéique des câbles

Les constructeurs de cordes spéléo fournissent une masse linéique exprimée en g/m correspondant à une corde sèche.

De par leur structure tressée, les cordes se gorgent d'eau et les constructeurs fournissent généralement une masse linéique pour une corde détremée.

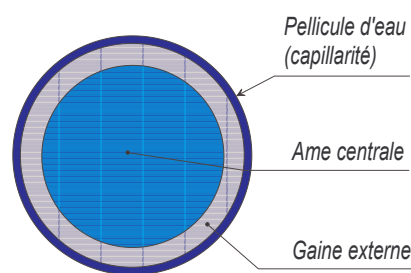
Les traitements « everdry » ne sont pas pris en compte et nous considérerons que les cordes présentent un volume de vides égal à 20% de la section.

Pour les surcharges dues à l'eau, nous considérerons également une pellicule d'eau de 0.5 mm d'épaisseur (pellicule causée par la capillarité).

Il convient d'évaluer les effets dynamiques d'une forte averse et d'en tenir éventuellement compte (se renseigner sur la pression dynamique auprès de la météo ; cet effet peut ne pas être négligeable)

Le calcul de **La Très Grande Tyrolienne** traitera les deux configurations : au sec et au mouillé, ce dernier cas étant de loin le plus défavorable.

FIG. 2.1 – Section d'un câble gorgé d'eau



2.2 Notations et conventions

Données	
L_0	Longueur horizontale de la travée (m)
H_0	Dénivellation de la travée (m)
w	Poids du câble (kg/m)
g	Accélération de la pesanteur (m/s^2)
Q	Masse de la charge roulante (kg)
N_0	Effort de mise en tension du côté du contreponds (daN)
X_p	Abscisse de la charge roulante (m)

Variables de calcul	
Y_p	Ordonnée de la charge roulante (m)
L_c	Longueur de la corde entre les ancrages (m) : $L_c = \sqrt{L_0^2 + H_0^2}$
Résultats	
<i>Câble seul</i>	
f_0	Flèche du câble seul à mi-portée (m)
S_0	Longueur du câble (m)
N_1	Effort normal à l'extrémité opposée (daN)
N_{min}	Effort normal minimal (daN)
N_{max}	Effort normal maximal (daN)
α_0	Inclinaison du câble à l'ancrage gauche (degrés)
α_1	Inclinaison du câble à l'ancrage droit (degrés)
Résultats	
<i>Câble chargé</i>	
f_1	Flèche du câble chargé (m)
N_{0g}	Tronçon gauche : Effort normal à l'appui gauche (daN)
N_{1g}	Tronçon gauche : Effort normal à l'appui droit (daN) ; $N_{1g} = N_p = N_{0d}$
α_{0g}	Tronçon gauche : Angle à l'appui gauche (degrés)
α_{1g}	Tronçon gauche : Angle à l'appui droit (degrés)
N_p	Effort normal au droit de l'équipage mobile (daN)
δ_p	Déflexion angulaire (degrés) ; $\delta_p = \alpha_{0d} - \alpha_{1g}$
N_{0d}	Tronçon droit : Effort normal à l'appui gauche (daN)
N_{1d}	Tronçon droit : Effort normal à l'appui droit (daN)
α_{0d}	Tronçon droit : Angle à l'appui gauche (degrés)
α_{1d}	Tronçon droit : Angle à l'appui droit (degrés)
Fonctions	
<i>Les fonctions de t s'expriment dans un repère local au tronçon</i>	
$S(x)$	Longueur développée du câble entre 0 et x (m)
$S_g(t)$	Longueur développée du câble entre 0 et t pour le tronçon gauche (m)
$S_d(t)$	Longueur développée du câble entre 0 et t pour le tronçon droit (m)
$N_g(t)$	Effort normal dans le tronçon gauche en fonction de t (daN)
$N_d(t)$	Effort normal dans le tronçon droit en fonction de t (daN)

2.3 Hypothèses de calcul

1. La position des appuis est supposée fixe
2. Le câble est infiniment flexible
3. Le câble est fortement tendu et peut être modélisé par une parabole et non par une chaînette (simplification des calculs de détermination de l'équation du câble)
4. Le poids du câble est uniformément réparti et dirigé vers le bas
5. Le passage d'un état d'équilibre à un autre est supposé lent
6. Les effets des sollicitations verticales et horizontales sont supposés indépendants
7. La charge roulante circule sans agrippement ni frottement sur le câble (efforts normaux identiques de part et d'autre de la charge roulante)
8. Les efforts d'agrippement et de traction de la charge roulante sont repris par un câble auxiliaire

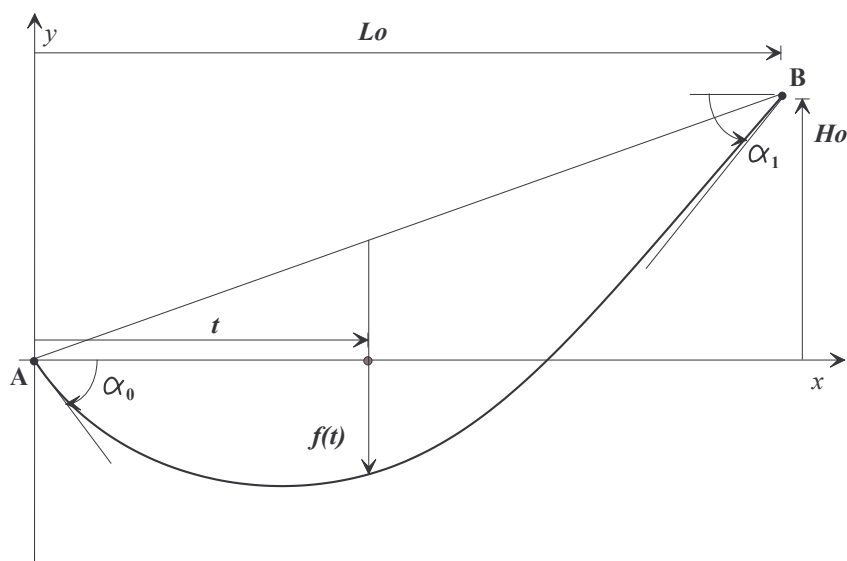
2.4 Efforts et géométrie dans un tronçon de câble

Pour les deux méthodes utilisées, on considère dans les calculs les notations pour le câble seul.

2.4.1 Calcul par les formules de Thibault

Cette méthode a été utilisée par Montaz-Mautino pour le calcul du téléphérique de Cauterets [Montaz-Mautino, 1985] et comporte les étapes suivantes :

FIG. 2.2 – Notations dans un tronçon de câble



1. Effort normal moyen dans le câble

$$\bar{T} = N_0 + w \cdot g \cdot \frac{H_0}{2} \text{ si } H_0 > 0$$

$$\bar{T} = N_0 - w \cdot g \cdot \frac{H_0}{2} \text{ si } H_0 < 0$$

2. Variables intermédiaires \bar{d} et L_c (longueur de la corde entre appuis)

$$L_c = \sqrt{L_0^2 + H_0^2}$$

$$\bar{d} = \frac{w \cdot g \cdot L_c}{2 \cdot \bar{T}}$$

3. Calcul de la composante horizontale de l'effort normal H_T

$$\alpha = \arccos \frac{L_0}{L_c}$$

$$H_T = \frac{w \cdot g \cdot L_0}{2 \cdot \bar{d}} \cdot \left[1 - \left(\frac{\cos^2 \alpha}{3} + \frac{2}{3} \right) \cdot \frac{\bar{d}^2}{2} \right]$$

4. Calcul de la flèche à mi-travée f_0

$$f_0 = \frac{w \cdot g \cdot L_c^2}{8 \cdot \bar{T}} \cdot \left[1 + \bar{d}^2 \cdot \left(\frac{\cos^2 \alpha}{3} + \frac{1}{4} \right) \right]$$

5. Calcul de la longueur du câble

$$S = L_c \cdot \left(1 + \frac{\cos^2 \alpha}{6} \cdot \bar{d}^2 \right)$$

2.4.2 Calcul par la méthode de Jippé

Formules préliminaires

La méthode de Jippé a été mise au point par le concepteur de **La Très Grande Tyrolienne** en 1998, bien avant qu'il prenne connaissance des formules de Thibault décrites précédemment.

Cette méthode de calcul itérative est basée sur la parabole décrivant le câble. Elle utilise la formule donnant la longueur d'un arc de parabole entre 0 et H_0 .

1. Parabole décrivant le câble

Le câble est décrit par un arc de parabole, passant par l'origine, d'équation $P(x) = x \cdot (a \cdot x + b)$ et dont la dérivée est $P'(x) = (2 \cdot a \cdot x + b)$. Dans le cas de notre câble, nous disposons de 3 paramètres pour définir l'équation de la parabole : l'angle α_0 et les coordonnées L_0 et H_0 .

Les conditions aux limites $x = 0$ et $x = L_0$ sont :

$$P'(0) = b = \tan \alpha_0$$

$$P(L_0) = a \cdot L_0^2 + \tan \alpha_0 \cdot L_0 = H_0$$

d'où

$$a = \frac{H_0 - \tan \alpha_0 \cdot L_0}{L_0^2}$$

$$b = \tan \alpha_0$$

$$\tan \alpha_1 = 2 \cdot \frac{H_0 - \tan \alpha_0 \cdot L_0}{L_0^2} \cdot L_0 + \tan \alpha_0$$

2. Calcul de la longueur du câble décrit par sa parabole

On rappelle que la longueur d'un arc de courbe d'équation $y = f(x)$ continue et dérivable sur $[a; b]$ est

$$L(x) = \int_a^b \sqrt{1 + (f'(x))^2} dx$$

Pour un câble fortement tendu, la courbe d'équilibre peut être assimilée à une parabole d'équation $y = x(a \cdot x + b)$ et non à la classique chaînette $y = h \cdot \cosh \frac{x}{h}$. En effet, le calcul du paramètre h ne peut se faire que d'une manière approchée¹, alors que le paramétrage des paraboles est facile, stable et rapide. Un calcul sous Matlab, Mathcad (ou par un fort en maths!) nous montre que l'intégrale entre 0 et L_0 de

$$f(x) = \sqrt{1 + (2 \cdot a \cdot x + b)^2}$$

a pour expression²

$$S(x) = \frac{1}{4 \cdot a} \left[(2 \cdot a \cdot x + b) \cdot \sqrt{1 + (2 \cdot a \cdot x + b)^2} + \ln \left| 4 \cdot a \cdot (2 \cdot a \cdot x + b) + \sqrt{1 + (2 \cdot a \cdot x + b)^2} \right| \right]_0^{L_0}$$

3. Calcul des efforts et directions aux extrémités

La Fig 2.3 montre le câble en équilibre et son triangle des forces associé. Les efforts aux extrémités du tronçon sont portés par les tangentes du câble aux deux extrémités.

Le calcul des efforts est basé sur la résolution du triangle associé (loi des sinus).

Nous calculons le poids total du tronçon : résultante P

$$P = w \cdot g \cdot S(L_0)$$

puis nous déterminons facilement les efforts normaux N_0 et N_1 :

Effort à l'extrémité droite du câble

$$N_1 = P \cdot \frac{\sin(\alpha_0 + \frac{\pi}{2})}{\sin(\alpha_1 - \alpha_0)}$$

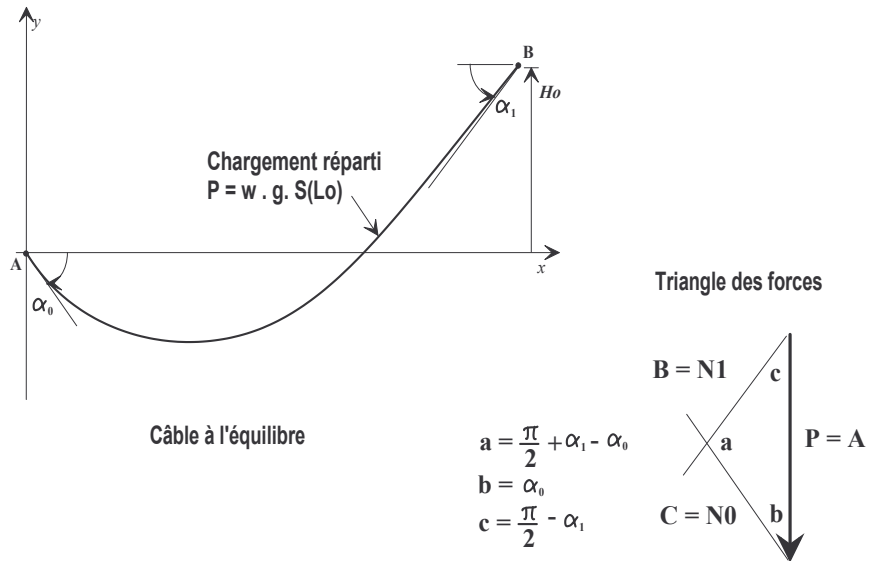
Effort à l'extrémité gauche du câble

$$N_0 = P \cdot \frac{\sin(\frac{\pi}{2} - \alpha_1)}{\sin(\alpha_1 - \alpha_0)}$$

¹Par contre le calcul de la longueur développée d'un arc de chaînette est désarmant de simplicité ...

²La sous-expression $(2 \cdot a \cdot x + b)$ revient plusieurs fois. L'implémentation informatique (comme dans le source L^AT_EX de ce document aussi d'ailleurs) passe par une sous-fonction

FIG. 2.3 – Equilibre d'un tronçon de câble



Algorithme de calcul

L'algorithme de calcul est fondé sur la variation de l'angle α_0 dont la valeur de départ est égale à

$$\alpha_0 = \arccos \frac{L_0}{L_c} - \varepsilon$$

où ε est une très petite valeur destinée à éviter une division par zéro.

On note N_{0p} l'effort normal à gauche pour la configuration provisoire du câble.

On détermine alors l'équilibre du câble : géométrie et efforts. On trouve alors une valeur très élevée de N_{0p} .

On décrémente alors α_0 d'une valeur Δ_θ (typiquement quelques minutes d'arc) et on recalcule la nouvelle configuration. L'effort N_{0p} diminue.

La condition de sortie des itérations est satisfaite dès que

$$N_{0p} \leq N_0$$

```

[Variables locales : efforts]
 $N_{0p}$  : real ;
 $N_{1p}$  : real ;
[Variables locales : angles]
 $\alpha_{0p}$  : real ;
 $\alpha_{1p}$  : real ;
[Valeur du pas de décrémentation angulaire]

 $\delta$  : real ;
[Variables locales : longueur du câble et poids total]
 $S_p$  : real ;
 $P_p$  : real ;
 $\delta \leftarrow 0.00001$  ;
[Valeur de départ de l'angle  $\alpha_{0p}$  : inclinaison de la corde moins une très petite valeur]

 $\alpha_{0p} \leftarrow \arccos \frac{L_0}{\sqrt{L_0^2 + H_0^2}} - 0.000001$  ;
Tant que ( $N_{0p} \geq N_0$ ) faire
    Equation de la parabole ayant  $\alpha_{0p}$  pour angle de la tangente en 0 ;
    Calculer  $\alpha_{1p}$  ;
    Calculer  $S_p$  ;
     $P_p \leftarrow w \cdot g \cdot S_p$  ;
    Calculer  $N_{0p}$  ;
    Calculer  $N_{1p}$  ;
     $\alpha_{0p} \leftarrow \alpha_{0p} - \delta$  ;
Fait
[retourner les résultats]
 $N_0 \leftarrow N_{0p}$  ;
 $N_1 \leftarrow N_{1p}$  ;
 $\alpha_0 \leftarrow \alpha_{0p}$  ;
 $S_0 \leftarrow S_p$  ;

```

Algorithme 1: Algorithme de mise en équilibre du câble

2.5 Equilibre d'un câble avec une charge roulante

2.5.1 Principe du calcul

Le calcul de la géométrie et des efforts dans la configuration chargée se fait, encore une fois, par un procédé itératif. Partant de la configuration d'équilibre du câble déchargé, on considère l'équipage mobile comme un appui qui ne peut se déplacer que verticalement. On décrémente alors la cote de l'équipage mobile d'une petite valeur puis on recalcule la configuration des deux tronçons de câble $\check{A}C$ et $\check{C}B$ (voir Fig 2.4). Le câble change alors de géométrie et par conséquent la configuration d'équilibre au noeud C se modifie. On répète alors ces étapes jusqu'à satisfaire une condition d'arrêt. Nous obtenons ainsi la configuration définitive de l'ouvrage, ce qui nous permet de calculer de nombreuses valeurs et de tracer des diagrammes. En calcul programmé, il est très facile de traiter ce problème; de plus, le traitement est suffisamment rapide pour permettre un calcul pour de nombreuses positions en x de la charge roulante. La ligne joignant les cotes de l'équipage mobile pour tout abscisse x nous fournit la trajectoire de cet équipage. Si nous introduisons le profil du terrain (et *GHTyro* le permet), il est possible de calculer la hauteur de survol et de faire des simulations. Cette méthode présente l'avantage de fonctionner avec tous les procédés d'étude de tronçons de câble et ainsi de permettre une bonne factorisation³ du code.

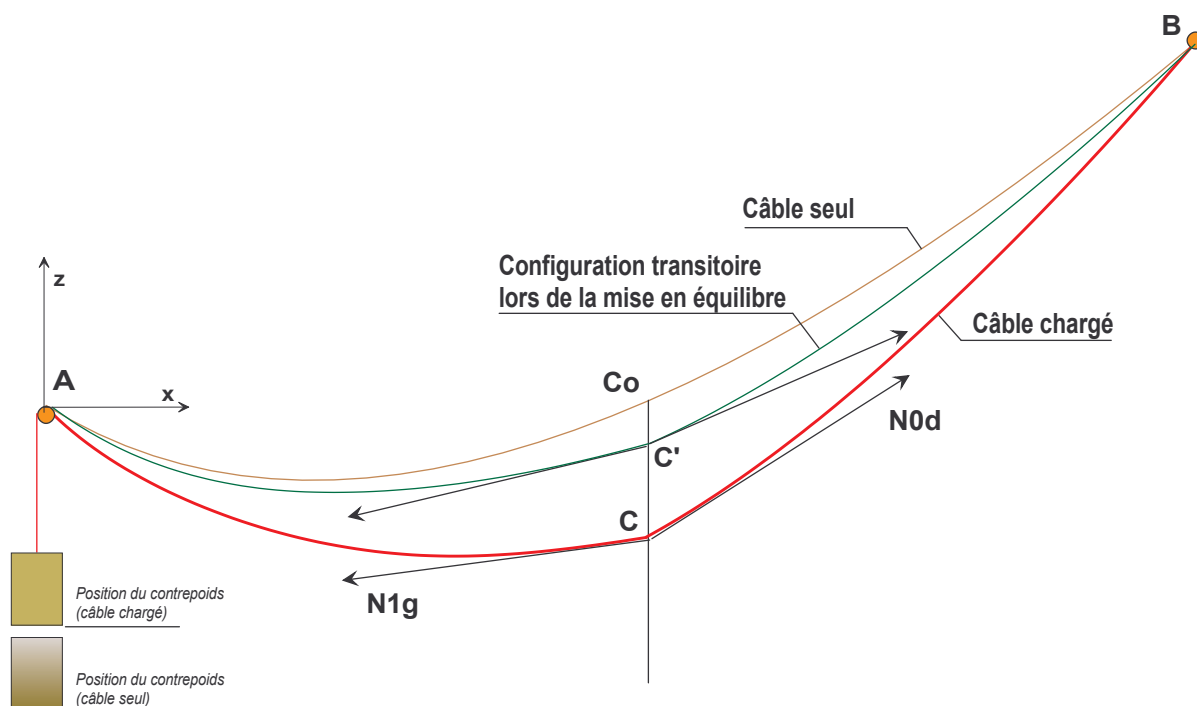
2.5.2 Résultats à obtenir

La méthode de calcul permet d'obtenir de nombreux résultats, tant mécaniques que géométriques.

1. Longueur du câble seul : S_0
2. Longueur du câble chargé : S_c

³La factorisation d'un code est son découpage en petites unités réutilisables et combinables à volonté. Un code agencé ainsi est compact, sûr et facilement maintenable.

FIG. 2.4 – Mise en équilibre du câble



3. Effort normal en tout point du câble : $N(s)$
4. Flèche du câble seul : f_0
5. Polynômes d'équilibre des deux tronçons du câble
6. Trajectoire de l'équipage mobile
7. Déplacement du contreponds : $\delta = S_c - S_0$
8. Hauteur de survol en tout point si l'on connaît le profil du terrain.

2.5.3 Condition d'arrêt

Nous rappelons que le principe de la méthode est basé sur la variation de l'altitude de l'équipage mobile. Nous avons par hypothèse : $N_{1g} = N_{0d}$ au droit de l'équipage mobile. L'équilibre au noeud C s'écrit (voir Fig 2.5)

$$\vec{N}_{1g} + \vec{N}_{0d} + \vec{P} + \vec{R}_H = \vec{0}$$

où \vec{R}_H est la réaction horizontale reprise par le câble de traction, équation qui devient en composantes :

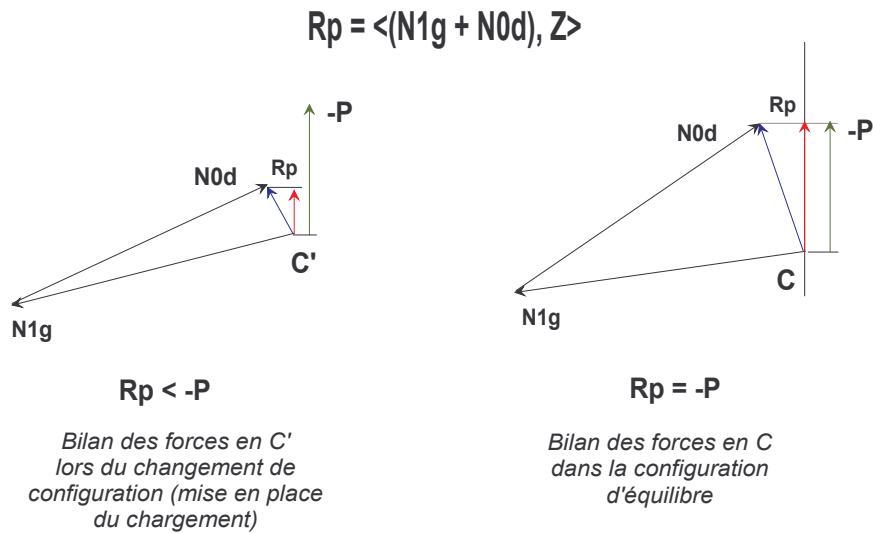
$$N_C \cdot (\cos \alpha_{Od} - \cos \alpha_{1g}) + R_H = 0$$

$$N_C \cdot (\sin \alpha_{Od} - \sin \alpha_{1g}) - P = 0$$

où

$$N_C = \left\| \vec{N}_{1g} \right\| = \left\| \vec{N}_{0d} \right\|$$

FIG. 2.5 – Bilans des forces au niveau de la charge roulante



2.5.4 Algorithme

[Structures décrivant les tronçons de câble ; TG : Tronçon gauche, TD : Tronçon droit]

TG : **TTravee** ;

TD : **TTravee** ;

[Variables locales]

N_{0p} : **real** ;

N_{1p} : **real** ;

R_p : **real** ;

[Variables locales : altitude du point C]

Z_0 : **real** ;

Δ_z : **real** ;

[Calculs préliminaires ; abscisse fixée en X_0]

TG.L₀ ← X_0

TD.L₀ ← $L_0 - X_0$

Z_0 ← (cote du câble seul en X_0)

Δ_z ← (décrément)

Z_0 ← $Z_0 - \Delta_z$;

[Passage de la configuration déchargée à la configuration chargée]

Tant que ($-R_p \leq P$) **faire**

[Définir la géométrie des deux tronçons]

TG.H₀ ← Z_0 ;

TD.H₀ ← $H_0 - Z_0$;

Calculer les efforts et la géométrie dans le tronçon gauche (cf Algorithme 1) ;

[Transmission de l'effort d'un tronçon à l'autre]

TD.N₀ ← TG.N₁ ;

Calculer les efforts et la géométrie dans le tronçon droit (cf Algorithme 1) ;

[Etudier l'équilibre au noeud C]

Calculer la résultante \vec{R}_c des forces au noeud C ;

[Projection verticale de la résultante (produit scalaire)]

R_p ← $\vec{R}_c \cdot \vec{Z}$;

[Décrément de l'altitude du point C]

Z_0 ← $Z_0 - \Delta_z$;

Fait

[Résultats obtenus : configuration complète du câble chargé]

2.6 Calcul au vent

Pour les tyroliennes et téléphériques de grande portée, il est indispensable d'effectuer un calcul au vent. Ce calcul peut conditionner le dimensionnement de l'ouvrage. Les actions du vent sont responsables de la destruction de lignes électriques à haute-tension lors des grandes tempêtes. Les effets du vent sont modélisables par une charge uniformément répartie appliquée perpendiculairement au plan vertical contenant les câbles.

Les actions du vent sont appliquées horizontalement et se composent avec les actions gravitaires. Le principe de superposition de la mécanique des structures permet un calcul séparé pour les axes \vec{y} et \vec{z} .

2.6.1 Calcul de la pression dynamique de base

Cette valeur traduit l'action d'un fluide (ici de l'air) sous l'effet de la vitesse déplacement de ce fluide. Elle varie avec le carré de la vitesse et a pour expression

$$P_{dyn} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot V^2$$

où ρ est la masse volumique du fluide (1. 300 kg/m³ pour l'air) et V la vitesse de ce fluide en m/s. La valeur obtenue est une pression exprimée en Pa.

Pour une vitesse du vent de 140 km/h, la valeur de P est de 800 Pa (limite réglementaire [STRM, 1990]).⁴

2.6.2 Calcul de la force de poussée sur les câbles

De la pression dynamique et des caractéristiques du câble on peut en déduire la force horizontale de poussée par mètre linéaire de câble. Cette force a pour expression

$$W = C_x \cdot P_{dyn} \cdot \Phi$$

où

C_x est le coefficient de forme ; $C_x = 1,125$ [STRM, 1990] pour un câble cylindrique

Φ est le diamètre du câble

Pour une vitesse du vent de 140 km/h, la force répartie appliquée sur un câble de 12 mm de diamètre dépasse 1 200 g/m !

Il vient donc que les effets du vent *sont prépondérants* devant les sollicitations verticales sur la tyrolienne.

Dans le cadre du projet, le comportement au vent est étudié par simulations sur logiciel *GHTyro*.

⁴Règlement du STRM-TG, article 4.211. Correspond à un vent de 140 km/h).

Chapitre 3

Technologie et Mise en oeuvre

3.1 Principes généraux

La Très Grande Tyrolienne fait appel aux méthodes et matériels de la spéléologie. Cependant, des dispositions spéciales sont à prendre en raison du caractère exceptionnel de cette installation.

Le principe de redondance est à la base de la conception de l'ouvrage, tant pour les méthodes de calcul (deux procédés indépendants et code de calcul fonctionnant en boucle fermée avec auto-contrôle) que pour les éléments porteurs (deux câbles porteurs indépendants, multiplicité des points d'amarrage aux têtes d'ancrage, reprise de l'effort en cas de rupture ou déplacement excessif des contrepoids)

Les ancrages sont l'objet d'une attention particulière et la solution envisagée consiste en amarrages sur tambours d'enroulement puisque ce système préserve plus de 95% de la résistance à la rupture des câbles.

3.2 Ancrages

Les noeuds affaiblissent fortement les câbles (jusqu'à 60% de diminution de résistance). Le plus résistant d'entre eux est le noeud en neuf qui préserve 70% de la résistance du câble.

C'est pour cette raison que l'équipe de conception privilégie des dispositifs d'ancrage garantissant une résistance maximale pour les câbles :

- Boucles manufacturées (brevet Petzl-Béal)
- Enroulement des câbles autour de tambours d'ancrage

Cette dernière disposition est très utilisée pour l'ancrage statique des câbles porteurs des téléphériques (voir Fig 3.1).

FIG. 3.1 – Ancrage de câbles par enroulement, sur un téléphérique



Le fonctionnement d'un ancrage par enroulement est basé sur le frottement câble/tambour, régi par les formules suivantes :

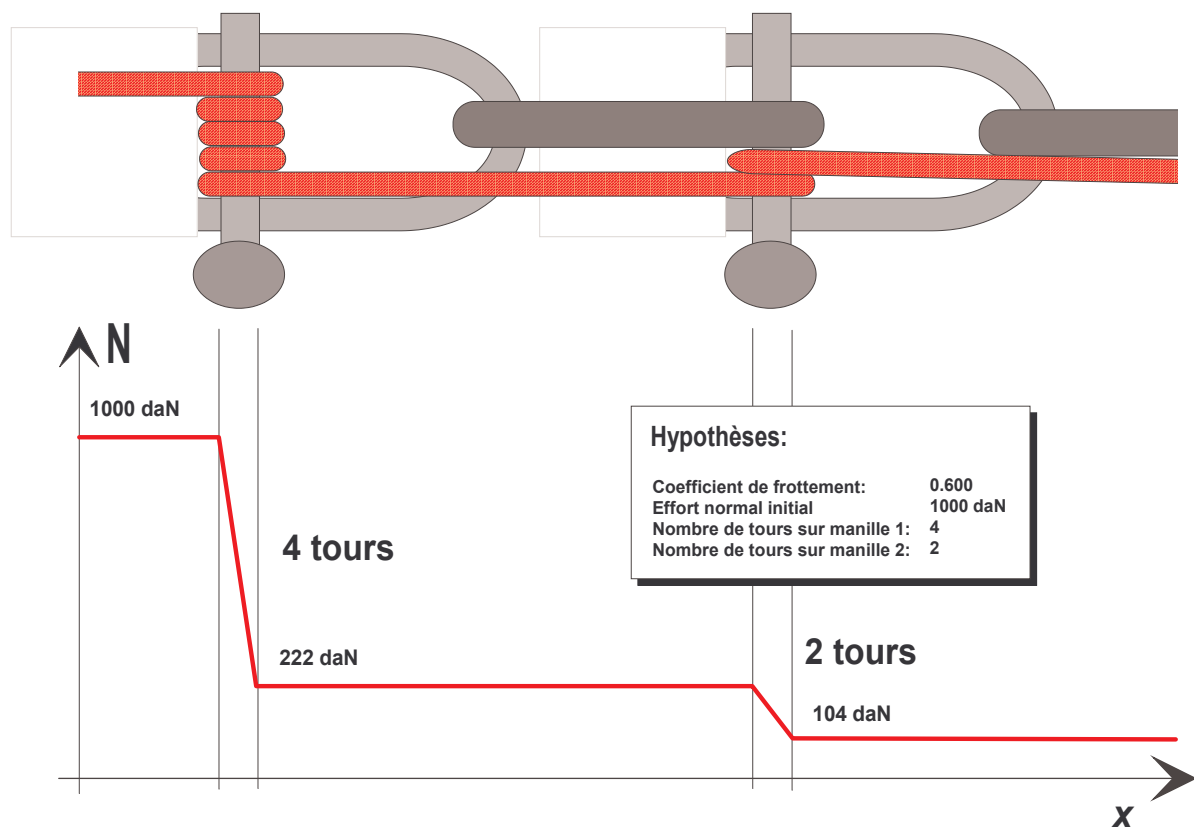
$$\frac{N_0}{N_1} = \exp(\pm \psi \cdot \alpha)$$

avec :

N_0	Effort normal en entrée d'enroulement
N_1	Effort normal en sortie d'enroulement
ψ	Coefficient de frottement
α	Angle d'enroulement en radians

Un des objectifs de **La Très Grande Tyrolienne** est d'utiliser du matériel standard et de recourir le moins possible à des montages spécifiques. Il en est ainsi des ancrages des câbles porteurs. Nous avons déjà signalé que les efforts ne doivent pas être repris directement par des noeuds. Une solution élégante est d'utiliser de grosses manilles du commerce ¹ sur la tige desquelles viennent s'enrouler les câbles. Le diamètre des tiges est suffisamment grand pour rendre négligeables les pertes de résistances dues aux faibles rayons de courbure ². La Fig 3.2 présente le schéma de principe d'un ancrage avec son diagramme d'effort normal associé.

FIG. 3.2 – Système d'ancrage utilisant des manilles et diagramme de N associé



Il est évidemment indispensable de disposer les manilles de telle façon que les câbles tendent à visser la goupille !. L'autre avantage de ce système est de permettre de disposer plusieurs manilles en série afin de réduire l'effort résiduel, qui est repris par un simple noeud.

3.3 Câbles de traction

Contrairement aux câbles porteurs, qui doivent être d'un seul tenant, une disposition constructive qui a les faveurs de l'équipe de **La Très Grande Tyrolienne** permet d'utiliser des tronçons standard de 200 m et autorise même l'emploi des noeuds.

Le principe est le même que les cavaliers intermédiaires sur les téléphériques à deux câbles porteurs : ces dispositifs ont, parmi leurs très nombreux avantages, celui de permettre de réduire le diamètre des câbles tracteurs.

¹Le descendeur TUBA de Petzl, dont le tube est de grand diamètre semble intéressant et adapté à cet usage

²Le diamètre intérieur des boucles manufacturées, dont la résistance est égale à celle de la corde, est inférieur à 15 mm

Dans les téléphériques à câble porteur unique (Applevage, Aiguille du Midi), les câbles tracteurs doivent reprendre l'effort de traction de la cabine *et surtout les efforts liés à leur poids propre, puisque les câbles n'ont pas d'autre appui que les galets des pylônes et des gares, et la fixation à la cabine. Ce qui donne des distances égales à la plus longue travée.*

Dans les installations à deux câbles porteurs (qui renforcent d'ailleurs la nature ferroviaire des téléphériques, le véhicule circulant sur un véritable chemin de roulement), des appareils d'appuis intermédiaires munis d'un galet, appelés « cavaliers », supportent les câbles tracteurs à intervalles réguliers. Les câbles ne devant supporter au titre du poids propre uniquement la portion comprise entre cavaliers peuvent voir leur diamètre fortement réduit.

Dans la **La Très Grande Tyrolienne**, le câble tracteur est constitué de tronçons de 200 mètres environ, reliés entre eux par des noeuds de jonction ou de type « boucle tricotée ». En ces points, le câble est supporté par un train de galets (poulies TANDEM superposées) prenant appui sur les deux câbles porteurs (voir Fig 1.1). Ces appuis intermédiaires supportent une boule en plastique³ pour la signalisation aérienne de l'ouvrage.

³Dispositifs utilisés pour la signalisation des câbles EDF. Ils sont d'un type homologué par la Direction Générale de l'Aviation Civile.

Chapitre 4

Note de calcul de l'installation

4.1 Variantes envisagées

Les notes de calcul synthétisées ont été directement générées par *GHTyro*, qui crée du code \LaTeX dans un fichier. Celui-ci est automatiquement lié au présent dossier lors de sa compilation.

1. Tyrolienne d'essai
Cette installation de faible portée doit être lancée en 2007 au-dessus du village de Lans en Vercors. Elle a pour but d'apprécier la faisabilité technique de **La Très Grande Tyrolienne**.
2. Combe Laval, variante CL02
Située au fond de la reculée de Combe Laval et plus grande portée possible dans ce secteur
3. Combe Laval, variante CL03
Située au fond de la reculée de Combe Laval.
4. Valchevrière, travée de 1400 m
Située dans le cirque de Valchevrière.
5. Valchevrière, travée de 1250 m
Située dans le cirque de Valchevrière.

4.2 Variante : Tyrolienne de test de Lans

4.2.1 Données

Longueur travée L_0	350 .00 m
Dénivellation travée H_0	-55 .00 m
Tension initiale N_0	1 200 .00 daN
Charge roulante Q	220 .00 kg
Masse linéique des câbles w	0. 180 g/m

4.2.2 Résultats câble seul

Méthode	Jippé	Thibault	Δ
Valeurs			
Longueur câble S_0	354 .34 m	354 .34 m	0 .00 m
Flèche à $L = L_0/2$	2 .37 m	2 .34 m	0 .02 m
Effort à l'appui gauche N_0	1 200 .00	1 200 .00	0 .00
Effort à l'appui droit N_1	1 188 .00	1 199 .99	-11 .99
Angle à l'appui gauche α_0	-10. 438 590°	-10. 422 559°	-0. 016 031°
Angle à l'appui droit α_1	-7. 412 049°	-7. 426 313°	0. 014 265°
$P(x)$	$0.000077 \cdot x^2 + (-0.184195) \cdot x$	$0.000077 \cdot x^2 + (-0.183941) \cdot x$	

4.2.3 Résultats câble chargé

Valeur	Position	$x = 0.10 \cdot L_0$		$x = 0.50 \cdot L_0$		$x = 0.90 \cdot L_0$	
	x	35 .00 m		175 .00 m		315 .00 m	
Méthode		Jippé	Thibault	Jippé	Thibault	Jippé	Thibault
S		355 .14 m	355 .11 m	356 .35 m	356 .31 m	355 .04 m	355 .03 m
$\Delta_{\text{contrepois}}$		0 .80 m	0 .77 m	2 .02 m	1 .97 m	0 .70 m	0 .69 m
N_0		1 200 .00	1 200 .00	1 200 .00	1 200 .00	1 200 .00	1 200 .00
N_{Cg}		1 177 .30	1 200 .00	1 186 .89	1 200 .00	1 188 .87	1 199 .99
N_{Cd}		1 177 .30	1 200 .00	1 186 .89	1 200 .00	1 188 .87	1 199 .99
N_1		1 168 .86	1 200 .00	1 181 .31	1 200 .00	1 179 .85	1 200 .21
f_0		-0 .85 m	-0 .84 m	-2 .37 m	-2 .34 m	-0 .85 m	-0 .84 m
f_1		-7 .41 m	-7 .28 m	-19 .30 m	-19 .10 m	-6 .76 m	-6 .71 m
Δ_f		6 .56 m	6 .43 m	16 .93 m	16 .76 m	5 .91 m	5 .86 m
α_{0g}		-20. 407 525°	-20. 202 778°	-15. 727 638°	-15. 658 201°	-11. 482 149°	-11. 459 518°
α_{1g}		-20. 101 227°	-19. 902 263°	-14. 212 293°	-14. 159 338°	-8. 760 624°	-8. 763 225°
α_{0d}		-8. 991 900°	-8. 980 062°	-3. 447 318°	-3. 498 819°	1. 905 106°	1. 824 133°
α_{1d}		-6. 220 963°	-6. 280 974°	-1. 920 367°	-1. 995 680°	2. 211 077°	2. 124 911°
$\Delta\alpha = \alpha_{0d} - \alpha_{1g}$		11. 109 327°	10. 922 201°	10. 764 975°	10. 660 519°	10. 665 731°	10. 587 358°

4.3 Variante : Tyrolienne de Combe Laval, variante CL 02 (fond de la reculée)

4.3.1 Données

Longueur travée L_0	1 250 .00 m
Dénivellation travée H_0	90 .00 m
Tension initiale N_0	1 800 .00 daN
Charge roulante Q	220 .00 kg
Masse linéique des câbles w	0. 650 g/m

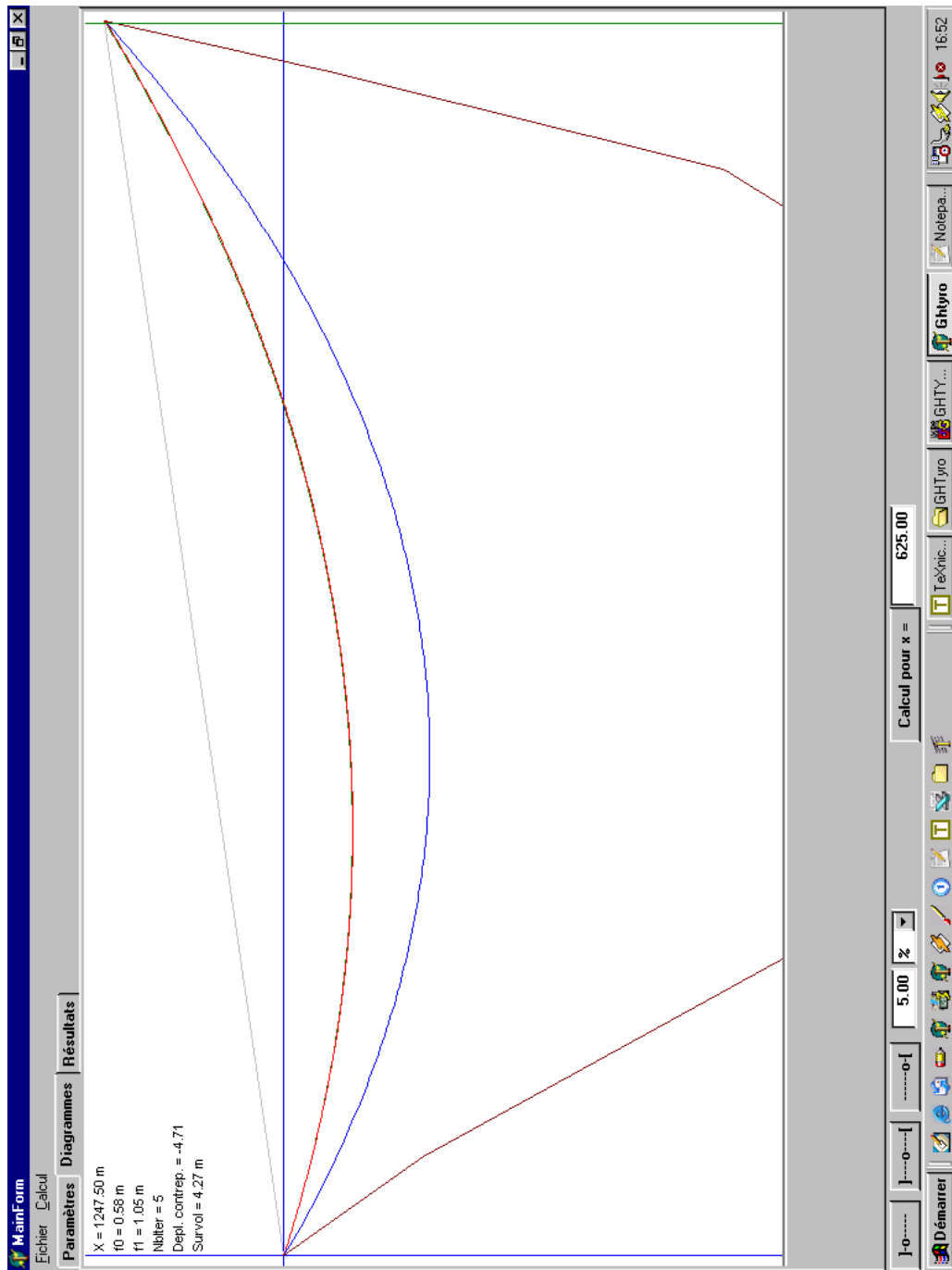
4.3.2 Résultats câble seul

Méthode	Jippé	Thibault	Δ
Valeurs			
Longueur câble S_0	1 264 .20 m	1 263 .54 m	0 .66 m
Flèche à $L = L_0/2$	72 .23 m	71 .77 m	0 .46 m
Effort à l'appui gauche N_0	1 800 .00	1 800 .00	0 .00
Effort à l'appui droit N_1	1 857 .34	1 858 .58	-1 .24
Angle à l'appui gauche α_0	-9. 043 810°	-8. 960 281°	-0. 083 529°
Angle à l'appui droit α_1	16. 863 765°	16. 787 192°	0. 076 573°
$P(x)$	$0.000185 \cdot x^2 + (-0.159133) \cdot x$	$0.000184 \cdot x^2 + (-0.157674) \cdot x$	

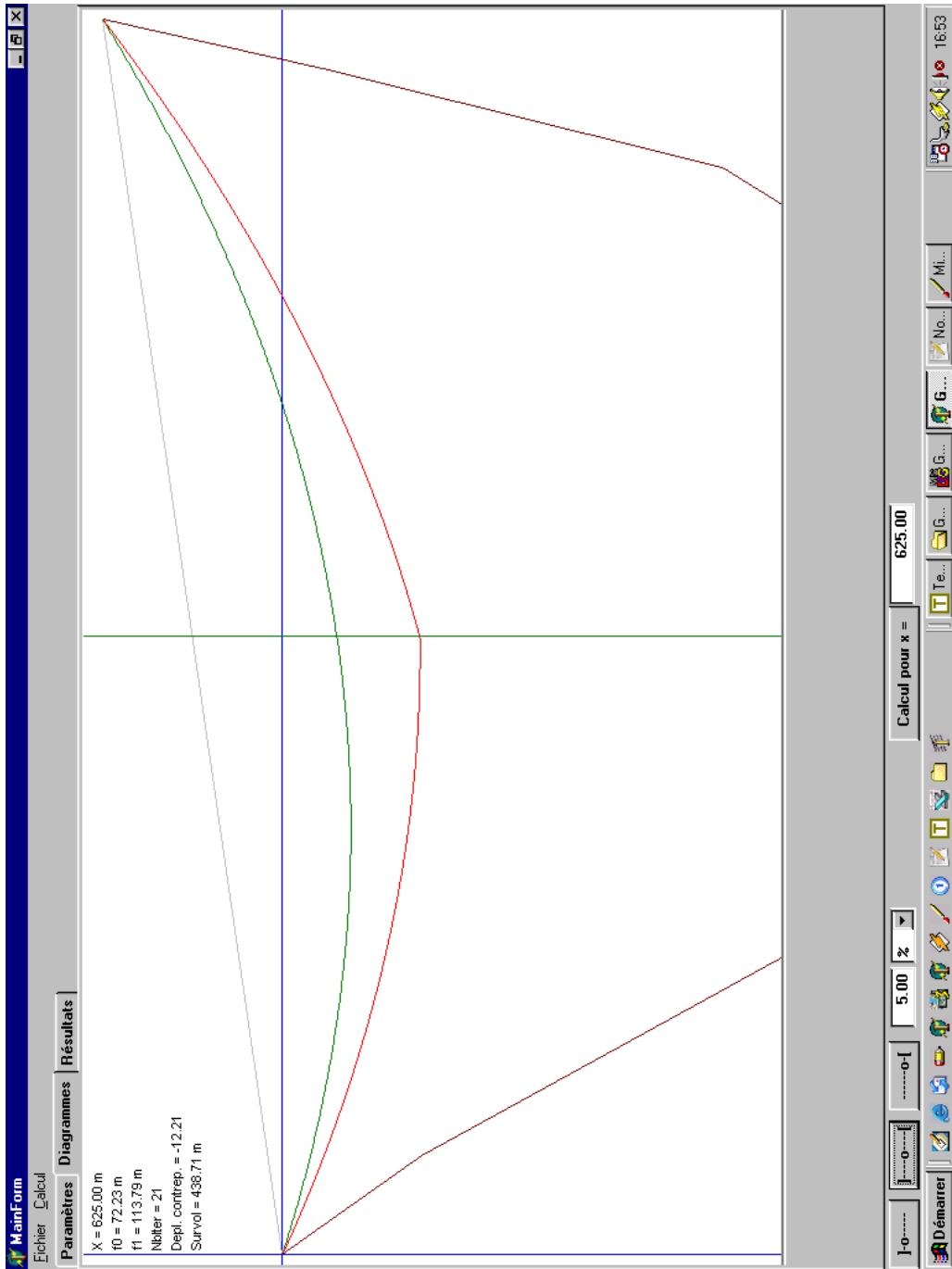
4.3.3 Résultats câble chargé

Valeur	Position		$x = 0.50 \cdot L_0$		$x = 0.90 \cdot L_0$	
	$x = 0.10 \cdot L_0$		$x = 0.50 \cdot L_0$		$x = 0.90 \cdot L_0$	
x	125 .00 m		625 .00 m		1 125 .00 m	
Méthode	Jippé	Thibault	Jippé	Thibault	Jippé	Thibault
S	1 268 .62 m	1 267 .81 m	1 276 .40 m	1 275 .19 m	1 268 .70 m	1 268 .25 m
$\Delta_{\text{contrepois}}$	5 .08 m	4 .27 m	12 .86 m	11 .65 m	5 .16 m	4 .71 m
N_0	1 800 .00	1 800 .00	1 800 .00	1 800 .00	1 800 .00	1 800 .00
N_{Cg}	1 777 .02	1 799 .98	1 755 .17	1 800 .09	1 824 .66	1 825 .83
N_{Cd}	1 777 .02	1 799 .98	1 755 .17	1 800 .09	1 824 .66	1 825 .83
N_1	1 854 .84	1 878 .39	1 857 .15	1 900 .72	1 856 .13	1 858 .78
f_0	-26 .00 m	-25 .84 m	-72 .23 m	-71 .77 m	-26 .00 m	-25 .84 m
f_1	-40 .85 m	-40 .21 m	-113 .79 m	-110 .84 m	-41 .94 m	-41 .78 m
Δ_f	14 .84 m	14 .38 m	41 .56 m	39 .06 m	15 .94 m	15 .94 m
α_{0g}	-15. 589 140°	-15. 299 308°	-12. 777 051°	-12. 348 267°	-9. 819 485°	-9. 752 177°
α_{1g}	-12. 984 079°	-12. 727 109°	0. 378 375°	0. 472 336°	13. 630 252°	13. 582 514°
α_{0d}	-5. 780 521°	-5. 596 926°	7. 591 309°	7. 515 010°	20. 893 844°	20. 832 290°
α_{1d}	17. 630 932°	17. 405 531°	20. 547 150°	20. 140 759°	23. 425 100°	23. 359 691°
$\Delta\alpha = \alpha_{0d} - \alpha_{1g}$	7. 203 557°	7. 130 183°	7. 212 934°	7. 042 674°	7. 263 592°	7. 249 775°

4.3.4 Diagramme enveloppe de la trajectoire du chargement



4.3.5 Configuration à mi-travée



4.4 Variante : Tyrolienne de Combe Laval, variante CL 03 (fond de la reculée)

4.4.1 Données

Longueur travée L_0	1 050 .00 m
Dénivellation travée H_0	55 .00 m
Tension initiale N_0	1 600 .00 daN
Charge roulante Q	220 .00 kg
Masse linéique des câbles w	0. 650 g/m

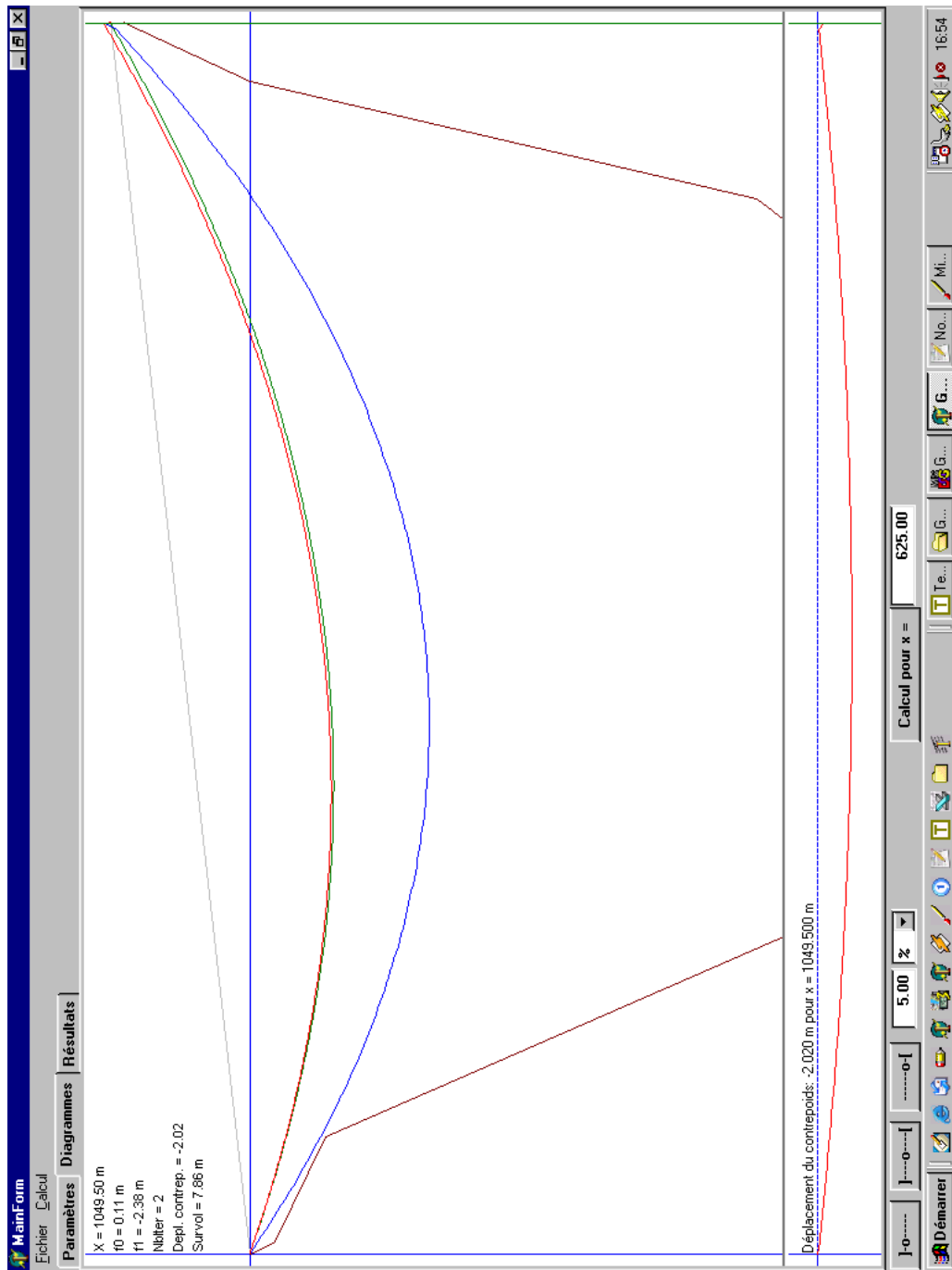
4.4.2 Résultats câble seul

Méthode	Jippé	Thibault	Δ
Valeurs			
Longueur câble S_0	1 059 .68 m	1 059 .24 m	0 .44 m
Flèche à $L = L_0/2$	57 .28 m	56 .96 m	0 .32 m
Effort à l'appui gauche N_0	1 600 .00	1 600 .00	0 .00
Effort à l'appui droit N_1	1 634 .92	1 635 .97	-1 .05
Angle à l'appui gauche α_0	-9. 417 533 °	-9. 348 078 °	-0. 069 455 °
Angle à l'appui droit α_1	15. 141 045 °	15. 076 456 °	0. 064 589 °
$P(x)$	$0.000208 \cdot x^2 + (-0.165827) \cdot x$	$0.000207 \cdot x^2 + (-0.164618) \cdot x$	

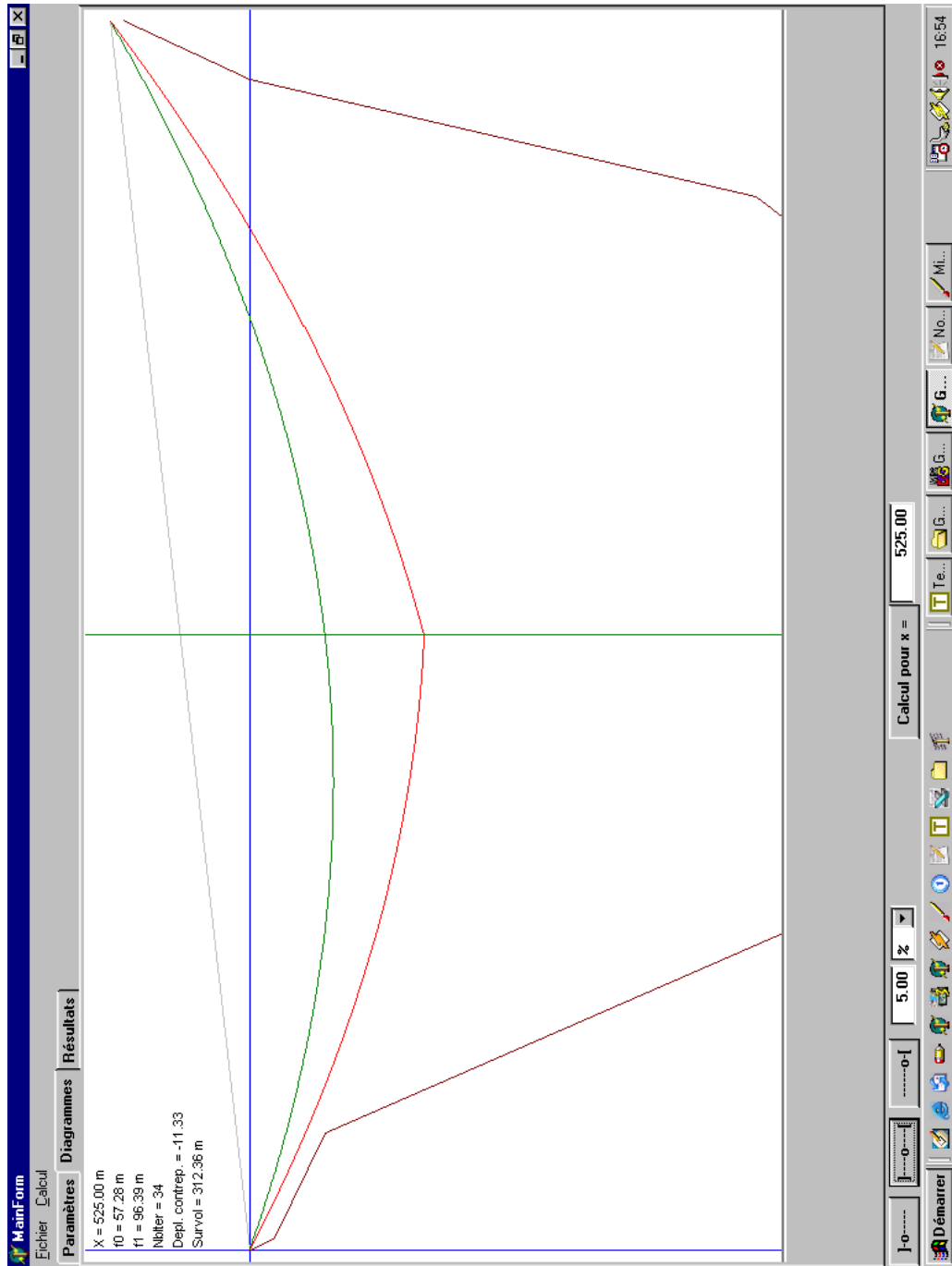
4.4.3 Résultats câble chargé

Valeur	Position		$x = 0.50 \cdot L_0$		$x = 0.90 \cdot L_0$	
	$x = 0.10 \cdot L_0$		$x = 0.50 \cdot L_0$		$x = 0.90 \cdot L_0$	
x	105 .00 m		525 .00 m		945 .00 m	
Méthode	Jippé	Thibault	Jippé	Thibault	Jippé	Thibault
S	1 063 .83 m	1 063 .18 m	1 071 .01 m	1 069 .87 m	1 063 .85 m	1 063 .59 m
$\Delta_{\text{contrepois}}$	4 .60 m	3 .94 m	11 .78 m	10 .64 m	4 .62 m	4 .36 m
N_0	1 600 .00	1 600 .00	1 600 .00	1 600 .00	1 600 .00	1 600 .00
N_{Cg}	1 577 .31	1 599 .98	1 555 .10	1 600 .05	1 608 .64	1 609 .47
N_{Cd}	1 577 .31	1 599 .98	1 555 .10	1 600 .05	1 608 .64	1 609 .47
N_1	1 631 .10	1 654 .20	1 634 .92	1 678 .30	1 633 .43	1 636 .06
f_0	-20 .62 m	-20 .51 m	-57 .28 m	-56 .96 m	-20 .62 m	-20 .51 m
f_1	-34 .80 m	-34 .16 m	-96 .39 m	-93 .58 m	-35 .45 m	-35 .47 m
Δ_f	14 .17 m	13 .65 m	39 .11 m	36 .62 m	14 .83 m	14 .96 m
α_{0g}	-16. 815 455 °	-16. 473 391 °	-13. 611 824 °	-13. 140 849 °	-10. 290 323 °	-10. 242 486 °
α_{1g}	-14. 350 690 °	-14. 043 137 °	-1. 165 210 °	-1. 047 140 °	11. 928 444 °	11. 881 150 °
α_{0d}	-6. 206 605 °	-6. 031 950 °	6. 964 031 °	6. 860 191 °	20. 088 705 °	20. 099 759 °
α_{1d}	16. 019 814 °	15. 786 587 °	19. 279 200 °	18. 826 938 °	22. 502 905 °	22. 509 937 °
$\Delta\alpha = \alpha_{0d} - \alpha_{1g}$	8. 144 085 °	8. 011 186 °	8. 129 241 °	7. 907 331 °	8. 160 261 °	8. 218 609 °

4.4.4 Diagramme enveloppe de la trajectoire du chargement



4.4.5 Configuration à mi-travée



4.5 Variante : Valchevrière 1 (câbles lourds)

4.5.1 Données

Longueur travée L_0	1 450 .00 m
Dénivellation travée H_0	230 .00 m
Tension initiale N_0	2 000 .00 daN
Charge roulante Q	200 .00 kg
Masse linéique des câbles w	0. 650 g/m

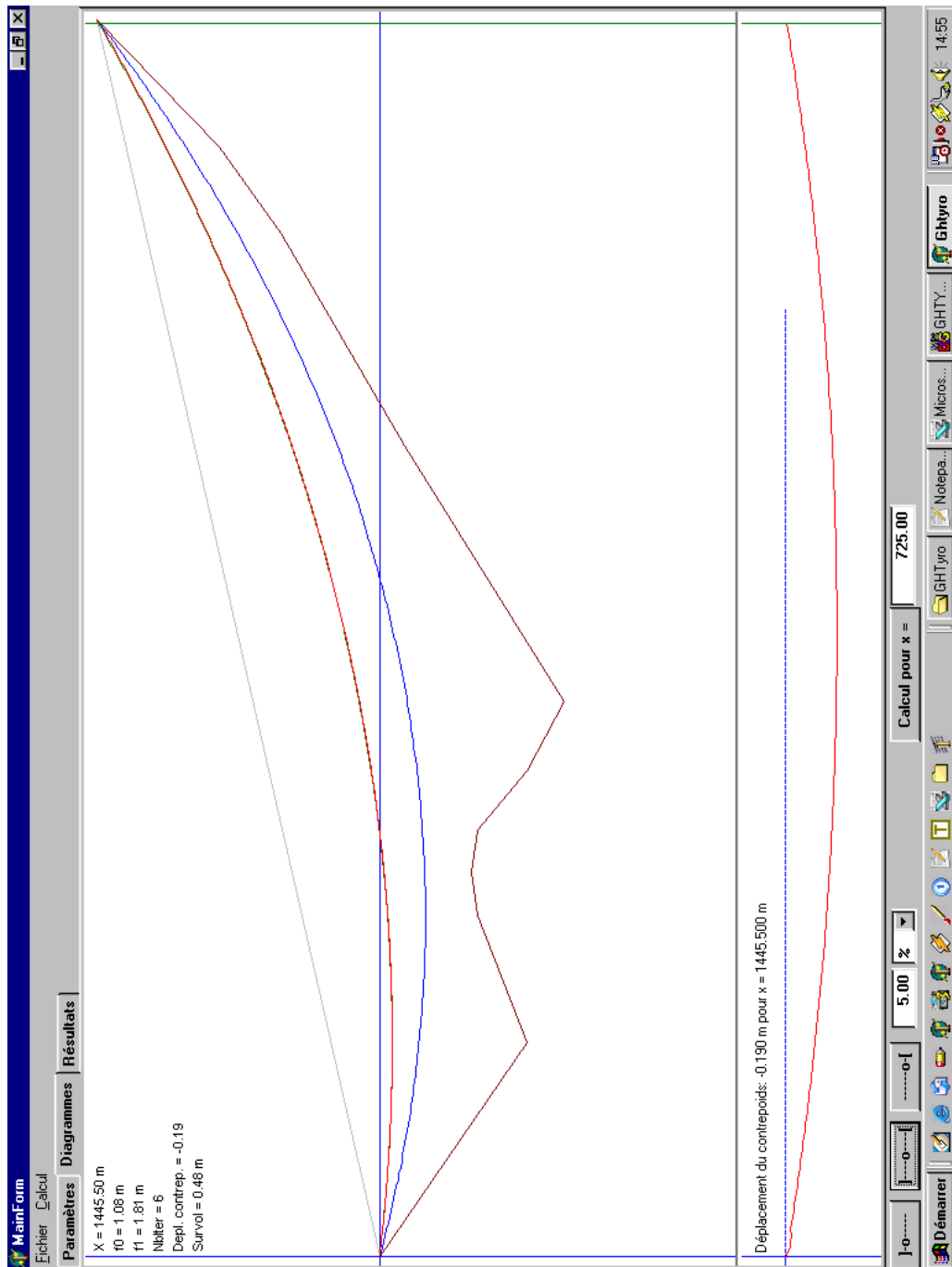
4.5.2 Résultats câble seul

Méthode	Jippé	Thibault	Δ
Valeurs			
Longueur câble S_0	1 481 .62 m	1 480 .75 m	0 .87 m
Flèche à $L = L_0/2$	87 .59 m	86 .98 m	0 .61 m
Effort à l'appui gauche N_0	2 000 .00	2 000 .00	0 .00
Effort à l'appui droit N_1	2 146 .43	2 148 .03	-1 .60
Angle à l'appui gauche α_0	-4. 746 796 °	-4. 648 668 °	-0. 098 128 °
Angle à l'appui droit α_1	21. 813 436 °	21. 729 974 °	0. 083 462 °
$P(x)$	$0.000167 \cdot x^2 + (-0.083002) \cdot x$	$0.000165 \cdot x^2 + (-0.081313) \cdot x$	

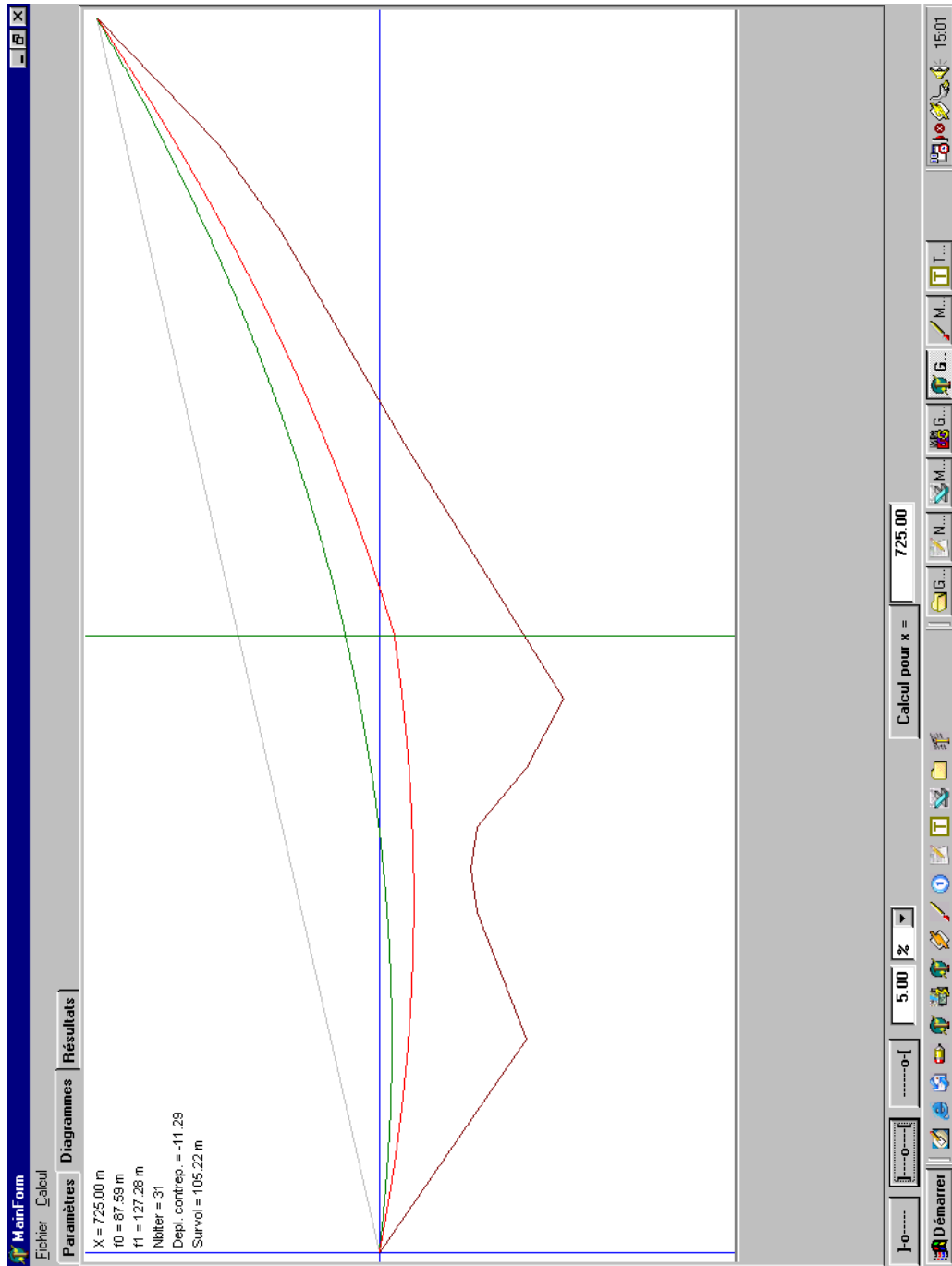
4.5.3 Résultats câble chargé

Valeur	Position		$x = 0.10 \cdot L_0$		$x = 0.50 \cdot L_0$		$x = 0.90 \cdot L_0$	
	x		145 .00 m		725 .00 m		1 305 .00 m	
Méthode	Jippé	Thibault	Jippé	Thibault	Jippé	Thibault	Jippé	Thibault
S	1 485 .77 m	1 484 .88 m	1 492 .91 m	1 492 .62 m	1 485 .77 m	1 485 .24 m		
$\Delta_{\text{contrepois}}$	5 .02 m	4 .13 m	12 .15 m	11 .87 m	5 .02 m	4 .49 m		
N_0	2 000 .00	2 000 .00	2 000 .00	2 000 .00	2 000 .00	2 000 .00		
N_{Cg}	1 981 .49	1 999 .99	1 991 .74	2 000 .10	2 101 .91	2 103 .18		
N_{Cd}	1 981 .49	1 999 .99	1 991 .74	2 000 .10	2 101 .91	2 103 .18		
N_1	2 142 .76	2 161 .82	2 147 .95	2 155 .85	2 143 .97	2 148 .76		
f_0	-31 .53 m	-31 .31 m	-87 .59 m	-86 .98 m	-31 .53 m	-31 .31 m		
f_1	-45 .31 m	-44 .72 m	-127 .28 m	-126 .67 m	-47 .30 m	-47 .26 m		
Δ_f	13 .77 m	13 .41 m	39 .69 m	39 .69 m	15 .77 m	15 .95 m		
α_{0g}	-10. 099 809 °	-9. 861 418 °	-7. 754 539 °	-7. 669 596 °	-5. 363 115 °	-5. 293 405 °		
α_{1g}	-7. 383 924 °	-7. 170 440 °	5. 838 641 °	5. 850 826 °	18. 705 755 °	18. 647 547 °		
α_{0d}	-1. 513 528 °	-1. 352 829 °	11. 666 705 °	11. 661 967 °	24. 577 556 °	24. 569 028 °		
α_{1d}	22. 443 773 °	22. 264 163 °	24. 789 557 °	24. 715 540 °	27. 124 168 °	27. 109 728 °		
$\Delta\alpha = \alpha_{0d} - \alpha_{1g}$	5. 870 396 °	5. 817 611 °	5. 828 064 °	5. 811 141 °	5. 871 801 °	5. 921 480 °		

4.5.4 Diagramme enveloppe de la trajectoire du chargement



4.5.5 Configuration à mi-travée



4.6 Variante : Valchevrière 2 (câbles lourds)

4.6.1 Données

Longueur travée L_0	1 250 .00 m
Dénivellation travée H_0	230 .00 m
Tension initiale N_0	2 000 .00 daN
Charge roulante Q	200 .00 kg
Masse linéique des câbles w	0. 650 g/m

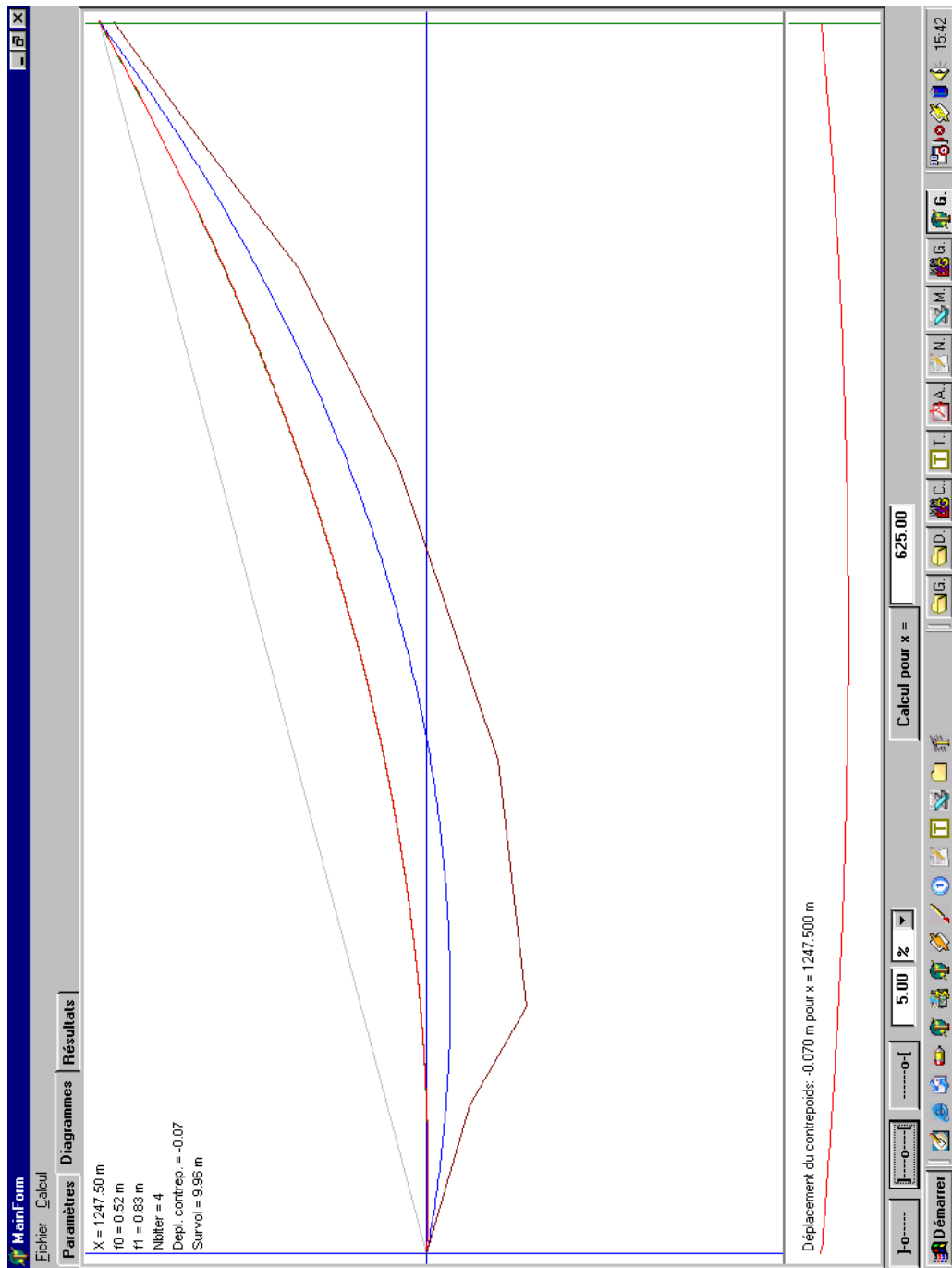
4.6.2 Résultats câble seul

Méthode	Jippé	Thibault	Δ
Valeurs			
Longueur câble S_0	1 279 .51 m	1 279 .11 m	0 .41 m
Flèche à $L = L_0/2$	65 .00 m	64 .70 m	0 .30 m
Effort à l'appui gauche N_0	2 000 .00	2 000 .00	0 .00
Effort à l'appui droit N_1	2 147 .28	2 148 .00	-0 .72
Angle à l'appui gauche α_0	-1. 376 191 °	-1. 319 241 °	-0. 056 951 °
Angle à l'appui droit α_1	21. 404 621 °	21. 356 948 °	0. 047 674 °
$P(x)$	$0.000166 \cdot x^2 + (-0.023989) \cdot x$	$0.000166 \cdot x^2 + (-0.023029) \cdot x$	

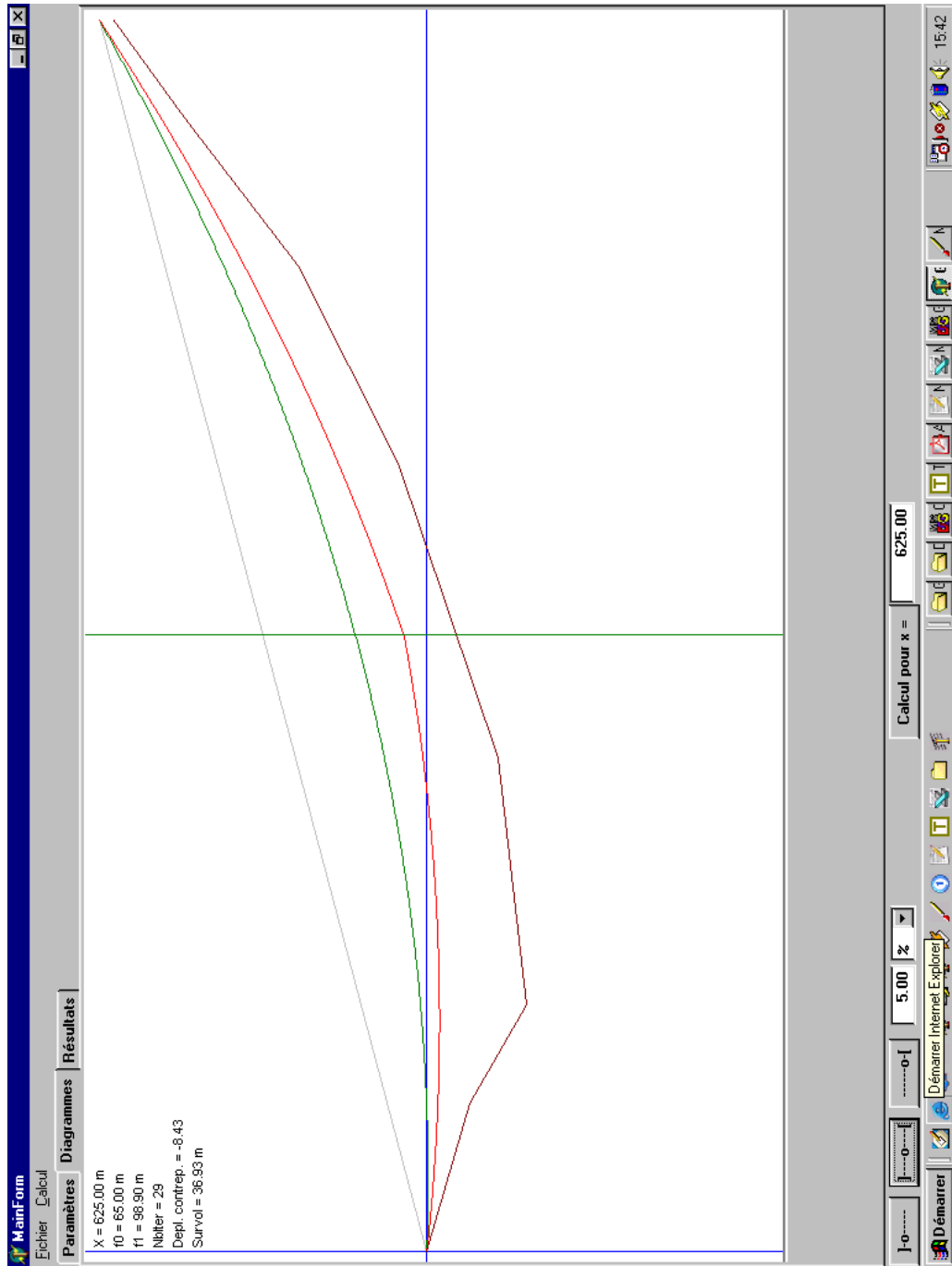
4.6.3 Résultats câble chargé

Valeur	Position		$x = 0.50 \cdot L_0$		$x = 0.90 \cdot L_0$	
	$x = 0.10 \cdot L_0$		$x = 0.50 \cdot L_0$		$x = 0.90 \cdot L_0$	
	125 .00 m		625 .00 m		1 125 .00 m	
	x					
Méthode	Jippé	Thibault	Jippé	Thibault	Jippé	Thibault
S	1 282 .54 m	1 282 .16 m	1 287 .94 m	1 287 .92 m	1 282 .68 m	1 282 .40 m
$\Delta_{\text{contrepois}}$	3 .43 m	3 .05 m	8 .84 m	8 .81 m	3 .57 m	3 .30 m
N_0	2 000 .00	2 000 .00	2 000 .00	2 000 .00	2 000 .00	2 000 .00
N_{Cg}	1 990 .48	2 000 .00	2 009 .84	2 010 .47	2 108 .77	2 109 .75
N_{Cd}	1 990 .48	2 000 .00	2 009 .84	2 010 .47	2 108 .77	2 109 .75
N_1	2 145 .62	2 155 .50	2 148 .03	2 148 .51	2 145 .69	2 148 .62
f_0	-23 .40 m	-23 .29 m	-65 .00 m	-64 .70 m	-23 .40 m	-23 .29 m
f_1	-34 .96 m	-34 .70 m	-98 .90 m	-98 .92 m	-36 .99 m	-36 .88 m
Δ_f	11 .56 m	11 .41 m	33 .91 m	34 .22 m	13 .59 m	13 .59 m
α_{0g}	-6. 631 984 °	-6. 505 489 °	-4. 366 638 °	-4. 359 586 °	-2. 002 609 °	-1. 955 363 °
α_{1g}	-4. 297 441 °	-4. 182 015 °	7. 284 964 °	7. 277 687 °	18. 632 408 °	18. 601 600 °
α_{0d}	1. 492 078 °	1. 571 314 °	13. 081 223 °	13. 090 400 °	24. 532 207 °	24. 494 575 °
α_{1d}	22. 002 196 °	21. 912 563 °	24. 327 256 °	24. 322 897 °	26. 722 161 °	26. 681 385 °
$\Delta\alpha = \alpha_{0d} - \alpha_{1g}$	5. 789 519 °	5. 753 329 °	5. 796 259 °	5. 812 712 °	5. 899 798 °	5. 892 974 °

4.6.4 Diagramme enveloppe de la trajectoire du chargement



4.6.5 Configuration à mi-travée



Chapitre 5

Instrumentation et mesures

La Très Grande Tyrolienne est avant tout un ouvrage de recherche permettant d'étudier le comportement des tyroliennes en corde de très grande portée, un domaine assez méconnu qui peut nous en apprendre beaucoup.

La partie **Instrumentation et mesures** est un volet important du projet et un grand nombre de paramètres peut être mesuré avec comparaison avec les valeurs de calcul.

On peut distinguer plusieurs types de mesures :

- Mesures environnementales
- Mesures d'efforts et de déplacements
- Mesures par méthodes topographiques

desquelles on peut déduire en temps réel la configuration de la tyrolienne.

5.1 Mesures environnementales

Le paramètre environnement principal est la vitesse du vent qui, comme on l'a dit précédemment, conditionne le dimensionnement de l'ouvrage.

Des anémomètres disposés en divers points du site fournissent cette information.

5.2 Mesures d'efforts et déplacements

La mesure des efforts est possible directement (dynamomètres au niveau des ancrages), mais il est indispensable de connaître en temps réel le déplacement des contrepoids. Cette mesure est facile à mettre en oeuvre.

La mesure directe des efforts et déplacements n'est possible qu'au niveau des ancrages.

5.3 Relevés topographiques

Les relevés topographiques constituent la pierre angulaire de la campagne de mesures associée à la réalisation et au fonctionnement de **La Très Grande Tyrolienne**. Seuls ces procédés permettent de connaître avec une bonne précision la configuration de la tyrolienne. En fonction du site, on peut envisager plusieurs méthodes, sachant que l'équipage mobile comporte une cible (prisme ou mire).

Bibliographie

DGAC. Signalisation aérienne. Ministère des Transports, 2000.

Comité EPI. Normes pour les Equipements de Protection Individuelle. Ministère des Transports, 2003.

André Joie. *Calcul au second ordre et instabilité des arcs*. PhD thesis, Université de Bordeaux 1, May 1982.

Montaz-Mautino. Téléphérique de Caunterets - Note de calcul de ligne, 1985. Note de calcul de la ligne ; 42 pages.

Gustav Stibranyi. Velky traversz - the superlong tyrolean. In Union Internationale de Spéléologie, editor, *Proceedings of the XIIIth International Congress of Speleology*, volume 5, pages 119–121, 1996.

STRM. Règlement du Service Technique des Remontées Mécaniques. Ministère des Transports, 1990.

Table des figures

1.1	Schéma de principe de la tyrolienne	6
1.2	Tracés possibles de la La Très Grande Tyrolienne	7
2.1	Section d'un câble gorgé d'eau	9
2.2	Notations dans un tronçon de câble	11
2.3	Equilibre d'un tronçon de câble	13
2.4	Mise en équilibre du câble	15
2.5	Bilans des forces au niveau de la charge roulante	16
3.1	Ancrage de câbles par enroulement, sur un téléphérique	18
3.2	Système d'ancrage utilisant des manilles et diagramme de N associé	19