

# Cours n°12

## Structures en câbles

### SOMMAIRE

<b>1</b>	<b>HISTORIQUE DES CONSTRUCTIONS EN CÂBLES .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>NOTIONS DE STATIQUE GRAPHIQUE.....</b>	<b>4</b>
	<b>2.1 CORPS SOUMIS A DEUX FORCES .....</b>	<b>4</b>
	<b>2.2 CORPS SOUMIS A TROIS FORCES .....</b>	<b>4</b>
	<b>2.3 CORPS SOUMIS A QUATRE FORCES .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>DYNAMIQUE DES FORCES ET POLYGONE FUNICULAIRE .....</b>	<b>5</b>
	<b>3.1 DEFINITIONS .....</b>	<b>5</b>
	<b>3.2 EQUILIBRE D'UN CORPS SOLIDE .....</b>	<b>7</b>
	<b>3.4 MOMENT RESULTANT D'UN ENSEMBLE DE FORCES <math>F_i</math> .....</b>	<b>8</b>
	<i>Cas 1 : Le dynamique est ouvert. ....</i>	<i>8</i>
	<i>Cas 2 : le dynamique est fermé .....</i>	<i>9</i>
	<b>3.5 FUNICULAIRE PASSANT PAR DEUX POINTS .....</b>	<b>10</b>
<b>4</b>	<b>STATIQUE DES FILS .....</b>	<b>12</b>
	4.1 fil soumis à des charges concentrées .....	12
	4.2 fil soumis à des charges réparties.....	13
<b>5</b>	<b>NOTION DE CÂBLE FUNICULAIRE ET MODE DE FONCTIONNEMENT D'UN CÂBLE.....</b>	<b>15</b>

6 INTERÊT DE LA PRECONTRAINTE D'UN CÂBLE ..... 17

7 TECHNOLOGIE DES CÂBLES ..... 18

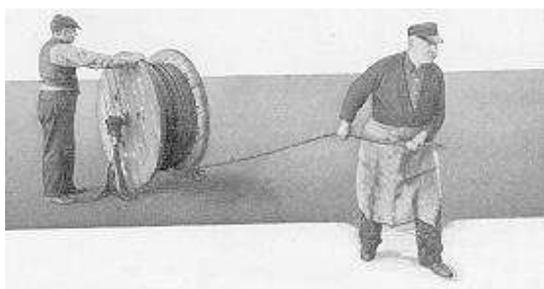
7.1 LES DIFFERENTS TYPES DE CABLES ..... 18

7.2 DOMAINE D'EMPLOI : ..... 21

7.3 PROTECTION CONTRE LA CORROSION : ..... 22

7.4 MODULE D'ELASTICITE : ..... 22

7.5 CONTRAINTE ADMISSIBLE : ..... 22



*L'art de dérouler un câble toronné d'après le manuel de la compagnie Roebling*

## 1 HISTORIQUE DES CONSTRUCTIONS EN CÂBLES

L'usage de câbles dans les constructions est très ancien. Des câbles de cuivre ont été retrouvés dans les ruines de Ninive, près de Babylone. Ces vestiges datent de 685 avant Jésus Christ. Un pont suspendu à des chaînes de fer aurait été construit en Chine à Yunnan en l'an 65 dont on doit une description au jésuite allemand Athanase Kircher au XVIII<sup>ème</sup> siècle : « *Ce pont qui a vingt chaînes, a vingt perches de long, qui font 140 pieds : l'on dit que quand beaucoup de personnes passent dessus, ou qu'il y a quelque grand fardeau, il branle si fort qu'il fait peur à ceux qui y sont...* »

Des câbles de bronze ont également été découverts dans les fouilles de Pompéi (an 79).

On attribue également les premiers ponts suspendus à des chaînes de fer au moine tibétain Thang-stong-rgyal-po (1385-1464) dont le pont sur la rivière Paro. En Europe, le pont de Menai, au pays de Galles, réalisé entre 1818 et 1826 par Thomas Telford et Davies Gilbert, est un des premiers ouvrages modernes, comprenant un arrangement de barres métalliques de 2.90 m auquel est suspendu un platelage de bois de 176 m. La suspension en chaînes a finalement été remplacée par des câbles en 1941.



*Le pont de Menai -1826- (Pays de Galles)*

La production industrielle de câbles, faits d'arrangements de fils métalliques, date de 1832 en Angleterre (Wilson), puis de 1834 en Allemagne (A. Albert), et enfin se développe aux Etats Unis grâce à John A. Roebling vers 1850.



*Allegheny Bridge(1829)*



*Brooklyn Bridge (1883)*

*Deux ponts suspendus de John A. Roebling*

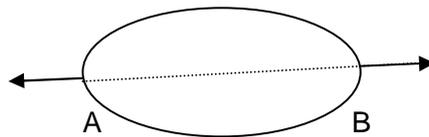
## 2 NOTIONS DE STATIQUE GRAPHIQUE

La statique graphique est l'étude des conditions d'équilibre des corps au repos à partir de la mesure et du tracé des forces. Elle n'est plus guère utilisée aujourd'hui du fait des progrès du calcul numérique par ordinateur. Cependant il est utile au constructeur d'apprécier, par un moyen simple comme le dessin, le fonctionnement des pièces et le cheminement des forces.

Le principe consiste à faire figurer sur une même épure les longueurs et les forces. Nous admettons par la suite que **toute force** est représentée par un **vecteur glissant** défini par sa **ligne d'action** (directrice) et **son intensité** (longueur du vecteur) ainsi que son **orientation**.

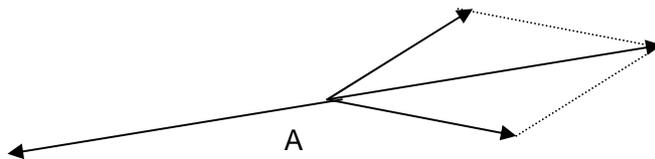
### 2.1 CORPS SOUMIS A DEUX FORCES

Ces deux forces sont égales et opposées



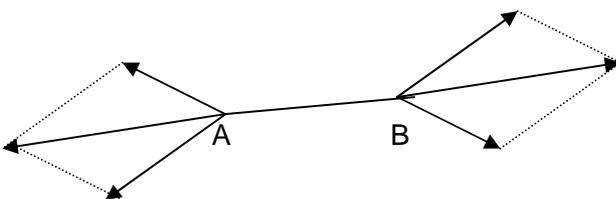
### 2.2 CORPS SOUMIS A TROIS FORCES

Les trois forces sont concourantes et l'une d'entre elles est égale à la somme vectorielle des deux autres.



### 2.3 CORPS SOUMIS A QUATRE FORCES

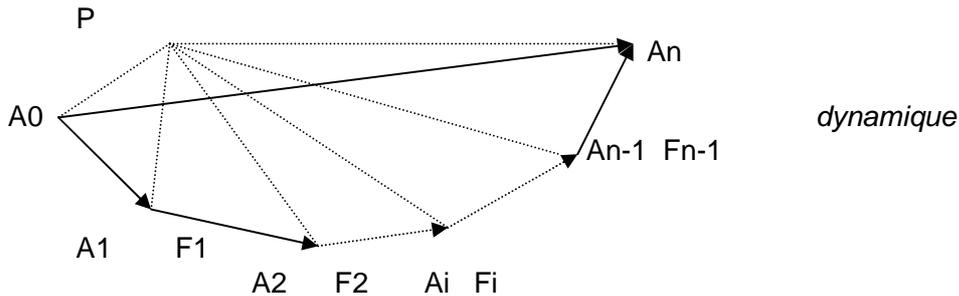
On regroupe les forces deux à deux. La résultante en A doit être égale et opposée à la résultante en B. On appelle « **droite de Cullman** » la droite qui porte ces deux forces égales et opposées. Il y a trois droites de Cullman, car il y a trois façons de grouper ces quatre forces.



### 3 DYNAMIQUE DES FORCES ET POLYGONE FUNICULAIRE

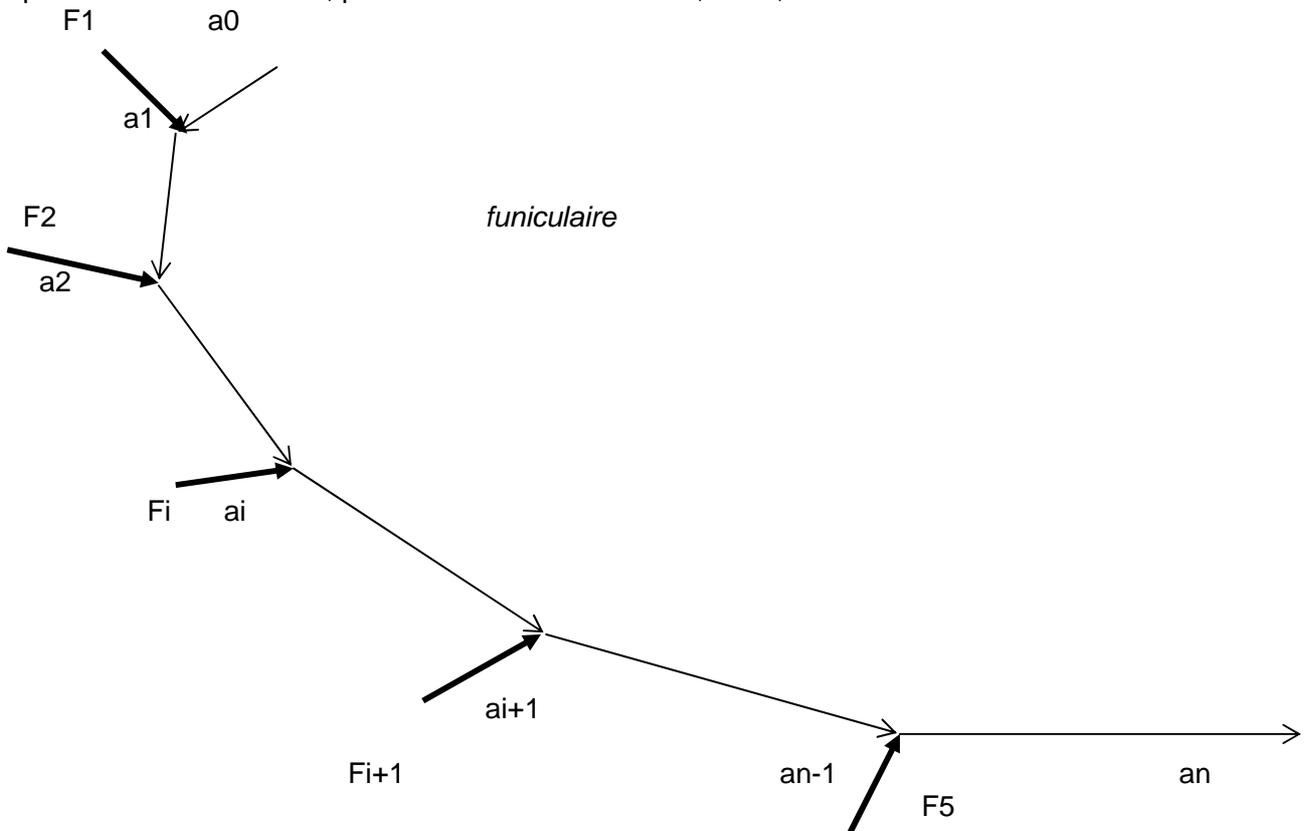
#### 3.1 DEFINITIONS

Soit  $n$  forces coplanaires. Par un point  $A_0$  arbitraire, on mène  $A_0 A_1$  équipollent à  $F_1$ , puis  $A_1 A_2$  équipollent à  $F_2$ , puis de proche en proche  $A_{i-1} A_i$  équipollent à  $F_i$ , et enfin  $A_{n-1} A_n$  équipollent<sup>1</sup> à  $F_n$ . Le contour polygonal  $A_0 A_n$  est appelé **dynamique** associé aux forces  $F_i$ . La forme du dynamique ne dépend pas du point  $A_0$  mais de l'ordre dans lequel on examine ces forces.



Le vecteur  $A_0 A_n$  est équipollent à la résultante des forces. Il ne dépend pas de l'ordre des forces  $F_i$ .

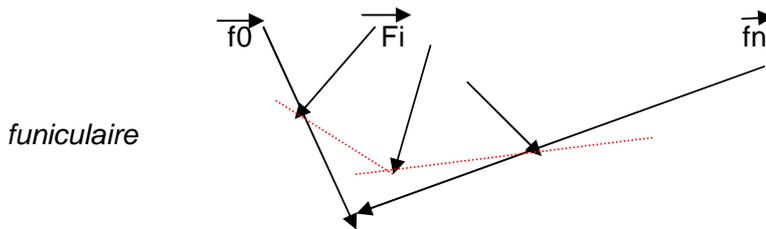
Par un pôle arbitraire  $P$ , on trace des droites liant  $P$  et l'extrémité des forces  $F_i$  du dynamique. Par un point arbitraire du plan  $a_1$  choisi sur  $F_1$ , on trace successivement les droites  $a_0 a_1$ ,  $a_1 a_2$ , parallèles à  $A_0 P$  et  $A_1 P$ , puis à l'intersection avec  $F_2$ ,  $a_2 a_3$ , et ainsi de suite...



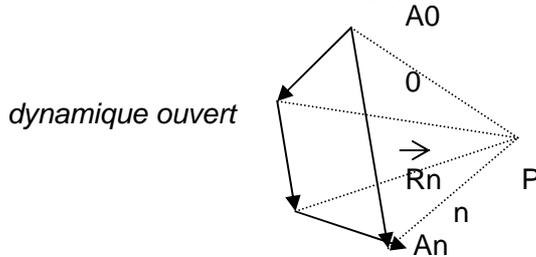
<sup>1</sup> vecteurs équipollents = vecteurs parallèles, de même direction et de même intensité

Le contour polygonal  $a_0a_n$  est appelé **funiculaire**<sup>2</sup> associé au dynamique  $A_i$  et au pôle  $P$ . A tout dynamique, il correspond une infinité de funiculaires, le choix de  $a_0$  et  $P$  étant arbitraire.

Tout **système plan de forces** est équivalent à un système de **deux forces** ayant pour ligne d'action le **premier** et le **dernier côté** du funiculaire et équipollents au premier et au dernier rayon polaires du dynamique, le premier rayon étant parcouru du dynamique vers le pôle, et le dernier rayon étant parcouru du pôle vers le dynamique.

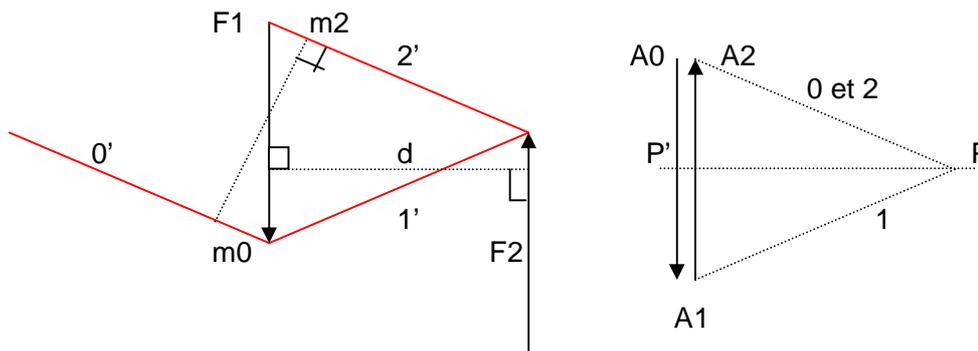


**Le dynamique est ouvert** si ses sommets  $A_0$  et  $A_n$  sont distincts. L'ensemble des  $n$  forces est alors réductible à une force  $R_n$  équipollente à  $A_0A_n$ .



**Si le dynamique est fermé :**

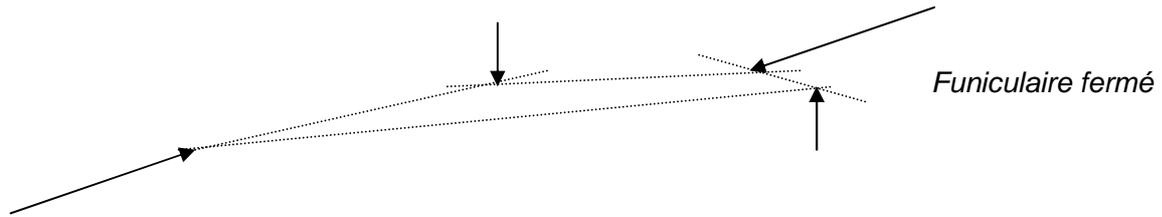
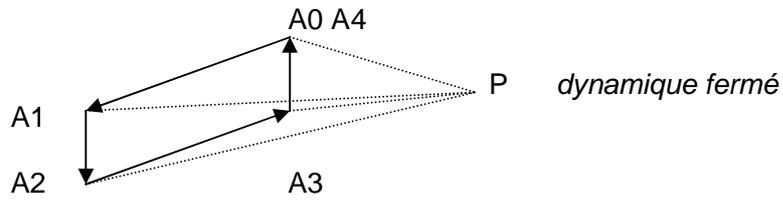
si  $A_0$  coïncide avec  $A_n$ . Les rayons  $a_0-P$  et  $P-a_n$  sont confondus. Si  $o'$  et  $n'$  sont distincts, le funiculaire est ouvert et l'ensemble est réductible à un couple.



*Funiculaire ouvert et dynamique fermé*

Si  $o'$  et  $n'$  sont confondus, le funiculaire est fermé. L'ensemble des forces est réductible à zéro.

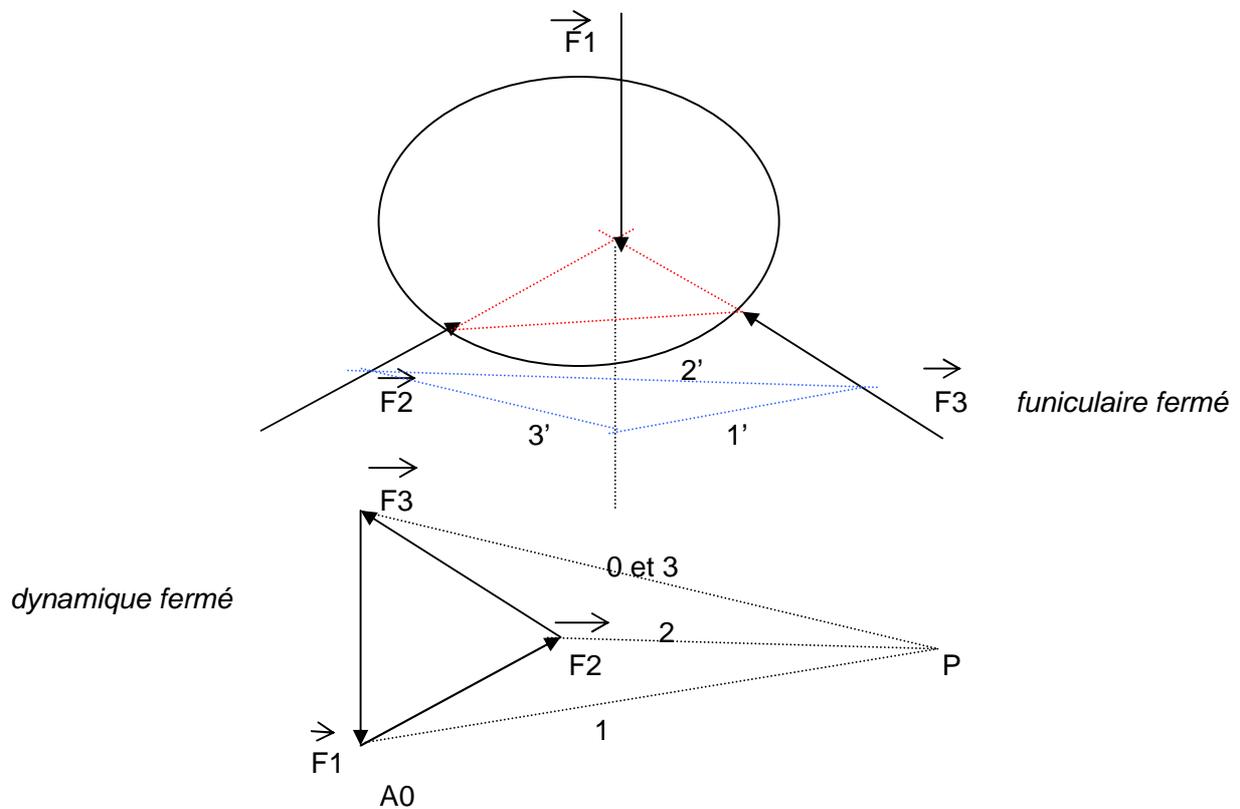
<sup>2</sup> Le mot *funiculaire* vient du latin *funiculus* : petite corde.



Funiculaire et dynamique fermés

### 3.2 EQUILIBRE D'UN CORPS SOLIDE

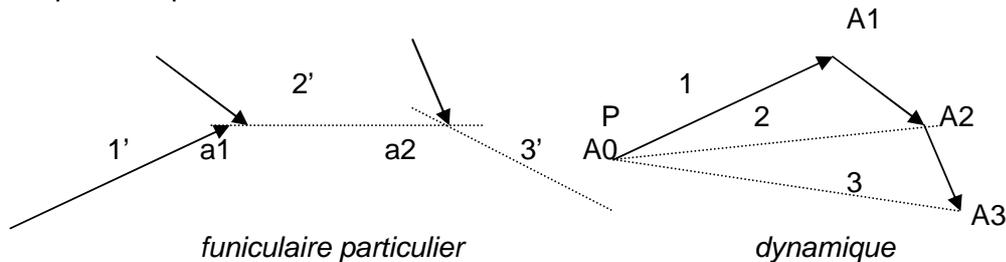
Tout solide soumis à un ensemble de forces ou de réactions d'appui est en équilibre si l'on peut associer à ces forces un polygone dynamique et un polygone funiculaire qui soient tous les deux fermés.



On peut choisir un funiculaire particulier, ayant son pôle situé à l'extrémité d'une des forces. On trouve alors la ligne de pression.

### 3.3 LIGNE DE PRESSION :

C'est le funiculaire particulier pour lequel le pôle P du dynamique est confondu avec A0. La ligne de pression permet de visualiser le cheminement des forces dans la matière.



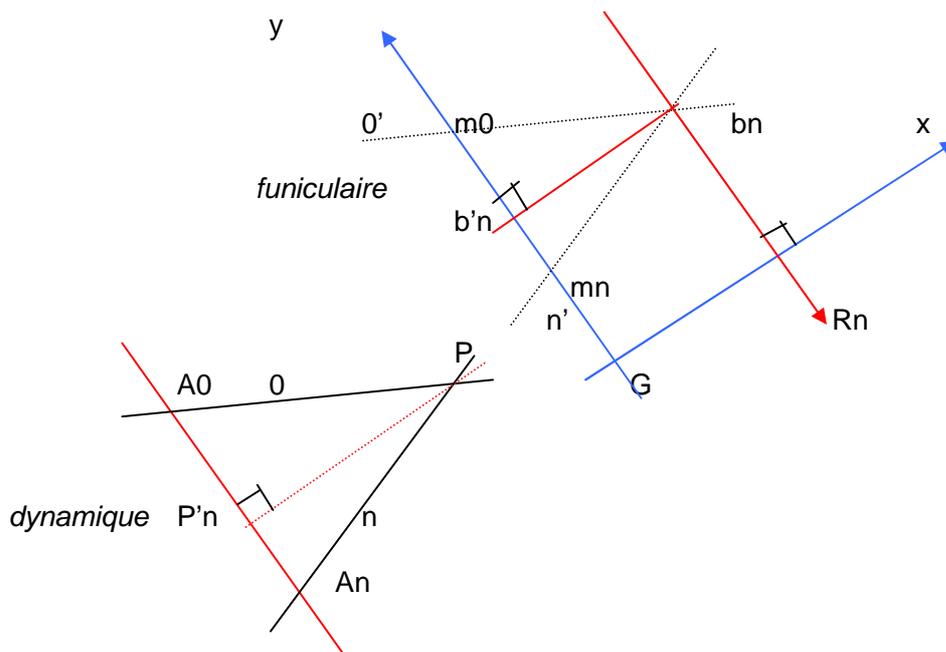
### 3.4 MOMENT RESULTANT D'UN ENSEMBLE DE FORCES Fi

Le moment en un point d'un ensemble de forces est égal au moment en ce point de leur résultante. Lorsque l'ensemble des forces est réductible à un couple, le moment se réduit au moment du couple.

#### Cas 1 : Le dynamique est ouvert

On trace le repère Gxy tel que Gx soit perpendiculaire à Rn, résultante des forces appliquées. Le moment de la résultante est égal à :

$$M = -\vec{R}_n \overline{b'_n b_n}$$



Le moment de la résultante  $R_n$  du funiculaire en G est égal au produit de cette résultante par la distance à l'axe GY. Les triangles P A0 An et bn m0 mn sont semblables. On en déduit la valeur du moment en G.

$$M = -\overline{b'b} \times \overline{R}$$

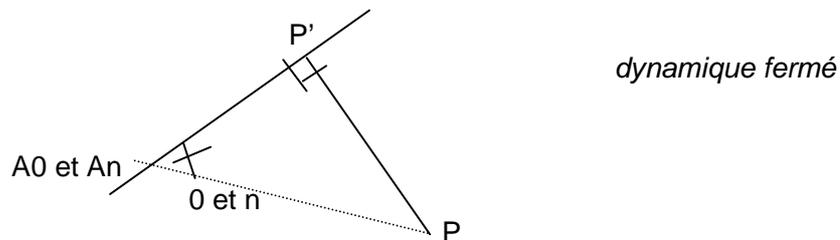
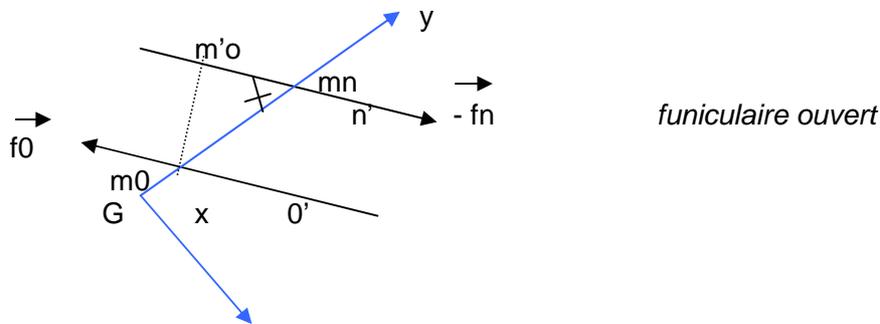
$$\frac{\overline{b'b}}{\overline{m_0 m_n}} = \frac{\overline{P'P}}{\overline{A_0 A_n}}$$

$$\overline{A_0 A_n} = |\overline{R}|$$

$$M = -\overline{P'P} \times \overline{m_0 m_n}$$

### Cas 2 : le dynamique est fermé

On considère le cas où le funiculaire est ouvert (réductible à un couple), car sinon le moment est nul en tout point du plan.



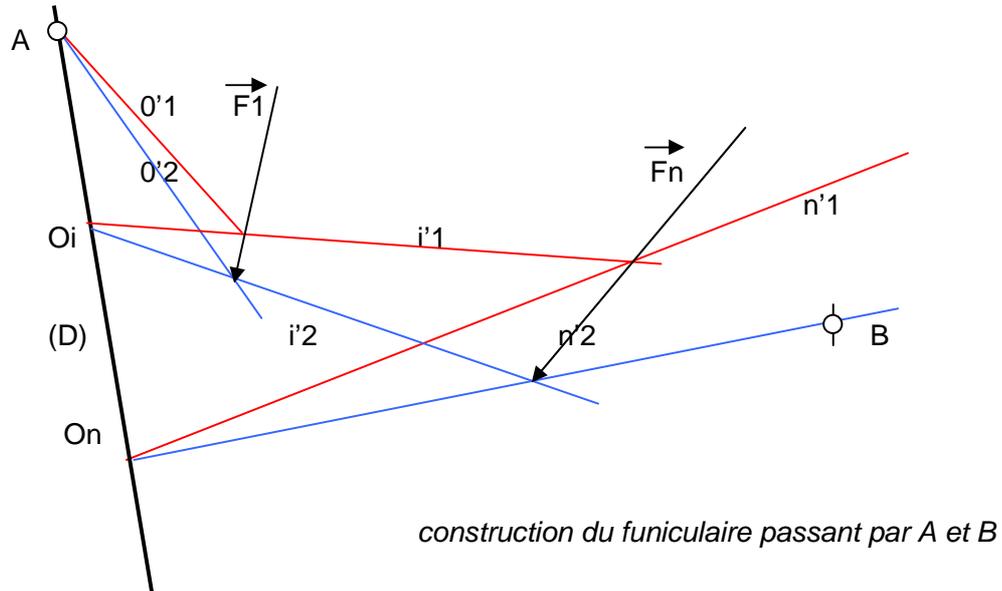
$P'$  est la projection de  $P$  sur la parallèle à  $Gy$  passant par  $A_0$ .  $PA_0$  est parallèle à  $f_0$ . Les triangles  $PP'A_0$  et  $m_0 m'o mn$  sont semblables.

$$\frac{\overline{P'P}}{\overline{A_0 P}} = \frac{\overline{m_0 m'o}}{\overline{m_0 m_n}}$$

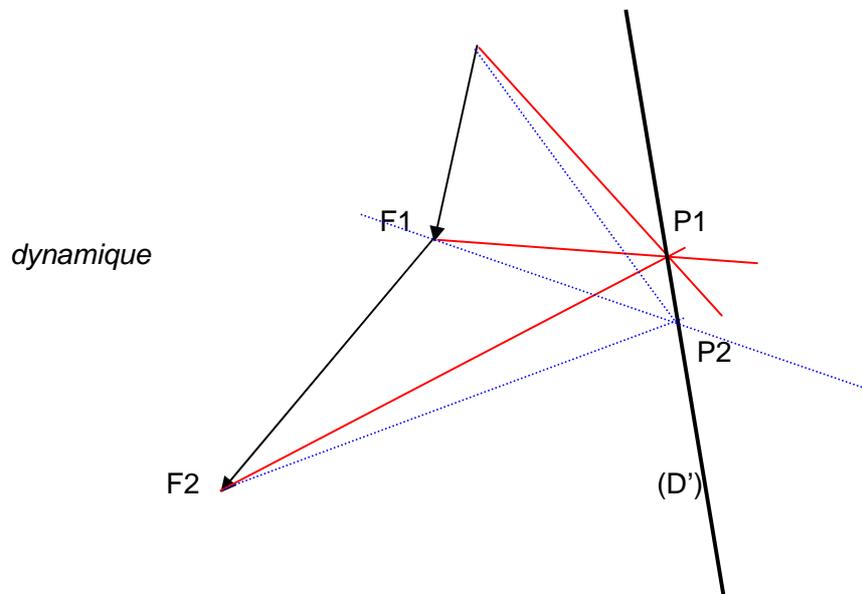
$$\overline{A_0 P} = -\overline{f_0}$$

Le moment est égal à  $M = -\overline{f_0} \times \overline{m_0 m'o} = -\overline{P'P} \times \overline{m_0 m_n}$

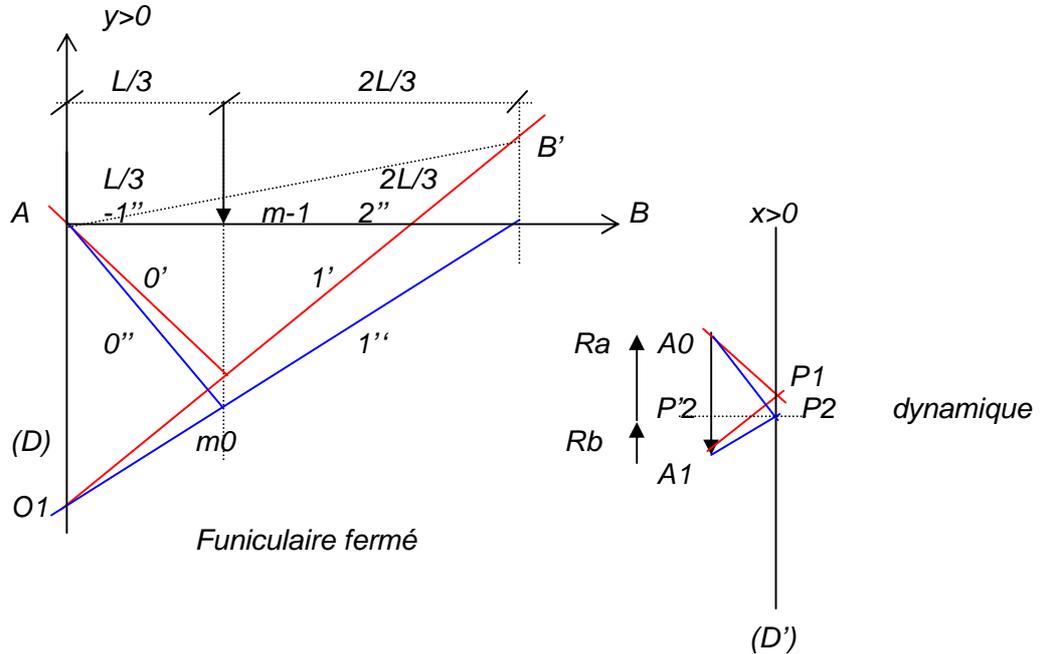
### 3.5 FUNICULAIRE PASSANT PAR DEUX POINTS



On trace un dynamique de pôle P1, puis un funiculaire passant par A. le côté n'1 ne passe pas par B. On choisit une droite D passant par A. On construit l'intersection de n'1 avec D. On obtient le point On. De ce point on trace la droite On B. L'intersection avec Fn permet d'obtenir le côté du funiculaire n'2... De proche en proche, on construit le funiculaire déformé passant par A et B. Le pôle P2 est obtenu par intersection de P1 P2 parallèle à D et d'un rayon quelconque i'2 du dynamique, parallèle à i'2. Cette construction permet de tracer le polygone d'équilibre d'un fil passant par deux points et soumis à des forces concentrées.



**Exemple :** calcul d'une poutre isostatique de longueur L recevant une charge P au 1/3 de sa longueur



On choisit un pôle arbitraire P1.

On trace le dynamique associé au pôle P1, puis le funiculaire associé 0'1'.

Le point B', intersection du rayon 1' avec la réaction d'appui Rb, ne correspond pas avec l'extrémité de la poutre, on fait un changement de pôle par rapport à D, perpendiculaire à AB.

On obtient le funiculaire 0''1''.

Les réactions d'appuis sont trouvées en lisant les grandeurs P'2 A0 et A1P'2.

La poutre est en équilibre sous P, Ra, Rb : le dynamique et le funiculaire doivent être fermés.

La droite AB représente les côtés -1'' et 2'' du funiculaire associé à P2P'2.

Le moment des forces de gauche à l'aplomb de la coupure (ou moment fléchissant) s'évalue simplement en mesurant m-1 m0 (<0) et en mesurant P'2P2 (>0) et en effectuant le produit des longueurs, affecté du signe moins. On retrouve facilement par le graphique le résultat donné par la RDM.

$$\frac{\overline{P'_2 P_2}}{\frac{2P}{3}} = \frac{\frac{L}{3}}{-m_{-1}m_0}$$

$$M = -\overline{P'_2 P_2} \times \overline{m_{-1}m_0}$$

$$M = \frac{2PL}{9}$$

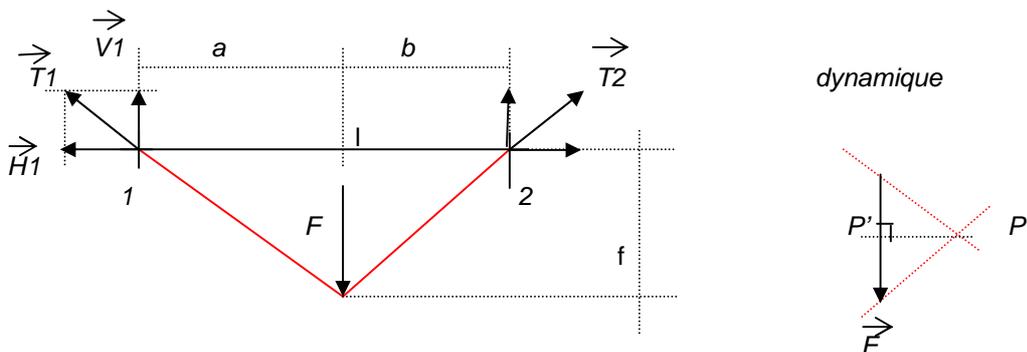
## 4 STATIQUE DES FILS

Un fil est un solide à ligne moyenne infiniment souple et flexible. Tout moment de flexion provoque une déformation importante. L'équilibre d'un fil est obtenu par un tracé tel que l'équilibre des forces de gauche se résume à une traction dans le fil. Ce tracé est funiculaire de l'état de charge appliqué au fil. Le fil est considéré, en première approche comme inextensible. Sa longueur est invariable.

### 4.1 fil soumis à des charges concentrées

La figure d'équilibre est une ligne brisée passant par les appuis. Cette ligne est confondue avec la ligne funiculaire particulière qui a la même longueur que le fil.

**Exemple 1 :** fil soumis à une charge concentrée



Le funiculaire donne la géométrie du fil de longueur  $L$ . La flèche est calculée à partir de la longueur du fil et la position de la charge.

La valeur de la traction horizontale  $H$  est égale à  $PP'$ , distance du pôle à la force  $F$ .

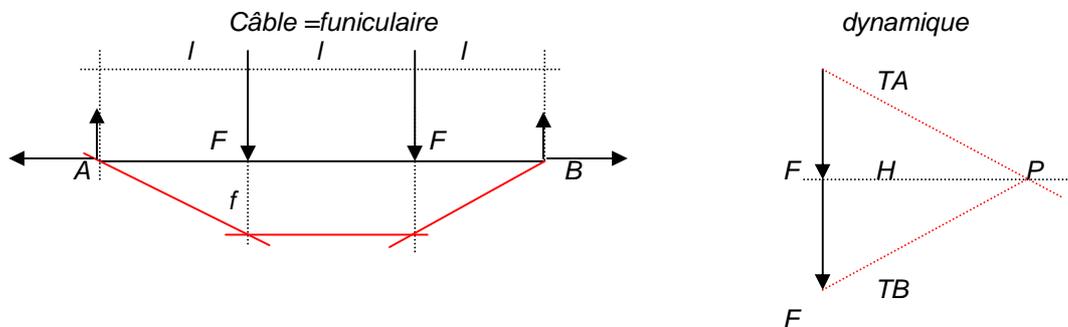
$$T_1 = \frac{\sqrt{a^2 + f^2}}{f} P \frac{b}{a+b}$$

$$T_2 = \frac{\sqrt{b^2 + f^2}}{f} P \frac{a}{a+b}$$

$$L = \sqrt{a^2 + f^2} + \sqrt{b^2 + f^2}$$

$$H_1 = H_2 = H = \frac{Pab}{(a+b)f}$$

**Exemple 2 : fil soumis à 2 charges concentrées**



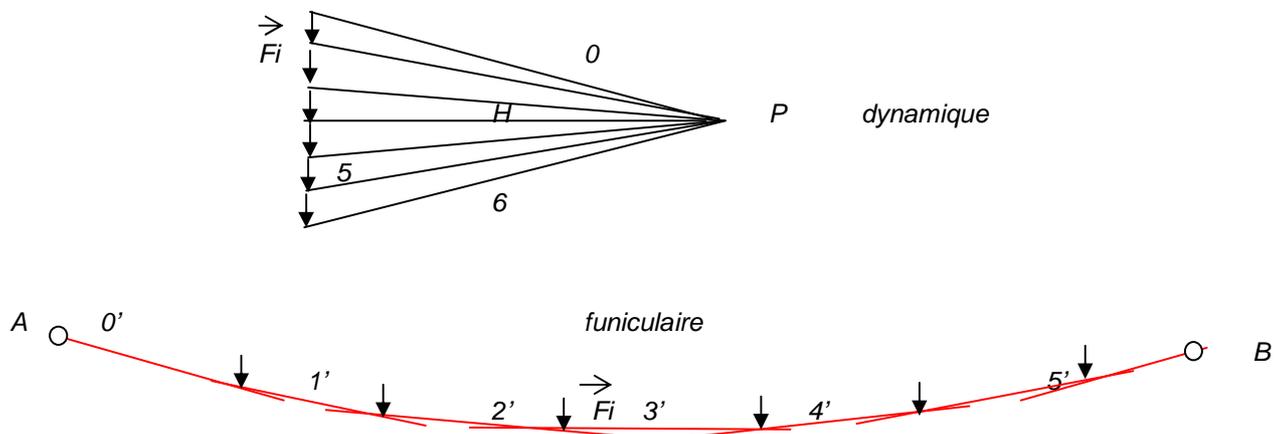
La longueur du fil  $L$  permet d'obtenir la flèche  $f$ . Le calcul du moment le long du fil permet de déterminer  $H$ .

$$\frac{F}{H} = \frac{f}{l} \Rightarrow H = \frac{Fl}{f}$$

$$L = l + 2\sqrt{l^2 + f^2}$$

$$T_A = F \frac{\sqrt{l^2 + f^2}}{f} = T_B$$

**Exemple 3 : fil soumis à  $n$  charges concentrées**

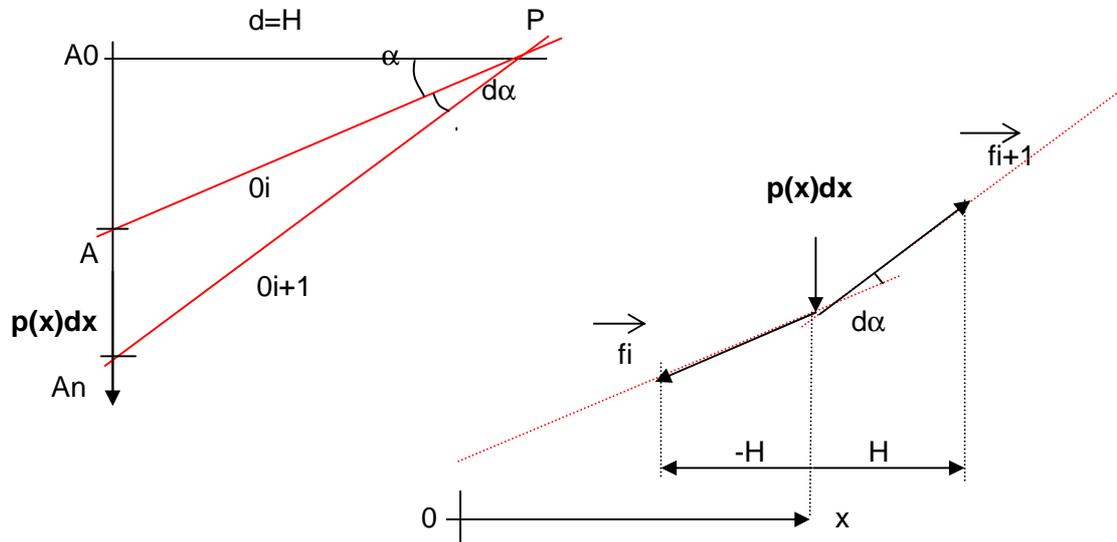


On trouve de proche en proche la ligne funiculaire, qui est aussi la forme d'équilibre du câble. La connaissance de  $L$ , longueur du fil, permet de connaître la forme d'équilibre.

**4.2 fil soumis à des charges réparties**

On découpe les forces en une infinité de petites forces élémentaires et on est ramené au cas précédent. On trouve une courbe dynamique en choisissant P sur l'horizontale de A0, et une courbe funiculaire. La figure d'équilibre du fil est la courbe funiculaire. A l'abscisse  $x$ , correspond

le point A du dynamique repéré par l'angle alpha. A0A correspond à la somme des forces élémentaires  $p(x)dx$  comprises entre 0 et x.  
 La valeur  $AAn/H$  est égale à la variation de l'angle de la tangente au polygone funiculaire, c'est à dire la courbure  $1/R$  de la courbe funiculaire.



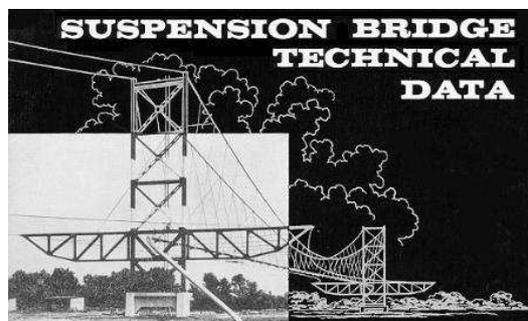
$$A_0A = \sum_0^x p(x)dx = \int_0^x p(x)dx$$

$$\frac{dy}{dx} = \text{tg } \alpha = \frac{\overline{A_0A}}{\overline{A_0P}} = \frac{\overline{A_0A}}{d}$$

$$\frac{d^2y}{d^2x} = \frac{1}{d} \frac{d\overline{A_0A}}{dx} = \frac{p(x)}{d} \quad (1)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{p(x)}{d} = \frac{p(x)}{H}$$

La courbure  $1/R$  est égale à la densité de charge divisée par la composante horizontale de la traction du câble qui est constante. Si  $p$  est constant, la solution de l'équation différentielle (1) est une parabole.

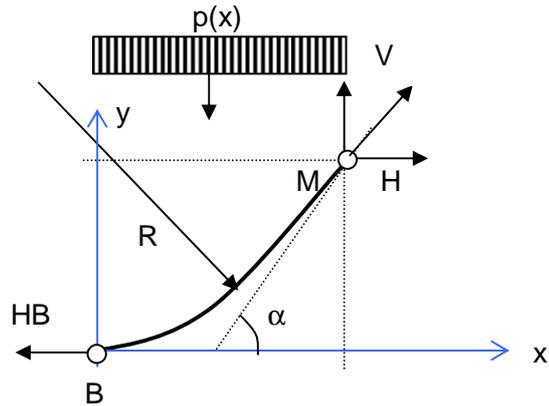


Manuel publié par la compagnie Roebling pour promouvoir l'usage de ses câbles

## 5 NOTION DE CÂBLE FUNICULAIRE ET MODE DE FONCTIONNEMENT D'UN CÂBLE

Galilée, en 1638, décrit la forme d'une chaîne tendue comme celle d'une parabole. La description mathématique d'un câble soumis à ses charges de poids propre est due à Jacques Bernoulli (Bâles-1690).

On considère un câble symétrique plan de longueur  $l$  et de flèche  $f$ , ancré à ses deux extrémités A et C. Il est soumis à une charge uniforme  $p$ , constante. Le point B est situé sur l'axe de symétrie de la figure. Les trois équations de la statique permettent de trouver la tension le long du câble.



$$(1) \sum F_x = 0$$

$$(2) \sum F_y = 0$$

$$(3) \sum M_B = 0$$

$$(1) \Rightarrow H = H_B$$

$$(2) \Rightarrow V = px$$

$$(3) \Rightarrow p \frac{x^2}{2} - Vx + Hy = p \frac{x^2}{2} - px^2 + Hy = -p \frac{x^2}{2} + Hy = 0$$

$$(4) y = \frac{p}{2H} x^2$$

C'est l'équation d'une parabole rapportée à son sommet B. L'équilibre des forces permet de définir la géométrie du câble. En désignant par  $R$  le rayon de courbure au sommet, l'équation devient :

$$y = \frac{x^2}{2R}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dy}{dx} = \frac{x}{R} = \frac{px}{H}$$

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{R} = \frac{p}{H}$$

On retrouve ainsi l'équation différentielle établie à l'aide de la statique graphique au paragraphe précédent. Le rayon de courbure est obtenu en reportant  $f$  (flèche) et  $l$  (distance entre ses extrémités) dans l'équation du câble. Il est égal à :

$$R = \frac{l^2}{8f}$$

On en déduit que la **composante horizontale H est constante tout le long du câble** et égale

$$\text{à : } H = pR = p \frac{l^2}{8f}$$

La force V croit du centre vers les extrémités du câble. D'après le théorème de Pythagore, la tension du câble T est égale à:

$$T = \sqrt{H^2 + V^2} = H \sqrt{1 + \left(\frac{V}{H}\right)^2} = H \sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{dy}{dx} = \frac{x}{R} = \frac{8f}{l^2} x$$

$$T = H \sqrt{1 + \left(\frac{x}{R}\right)^2}$$

**La tension du câble croit avec l'abscisse x.** Elle est maximale aux extrémités du câble, c'est à dire aux ancrages A et C.

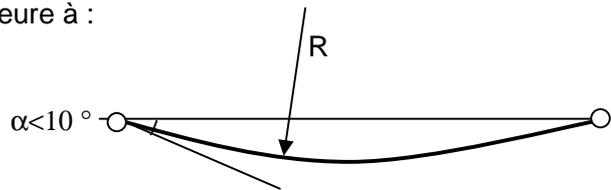
La longueur du câble est obtenue, avec une approximation suffisante, grâce à la formule

$$\text{suivante : } L = l + \frac{8f^2}{3l} - \frac{32f^4}{5l^3}$$

### Câble surbaissé :

On dit que le câble est surbaissé quand l'angle de la tangente aux extrémités est inférieur à 10 degrés. La tangente de l'angle est alors inférieure à :

$$\operatorname{tg} \alpha \leq 0.176$$



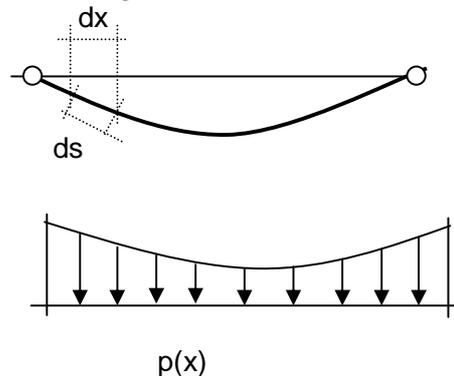
Et la tension maximale du câble est égale à :

$$T = H \sqrt{1 + \left(\frac{x}{R}\right)^2} = T = H \sqrt{1 + (0.176)^2} = 1.015H$$

La tension T peut être considérée comme **constante** (variation inférieure à 1.5%) tout le long du câble et égale à H.

### Chaînette :

Si l'on examine l'équilibre d'un câble sous l'effet de son poids propre  $p_0$ , la charge par mètre de longueur n'est plus uniforme, mais sa répartition dépend de la pente du câble : la charge est plus forte vers les appuis, lorsque la pente du câble augmente.



$$p(x)dx = p_0 ds$$

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{p_0}{H} \frac{ds}{dx}$$

$$ds = \sqrt{dx^2 + dy^2} = dx \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} = dx \sqrt{1 + y'^2}$$

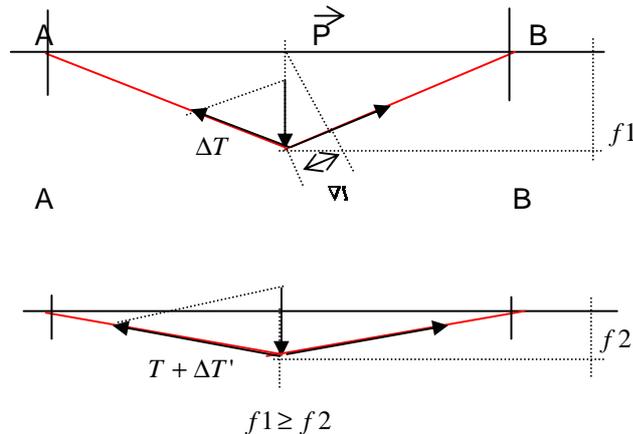
$$\frac{d^2 y}{dx^2} = \frac{p_0}{H} \sqrt{1 + y'^2}$$

La solution de cette équation différentielle donne l'équation du câble, qui est une chaînette (courbe en sinus hyperbolique). Cette courbe est « plus ronde » que la parabole.

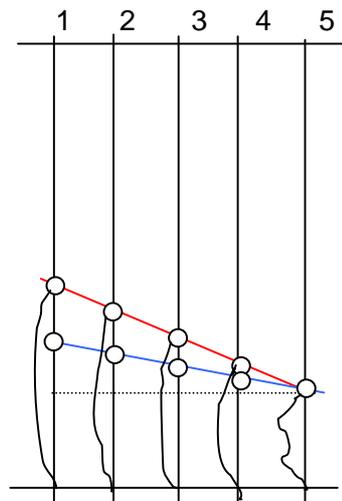
## 6 INTERÊT DE LA PRECONTRAÎTE D'UN CÂBLE

**Exemple 1 :** Lorsque le câble n'est pas précontraint, la figure d'équilibre ne dépend que de la longueur du câble et de son allongement sous l'effet de la charge. Cette déformation peut être importante.

Lorsque l'on tend le câble, avant application de la charge, le câble se déforme jusqu'à l'obtention de l'équilibre des forces internes et de la charge appliquée. La flèche du câble est plus faible que dans le cas précédent, car la composante de la force de précontrainte dirigée dans le même sens que l'action croît avec l'angle du câble. L'état d'équilibre est atteint plus tôt et la flèche totale est plus faible.



**Exemple 2 :** Considérons un fil vertical, non tendu. A mi-hauteur on accroche un poids P que l'on augmente progressivement. La partie inférieure se détend. L'allongement du câble lorsque la charge augmente ne dépend que des caractéristiques mécaniques de la partie supérieure: longueur du fil, section, module. Si l'on précontraint ce fil, la déformation dépendra de la rigidité de la partie supérieure et de la partie inférieure tant que cette dernière restera en tension, et ce, jusqu'à ce que la précontrainte inférieure soit annulée par l'allongement relatif du fil. La déformation relative sera la moitié de celle obtenue dans le cas du fil sans précontrainte. La précontrainte raidi le système. Le dernier point 5 correspond à l'annulation de la précontrainte inférieure. Les déformations du fil non tendu et du fil précontraint sont égales.



## 7 TECHNOLOGIE DES CÂBLES

### 7.1 LES DIFFERENTS TYPES DE CABLES

On utilise plusieurs types d'éléments tendus :

- Les barres à haute résistance ou en acier ordinaire
- Les câbles faits de fils tréfilés parallèles
- Les monotorons
- Les câbles toronnés ou assemblages de torons
- Les câbles clos

#### **BARRES EN ACIER A HAUTE RESISTANCE**

TYPE	SECTION (mm <sup>2</sup> )	CLASSE	Frg (KN)	frg (Mpa)	Feg (KN)	feg (Mpa)
Φ 26	531,0	1030	547	1 030	443	834
Φ 26	531,0	1230	653	1 230	575	1 083
Φ 32	804,0	1030	830	1 032	670	833
Φ 32	804,0	1230	990	1 231	870	1 082
Φ 36	1018,0	1030	1 050	1 031	850	835
Φ 36	1018,0	1230	1 250	1 228	1100	1 081

Utilisées pour mettre en précontrainte des pièces courtes

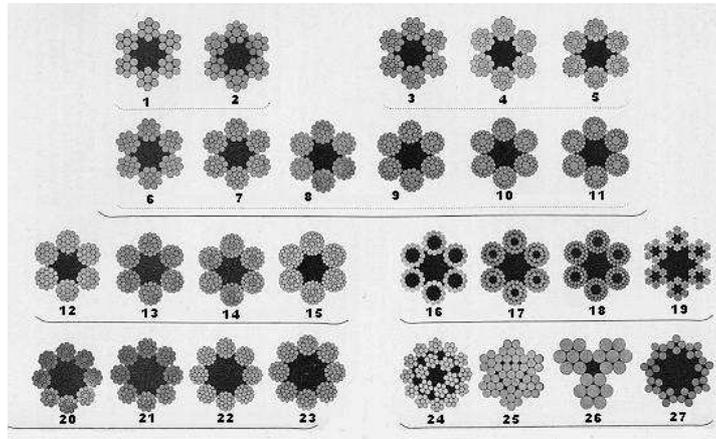
#### **BARRES EN ACIER 460 POUR TIRANTS**

*(Utilisées pour des haubans de faible puissance)*

Type	Diamètre (mm)	Section (mm <sup>2</sup> )	Frg (kN)	Feg (kN)	Poids Kg/m
M20	19	254	153	115	2
M24	22	380	221	167	2.95
M30	28	572	350	264	4.6
M36	34	855	510	384	6.75
M42	39	1195	694	523	9.18
M48	44.	1520	911	687	12.09
M56	52	2124	1253	945	16.6
M64	59	2827	1649	1244	21.9
M76	71	4072	2381	1795	31.6
M90	85	5809	3403	2566	45.2
M100	95	7238	4243	3200	56.3

**FILS TREFILES A FROID EN ACIER A HAUTE RESISTANCE** *(utilisés pour fabriquer des câbles à fils parallèles : haubans, précontrainte du béton)*

TYPE	SECTION (mm <sup>2</sup> )	CLASSE	Frg (KN)	frg (Mpa)
Φ 7	38.5	1570	60.4	1570
Φ 8	50.2	1570	79	1570
Φ 7	38.5	1670	64.3	1 670
Φ 8	50.2	1670	84	1 670



Arrangements de câbles toronnés selon le catalogue de la compagnie Roebling  
Utilisés pour des suspensions de pont

### **TORONS EN ACIER A HAUTE RESISTANCE**

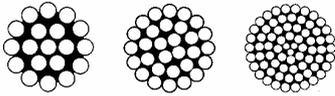
Utilisés pour des câbles de précontrainte et des haubans

TYPE	SECTION (mm <sup>2</sup> )	CLASSE	Frg (KN)	frg (Mpa)	Feg (KN)	feg (Mpa)
T 13 standard	93,0	1860	173	1 860	154	1 656
T13 standard	93,0	1770	164	1 763	146	1 570
T 15 standard	139,0	1770	246	1 770	220	1 583
T 15 standard	139,0	1670	232	1 669	207	1 489
T 13 super	100,0	1860	186	1 860	166	1 660
T 15 super	150,0	1770	265	1 767	236	1 573
T 15 super	150,0	1860	279	1 860	249	1 660

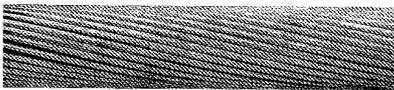
**LES MONOTORONS (enroulement en spirale):**  
*(utilisés pour des haubans, suspentes et des suspensions)*

Spiral Strand

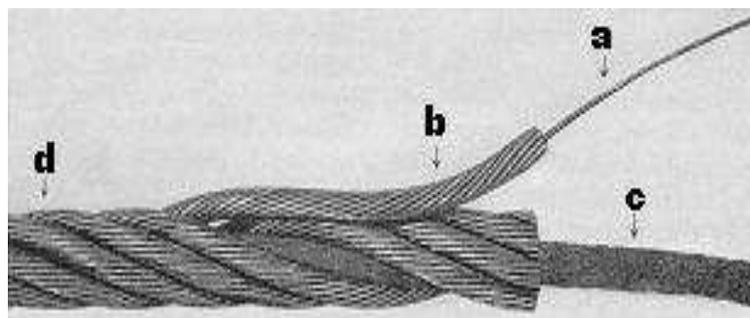
Spiral strands consist of large diameter galvanised round wires helically spun together. The wires are stranded in one or more layers, mainly in opposite directions, to the required diameter.



Spiral Strand



Diamètre mm	Section mm <sup>2</sup>	Masse par m Kg/m	Rigidité axiale (EA) Nm	Force de rupture grade 1570 kN	Force de rupture grade 1770 kN
13	105	0.85	18.4	152	171
16	156	1.26	27.3	225	254
30	530	4.29	92.8	766	864
40	942	7.63	160.1	1362	1536
50	1473	11.91	243	2129	2400
60	2121	17.2	350	3065	3456
70	2891	23.6	462.6	4169	4700
80	3673	30.8	569	5240	/
90	4653	39	721	6640	/

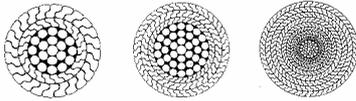


## LES CABLES CLOS :

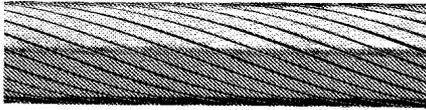
(Utilisés pour des haubans , suspentes, et suspension)

### Locked Coil Strand

Locked coil strand consists of a centre of one or more layers of large diameter galvanised round wires helically spun together. Covering this centre are one or more layers of large diameter galvanised shaped wires, mainly in opposite directions to the required diameter.



### Locked Coil Strand



Diamètre mm	Section mm <sup>2</sup>	Masse par m Kg/m	Rigidité axiale (EA) Nm	Force de rupture kN
30	594	5.3	92	858
40	1090	7.22	125	1170
50	1710	15.3	265	2470
60	2490	22.2	386	3590
70	3390	30.2	525	4990
80	4420	39.5	685	6390
90	5600	50	868	8090
100	6990	62.6	1083	10100
110	8460	75.7	1311	12200
120	10100	90.1	1565	14500
130	11900	107	1844	16200

## 7.2 DOMAINE D'EMPLOI :

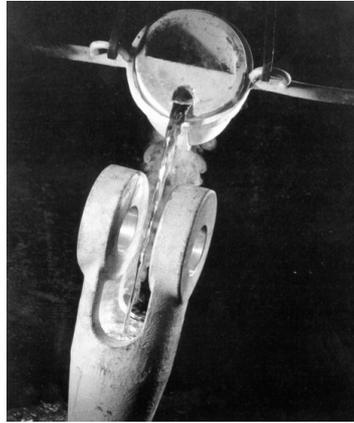
Les barres sont utilisées lorsque les longueurs des tirants sont courtes et que les efforts de traction sont faibles. Le réglage s'effectue par manchons filetés et les extrémités doivent être articulées. Elles sont handicapées par leur poids et lorsqu'il y a des flexions parasites qui créent des variations de contraintes nuisibles vis à vis de la résistance à la fatigue.

Les câbles sont utilisés lorsque la finesse des tirants est recherchée ou lorsqu'une précontrainte importante est nécessaire pour raidir la structure.

Les câbles toronnés sont principalement utilisés dans les ouvrages d'art à haubans ou les ponts sous tendus, qui demandent des puissances considérables et une mise en tension active.

Les câbles clos et les monotorons sont utilisés pour les toitures, les câbles de rive des structures en textile, les suspentes des arcs de type bow-string, et certains ouvrages haubanés. Les câbles clos permettent la reprise de charges importantes, avec des diamètres faibles.

Les pièces d'ancrage sont volumineuses (culots sertis à la résine ou au zinc, barres relais et vérins de traction). Ces dispositions technologiques doivent être intégrées avec soin dans le projet définitif.



*sertissage d'un culot au zinc*

### **7.3 PROTECTION CONTRE LA CORROSION :**

Elle est assurée par peinture ou métallisation pour les barres, par gaine PEHD et enrobage de cire pétrolière ou au coulis de ciment pour les torons, par galvanisation et peinture pour les câbles clos et les groupes de torons des ponts suspendus. Certains câbles ou barres peuvent être réalisés en acier inoxydable mais les caractéristiques mécaniques sont plus faibles.

### **7.4 MODULE D'ELASTICITE :**

Il est égal à 200 000 Mpa pour les barres et les fils, et à 190 000 Mpa pour les torons. Il est plus faible (car c'est un module apparent que l'on mesure, et non le module du métal seul) pour les câbles clos, et les groupes de torons torsadés. Il varie alors de 140 000 à 157 000 Mpa

### **7.5 CONTRAINTE ADMISSIBLE :**

On adopte généralement une tension admissible inférieure ou égale à 0.45 Frg, avec Frg la force de rupture du câble. Les variations de tension doivent rester inférieures à 0.20 Frg sous l'effet des charges d'exploitation et des charges climatiques pour éliminer le risque de rupture par fatigue de l'acier.



*Williamsburg Bridge (1903)*