

# CHAPITRE 4 : LES STRUCTURES TENDUES

## 4.1 Introduction

Le développement des technologies et de matériaux légers de grande résistance : textiles divers, aluminium, plastiques armés, aciers spéciaux, titane, etc. Ceci à permet de réaliser des structures et des enveloppes de plus en plus légères pour franchir des espaces toujours plus vastes. Elles apportent des satisfactions esthétiques et répondent à des besoins nouveaux : enveloppes modulables, escamotables, laissant passer la lumière et libérant les espaces courants de toute contrainte de structure ;

Les éléments tendus sont particulièrement efficaces car ils utilisent totalement les capacités résistantes de l'acier pour éliminer les phénomènes d'instabilité tel que le flambement ou le cisaillement. Cette technique permet en outre d'utiliser des matériaux incapables de résister à la compression ou à la flexion, tels que les tissus naturels ou synthétiques, qui travaillent au maximum de leur capacité à la traction.

## 4.2 Structures en câbles

Afin de réaliser des structures de grandes portées, les ingénieurs ont recours à des structures utilisant des câbles ou des tirants avec une faible quantité de matière est donc un poids de structure réduit. Le système porteur est souvent constitué de câbles ou de barres tendues associés à des poutres. Dès que la portée devient grande, on utilise généralement des câbles en acier dur pour réaliser la suspension.

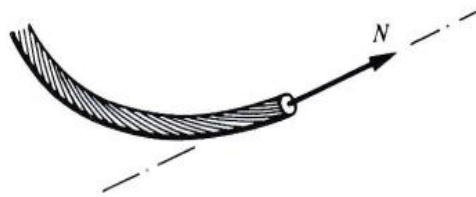
### 4.2.1 Câbles

Ce sont des éléments souples de faible diamètre vis-à-vis à leurs longueurs, composés d'un groupe de fils d'acier à haute résistance tordus ensemble mécaniquement. On admet généralement que les câbles sont parfaitement flexible, donc ils n'offrent de résistance ni à la torsion, ni à la flexion, ni à l'effort tranchant, ni à la compression. Alors les câbles ne peuvent supporter que les contraintes de traction directe, en raison de leur résistance élevée à la traction et de leur manière efficace de transmettre la charge, les structures de câbles sont capables de supporter les charges importantes des structures à longue portée de manière plus économique que la plupart des autres éléments structurels.

Entant donné que le câble ne travaillant qu'en traction, les fabricants ont réalisé des aciers pour câble à très haute résistance, qui peut reprendre des charges avec peu de matière. Malgré le cout élevé de l'acier, le câble est un élément de construction compétitif.

### **Mode de travail du câble**

Dans le câble ne peut naitre que l'effort normal de traction, souvent appelé *tension* du câble dirigé suivant la tangente à l'axe du câble comme le montre la figure ci-dessous.



Le câble non chargé est totalement lâche donc n'a pas de forme définie, il ne peut supporter aucune force. Ce sont les charges qui, mettant le câble en tension, définissent du même coup sa configuration. Donc pour rigidifier un câble, il faut le charger et on obtient alors une structure en câbles que si elle est rechargée.

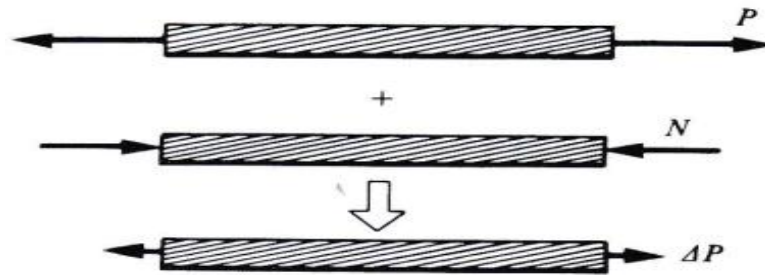
Le poids propre suffit parfois à assurer cette précharge (poids du tablier des ponts suspendus par exemple), mais s'il est trop faible, il faut la créer dans la structure lors de son montage par une opération de *prétension* qui introduit un jeu d'efforts normaux initiaux dans les câbles (toiture légère par exemple). Pour ce convaincre de la nécessité de cette opération et pour imaginer la manière dont on peut la créer, il suffit d'observer ce qui se passe lors de l'ouverture d'un parapluie (la toile est un réseau de câbles en miniature).

L'opération de prétention est nécessaires presque pour toutes les structures en câbles, elle a trois avantages :

- Rigidifier la structure et définit sa géométrie ;
- Permettre un réglage des efforts intérieurs c'est-à-dire une distribution harmonieuse des efforts totaux (prétention et efforts des charges) ;
- Elle permet la reprise des efforts de compression dus aux charges.

En effet, si un élément est soumis à une traction initiale  $\mathbf{P}$ , il peut supporter, sans se détendre, une compression superposés  $\mathbf{N}$ , si elle est d'intensité moindre que  $\mathbf{P}$ , afin que sous l'effet combinée de la prétension et de la compression, il reste une légère tension  $\Delta\mathbf{P}$  dans le câble c'est-à-dire :

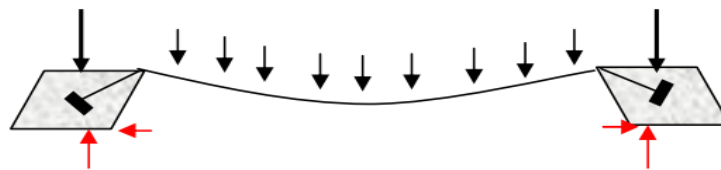
$$\Delta\mathbf{P} = \mathbf{P} - |\mathbf{N}| > \mathbf{0}$$



### *Stabilité des structures à câbles*

La stabilité de l'ensemble de ce type de structure peut être assuré par :

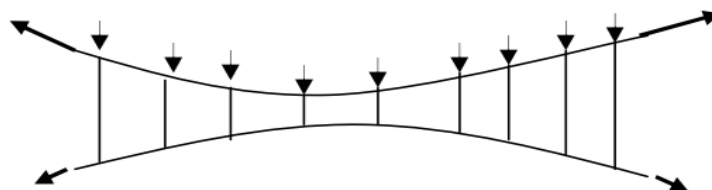
- **La masse de la structure** : C'est la formule choisie au Stade de France où un lest en béton situé à l'extrémité de la toiture, empêche le soulèvement du porte-à-faux. C'est également le cas des ponts rubans, le béton assurant le non-soulèvement de la structure et sa stabilité transversale. Les culées d'ancrage ont une masse élevée pour s'opposer à la traction du câble.



### **Principe statique du pont ruban**

- **La précontrainte** : C'est le cas des poutres à câbles où deux câbles de courbures opposées sont liés entre eux par des éléments tendus ou comprimés. Sous charge, le câble supérieur se tend, et le câble inférieur se détend. La tension initiale des câbles permet de conserver la rigidité de l'ensemble quel que soit le cas de charge.

C'est également le cas des nappes de câbles tendues sur des poutres de rive rigides ou des ancrages.



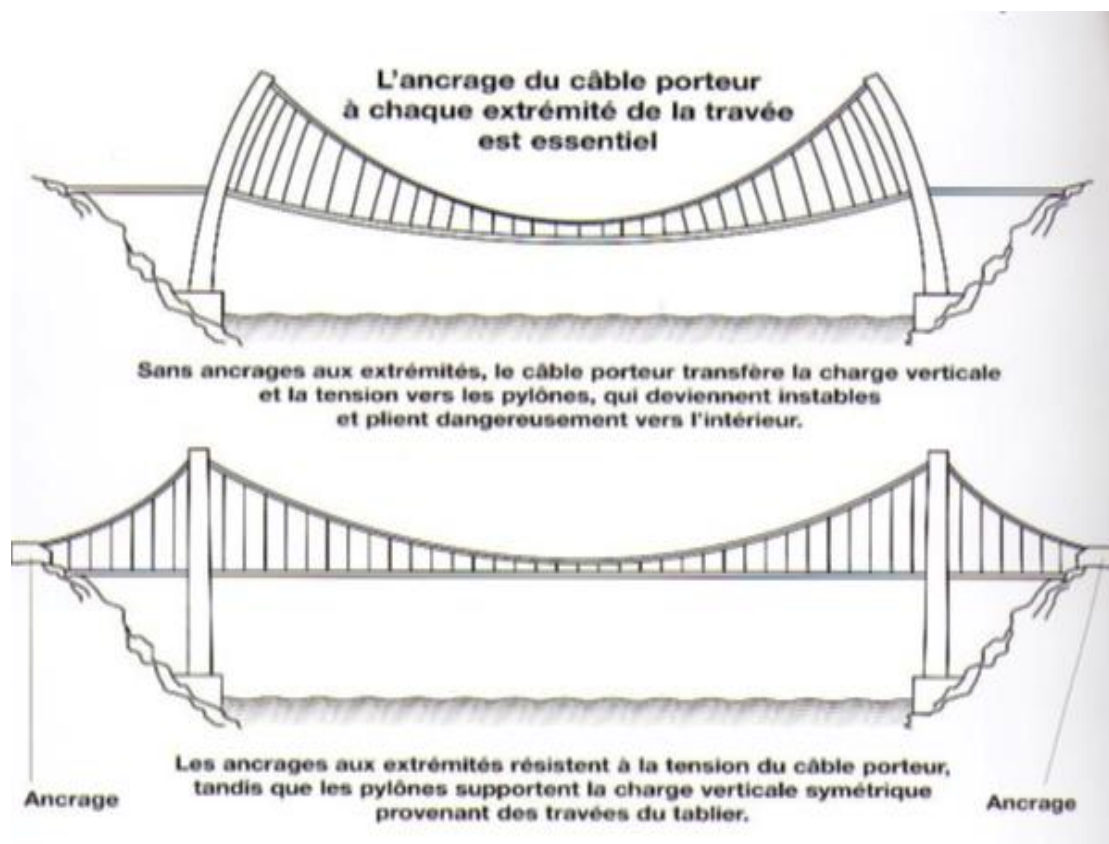
- **les éléments de structure de propriétés différentes** : Une poutre rigide ou semi-rigide est portée par des câbles. La poutre ou la dalle assure la résistance aux flexions et torsions locales.

Elle assure également le transfert des charges jusqu'à la suspension. C'est le cas des ouvrages haubanés, suspendus ou sous-tendus. On appelle ces constructions des structures hybrides. Parfois, la poutre porteuse sert à ancrer le câble : c'est le cas général pour les ouvrages haubanés ou sous-tendus. La poutre reçoit donc un effort normal important. Les câbles des ouvrages suspendus sont, quant à eux, ancrés sur d'imposants massifs.

#### 4.2.2 Familles de structures à câbles :

**Les structures suspendues :** C'est une structure qui reprend le principe de fonctionnement des ponts suspendus. Chaque câble du tablier reprendre les charges du tablier suspendu au câble principale. Ce dernier nécessite un ancrage ou extrémités dans le cas d'une force de traction. Les charges à considérer sont constituées du poids propre, de la neige, de surcharges constantes ou mobiles, de certaines sollicitations du vent.

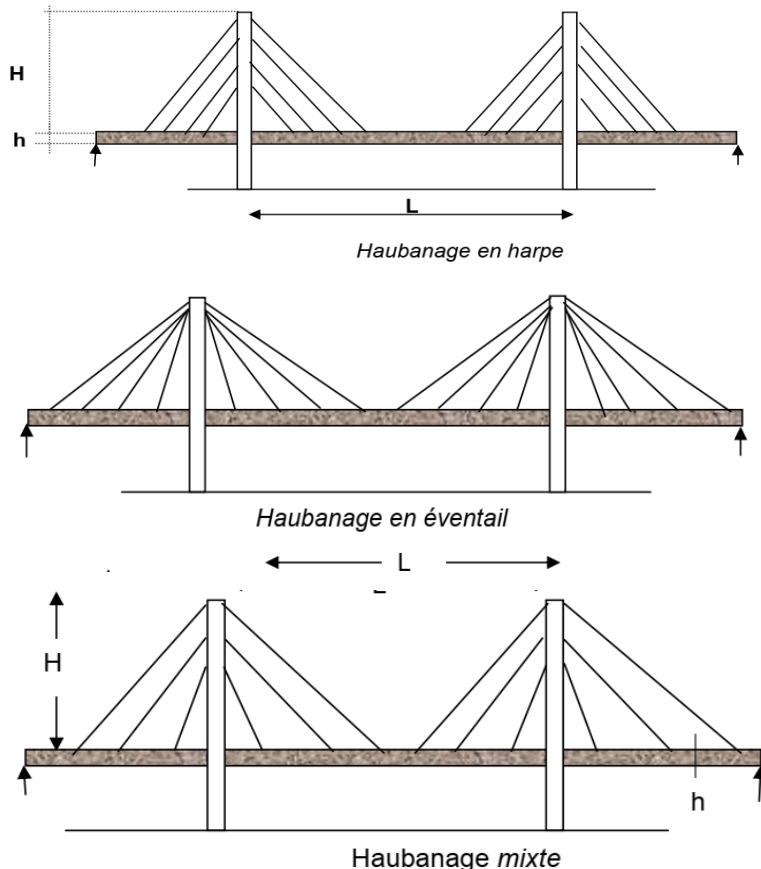
Les ouvrages suspendus sont constitués d'un câble porteur, de suspentes régulièrement espacées, et d'une poutre appelée poutre de rigidité. Le rapport de la hauteur des pylônes à la portée  $L$  est de  $0.10L$  à  $0.15L$ . Ces structures sont très utilisées pour les ponts et passerelles de très grande portée.



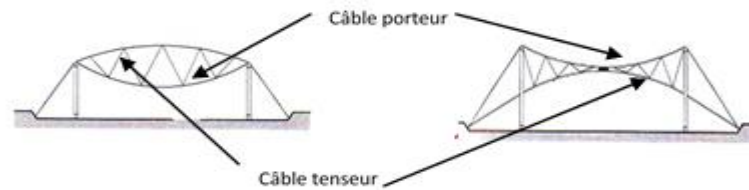


**Les structures haubanées :** Les structures haubanées concernent essentiellement les ponts. Le haubanage est l'élément fondamental assurant le fonctionnement statique de la structure. Il existe trois façons de fixer les haubans en tête de pylône : en éventail, en harpe et mixte. Chaque câble reprend une partie du poids du tablier (ou de la structure horizontale) et, du fait de leur inclinaison par rapport à la verticale, ils provoquent une compression dans le tablier. À noter que les efforts de compression doivent s'équilibrer, d'où la symétrie du haubanage par rapport au pylône. Ceci explique également le mode de montage usuel de ce type d'ouvrage à partir du pylône.

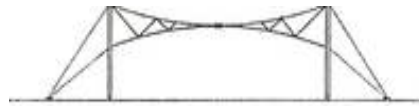
Le rapport hauteur du mât à la portée  $H/L$  de la poutre porteuse est voisin de 0.20 à 0.25 pour un système symétrique constitué de deux mâts et une traverse. L'espacement des haubans sur la traverse doit être tel que la flexion de cette poutre reste limité entre deux haubans consécutifs.



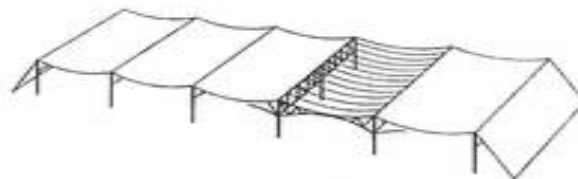
**Les poutres à câbles (Systèmes planaires) :** Dans ces structures, les éléments sont tendus. Aucune pièce n'est comprimée ni fléchie. Toutes les sollicitations extérieures sont reprises par des câbles. On associe deux câbles dont chacun permet d'exercer sur l'autre l'action complémentaire : câble porteur P le câble dont la concavité est tournée vers le haut, il résiste aux charges de poids propre, neige, surcharge fixes ou mobiles et câble tenseur T celui dont la concavité est tournée vers le bas, il résiste aux soulèvements dus à l'action du vent. La tension initiale de chaque câble est calculée pour que les membrures ne se détendent jamais. Ces poutres sont donc précontraintes, et doivent être ancrées en rive.



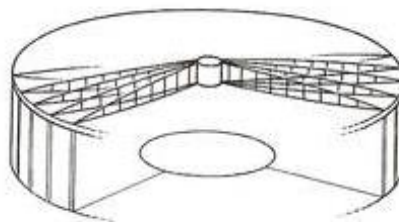
Pour certaines réalisations, on utilisera plutôt des poutres à câbles rayonnants. On reprend dans ce cas de figure le principe de fonctionnement des roues de vélo, avec des câbles tendus qui transmettent les efforts à un élément de rive en compression qui permet d'éviter la mise en place de haubans d'ancrage. La figure ci-dessous montre les différentes structures légères avec des poutres à câbles porteur et tenseur.



**Poutre-câble à une travée.**



**Poutres-câbles à travées continues.**



**Poutres-câbles en fuseau.**

## 4.3 Les membranes

Parmi les différents types de structures spatiales, la catégorie des membranes tendues prend une place exceptionnelle en raison des courbures spatiales dans sa conception : plus que d'autres catégories, elle est une combinaison de science et d'art, de savoir-faire scientifique et d'émotion des concepteurs. Les membranes sont des matériaux assez nouveaux apparus dans le domaine de la construction après avoir été initialement l'objet de recherches pour l'industrie aérospatiale. De nature chimique, les membranes sont des surfaces couvrant de vastes espaces avec très peu de matière. Leur stabilité est obtenue par la mise en tension de leur surface, au moyen de structures périphériques sur lesquelles elles s'appuient (en acier ou aluminium généralement), en créant des formes paraboliques autostables, ou alors en les arrangeant de façon à former des volumes gonflables. Elles sont légères, très souples, et se dilatent facilement en présence de chaleur

Les membranes tendues sont des systèmes structurels spatiaux où les membranes soumises à des contraintes de traction jouent un rôle majeur dans le comportement structurel de structures entières. Selon cette définition, il existe deux types différents de membranes tendues, caractérisées par la nature de la prétension : soit de la surpression (prétension provoquée par l'air perpendiculaire à la surface de la membrane), soit de la prétension à la surface de la membrane :

### 4.3.1 Les structures pneumatiques

Il existe de nombreux outils dans notre vie quotidienne basés sur le principe pneumatique comme les pneumatiques d'une voiture, les gilets de sauvetage, les issues de secours pour les gros avions et les matelas gonflables à des fins thérapeutiques. Et nous connaissons également le même principe dans la forme des structures pneumatiques ouvertes dans les voiles de yacht, les parachutes et les planeurs de vent. Le développement des structures pneumatiques a été très important dans les années 50 et 60, mais au cours des 2 dernières décennies, il a eu lieu principalement aux États-Unis, où les applications qui ont été développées au cours des deux dernières décennies sont principalement des revêtements de grands stades intérieurs, couvrant des portées de 100m et plus. Pour ces applications, on utilisait normalement un tissu à membrane des années 70. Le tissage de polyester enduit de PVC a été remplacé par la fibre de verre enduite de PTFE plus durable et incombustible. Sur des portées d'une telle ampleur, les membranes ont été renforcées par un filet de câble à échelle macro pour absorber les principales contraintes. Ces structures pneumatiques renforcées n'ont qu'un poids propre d'environ 0,05 à

0,10  $kN / m^2$  et peuvent être considérées à première vue (en dehors des fondations) comme de véritables structures légères.

### 4.3.2 Membranes précontraintes

Les structures membranaires précontraintes appartiennent aux structures les plus importantes au sens structurel en ce qu'elles sont composées de matériaux qui ne peuvent résister qu'aux contraintes de traction pour la surface de la membrane et principalement à la compression pour les mâts, les arcs et autres éléments en forme de barres. La nature de ces différences a été suivie très attentivement par ses développeurs : les surfaces de traction qui pouvaient également résister aux contraintes de flexion n'étaient pas appréciées comme des membranes purement étirées, par exemple les deux stades olympiques conçus par Kenzo Tange à Tokyo. 1964. Les toits du gymnase intérieur et de la piscine sont constitués de profilés en acier précurbés avec un revêtement en acier sur le dessus : mécaniquement ces toits ne se comportent ni comme un toit suspendu, ni comme une structure de poutre conventionnelle : les poutres réduisent la flexion moments comparables à un toit purement suspendu, ou la forme suspendue a donné aux poutres une portée beaucoup plus grande. Le résultat avait l'avantage de combiner deux techniques.

La technique des membranes précontraintes est basée sur la logique de stabilisation d'une structure de toiture en utilisant uniquement des matériaux tendus. Lorsqu'un câble s'étend sur deux points, il s'affaisse à cause de son propre poids mort sous la forme d'une caténaire. Selon l'affaissement, la forme de la caténaire ressemble presque à celle d'une parabole plus facile à calculer, mais qui ne représente strictement que la déformation d'un élément en apesanteur sous chargement uniforme en projection. La hauteur de l'affaissement est une indication des forces horizontales résultantes ; les forces verticales restent inchangées. L'influence sur le câble suspendu par une force externe peut être imaginée comme une ligne en V nette qui est plus nette lorsque l'amplitude du port en lourd et de la charge diffère. La forme résultante du câble peut être calculée exactement par son moment de flexion, numériquement et graphiquement. Une seconde et égale charge entraînera une déformation supplémentaire du câble qui est de magnitude inférieure à la première. C'est-à-dire : chaque chargement suivant a moins d'influence.