

Structures textiles

par **Marc MALINOWSKY**

*Consultant Structure. Groupe ALTO
Président du Club de la Structure Textile*

et **Christian LYONNET**

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)

1. Développement des structures textiles.....	C 2 470 - 2
1.1 Origine.....	— 2
1.2 Évolution au cours des 40 dernières années.....	— 2
1.3 Évolution des caractéristiques des constituants.....	— 3
1.4 Contribution de l'informatique.....	— 3
1.5 Motivations principales.....	— 4
2. Membranes	— 6
2.1 Définitions	— 6
2.2 Constitution.....	— 6
2.3 Propriétés	— 8
2.4 Évolutions et tendances du marché.....	— 10
3. Éléments de mise en tension des toiles	— 12
3.1 Ossatures.....	— 12
3.2 Éléments accessoires	— 14
4. Principes de statique. Typologie	— 16
4.1 Principes de portance des toiles.....	— 16
4.2 Avantages et inconvénients des divers types	— 17
5. Modélisation et calcul	— 18
5.1 Fonctionnement mécanique et bases théoriques.....	— 18
5.2 Méthodologie de calcul.....	— 20
5.3 Recherche de forme	— 20
5.4 Calcul de la structure sous charges extérieures	— 24
5.5 Recherche de la géométrie de découpe de toile.....	— 26
5.6 Études générales sur le chapeau chinois	— 28
6. Analyse des autres aspects techniques	— 29
6.1 Découpe et techniques d'assemblage des lés	— 29
6.2 Prétension des toiles	— 31
6.3 Récupération et évacuation des précipitations.....	— 32
6.4 Éclairage	— 32
6.5 Thermique et condensation.....	— 33
6.6 Comportement en cas d'incendie	— 33
6.7 Entretien et maintenance.....	— 33
7. Réglementation. Codification technique et assurance	— 33
7.1 État de la question.....	— 33
7.2 Propositions en matière de codification technique	— 34
8. Conclusions	— 35
Pour en savoir plus.....	Doc. C 2 470

Le développement des structures textiles durant les dernières décennies s'inscrit dans le concept général d'allègement des constructions. Il semble trouver son origine dans les études de structures tridimensionnelles et des structures à câbles qui se sont développées vers les années 50 dans les milieux universitaires, par exemple en Allemagne.

1. Développement des structures textiles

1.1 Origine

Il est d'usage de faire remonter les premiers emplois des toiles tendues, pour se protéger, des intempéries, à des origines lointaines (historiques, voire préhistoriques).

Les tentes de nomades, les constructions militaires de campagne ou les abris de loisir ou de réception paraissent, en effet, présenter un caractère de parenté avec les bâtiments textiles contemporains. Ces constructions semblent toutes avoir été caractérisées par leur non-permanence et leur démontabilité.

Les arènes romaines fournissent à cet égard un exemple remarquable puisque, avec plusieurs siècles d'intervalle, on constate que les romains ont couvert (figure 1) les arènes de voile de coton afin de se protéger du soleil ; les Nîmois aujourd'hui (figure 2) disposent une lentille à parois textiles sur leurs arènes durant la saison d'hiver.

Les constructions textiles des 40 dernières années conservent, pour certaines d'entre elles, le caractère de démontabilité (ou d'ouverture). Mais de nombreux emplois de ce type de bâtiments se sont développés dans les constructions fixes à vocation durable. Dans ce dernier cas, les constructions textiles se présentent comme une alternative aux types de constructions traditionnelles.

1.2 Évolution au cours des 40 dernières années

Les premiers emplois significatifs des structures tendues, sous la forme de structures gonflables, apparaissent aux États-Unis dans les années 50, puis se développent et deviennent courantes en Europe durant les années 60 (figure 3).

Les tempêtes de l'année 1975 ont abattu une cinquantaine de ces dernières et ont nui à leur réputation. Par ailleurs, le premier choc pétrolier a nettement augmenté leur coût d'exploitation, ce qui a freiné leur développement.

Les années 70 ont vu le développement en Europe des structures textiles portées (figure 4). La prétension des toiles est généralement obtenue dans ce type de construction par des arcs métalliques. Ces constructions permettent, par rapport aux structures gonflables, une liberté de forme d'un niveau supérieur. Elles autorisent surtout de grandes dimensions qui sont particulièrement intéressantes pour les bâtiments de stockage ou d'aires sportives.

Durant les mêmes années 70, des études approfondies ont été entreprises (tant formelles que de calculs, dérivés de ceux des structures à câbles). Elles ont débouché sur le développement des structures textiles tendues à prétension ponctuelle (figure 5). D'une géométrie encore plus complexe que celles des structures à prétension linéaire, les structures à prétension ponctuelle empruntent à l'architecture navale ses composants (mâts, wishbones, accastillage). Ces emprunts et l'esthétique qui en découle motivent aujourd'hui les emplois fréquents de cette dernière technique.

Actuellement, les trois types de structures (détaillés dans le paragraphe 4 quant au principe de leur fonctionnement) sont utilisés de façon concomitante, les deux derniers types représentent cependant les ouvrages de surface importante réalisés actuellement.

Ces réalisations ont justifié l'application de la procédure d'ATEX du CSTB pour certaines d'entre elles. On relève d'ailleurs que des structures récentes combinent parfois la prétension linéaire et la prétension ponctuelle.

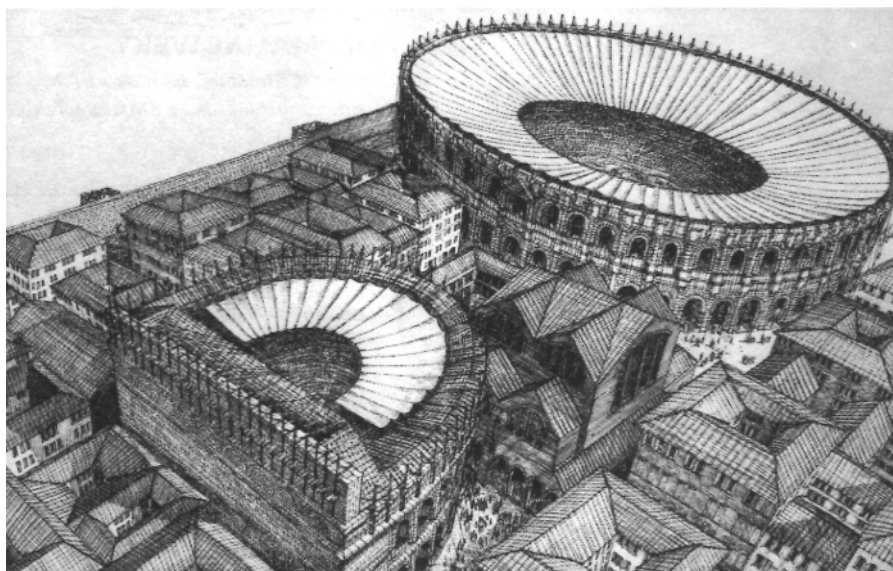


Figure 1 – Naissance d'une cité romaine
(David Macaulay. Éd. Deux coqs d'or)



Figure 2 – Couverture en lentille textile des arènes de Nîmes



Figure 5 – Structure à pré-tension ponctuelle (Architectes B + FL)

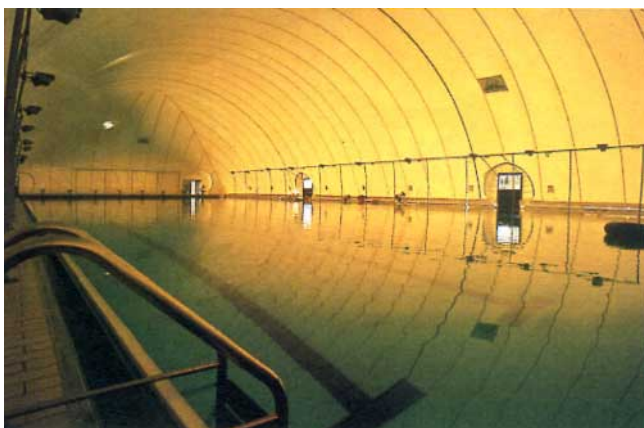


Figure 3 – Piscine du Canet-Plage



Figure 4 – Structure à pré-tension linéaire.
Extension de la gare TGV à Poitiers

1.3 Évolution des caractéristiques des constituants

Le développement des bâtiments à enveloppe textile est indissociable de celui des tissus à usages techniques (TUT) qui s'est opéré ces dernières décennies.

Les fibres animales (peaux, laines, crins) ou végétales (coton, lin, jute) utilisées de tout temps par l'homme pour se protéger des intempéries présentaient des caractéristiques de résistance et de durabilité limitées. L'importance en surface des constructions utilisant ces revêtements et leur durée de vie étaient, de ce fait, également limitées.

La seconde moitié du 20^e siècle a vu le développement des fibres de synthèse qui conjuguent une résistance en traction élevée et des caractéristiques d'impérissabilité améliorées par rapport aux fibres naturelles. De façon concomitante, les enductions synthétiques résistant à l'agressivité de l'environnement ont été mises au point.

Cette évolution conjuguée des fibres (destinées après tissage à conférer l'aspect résistance des tissus) et des enductions permet l'essor des textiles techniques enduits dont une des applications privilégiée est celle d'enveloppe « travaillante » des bâtiments.

Les tisseurs-enducteurs se sont spécialisés dans l'offre de matériaux spécifiques aux bâtiments textiles qui, outre les caractéristiques précitées, justifient une adaptation à des exigences complémentaires telles la translucidité, la soudabilité, l'autolavabilité... Les techniques d'obtention de ces tissus particuliers et leurs caractéristiques font l'objet du paragraphe 2.

Parallèlement au développement des tissus à usages techniques, les autres constituants des structures textiles tendues ont également évolué. Dans le domaine des structures métalliques supports, ces évolutions – générales au concept bâtiment – se sont traduites par un allègement et une meilleure maîtrise de la protection contre la corrosion. Dans le domaine des câbles, on relève l'emploi de fibres de synthèse (Kevlar par exemple) en substitution aux câbles métalliques traditionnels.

1.4 Contribution de l'informatique

La conception et le calcul des structures textiles sont indissociables de l'analyse des structures à câbles ou en membranes entrepris par divers précurseurs tels Frei Otto, Le Ricolais ou Sarger.

La similitude des structures en membrane textile avec les structures à câbles (article *Structures à câbles* [C 2 580]) est évidente lorsque l'on admet de diminuer la section des câbles et d'en réduire l'espacement jusqu'à constituer une résille jointive : la membrane.

Les deux types de structure ne peuvent reprendre les efforts qu'en traction, leur poids propre pouvant être négligé. Du fait de ce faible poids propre, les actions climatiques deviennent prépondérantes. Ces actions, dues à la neige et au vent, ne peuvent être stabilisées que par l'application d'une force extérieure (la prétension) sur les deux familles de courbures opposées qui constituent la membrane.

La stabilisation d'un point quelconque de la membrane sous l'action de charges climatiques de sens opposés ne peut être obtenue que si la membrane présente une double courbure inverse en tout point du réseau, ou positive pour les structures gonflables.

Il en résulte que la recherche de forme (figure 6) d'une membrane induit celle de l'équilibre de chaque nœud du maillage sous les actions qui lui sont appliquées en œuvre. L'optimisation du plan de découpe et l'adaptation des caractéristiques de la membrane découlent des considérations précédentes. On conçoit, dans ces conditions, que la conception et l'étude des structures textiles entraînent des calculs longs, et que le traitement informatique de ceux-ci se trouve pleinement justifié.

Les premiers bâtiments complexes et de grande surface, en structure à câbles ou membranes, furent traités par maquette d'étude (exemple : bâtiments des jeux Olympiques de Munich en 1972).

En 1974, une étude théorique fut lancée pour vérifier les études maquettes (méthode dite des splines doux surfaciques).

Vers 1978, M. Majowiecki a procédé à une étude visant à déterminer l'équilibre d'un filet de câbles en convergeant pas à pas sur chaque nœud pris isolément.

Vers 1980, l'étude de relaxation dynamique a été développée en Grande-Bretagne. Elle vise la recherche de forme et les efforts correspondants dans un filet de câbles.

Ces recherches ont débouché, en 1984, sur les deux voies de solution actuellement appliquées et constituées par les algorithmes de filets de câbles et le calcul par éléments finis.

Cette courte présentation n'a pour but que de situer la contribution des recherches ayant abouti à des logiciels d'étude des membranes textiles utilisées en architecture. La liste suivante (non exhaustive) est due à l'obligeance de M.R. Motro de l'université de Montpellier II :

- *Archimède* [Laboratoire de Mécanique et de Génie civil de Montpellier (France)] ;
- *Fastnet/Easycut* [M. Gründig, Berlin (République fédérale d'Allemagne)] ;
- *Force* [M. Mollaert, Bruxelles (Belgique)] ;
- *MEFTX/Architex* [M. Trompette, Grenoble (France)] ;
- *PAM-LISA* [M. Haug/Muttin, Paris (France)] ;
- *RETE/Pneus* [M. Majowiecki, Bologne (Italie)] ;
- *Tensyl* [M. Wakefield (Grande-Bretagne)].

Pour plus de détails, on se reportera au paragraphe 5.

1.5 Motivations principales

Jusqu'aux années 70, il semble que le principal argument de choix et de décision en faveur des structures textiles ait été le caractère non permanent de l'édifice, son repliement ou sa démontabilité.

La couverture de courts de tennis pour leur usage en saison d'hiver, ou la piscine du boulevard Carnot à Paris (figure 7) dont le toit est replié en tête de mât à la belle saison, constituent des exemples d'emplois non permanents des couvertures textiles.

La vocation d'édifice permanent est toutefois maintenant revendiquée pour la majorité des réalisations. Dans ce cas, de nouvelles exigences sont formulées et des caractéristiques propres aux membranes textiles sont exploitées :

— **possibilité de moduler la lumière** : la toile, selon les choix du concepteur, peut être opaque ou plus ou moins translucide. Des agencements de toiles d'opacités différentes peuvent être réalisés. Le caractère de translucidité des toiles procure des ambiances

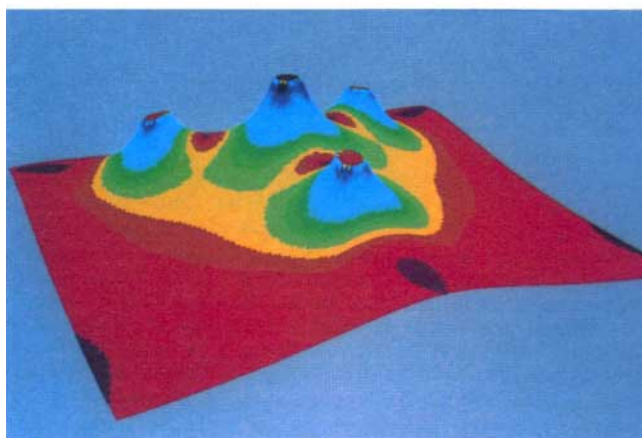
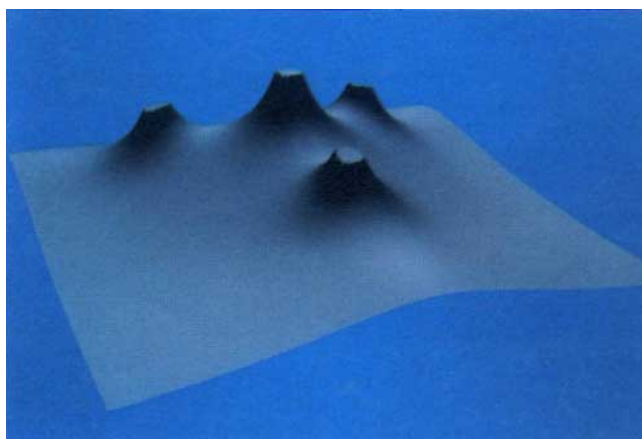


Figure 6 – Visualisation informatique de forme (Doc. ARCORA)

intérieures recherchées du fait de la diffusion de la lumière. De façon non exclusive, les bâtiments sportifs (gymnases, piscines, etc.) constituent des exemples d'exploitation de la translucidité des toiles ;



Figure 7 – Piscine découverte à Paris
(d'après Technique et Architecture n° 3, 1971)



Figure 8 – Réfrigérant du Bouchain

— **rapidité de construction** : le niveau élevé de préfabrication en atelier des divers constituants des bâtiments textiles permet une mise en œuvre très rapide de ces constructions. Le réfrigérant du Bouchain (figure 8) et les « Zénith » de Paris et de Montpellier (figure 9) constituent les exemples les plus connus de la rapidité d'exécution des bâtiments métallo-textiles ;

— **mode de construction « léger »** : la faible masse des matériaux dont il est fait usage pour l'érection des structures textiles permet de ne pas hypothéquer de façon irrémédiable l'avenir du sol où reposent les bâtiments utilisant cette technique ;

— **aspect formel de la réalisation** : ce critère, plus subjectif que les précédents, est lié à l'aspect aérien des structures et à la translucidité des toiles. La légèreté d'ensemble des bâtiments qui en découle ne manque pas d'attirer les maîtres d'œuvre et certains maîtres d'ouvrage. Parmi ces derniers, le cas de la SNCF est remarquable quant au choix des couvertures textiles pour les gares du TGV Atlantique (figure 4).

On relève cependant que certains ouvrages récents, les nuages de la Grande Arche de La Défense par exemple, ne traduisent qu'imparfaitement dans la réalité le parti de légèreté d'aspect du projet initial ;

— **faible coût de construction et d'entretien** : le coût se répartit de la façon suivante :

— étude, coordination	5 %
— ossature support :	
• fournitures	40 %
• montage	12 %
— membranes :	
• fournitures	25 %
• montage	8 %
— divers, accastillage	10 %

Il est de l'ordre de 1 400 à 1 700 F/m² (en 1993).

L'entretien est comparable à celui d'une verrière (≈ 10 F/m² par séance de nettoyage).

L'argument de faible coût, réel dans de très nombreux cas d'application, mérite d'être nuancé pour certaines réalisations.

Si l'ensemble des aspects évoqués ci-avant sont à mettre au rang des avantages qui militent en faveur de l'emploi des structures textiles, d'autres paraissent constituer des freins à leur développement. Parmi ceux-ci on peut citer :

— les **incertitudes** qui subsistent quant à la **durabilité des toiles** et principalement quant à la conservation de leur aspect initial (y compris la translucidité) ;

— les **caractéristiques limitées d'isolations thermique et acoustique** ;



Figure 9 – Zénith de Paris (Doc. M.M.)

— les **déplacements de parois** qui rendent délicat le traitement des partitions intérieures des bâtiments ;

— les **difficultés de traitement des raccords** entre la partie textile et les ouvrages « en dur » qui la bordent, du moins d'un point de vue esthétique.

On trouvera, au paragraphe 4.2, une approche plus détaillée des avantages et inconvénients de chacun des types de bâtiments textiles (aérosupportés, portés linéairement ou à prétension ponctuelle).

Le développement des structures textiles s'est effectué de façon privilégiée dans certains types de bâtiments peu sensibles aux inconvénients évoqués ci-avant. Ce sont :

— les aires collectives, sportives ou culturelles ;

— les aires de stockage industriel de moyenne ou grande portées ;

— les atriums lumineux pour ateliers, hôtels, bureaux ou centres commerciaux.

Le développement de cette technique s'est également effectué en fonction des critères d'opérations spécifiques, tels que :

— des fortes contraintes de calendrier d'exécution ;

— des contraintes géomécaniques d'implantation critiques (tassement ou sismicité) ;

— des cahiers des charges prévoyant la réutilisation du site à court ou moyen termes.

2. Membranes

2.1 Définitions

Les constructions textiles anciennes (tentes, chapiteaux itinérants) utilisaient des toiles monocomposant, généralement obtenues par tissage du coton.

Les caractéristiques de ces toiles étaient limitées, tant du point de vue mécanique que, surtout, de leur durabilité.

L'essor de l'architecture textile des dernières décennies est intimement lié au développement des fibres synthétiques. Ces textiles sont des composites caractérisés par une dissociation des fonctions : résistance mécanique, et paroi étanche et protectrice.

Les textiles à usages techniques (TUT) possèdent des applications diversifiées (géotextile, médical, aéronautique ou spatial, protection, etc.). L'architecture textile constitue un des secteurs de développement des TUT, avec des spécificités de caractéristiques qui ont conduit certains producteurs à se spécialiser dans ce domaine. (Un tisseur-enducteur français réalise 70 % de son chiffre d'affaires de TUT dans le domaine de l'architecture textile.)

Le principe de constitution des textiles enduits est illustré sur la figure 10. On y distingue :

- le tissu lui-même, constitué par l'association, par tissage (ou autre mode de liaison), de fils de chaîne et de trame ;
- la couche de fond ou « d'adhésion » qui permet la liaison entre le tissu et les couches protectrices ;
- les couches de protection, sur chacune des faces du tissu, obtenues par enduction ou calandrage ;
- les protections superficielles éventuelles destinées à éviter ou retarder les salissures des couches d'enduction et à protéger celles-ci des agents de dégradation.

Ce principe de constitution est, à quelques détails près, toujours le même. La diversité des textiles enduits résulte de celle des composants (renfort et matrice) qui le constituent.

Les critères de sélection des matériaux associés sont principalement :

- les propriétés mécaniques des fibres de renfort ;
- la durabilité et la plasticité des matrices d'enrobage du renfort ;
- la compatibilité fibres-matrice ;
- les procédés de fabrication ;
- l'aptitude à permettre la réalisation des assemblages classiques (soudure) ;
- et, bien évidemment, le prix des divers constituants.

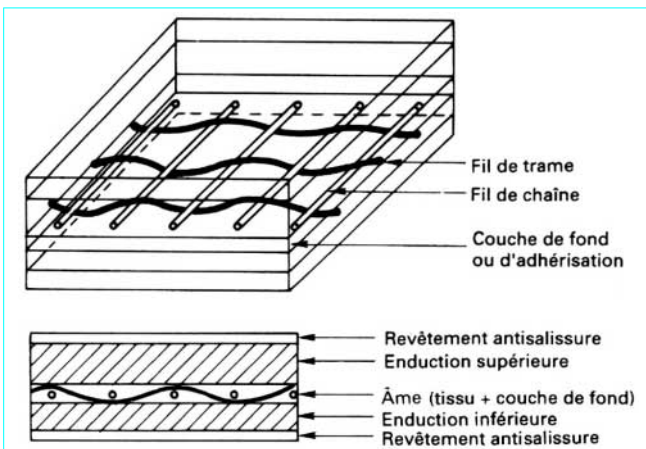


Figure 10 – Principe de constitution d'un textile enduit

2.2 Constitution

2.2.1 Âmes textiles

Elles sont constituées par l'armature en fibres et par la couche de fond ou « d'adhésion » qui l'enrobe.

2.2.1.1 Fibres

Les caractéristiques de résistance des fibres synthétiques sont sensiblement **dix fois plus élevées** que celles des fibres végétales employées antérieurement.

Le choix des fibres synthétiques s'opère en fonction des critères suivants :

- module d'élasticité ;
- résistance à la rupture ;
- masse volumique (assortie de la densité relative par référence au polyester qui est le plus utilisé) ;
- compatibilité avec la matrice dans laquelle elles sont enrobées ;
- prix.

Le tableau 1 récapitule les caractéristiques des fibres les plus couramment utilisées.

Ces fibres présentent une absence de palier plastique et un comportement élastique quasi linéaire jusqu'à rupture.

Les plus couramment utilisées en architecture textile sont le polyester-PVC (polychlorure de vinyle) à 95 % et le tissu de verre enduit PTFE [polytétrafluoroéthylène (*Téflon*)] à 5 %, du moins en Europe.

Tableau 1 – Caractéristiques des fibres de renfort

Nature des fibres	Masse volumique (kg/dm ³)	Densité relative par rapport au polyester	Module d'élasticité <i>E</i> (MPa)	Résistance à la rupture (MPa)
Polyester	1,2	1	6 000	750
Verre	2,54	2,12	78 000	2 200
Carbone	1,74	1,45	200 000	2 100
Kevlar	1,45	1,2	130 000	2 900
Acier	7,85	6,5	210 000	1 800

2.2.1.2 Tissu

Les fibres, liées entre elles sous forme de fils, sont généralement assemblées par tissage, afin de constituer une nappe continue résultant de l'entrecroisement à angle droit des fils.

Les fils positionnés dans le sens des lisières (longueur du tissu) forment la **chaîne**, les fils dans le sens perpendiculaire (largeur du tissu) forment la **trame**. Le mode d'entrecroisement des fils de chaîne et des fils de trame constitue l'**armure**.

Les armures sont différenciées par le nombre variable des fils de trame et des fils de chaîne qui se croisent.

On distingue selon le type d'armure, la toile, le panama, la serge, etc. (figure 11). La serge est caractérisée par un effet oblique résultant du tissage décalé à chaque rang, et confère une très haute résistance à la déchirure amorcée.

Le panama et la serge sont les tissages les plus utilisés pour les structures textiles.

Le principe de tissage classique présente l'inconvénient de créer une anisotropie de comportement du tissu à la traction dans le sens chaîne et trame.

Pour palier cet inconvénient, il est possible d'avoir recours à des techniques qui permettent d'obtenir une tension initiale équivalente des fils de chaîne et de trame.

Ces techniques sont :

- le tricot chaîne à trame insérée (même principe que le métier à tisser le velours) ou Raschel Tramer (du nom du métier à tisser) (figure 12). Cette technique, très répandue aux États-Unis, commence à se développer en France ;
- la précontrainte d'un tissu classique (figure 13) avant et durant la phase d'enduction, cette technique a été développée en France ces dernières années par la société Serge Ferrari.

2.2.1.3 Couche de fond ou « d'adhésion »

Elle est destinée à favoriser la liaison entre le tissu et l'enduction qui le recouvre sur chacune de ses faces. Son épaisseur est d'environ 20 µm.

Elle est de nature voisine des enductions externes, mais dopée en plastifiant, de manière à permettre un meilleur glissement des fils du tissu entre eux.

Le rapport ENKA [28], souvent apporté en justification de l'aspect durabilité des toiles (et détaillé dans le paragraphe 2.3.3.2), met en évidence l'importance jouée par cette couche intermédiaire à l'interface tissu-enduction.

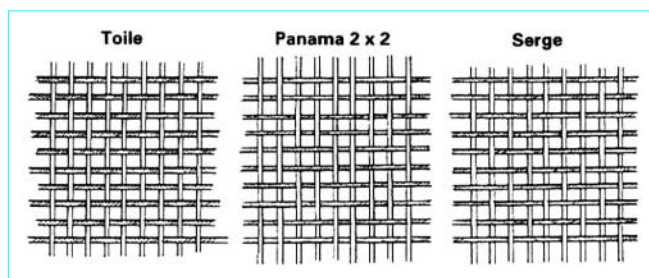


Figure 11 – Tissage classique

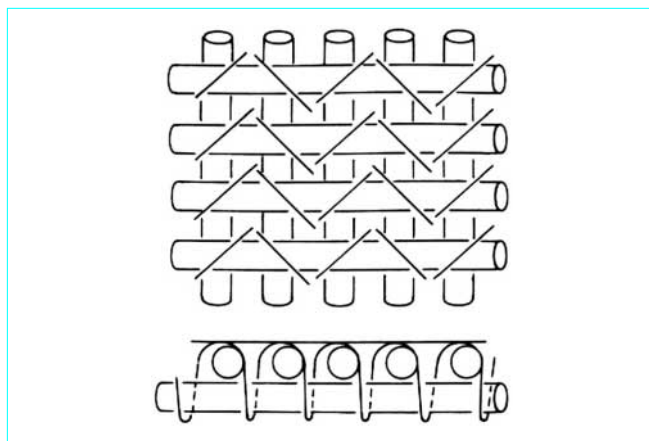


Figure 12 – Tricot chaîne à trame insérée ou Raschel Tramer

2.2.2 Enduction

Le tissu doit être rendu imperméable et durable. Ces fonctions sont réalisées par une protection continue : l'enduction double face.

L'enduction ne modifie pas sensiblement les caractéristiques mécaniques principales de la toile, sauf à renforcer sa tenue dans le biais.

Les enductions sont généralement appliquées en épaisseurs dissymétriques (0,5 à 0,8 mm) sur chaque face du tissu, la plus importante se trouvant en face extérieure.

2.2.2.1 Méthodes d'enduction

■ Enduction à chaud

C'est le procédé le plus utilisé pour les textiles à usage de bâtiment. Le revêtement liquide est déposé par une trémie sur chaque face du tissu. Cette opération est suivie d'un glaçage au four et d'un roulage destiné à lisser le complexe ainsi réalisé.

■ Calandrage

Un film plastique réchauffé est déroulé sur chaque face du tissu. L'ensemble est placé dans une presse chauffante destinée à réaliser la liaison des constituants assemblés. Cette technique est surtout utilisée aux États-Unis.

■ Mouillage répété

Cette technique particulière est utilisée pour les enductions PTFE (*Téflon*) sur tissu de verre. Le tissu est trempé dans un bain puis séché à plusieurs reprises. Cette technique est également utilisée aux États-Unis.

2.2.2.2 Compatibilité tissu-enduction

En règle générale, les enductions PVC, butyle ou *Hypalon* sont compatibles avec les supports en polyester, en polyéthylène et en *Kevlar*. Les enductions *Téflon* ne sont, elles, compatibles qu'avec les supports de fibres de verre.

2.2.2.3 Caractéristiques requises pour les enductions

Elles concernent :

- l'étanchéité à l'eau (et au gaz) ;
- la fonction protection du tissu (et durabilité intrinsèque) ;
- l'adhérence de l'enduction sur le support ;
- la souplesse ;
- la thermosoudabilité (afin de permettre l'assemblage des lés) ;
- la réaction au feu ;
- l'anticryptogamie ;
- la translucidité et l'effet de diffusion ;
- la tenue des coloris dans le temps ;
- le prix.

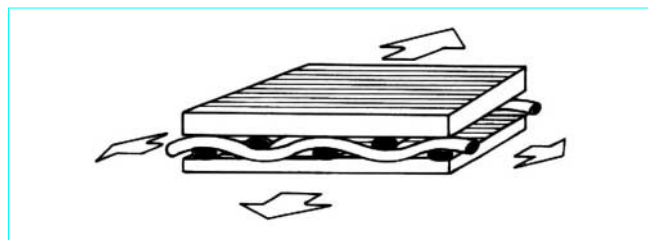


Figure 13 – Précontrainte d'un tissu classique lors de l'enduction

2.2.3 Revêtements

Certaines des caractéristiques requises, ci-dessus listées, ne peuvent être assurées par les seules enductions. On a alors recours à des revêtements de surface, principalement en face extérieure du tissu.

Les fonctions essentielles de ces revêtements de surface sont d'éviter l'encrassement et les salissures prématurées de la toile, et de protéger le complexe du rayonnement UV qui, associé à l'humidité, constitue le facteur prépondérant de vieillissement des toiles.

Dans le cas des toiles translucides ou diffusantes, le revêtement protecteur a également pour but de freiner l'évolution de la transmission lumineuse.

Les premiers revêtements employés furent des résines acryliques qui sont de moins en moins utilisées. Actuellement, les protections de surface des toiles PVC-polyester sont réalisées à partir de PVF (polyfluorure de vinyle) ou PVDF (polyfluorure de vinyldène).

Ces revêtements se présentent :

- soit sous la forme d'un **film collé sur l'enduction** ($\approx 100 \mu\text{m}$) ;
- soit sous la forme de **verniss** ou d'**enduction** plus ou moins épaisse (5 à 15 μm).

Le second type est le plus souvent utilisé en France.

Les protections par film, dont la régularité d'épaisseur constitue l'un des avantages, présentent un risque de fissuration lors de la mise en tension des toiles, car leur souplesse est limitée.

La qualité des revêtements du type vernis ou enduction dépend essentiellement de leur épaisseur (et de la régularité de celle-ci) et de leur principe d'accrochage à l'enduction de base.

Qu'il s'agisse des films ou des vernis, les revêtements protecteurs posent un problème lors de la réalisation des soudures pour assemblage des lés. Les moyens de contourner cette difficulté seront abordés dans le paragraphe 6.1.2.

2.3 Propriétés

Pour leur emploi en architecture textile, les membranes doivent présenter des propriétés et caractéristiques particulières, lesquelles justifient d'être définies de façon spécifique à l'emploi considéré.

La définition de ces données semble encore très incomplète. On relève toutefois une tentative du Club de la Structure Textile de dresser un tableau visant à préciser, de façon harmonisée, la présentation des caractéristiques des tissus enduits à usage de constructions textiles tendues. Des exemples de caractéristiques de composites souples à usage de membrane autoportante sont donnés dans le tableau 2.

2.3.1 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des membranes sont dues à la présence des fibres de renfort, assemblées en tissu.

On définit un tissu par :

- la nature des fibres ;
- le nombre de fils par unité de longueur (objet de la norme NF G 07-155) ;
- le grammage de l'armature (selon la norme NF G 07-150) ;
- la masse du tissu enduit définie, quant à elle, par la norme NF G 37-102 ;
- le type de tissage.

2.3.1.1 Résistance en traction

La résistance en traction du tissu est déterminée dans chaque sens (trame et chaîne) afin de préciser, pour chacun de ces sens :

- la courbe d'allongement en fonction de l'effort de traction ;
- la valeur de résistance maximale (rupture) ;

- l'allongement à la rupture ;
- le module d'élasticité.

Les méthodes d'essai uniaxiales définies par les normes NF G 07-001 et NF G 37-103 ne présentent pas toujours un caractère suffisant pour renseigner les utilisateurs de ces toiles dans les applications de structures textiles.

Tableau 2 – Caractéristiques de composites souples à usage de membrane autoportante

Caractéristiques	Nature du support	
	Polyester/PVC Fil de polyester	Fibre de verre PTFE Fil de fibre de verre
Nombre de fils au cm	12/12	10/10
Finesse (1).....	1 100 dtex	800 dtex
Armure.....	Panama	Toile
Masse surfacique du support ...	270 g/m ²	600 g/m ²
Nature de l'enduction	PVC	PTFE (Téflon)
Rapport d'épaisseur ext./int.	2/3-1/3	1-1
Finition	Laque PVDF	Téflon
Masse surfacique totale	800 g/m ²	1 200 g/m ²
Largeur de lé	210 cm	300 cm
Résistance maximale à la rupture	400 daN/5 cm	460 daN/5 cm
Résistance à la déchirure amorcée	12 daN/cm	15 daN/cm
Allongement à la rupture	15 %	4 %
Allongement résiduel instan- tané sous 100 N/5 cm	0,6 %	0,3 %
Résistance soudure/rupture	80 %	100 %
Réaction au feu	M 2	M 1
Translucidité	8 %	12 %
Autolavabilité	Médiocre	Satisfaisante
Espérance de vieillissement	15/18 ans	25/30 ans

(1) 1 tex = 10^{-6} kg/m.

En effet, le tissu est sollicité simultanément dans deux directions perpendiculaires de son plan. Les constructeurs ont donc parfois besoin d'être renseignés sur le comportement sous sollicitation biaxiale des tissus, surtout pour les faibles valeurs de charge à mettre en œuvre lors de la prétension.

Les investigations expérimentales dans le domaine des contraintes biaxiales sont anciennes. Plus récemment, des essais de traction biaxiale ont été développés en Allemagne par l'Institut für Bautechnik de Berlin ou, plus récemment encore, par l'ITF-Lyon en collaboration avec le laboratoire de mécanique des matériaux de l'université de Lyon I.

Les essais de traction bidirectionnelle permettent de mettre en évidence la symétrie de comportement d'allongement en traction des tissus précontraints (§ 2.2.1) selon les sens chaîne et trame.

Par un programme d'essais cycliques adaptés, les tests biaxiaux permettent d'appréhender les phénomènes de fluage des tissus dans les conditions d'emploi, qu'il s'agisse :

- du fluage géométrique ou « embuvage » lié aux premières sollicitations de traction appliquées au tissu ;
- ou du fluage sous charge maintenue, résultant de la prétension imposée à la mise en œuvre ou de l'action des charges climatiques.

Les essais de traction biaxiale paraissent particulièrement pertinents pour les structures gonflables.

L'intérêt de tels essais est surtout l'étude du comportement sous faibles sollicitations.

Il ne semble pas qu'il ait été jusqu'ici entrepris de synthèse dans le domaine des tests bidirectionnels, ni d'essais interlaboratoires, en vue de la définition d'une méthode expérimentale harmonisée.

La résistance en traction des tissus actuellement utilisés en architecture textile, par référence aux fiches fabricants, s'établit entre 400 et 800 daN environ (pour 5 cm de largeur).

2.3.1.2 Résistance à la déchirure amorcée

Cette donnée permet d'appréhender les risques de propagation d'une déchirure imputable à un défaut ou à un accident, voire à une malveillance.

La norme expérimentale G 37-130 précise les conditions de réalisation de l'essai de déchirement sur éprouvette trapézoïdale. Les essais sont réalisés sur chacun des sens (chaîne et trame du tissu) et sont très voisins de ceux appliqués en Allemagne selon DIN 53-563.

Dans certains cas, la résistance à la déchirure des tissus pour constructions textiles est fournie par référence à la norme française NF G 37-129.

Mesurées sur éprouvette trapézoïdale, les résistances à la déchirure annoncées par les fabricants se situent, selon le grammage des toiles et le sens du tissu, entre 25 et 100 daN environ.

2.3.1.3 Adhérence

La cohésion de l'assemblage des constituants d'un textile enduit est caractérisée par un essai d'adhérence (des enductions sur l'âme textile), selon la norme française NF G 37-107, qui renvoie à la norme NF T 46-008 quant aux conditions générales de l'essai.

Une méthodologie voisine est développée en Allemagne.

L'expression des résultats consiste à fournir la valeur maximale de l'effort (par unité de largeur) enregistrée lors du délaminage.

2.3.2 Autres propriétés physiques

2.3.2.1 Imperméabilité à l'eau

Deux normes françaises NF EN 20811 (ex NF G 07-057) et NF G 37-106 caractérisent l'imperméabilité à l'eau des textiles enduits.

Seule la norme NF G 37-106 paraît pertinente, compte tenu du caractère systématique d'emploi des tissus enduits en architecture textile.

Les deux méthodes citées caractérisent l'étanchéité sous pression d'eau, disposition qui s'écarte sensiblement des conditions d'emploi des tissus enduits en construction textile. Dans le cas de la NF G 37-106, deux pressions de référence sont retenues : 0,1 bar ou 1 bar. Ces pressions sont exercées sur un échantillon de 20×20 cm, solidaire d'un bâti étanché en périphérie de l'échantillon.

La non-étanchéité du tissu enduit est caractérisée par l'observation, après 3 min de maintien sous pression, du début de formation d'une goutte d'eau à la surface de l'échantillon.

Malgré les réserves évoquées ci-avant quant à la représentativité d'un essai de ce type, il ne semble pas que les tissus enduits couramment utilisés puissent présenter des difficultés à être qualifiés selon un essai sous pression d'eau. La pression de 0,1 bar peut être considérée comme un seuil suffisant.

2.3.2.2 Imperméabilité à l'air

Cette caractéristique est particulièrement recherchée dans les applications de toiles aux structures aérosupportées et en fuseaux ou lentilles raidis par pression d'air.

L'essai selon la norme NF G 07-111 s'applique aux tissus et tricotés non enduits. Il vise à quantifier la perméabilité ou la porosité. L'échantillon est soumis à une dépression de 196 Pa mais, compte tenu des faibles perméabilités recherchées, des textiles enduits et de la précision aléatoire de mesure des porosimètres à diaphragme dans le cas des faibles porosités, on peut s'interroger sur la pertinence de l'application de la NF G 07-111 aux textiles enduits pour architecture textile.

Nota : la perméabilité à l'air des assemblages de lés ou des raccords divers doit, par contre, être vérifiée lors de la confection des membranes.

2.3.2.3 Souplesse et comportement au froissement

La souplesse des textiles enduits est déterminée selon la méthode « de la boucle plate », suivant la norme NF G 37-131. Elle est définie par la mesure de la hauteur de la boucle après cinq minutes.

Dans le cas de structures repliables ou dégonflables, il peut être utile d'appréhender les conséquences de ces opérations répétées sur l'intégrité des toiles. On a recours, dans ce cas, à l'essai de froissement défini par la norme NF G 37-110.

2.3.2.4 Transmission lumineuse

Il est parfois fait référence, dans les documentations des fabricants, à la norme NF G 07-162. Or cette norme est principalement destinée à préciser le niveau d'opacité des bâches, stores, écrans solaires.

La transmission lumineuse et les caractéristiques diffusantes des toiles constituent souvent des critères de choix importants en architecture textile. Il semble dans ces conditions que la recherche d'une norme mieux adaptée ou la mise au point d'une méthodologie spécifique s'impose.

2.3.2.5 Classement de réaction au feu

Il est défini à partir des essais communs à l'ensemble des matériaux de construction, et plus particulièrement par référence aux normes NF P 92-503 et NF P 92-505.

Les toiles polyester enduites de PVC, d'emploi majoritaire en France, relèvent du classement de réaction au feu M2.

2.3.3 Évolution des caractéristiques et durabilité des tissus

2.3.3.1 Comportement des membranes lors de la mise en tension initiale et des sollicitations en traction ultérieures

■ Fluage géométrique ou embuvage

Lors des premières sollicitations mécaniques de la toile pour sa mise en tension, les efforts exercés peuvent conduire à une réorganisation du renfort qui engendre des déformations irréversibles.

Ces déformations, caractérisées par des allongements, sont souvent dissymétriques pour les tissus traditionnels (§ 2.2.1). Les allongements dans le sens de la trame sont, dans ce cas, supérieurs aux allongements dans le sens de la chaîne.

La connaissance de ces allongements irréversibles est importante au niveau des découpes et assemblages des lés ainsi que pour les jeux de montage à réserver en lisière des membranes.

Les allongements résiduels sont déterminés selon la méthode d'essai de traction décrite au paragraphe 2.3.1.1, pour des valeurs de traction voisines de celles appliquées lors de la précontrainte de mise en œuvre, soit 200 daN/m ou 10 daN/5 cm.

■ Fluage sous charge

En œuvre, la membrane va être sollicitée (complémentairement aux contraintes de précontrainte) du fait des actions climatiques. Ces sollicitations sont non permanentes, ce qui conduit souvent à procéder à des expérimentations cycliques pour déterminer le fluage sous charge.

Les charges appliquées sont supérieures à celles évoquées au paragraphe 2.3.1 et sont, au maximum, celles définies comme contrainte d'utilisation du tissu (1/5 de la charge de rupture). Les déformations s'expriment également, dans ce cas, en pourcentage d'allongement par rapport à l'initial.

Les essais sont généralement réalisés en traction uniaxiale. Ils sont conduits à une température de 20 °C environ, mais peuvent combiner un conditionnement en température (70 °C).

L'approche allemande (§ 2.3.1.1) cumule les actions bidirectionnelles et la température.

2.3.3.2 Durabilité des toiles et essai d'endommagement accéléré

D'une façon commune à tous les matériaux ou produits de construction, la durabilité de ceux-ci constitue la donnée la plus difficile à appréhender et celle pour laquelle la corrélation entre les essais d'endommagement en laboratoire et le comportement réel est aléatoire.

La durabilité des textiles enduits dépend, en premier lieu, des enductions. Leur épaisseur et leur nature influent directement sur la durabilité du complexe.

Les revêtements protecteurs (de l'enduction) évoqués au paragraphe 2.2.3 ont un rôle déterminant sur la durabilité des toiles (du moins dans le domaine de la conservation de l'aspect).

La notion de durabilité implique d'identifier les caractéristiques dont le suivi de l'évolution permet de caractériser le niveau d'endommagement des toiles. Au rang de ces caractéristiques, on compte la résistance mécanique (traction, déchirure, adhérence), et également d'autres caractéristiques fonctionnelles comme la translucidité, la variation de teinte, la souplesse, etc.

Il convient enfin d'identifier les agents d'altération qui, seuls ou combinés, influent sur l'évolution des caractéristiques.

Comme pour de nombreux matériaux de construction, ces agents sont principalement : la température, l'humidité, le rayonnement UV, l'agressivité du milieu environnant (composés chimiques), les développements végétaux ou l'attaque des insectes.

■ Données relatives à l'étude de la durabilité des textiles enduits

Le document le plus souvent cité dans ce domaine est le rapport du Dr Eichert, Institut des fils industriels ENKA [28].

Ce rapport relate les observations effectuées sur divers tissus enduits après exposition naturelle de dix ans sur divers sites.

Le tableau 3 résume les conditions de cette expérimentation.

Le rapport observe « que les essais d'exposition aux intempéries peuvent se résumer en trois points essentiels :

— dans l'ensemble, l'épaisseur de couche s'est avérée être le facteur de protection prédominant ;

— les additifs d'absorption des rayons UV ne jouent qu'un rôle mineur sur le plan des diminutions de la ténacité résiduelle et de la résistance résiduelle à la déchirure, et là encore pendant de courtes périodes d'exposition seulement ;

— l'irradiation UV et les heures d'ensoleillement ne sont pas les seuls facteurs dont il faut tenir compte pour juger la fonctionnalité à long terme, car d'autres facteurs conditionnés par l'environnement, comme la pollution de l'air par les gaz d'échappement de l'industrie et des automobiles, peuvent contribuer de façon décisive à la détérioration ».

On peut en outre signaler que ce rapport insiste sur l'importance que revêt l'épaisseur minimale de l'enduction au droit des crêtes de fils de trame.

Les conclusions du rapport ENKA permettent de mieux comprendre la position des fabricants quant à l'énoncé des garanties de durabilité sur les toiles, qui s'expriment souvent (pour une même nature de renfort et d'enduction) selon une relation directe entre grammages et durée de vie prévue de l'ouvrage.

2.3.3.3 Normes d'essais en relation avec la durabilité

■ Vieillesse artificielle à l'étuve et essai de tenue à la chaleur

La norme NF G 37-105 précise la méthodologie d'un tel essai. Elle ne fixe pas de température de référence (7 conditionnements de 70 °C à 250 °C sont signalés) et ne précise pas les moyens d'évaluation des dégradations après essai.

■ Résistance à l'hydrolyse

La norme NF G 37-122 prévoit le conditionnement prolongé d'échantillons dans une enceinte à 70 °C et 95 % d'humidité relative (de 2 à 12 semaines).

La résistance à l'hydrolyse est appréciée selon l'essai de froissement décrit dans la norme NF G 37-110.

■ Solidité des teintures

Selon la norme ISO 105 B 04.

■ Résistance aux champignons

Elle fait l'objet des normes suivantes :

- NF X 41-514 qui vise la protection des matières plastiques ;
- NF X 41-600 qui vise les conditions de résistance aux micro-organismes des textiles cellulosiques (naturels ou artificiels).

Toutes deux procèdent par ensemencement et conservation dans un milieu propice au développement des champignons.


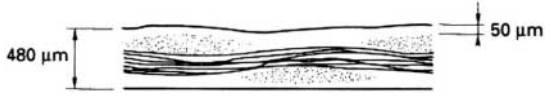
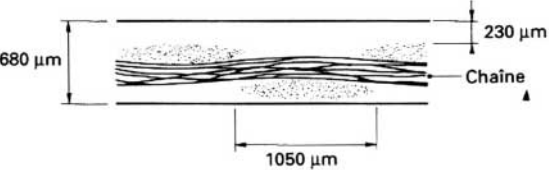
2.4 Évolutions et tendances du marché

La constitution des membranes varie selon les lieux de production. On peut signaler :

- en Amérique du Nord : les tissus en polyamide enduits d'élastomères de synthèse (peu souples, non soudables et assemblés par collage), les tissus de verre enduits de *Téflon* depuis 1973 ;
- au Japon : le coton synthétique (solution abandonnée) ;
- en France : le *Nylon* enduit PVC (peu à peu abandonné) ;
- en Allemagne : le polyester enduit PVC.

Tableau 3 – Test d'exposition naturelle : climatologie et descriptions des tissus enduits (Rapport ENKA [28])

Caractéristiques	Sites d'exposition			
	Wuppertal (Allemagne)	Ebnit (Autriche)	Dormeletto (Italie)	Miami (Floride, USA)
Altitude..... (m)	130	1 100	380	0
Précipitations..... (mm)	1 110	1 130	1 840	1 170
Durée d'ensoleillement..... (h)	1 470	1 760	2 230	2 950
Particularité.....	zone industrielle		près de l'autoroute de Milan	

	Masse surfacique (g/m ²)	Épaisseur d'enduction (μm)	Concentration d'absorbant UV (%)	
	540	20		Support : Polyester 1 100 dtex (Diolen 1745) Panama 9/9 Enduction de couleur blanche
	600	50	0,5	
	900	230	1	

Aujourd'hui, les emplois de toiles polyester enduit PVC sont majoritaires dans le monde. Cette solution constitue un couple caractéristique-coût particulièrement intéressant.

En Europe, 90 % des constructions textiles utilisent des membranes polyester-PVC. Les 10 % restants sont constitués par des tissus de verre enduit *Téflon*, d'un coût très nettement supérieur mais de durabilité accrue. Les principaux producteurs de textiles enduits utilisés en architecture textile sont : l'Allemagne, la France, les États-Unis, l'Italie et le Japon.

Les pays consommateurs sont les mêmes que précédemment, avec en plus l'Australie et l'Arabie Saoudite.

L'Europe reste leader dans la production des toiles à vocation architecture textile.

L'Allemagne et la France représentent 70 % du marché mondial des applications de textile enduit dans ce domaine (l'Allemagne étant le premier producteur).

Les États-Unis semblent essentiellement exploiter la solution verre/*Téflon*, très onéreuse mais de durabilité éprouvée (surtout vis-à-vis des salissures).

On comprend, dans ces conditions, l'importance accordée actuellement aux recherches dans le domaine des revêtements anti-salissures des textiles polyester-PVC.

D'autres voies de solutions ont été – et sont encore – explorées. Le tableau 4, extrait de l'ouvrage [32], fournit une synthèse des coûts et caractéristiques des diverses constitutions de membranes utilisées en construction.

Tableau 4 – Coût et propriétés des films et textiles enduits (en 1992)

Matériaux	Prix (F/m ²)	Allongement relatif (%)	Durabilité (an)	Translucidité (%)	Réaction au feu	Coloris	Application
Films							
PVC	15		< 10	90	M3	Tous	} Bardage de serres
Polyester <i>Mylar</i>	50		< 15	95	M3	Tous	
FEP	100	200	< 25	95	M1	Clairs	
PTFE	100	300	> 25	90	M1	Clairs	
Tissus enduits							
Polyester/PVC avec laque acrylique	20 à 70	16	< 15	8 à 30	M2	Tous	Largement utilisé pour tous types de structures tendues Médiocre stabilité dimensionnelle Pour très haute résistance demandée Pour radômes
Nylon/PVC	20 à 70	20	< 12	8 à 30	M2	Tous	
Kevlar/PVC	300 à 600	3	< 20	Opaque	M2	Tous	
Polyester/Hypalon	80 à 200		< 20	Opaque	M0	Tous	
Polyester/PVC avec Tedlar	30 à 80	16	< 20	7 à 20	M2	Tous	Meilleure autolava- bilité. Faible expé- rience des soudures Développement stoppé Très utilisé aux États-Unis pour structures perma- nentes Très rare Développement stoppé
Polyester/PVDF	150 à 200	16	< 25	35	M2	Blanc	
Fibre de verre/PTFE	250 à 450	6	< 30	5 à 15	M0	Ivoire	
Kevlar/PTFE (Tolvar)	400 à 650	3	< 25	Opaque	M1	Ivoire	
Verre/silicone	200	6	< 25	20 à 50	M2	Clairs	
Films renforcés							
PVC/polyester	10		< 10	80	M2		Largement utilisé pour parement translucide sur échafaudage Non commercialisé
FEP ou PTFE avec verre, Kevlar ou trame de câbles d'acier			< 25	50 à 80			

3. Éléments de mise en tension des toiles

3.1 Ossatures

3.1.1 Charpentes et ancrages

3.1.1.1 Charpentes

Tous les types usuels de charpentes (bois lamellé collé, béton, métal) peuvent être associés aux membranes textiles tendues.

Dans la majorité des cas, en raison des portées compatibles avec le travail de la toile, de la recherche de légèreté et des délais de mise en œuvre très courts, la solution de structure tridimensionnelle constituée de tubes d'acier est retenue.

Les charpentes métalliques en tubes autorisent une préfabrication poussée en atelier et permettent des assemblages aisés sur le site, sous forme de poutres, arcs (figure 14), mâts, échelles, etc.

En outre, les tubes ronds métalliques facilitent l'opération de raccord des rives de toiles par transfilage. Ils ne blessent pas les membranes, qui peuvent être en contact avec la structure soit au montage, soit de façon permanente en œuvre.

Les structures métalliques constituent enfin la solution la mieux adaptée lorsqu'un ou plusieurs démontages de la construction sont prévus.

3.1.1.2 Ancrages

Dans le cas des structures aérosupportées, les liaisons au sol destinées à s'opposer au soulèvement de la construction peuvent être assimilées à des structures.

On distingue deux types d'ancrages : les lests et les ancrages au sol.

— Les lests sont des ancrages par gravité. Des réservoirs périphériques sont disposés sur le pourtour de l'enveloppe. Ces réservoirs peuvent être remplis d'eau, de sable, de terre ou de graviers.

Les systèmes d'ancrage par lest sont peu sûrs dans certains cas (planéité, vandalisme, gel, coefficient de frottement avec le sol) et ne se justifient que pour les structures temporaires dans le cas où l'ancrage au sol est peu praticable.

— Les ancrages au sol sont, dans la pratique, les seuls utilisés.

Les figures 15 et 16 illustrent diverses organisations d'ancrage au sol de membranes aérosupportées.



Figure 14 – Arcs métalliques tridimensionnels. Tricastin Eurodif
(Doc. Esmerly-Caron)

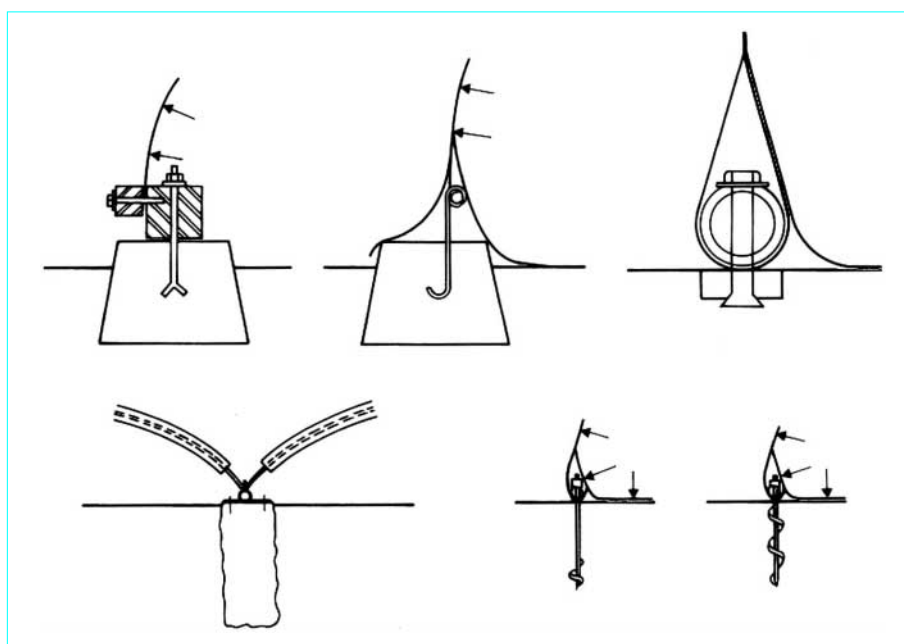


Figure 15 – Principes d'ancrage au sol des structures gonflables (d'après [23])

3.1.2 Organisation des ossatures

Elle diffère selon le principe de pré-tension de la toile.

Dans le cas de la **pré-tension surfacique**, c'est la surpression interne qui assure la fonction de support de la toile. « L'ossature » est alors limitée aux ancrages qui équilibrent l'ensemble des contraintes verticales ascendantes, imposées à l'ouvrage textile.

Dans le cas de la **pré-tension linéaire**, les toiles sont supportées par des poutres ou arcs. Ces supports sont autostables par eux-mêmes ou du fait de l'adjonction d'un réseau de câbles de contreventement. Les poutres ou arcs sont situés à l'intérieur du volume clos par la toile.

Dans le cas de la **pré-tension ponctuelle**, les points sommitaux de la membrane sont supportés ou suspendus à des mâts qui constituent dans ce cas l'essentiel de l'ossature. Ces mâts sont généralement haubanés (article *Fondations pour pylônes et mâts* [C 2 682] dans ce traité).

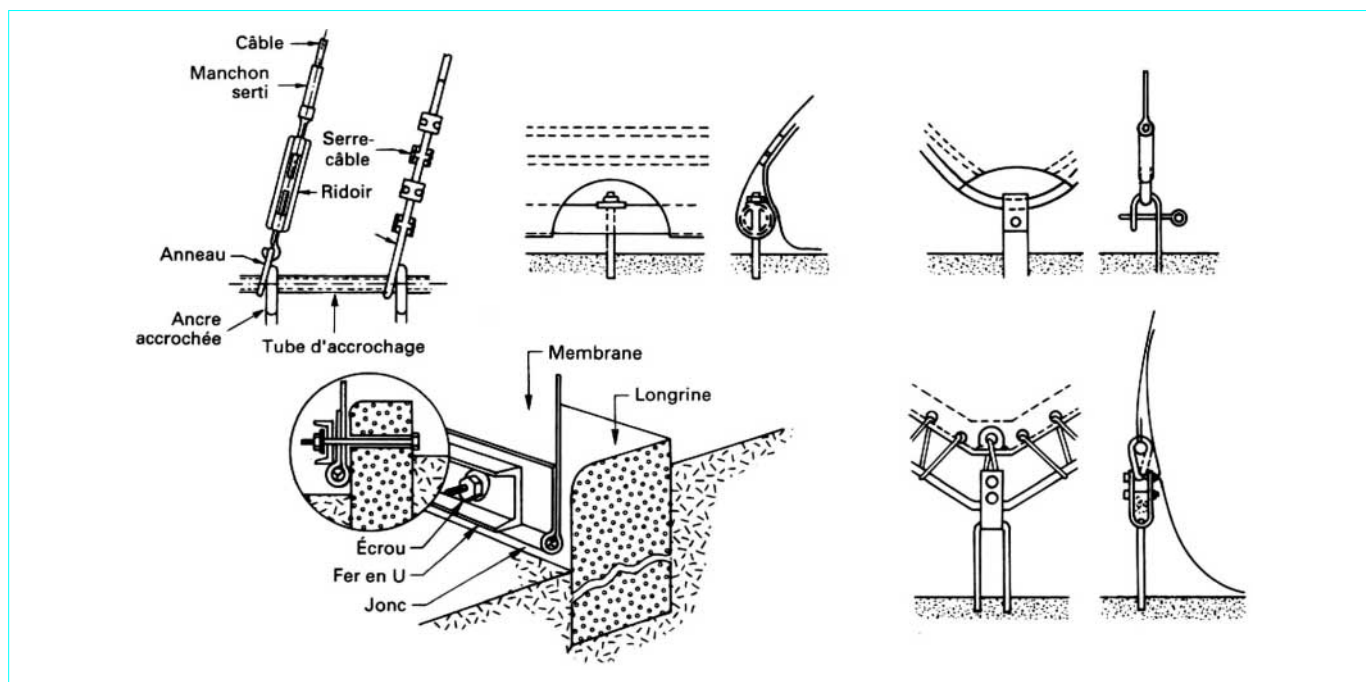


Figure 16 – Principes des liaisons de rive et d'ancrage au sol des structures aérosupportées (d'après [24])

Les parties inférieures de la membrane sont, soit tendues linéairement selon leur lisière, soit tendues ponctuellement par les « pointes de toile » à l'aide de câbles solidaires d'ancrages au sol ou de mâts secondaires en périphérie de l'ouvrage.

Les grands déplacements de la toile – qui constituent une des particularités de l'architecture textile – nécessitent d'être pris en compte au niveau de la conception des ossatures supports. Les mâts réalisés en tubes d'acier, montés sur rotule et stabilisés par des haubans en acier, constituent un des exemples permettant d'obtenir une certaine souplesse des structures.

3.1.3 Protections particulières des ossatures

Comme on l'a vu précédemment, les structures associées aux toiles sont généralement métalliques (en acier). De plus, ces structures présentent la particularité d'être parfois, en partie ou en totalité, situées à l'extérieur du volume clos par l'enveloppe textile. Cette disposition conduit à prendre d'importantes précautions au niveau de la **protection contre la corrosion** des ossatures.

Cette protection peut être réalisée par **galvanisation** et/ou par **revêtement organique** appliqué en plusieurs couches.

Malgré les précautions prises lors de la réalisation de l'ouvrage, il faut envisager, en exploitation, une surveillance accrue de l'intégrité des revêtements protecteurs de l'ossature, et des travaux de maintenance dès qu'une défaillance de protection est décelée.

Dans le domaine de la protection des ossatures, le concepteur doit également se préoccuper de la **protection contre l'incendie** pour laquelle diverses techniques ont été développées :

- les structures irriguées ;
- les revêtements par peinture intumescente.

En dernier lieu, il convient de ne pas négliger la **protection contre le vandalisme**.

Les constructions textiles font un large emploi de câbles, tendeurs et autres dispositifs de réglage de tension, accessibles du sol. Dans certains cas, il peut être rendu nécessaire de prévoir des dispositifs de capotage des organes de réglage, afin de les mettre à l'abri de manœuvres malveillantes.

Les toiles, quant à elles, sont plus ou moins sensibles à l'action d'un objet tranchant. L'incorporation de filets d'acier dans la masse des toiles est une solution qui a donné lieu à des expérimentations récentes mais, semble-t-il, dans d'autres domaines (bâchage de wagons) que celui de l'architecture textile.

3.2 Éléments accessoires

3.2.1 Définitions, types et fonctions

Les éléments accessoires sont destinés au liaisonnement et au réglage entre les divers constituants de la membrane et/ou de l'ossature.

On distingue les éléments suivants.

— Les **câbles** (figure 17) : ce sont des éléments souples, filiformes, qui transmettent les efforts d'un point à un autre. Suivant leur principe de confection, on distingue les câbles monotoron (gainé ou non), les câbles clos, les câbles multitoron, etc.

— Les **attaches de câbles** (figure 18) : ces accessoires permettent le raccordement des extrémités de câbles. Les systèmes les plus utilisés sont les culots coniques et les culots filés, filetés et sertis.

— Les **éléments de mise en tension** (figure 19) : ils sont destinés à l'application des efforts destinés à la précontrainte de la toile et/ou à compenser les fluages ultérieurs de celle-ci.

— Les **éléments de liaisonnement portés par la toile** : ce sont les œillets (§ 6.1.3), les ralingues ou les plaques rapportées (figure 20) sur les pointes de toiles, afin d'exercer les efforts concentrés de tension à ces endroits.

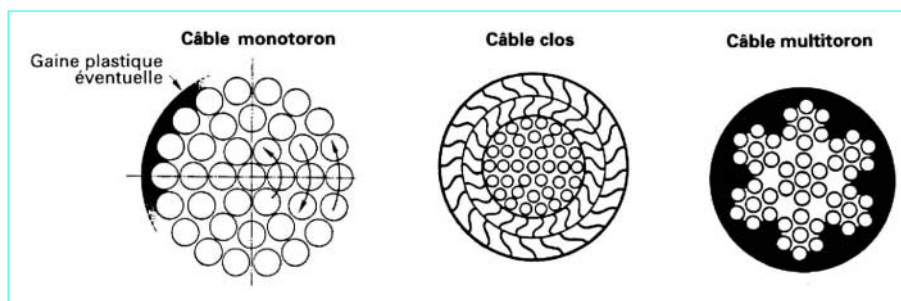


Figure 17 – Constitution des câbles

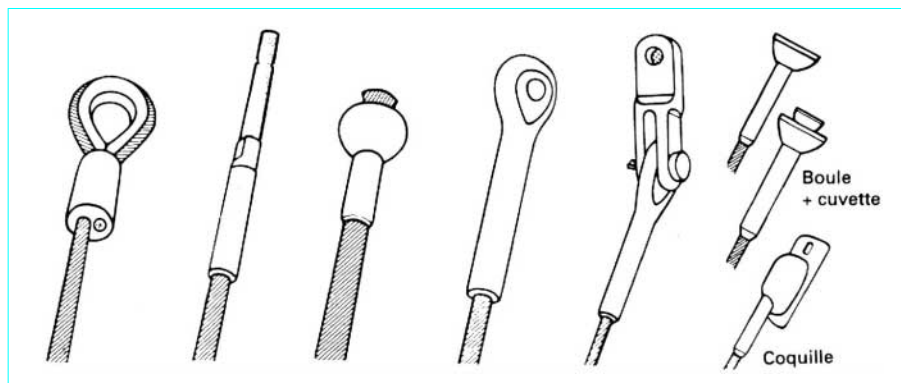
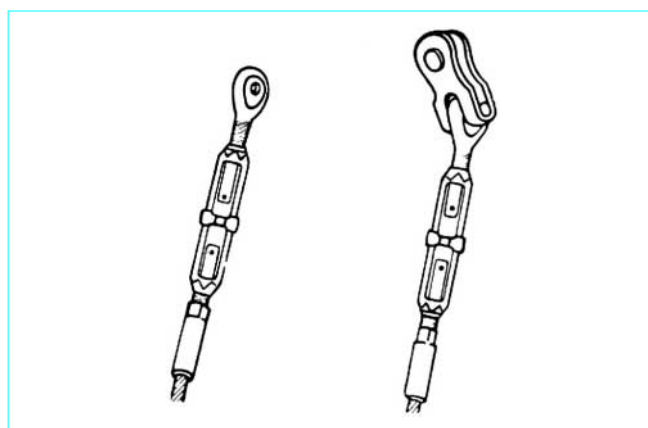


Figure 18 – Attaches et extrémités de câbles

Figure 19 – Ridoirs pour tension des câbles
(d'après catalogue SARMA)

3.2.2 Nature et dimensionnement

Les câbles sont généralement en acier. La protection contre la corrosion peut être obtenue par galvanisation des fils ou recouvrement par gainage synthétique. Il existe également des câbles en acier inoxydable, mais d'un coût nettement plus élevé et de caractéristiques mécaniques plus faibles que celles des câbles en acier classique, et il convient de prescrire une composition monotoron afin de minimiser l'allongement relatif.

Les câbles en fibres synthétiques *Kevlar* sont de plus en plus employés en architecture textile. D'un poids trois fois moins élevé

que celui d'un câble d'acier de même résistance, les câbles en *Kevlar* sont, de plus, de mise en œuvre plus aisée que les câbles en acier.

Les éléments d'accastillage sont généralement en acier galvanisé, parfois en acier inoxydable.

Le dimensionnement des câbles et de l'accastillage est défini lors de la conception du projet de construction en fonction des efforts exercés sur les liaisons.

Un coefficient de sécurité au moins égal à 2,5 est appliqué sur la contrainte maximale d'usage calculée (ELS).

3.2.3 Durabilité et sécurité

Les considérations évoquées dans ce domaine pour les ossatures (§ 3.1.3) s'appliquent aux éléments accessoires. Cela concerne :

- la résistance à la corrosion ;
- la sécurité au feu ;
- la protection contre le vandalisme.

En matière de durabilité des accessoires métalliques, celle-ci est bien évidemment supérieure lorsque ces accessoires sont issus de matériaux non corrodables dans leur masse (acier inoxydable).

Bien que le Cahier des règles de l'Art [19] signale qu'une meilleure protection des parties métalliques est obtenue par le recours à l'acier inoxydable, il ne semble pas qu'une démarche de spécification ait été entreprise visant à déterminer les cas d'emploi obligatoire de ce type de protection.

En ce qui concerne les câbles en fibres synthétiques, la durabilité de ceux-ci est influencée essentiellement par l'agressivité de l'environnement et par le rayonnement UV.

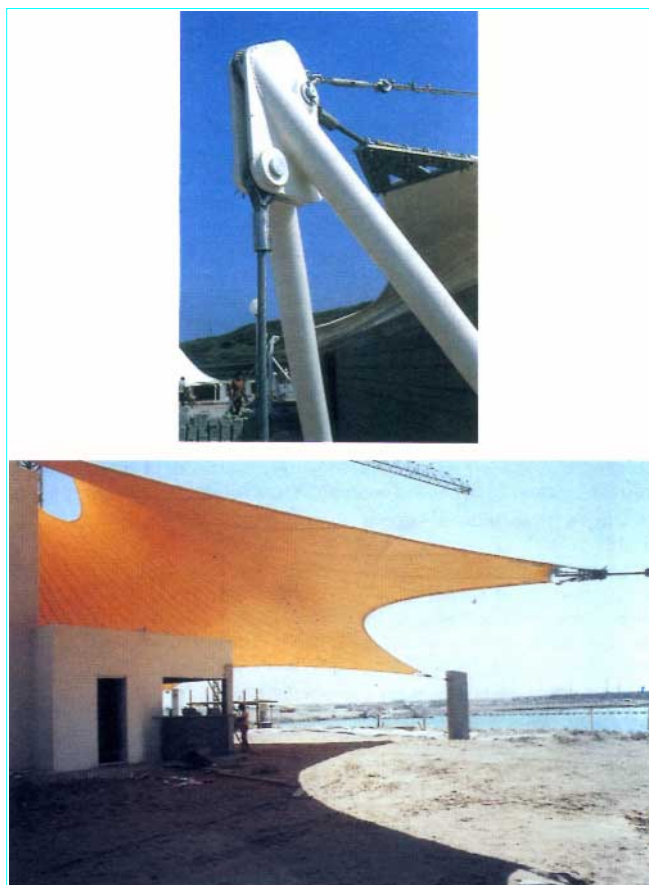


Figure 20 – Platine métallique de renfort des pointes de toile

4. Principes de statique. Typologie

4.1 Principes de portance des toiles

4.1.1 Structures gonflables ou aérosupportées

Elles représentent environ 10 % des constructions actuelles en architecture textile. Ce type de structure permet de couvrir de petites ou grandes surfaces (aires de sport, de stockage, recouvrement de piscine de plein air).

Les structures gonflables épousent des formes élémentaires (sphères, cylindres, dômes, etc.). Elles sont généralement simples du point de vue calcul et conception, mais ne permettent pas une grande liberté de formes.

Ce type de structure reste **assez sensible aux effets du vent**.

L'élément support de la toile est l'air qui, par la pression qu'il exerce sur la face intérieure du tissu, réalise une prétension surfacique de la toile. La rigidité de forme est obtenue par simple ou double courbure.

La **surpression** à l'intérieur du bâtiment est de l'ordre de 1 à 3 mbar (10 à 30 mm de colonne d'eau). Elle est **maintenue par une soufflerie** qui doit assurer en moyenne un renouvellement du volume d'air du bâtiment à l'heure.

Le groupe de ventilation, généralement électrique, doit être, pour des raisons de sécurité, placé à l'extérieur du bâtiment. Il est obligatoirement couplé à un groupe de secours thermique à démarrage automatique en cas de panne du groupe principal.

L'aspect **sécurité d'effondrement** est spécifique à ce type de construction. La structure peut en effet s'effondrer pour diverses causes : incendie, panne de ventilation, déchirure de l'enveloppe, etc.

On se reportera utilement à cet égard au Cahier du CSTB n° 162 [23].

Les structures précontraintes par pression d'air sont généralement à simple paroi et surpression du local occupé (figure 3). Cette disposition implique bien évidemment de recourir à des dispositifs de sas pour l'accès dont la stabilité propre doit être assurée indépendamment. Elles peuvent être à double paroi :

- du type lentille pressurisée portée par câble (figure 2) ;
- du type « boudins gonflés » (figure 8).

Dans le cas d'une implantation à base rectangulaire, il convient de ne pas excéder un rapport 5 entre longueur et largeur.

4.1.2 Structures portées

Elles englobent toutes les structures dont la prétension résulte des efforts appliqués le long des rives de membranes assujetties à des arcs, fermes ou portiques généralement métalliques (figures 4 et 14, par exemple).

La configuration des zones de liaison conduit à qualifier la prétension de linéaire.

La toile doit présenter une double courbure et la charpente support est, dans la plupart des cas, autostable.

La prétension linéaire des rives souples hautes et/ou basses, dans la direction des lignes de courbures principales de la membrane, doit être équilibrée par la charpente support qui transmet les efforts aux ancrages sous forme de poussées horizontales et verticales.

4.1.3 Structures à prétension ponctuelle

Les efforts de prétension de la membrane sont, dans ce cas, localisés à des zones limitées en surface, à l'intérieur et en périphérie de la membrane.

Ces structures autorisent une **grande liberté de formes** grâce aux multiples combinaisons possibles de localisation des points de tension de la surface. Un seul impératif de base consiste à veiller à ce qu'en tout point il existe une courbure inverse.

Les formes les plus simples de structures tendues ponctuellement sont du type « chapeau chinois » (figure 21) ou « feuille de houx ».

Les dispositions directrices générales de conception des structures tendues sont précisées dans le « Cahier des règles de l'Art » [19]. Elles concernent principalement :

- l'homogénéité des rayons de courbure des ralingues ($15 < r < 25$ m) ;
- la distance maximale entre pointes de toiles (de 8 à 15 m) ;

- le positionnement des mâts par rapport aux rives périphériques de toiles, le plus barycentrique possible ;
 - l'étude des bassins de versant des eaux (et d'accumulation possible de la neige) à l'aide de modèles en jersey et de billes de liège (§ 5.3.2).
- Les figures 22 et 23 illustrent des exemples de structures à prétension ponctuelle.

4.2 Avantages et inconvénients des divers types

L'adaptation des trois types principaux de structures textiles évoquées au paragraphe 5, en fonction de la destination des bâtiments, est précisée dans les tableaux 5 et 6.

Tableau 5 – Conditions d'adaptation des structures textiles aux bâtiments sportifs			
(Origine : Club de la Structure Textile – CR n° 2.92)			
Aires sportives	Structures gonflables	Rives rigides (portées)	Rives souples (tendues)
Tennis	*	*	*
Salle polyvalente	Non	**	Non
Piscine	**	**	Non (1)
Patinoire	Non	*	*
Manège (chevaux)	Non	**	**
Stade - tribunes	Non	**	**
- terrains	**	*	*
- piste	Non	*	*
Golf - practice	Non	Non	*
- club house	Non	Non	*
Boulodrome	*	*	*
Mur d'escalade	Non	*	*
Piste de ski			* (2)
* possible ** vraiment adapté			
(1) Sauf découvrables type Saint-Mandé.			
(2) Projet très avancé au Japon.			



Figure 21 – Chapeau chinois (Doc. Sté Dalo)

D'une façon générale, les constructions métallo-textiles ne conviennent que si les contraintes acoustiques et thermiques sont mineures, alors que la modulation de la lumière et la protection contre les intempéries sont les préoccupations dominantes.



Figure 22 – Mât central (Doc. Esmerly-Caron)



Figure 23 – Station Elf (Doc. M.M.)

Tableau 6 – Avantages et inconvénients des différentes structures textiles [33]

Structures gonflables	Structures tendues	Structures portées
<ul style="list-style-type: none"> — mise en œuvre rapide et aisée — conception et études simplifiées — démontage facile — faible coût d'investissement — possibilité de coupler ventilateurs et chauffage climatisation — usages très divers : couvertures, arcs, moules et coffrage, réservoirs... — amagnétiques (radôme) — coffrage récupéré ou perdu 	<ul style="list-style-type: none"> — translucidité — grandes portées — intérêt architectural : grande liberté de forme — accrochage aisé aux constructions existantes — temps de montage très rapide 	<ul style="list-style-type: none"> — translucidité — formes et programmes architecturaux variés — possibilités d'adaptation à des structures existantes — rapidité de mise en œuvre (montage, démontage) — possibilités de panachage entre : <ul style="list-style-type: none"> • structures rigides et textiles • structures portées et tendues par points — acoustique améliorée (par rapport aux structures gonflables) — possibilité d'accrochage de décoration, publicité, fractionnement, scénographie — maintenance très réduite — investissement plus faible (1) — longévité assurée au-delà de 15 ans.
<ul style="list-style-type: none"> — formes limitées — déperditions thermiques importantes, frais de maintenance élevés (énergie) — nuisances acoustiques (ventilation permanente) — effet de serre l'été pour structures non ventilées — nécessité d'accès spéciaux — sensibilité aux actes de malveillance ou de négligence 	<ul style="list-style-type: none"> — conduite des calculs et obtention de la surface d'équilibre complexes — constructions souvent ouvertes — réglage définitif délicat — contrôle périodique de la prétension 	<ul style="list-style-type: none"> — calculs plus délicats que pour la structure gonflable — difficultés de mise en prétension dues au frottement sur les arcs — nécessité d'un contrôle périodique de la prétension — appareils de levage pour les arcs

(1) En termes d'investissement, un ouvrage métallo-textile se situe à mi-chemin entre une couverture en bacs nervurés (opaque) et une verrière (transparente).

5. Modélisation et calcul

5.1 Fonctionnement mécanique et bases théoriques

5.1.1 Spécificités mécaniques

Du point de vue mécanique et par rapport aux structures rigides traditionnelles, les structures textiles tendues ont un caractère très particulier marqué notamment par :

- un état de **précontrainte initiale** indispensable à la rigidification de la structure ;
- la nécessité impérieuse d'avoir en tout point un état de **contraintes de traction suivant les deux directions** de trame et de chaîne, et une double courbure inverse ;
- l'existence de **grands déplacements**, et parfois de **grandes déformations**, qui induisent une non-linéarité géométrique ;
- l'**anisotropie du matériau** utilisé, et parfois la nécessité de prise en compte de sa non-linéarité structurelle dans le domaine élastique ;
- la **faible valeur du poids propre** par rapport aux sollicitations climatiques et aux efforts de précontrainte ;
- les **contraintes technologiques de fabrication** qui imposent de découper les surfaces gauches sous contraintes en différents éléments de dimensions limitées et initialement plans ;
- l'existence de **réactions d'appuis importantes**, comportant en particulier des composantes verticales de soulèvement et de fortes composantes horizontales.

L'ensemble de ces contraintes conduit à une interrelation très forte entre la forme, les forces et les matériaux. L'indétermination cinétique initiale et la nécessité de la détermination de la géométrie de

découpe demandent donc d'adopter pour ce type de structures une méthodologie de conception particulière. Le caractère non linéaire des calculs effectués nécessite également l'utilisation de méthodes de calcul itératives et/ou incrémentales et une visualisation graphique de la déformée qui permet souvent des rectifications manuelles (pour éviter par exemple l'apparition de plis ou de poches, ou pour augmenter la courbure).

5.1.2 Nécessité de la double courbure

L'équilibre local en un point des membranes tendues est caractérisé par les valeurs des intensités T_1 et T_2 des tensions principales (figure 24) [1].

Les rayons de courbure principaux qui correspondent aux tensions sont respectivement R_1 et R_2 .

L'équation d'équilibre local s'écrit :

$$\frac{T_1}{R_1} + \frac{T_2}{R_2} = p$$

p représente une intensité surfacique d'actions extérieures. Deux cas peuvent être envisagés :

- la **surface est à double courbure négative ou inverse** : l'équilibre est alors possible avec une valeur nulle de p (les valeurs de R_1 et R_2 étant affectées d'un signe opposé). C'est le cas des structures textiles tendues linéairement et ponctuellement ;

- la **surface est à double courbure positive** : dans ce cas R_1 et R_2 étant de même signe, l'équilibre ne peut exister que par l'apport d'un troisième terme p_i permanent correspondant en pratique à une pression intérieure uniforme appliquée à la membrane. C'est le cas des structures gonflables.

Dans les deux hypothèses, les actions extérieures caractérisées par une pression ne doivent pas annuler l'une ou l'autre des tensions principales, ce qui se traduirait par l'apparition de plis dans la membrane.

5.1.3 Rôle de la prétension

La nécessité de la double courbure étant établie, la stabilité de la membrane est assurée par la prétension, c'est-à-dire par l'introduction d'une précontrainte. La prétension consiste à exercer des tractions sur chacune des deux familles de fils (en trame et en chaîne) afin de limiter les déplacements de la membrane soumise aux actions extérieures.

Afin d'illustrer les différents aspects liés à la prétension, nous pouvons, avec un modèle simplifié, étudier l'équilibre d'un point de la surface. Dans le cas de la double courbure inverse, le modèle est constitué de deux câbles AB et CD fixés respectivement en deux points « hauts » et en deux points « bas ». La projection horizontale des quatre points constitue un quadrilatère (figure 25).

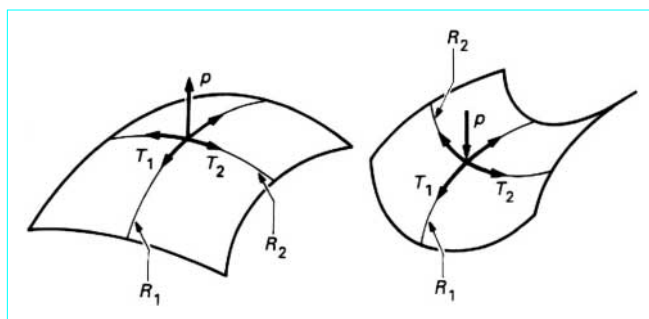


Figure 24 – Équilibre local d'une membrane tendue

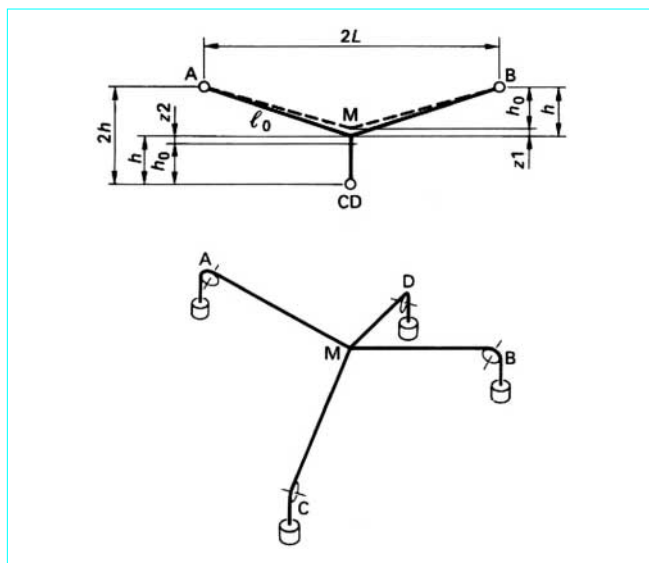


Figure 25 – Modèle du bicâble

Par mesure de simplification posons $AB = CD = 2L$. Les câbles dans leur état non déformé sont de longueur $2\ell_0$. La distance entre les droites AB d'une part, et CD d'autre part est choisie supérieure à $2h_0$, h_0 étant la distance du point M à la droite AB (ou CD) correspondant à une tension nulle dans le câble AMB (ou CMD). Cette même distance, dans l'état de précontrainte caractérisé par le déplacement z du point M, est $h_0 + z$.

Dans ce cas symétrique, la mise en prétension consiste à faire coïncider les points M des deux câbles à mi-hauteur entre les deux plans horizontaux : la déformation correspondante des deux câbles revient à appliquer au câble supérieur une force T_1 et au câble inférieur une force T_2 .

Dans un cas comme dans l'autre, on peut écrire ainsi la relation entre la force appliquée au nœud et le déplacement correspondant par rapport à l'état non déformé, qui correspond au diagramme de la figure 26 :

$$T = 2EA \sin \alpha \frac{\sqrt{L^2 + (h_0 + z)^2} - \ell_0}{\ell_0}$$

avec E module d'Young,

A section du câble,

α inclinaison du câble sur l'horizontale.

Cette relation introduit les termes du second ordre par rapport au déplacement, tenant compte ainsi des **grands déplacements tout en restant en petites déformations et en élasticité linéaire**.

Cette relation entre T et z est valable pour les deux câbles. L'origine choisie correspond à la géométrie initiale non déformée soit à $z = 0$.

À l'équilibre sans action extérieure, nous avons bien sûr : $T_1 = T_2$, ce qui nous donne le déplacement z_1 qui correspond donc à la prétension.

Lors de l'application d'une action verticale F dirigée vers le bas, le point M commun aux deux câbles subit un déplacement dans le même sens. Lorsque l'équilibre est à nouveau atteint, soit pour la cote z_2 du point M, nous avons :

$$T'_1 + F = T'_2$$

Le déplacement z_2 du point d'équilibre est donc tel que la longueur KC sur le diagramme de la figure 26 soit égale à F . À partir du point M représentatif de l'état de prétension ($z = z_1$), le relâchement du câble inférieur est en effet représenté par une courbe symétrique de la courbe de mise en tension du câble supérieur par rapport à une verticale passant par M.

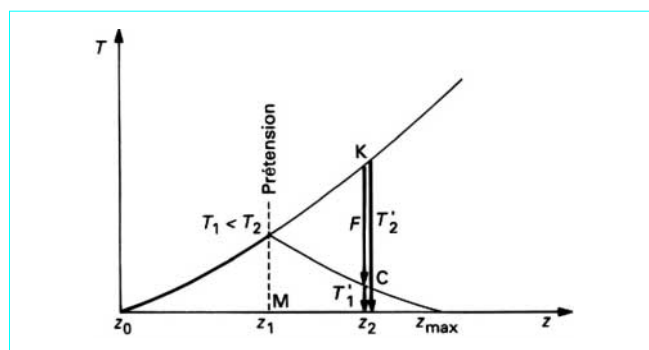


Figure 26 – Diagramme de fonctionnement du bicâble [1]

En conséquence :

— l'équilibre sous charge fait apparaître un accroissement de la force appliquée au câble supérieur, mais sa tension T_2 est inférieure à la somme $T_2 + F$, car T_1' est inférieure à $T_1 (= T_2)$. Il n'y a donc pas addition des effets de la prétension et des charges appliquées, mais combinaison ;

— le déplacement du point de jonction des deux câbles est mesuré par la différence $z_2 - z_1$ qui est inférieure à l'abscisse z_1 en l'absence de prétension. Celle-ci a donc une action de rigidification de la membrane ;

— il faut dans tous les cas s'assurer que le câble inférieur ne « flotte » pas, ce qui correspond à une tension nulle, donc que z_2 est inférieur à z_{\max} , z_{\max} étant l'abscisse du point d'intersection de la courbe T_1' avec l'axe des z .

Concernant le niveau de prétension, une première analyse pourrait nous conduire à choisir des valeurs élevées afin que les déplacements de la membrane soient limités quelles que soient les actions climatiques, caractérisées dans notre exemple par F .

Mais imposer en permanence à la toile un tel état de prétension ferait travailler le tissu de manière excessive et provoquerait donc une fatigue et un vieillissement prématuré de la toile, cela pour ne supporter que des actions extrêmes rarement atteintes et pendant peu de temps. Il en résulte que le choix des valeurs de prétension est toujours un compromis entre les déplacements de la membrane considérés comme admissibles en fonction de sa forme et de son utilisation, et la fatigue imposée à la toile. Ces valeurs dépendent principalement des actions climatiques susceptibles d'être appliquées à la membrane, mais l'usage conduit à retenir des valeurs comprises entre 180 et 350 daN/m.

5.2 Méthodologie de calcul

Compte tenu des remarques générales faites précédemment, le calcul des structures textiles tendues doit suivre une méthodologie particulière qui comporte en général trois étapes :

- la recherche de la configuration d'équilibre et le calcul de la prétension appelée **recherche de forme** ;
- une fois la géométrie définie, le calcul des **contraintes et déplacements dus aux sollicitations climatiques** ;
- la définition de la géométrie de chaque lé dont l'assemblage formera la membrane, par un processus appelé **recherche de la géométrie de découpe**.

De nombreuses méthodes de calcul plus ou moins différentes ou spécifiques sont utilisées pour chaque phase de calcul dont les plus courantes sont présentées ci-après.

5.3 Recherche de forme

5.3.1 Objectifs

La première étape consiste à définir la forme (figure 27), qui est essentielle, à la fois pour l'architecte et pour le mécanicien. Le premier y voit avant tout une « forme initiale » conçue à partir d'une conception purement esthétique et architecturale mais, pour le second, il s'agit de définir une « forme d'équilibre » régie par les lois générales de la mécanique. Il s'agit donc, pour le bureau d'études, de donner au façonnier, à partir du plan d'architecte, la forme des lés de tissu qui, une fois assemblés et tendus dans l'espace, vont redonner le dessin de l'architecture ou, du moins, une forme proche et acceptable par celui-ci.

La géométrie des membranes est caractérisée par la nécessité de satisfaire à la condition de double courbure en tout point, double courbure inverse dans le cas des structures tendues. « Géométriser »

revient donc, en quelque sorte, à fixer en chaque point les deux rayons de courbure principaux R_1 et R_2 , ce qui équivaut à fixer le rapport des tensions principales. Le choix doit tenir compte de l'ordre de grandeur des actions équilibrées par chacune des courbures principales, et de l'anisotropie des caractéristiques mécaniques de la toile selon la trame et la chaîne. Après avoir esquissé la forme générale de la membrane par ses contours apparents, et en avoir déterminé les rives et ancrages, il convient de connaître l'ensemble de la surface afin de définir la géométrie de coupe du tissu pour la confection. Or la géométrie résulte d'une part de la géométrie non déformée des éléments de toiles constitutifs, et d'autre part des actions induites par la prétension mise en œuvre, prétension qui confère au système sa rigidité. L'effet des actions appliquées se traduit ensuite par une déformation de la géométrie obtenue.

La recherche d'une surface donnant une aire minimale pour un contour fixé n'est pas obligatoire même si elle conduit à réaliser un système ayant une énergie potentielle minimale. Il est donc possible d'avoir une plus grande liberté de forme en s'écartant de ce type de solution.

En principe, la surface peut être caractérisée, selon les cas, par l'une ou l'autre des méthodes suivantes :

- en donnant l'équation explicite de la surface qui, pour chaque point (x, y) , détermine la valeur de la cote z ; cela n'est possible que pour un nombre très restreint de surfaces ;
- en définissant la géométrie par déplacement d'une courbe « génératrice » sur une ou plusieurs courbes « directrices » ;
- en réalisant une maquette ;
- en opérant un processus numérique de recherche de forme qui permet d'obtenir la valeur des cotes z d'un nombre fini de points en fonction de leurs coordonnées x et y , et par interpolation à un point quelconque de la surface.

Les méthodes de modélisation utilisées pour la recherche de forme peuvent se classer en deux catégories, dont la dernière tend à se généraliser : la modélisation physique et la modélisation numérique.

5.3.2 Modélisation physique

Deux méthodes de définition de forme sont utilisées [13].

5.3.2.1 Bulles de savon

Les modèles sont réalisés à partir d'un mélange eau-*Teepol* dans lequel sont trempés des contours rigides en fil de fer.

Cette technique permet d'obtenir des surfaces gauches représentatives de membranes isotropes et dont les contraintes seraient constantes en tout point, ce qui conduit à des surfaces minimales **dont on ne peut faire évoluer la forme qu'en déformant le contour support**. Cette méthode ne s'applique bien sûr pas pour les structures à appuis ponctuels.

Son utilisation, surtout pédagogique et universitaire, a été très prisee dans les années 70, en particulier par l'Institut des structures légères de Stuttgart, animé par Otto Frei.

5.3.2.2 Maquettes de tissu élastique

Les maquettes en jersey sont faciles à réaliser, à l'exception des rives souples et des points singuliers.

Cette technique donne une bonne approche des surfaces gauches et permet de jauger qualitativement les sous-tensions et les poches d'eau ou de neige en y testant des petites sphères de liège (diamètre 10 mm). Les surfaces engendrées sur un même support peuvent subir des petites variations de forme en jouant sur les tensions principales.

Elle peut être un outil efficace de recherche et même de développement si l'on se rapproche de l'échelle 1/20.

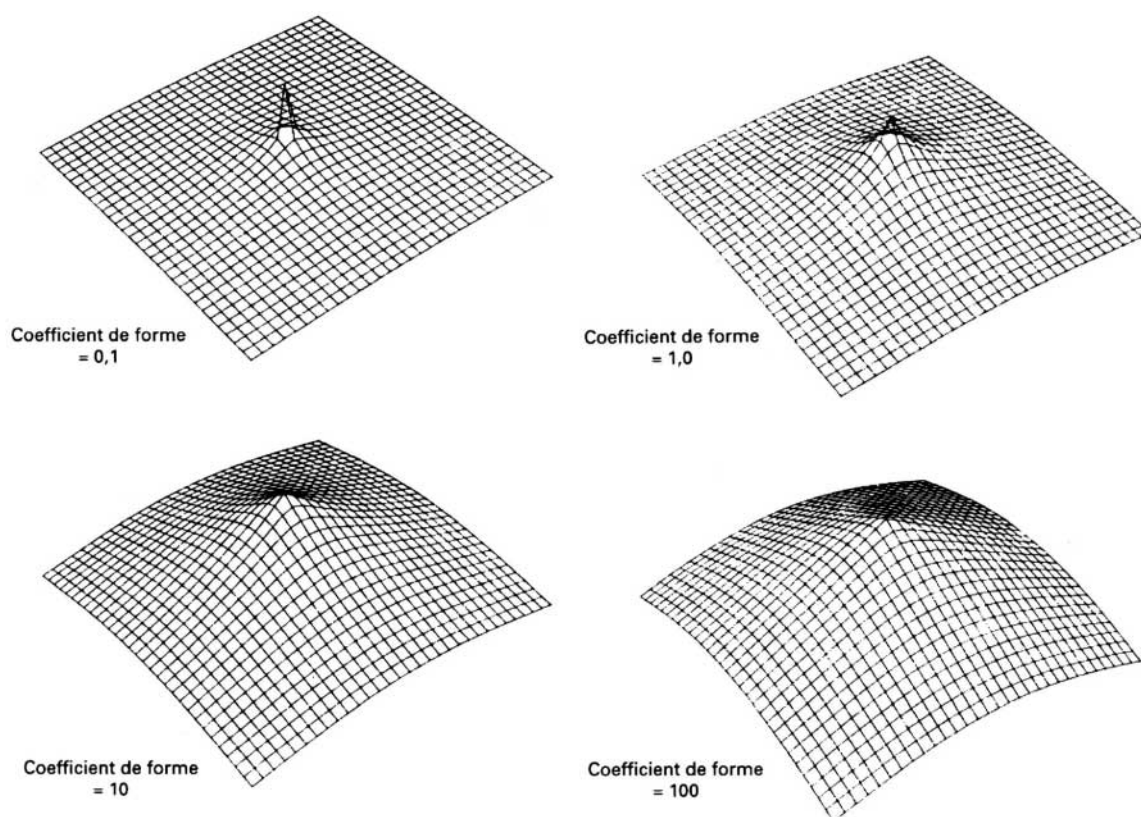


Figure 27 – Recherche de forme

5.3.3 Modélisation numérique

5.3.3.1 Méthode des densités de force

Le principe de cette méthode a été défini par H. J. Sheck [4].

La surface à modéliser est discrétisée par un maillage quelconque, quadrangulaire ou triangulaire, qui peut être assimilé à un réseau de câbles.

Chaque nœud est numéroté en commençant par les nœuds libres, où s'exercent les sollicitations extérieures, et en terminant par les nœuds fixes correspondant aux supports.

Sont ensuite définies les liaisons entre les différents nœuds par une matrice de connexion indiquant, pour chaque élément, les nœuds d'origine et d'extrémité (voir exemple de la figure 28) [11].

À partir de la définition du maillage initial et des sollicitations extérieures, la position d'équilibre est définie par un système d'équations non linéaires qui fait intervenir pour chaque élément le rapport de la tension dans celui-ci à sa longueur, qui est appelé **densité de force** $Q = N/L$.

Si l'on isole ce coefficient considéré comme un paramètre fixé par le concepteur, les équations d'équilibre de chaque nœud deviennent alors linéaires, ce qui permet d'obtenir facilement, par des méthodes de résolution directe (avec inversion de matrice) ou itératives, les coordonnées de chaque nœud libre et donc les longueurs et tensions dans chaque élément.

L'algorithme général de recherche de forme peut donc être représenté comme indiqué sur la figure 29.

La sortie graphique et le calcul des tensions dans chaque élément permettent au concepteur d'ajuster pas à pas la forme de la structure en modifiant les densités de force afin d'obtenir une géométrie finale acceptable, qui n'entraîne pas, par exemple, de surtension dans les éléments ou de poche et qui corresponde à des courbures suffisantes. La figure 30 donne un exemple de définition de forme par un logiciel basé sur cette méthode [5].

À chaque choix des coefficients de densité de force correspond donc une seule position d'équilibre. Cependant, certaines conditions supplémentaires peuvent parfois restreindre ce choix. Des algorithmes de résolutions particulières permettent ainsi d'appliquer la méthode des densités de force pour obtenir des surfaces d'aire minimale, ou pour respecter par exemple le passage de la surface par des points obligés.

Les **avantages** principaux de la méthode sont :

- l'existence d'une solution quels que soient les choix du concepteur ;
- le nombre limité de données nécessaires à la résolution du système. Seules interviennent la définition du maillage et des points fixes, et la valeur des coefficients de densité de force pour chaque élément imposée par le concepteur ;
- des temps de calcul réduits permettant une forte interactivité ;
- l'obtention de la forme d'équilibre (coordonnées des nœuds mobiles), mais également des tensions dans les éléments.

L'**inconvénient** majeur est le fait que le rapport tension sur longueur (densité de force) n'est pas très physique ni représentatif, de telle sorte qu'il est difficile au concepteur non habitué de prédire la forme de la surface correspondant aux valeurs qu'il introduit.

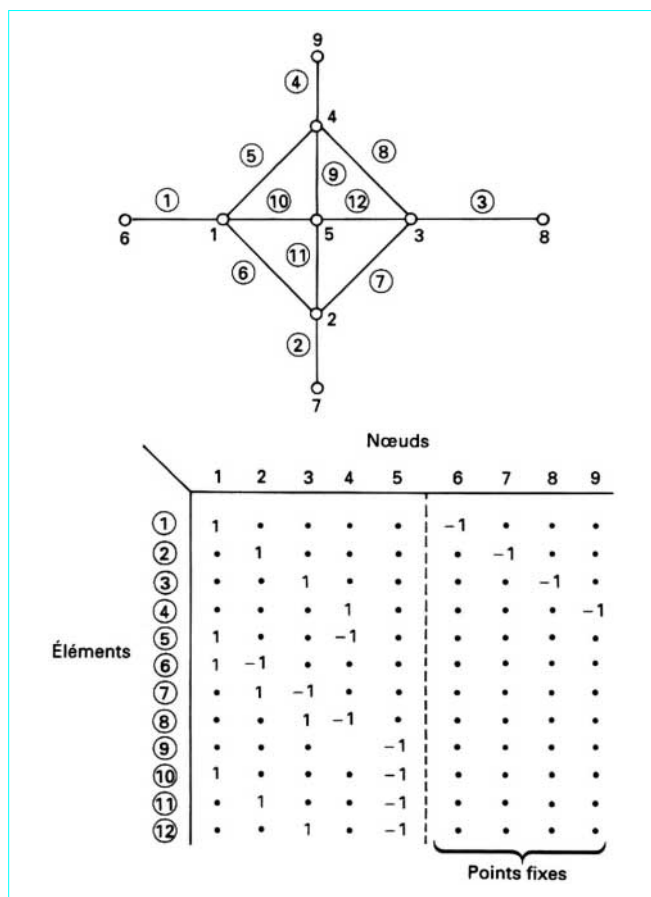


Figure 28 – Exemple de matrice de connexion définissant le maillage dans la méthode des densités de force [11]

5.3.3.2 Méthode de Haug ou du filet de câble

Le principe de cette méthode a été mis au point par E. Haug [6].

La recherche de forme suit le processus suivant (figure 31) :

a) la configuration initiale de la structure est définie par un réseau de câbles correspondant à un maillage qui peut être quelconque. Ce réseau définit un ensemble de nœuds dont certains sont mobiles tandis que d'autres, appelés « nœuds pilotes », sont fixés par le concepteur par déplacements incrémentaux jusqu'à leurs positions finales (nœuds d'appuis). La rigidité de chaque câble est prise égale à ES/ℓ (S étant égal à la section du tronçon de membrane correspondant, E le module d'Young et ℓ la longueur de l'élément) ;

b) à partir de la surface initiale définie pour les coordonnées de chaque nœud, les nœuds pilotes subissent un déplacement imposé induisant des allongements des éléments, donc des variations d'efforts dans les câbles qui se traduisent par l'apparition de forces aux nœuds libres, d'où un déséquilibre de la structure dans le cas où ces forces ne peuvent être considérées comme négligeables ;

c) la nouvelle géométrie d'équilibre peut alors être déterminée par l'utilisation d'une méthode itérative type Newton-Raphson à partir du calcul des matrices de rigidité élastique et géométrique.

Le processus itératif utilisé consiste à calculer successivement :

- les allongements de chaque câble,
- les effets correspondants,
- les forces résultantes aux nœuds mobiles,
- les déplacements des nœuds induits par ces forces,
- les allongements des câbles, etc.

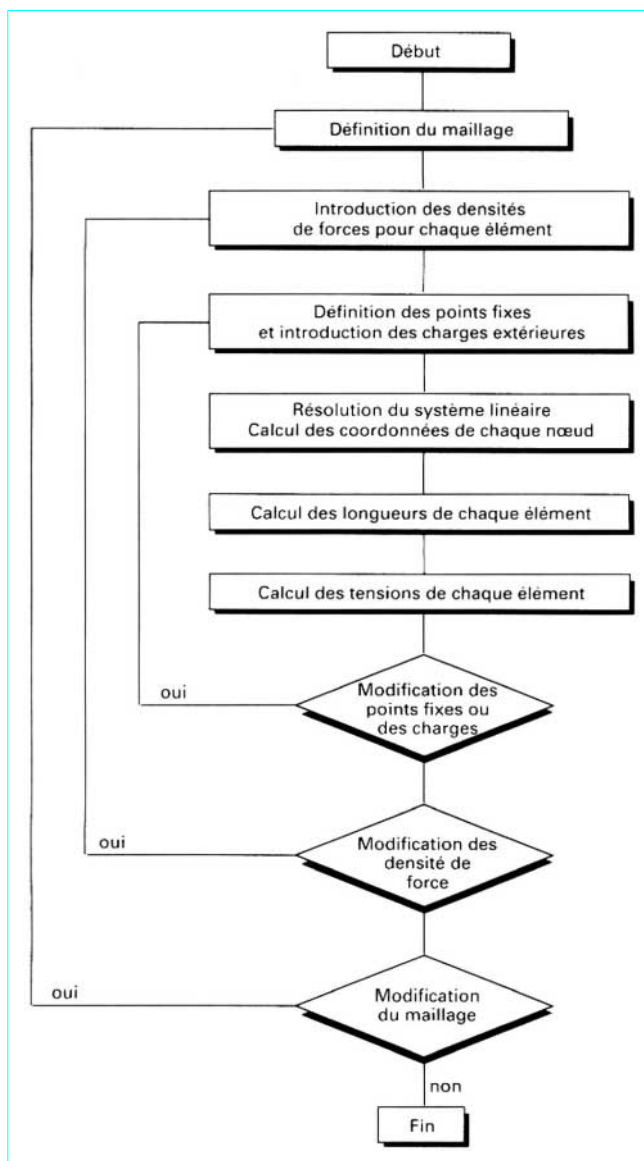


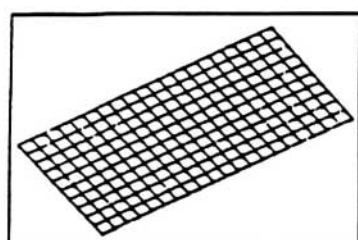
Figure 29 – Algorithme général de recherches de forme par la méthode des densités de force

d) les phases b et c sont répétées pour chaque incrément de déplacement des nœuds pilotes jusqu'à leur position finale ;

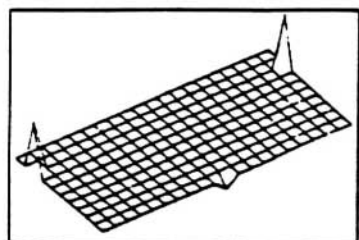
e) dans le cas où la géométrie d'équilibre calculée induit des prétensions trop importantes dans certains câbles, un ajustement de ces prétensions est nécessaire. Pour cela de nouvelles valeurs des longueurs initiales sont calculées afin de correspondre à des tensions acceptables pour une même valeur de l'allongement total du câble. Un nouveau calcul itératif est alors nécessaire afin de trouver les nouveaux efforts qui équilibrent les forces extérieures.

Les principaux avantages de cette méthode sont :

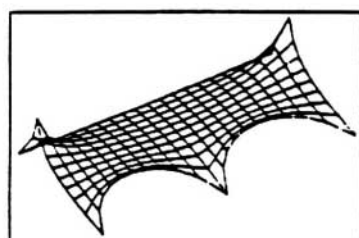
- le contrôle parfait, par le concepteur, de l'évolution de la forme de la surface par déplacements successifs des appuis ;
- la facilité d'utilisation, le concepteur jouant sur un paramètre très physique donc de manipulation aisée.



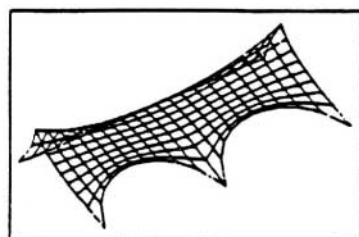
a) définition du maillage



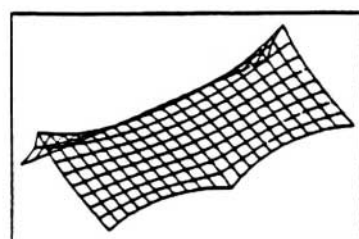
b) introduction des coordonnées des points fixes



c) forme préliminaire après un premier calcul



d) modification des coefficients de densité de force afin de retendre la partie supérieure de la structure



e) nouveaux calculs afin de modifier la géométrie des bordures inférieures

Figure 30 – Exemple de recherche de forme à l'aide d'un logiciel utilisant la méthode des densités de force [5]

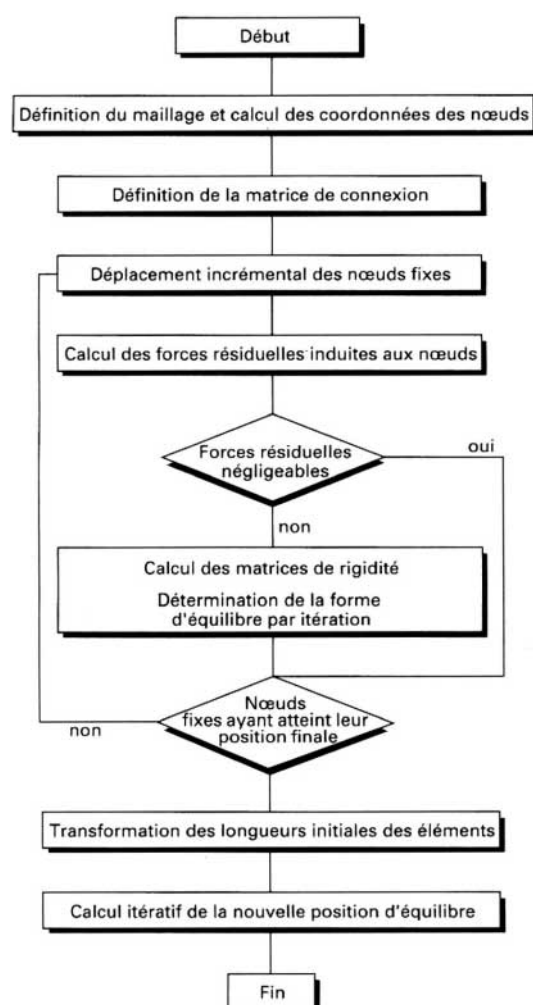


Figure 31 – Processus de recherche de forme par la méthode de Haug ou du filet de câble

Mais cette méthode a de gros **inconvénients**, qui sont principalement :

- le nombre important de données à introduire (en particulier les coordonnées de chaque nœud) ;
- la lourdeur des calculs qui demandent des temps de traitement importants ;
- l'impossibilité d'étendre cette méthode au calcul de la géométrie de découpe.

5.3.3.3 Méthode de relaxation dynamique

Cette méthode a été mise au point en 1965 par A.S. Day [7] et développée, dans le début des années 70, pour le calcul des structures tendues par M.R. Barnes [8] [9].

Elle présente des caractères de similitude avec la méthode de Haug, en particulier le déplacement incrémental des nœuds pilotes, mais elle utilise d'autres critères pour la recherche de la configuration d'équilibre.

Le principe de la méthode de relaxation dynamique est de suivre pas à pas, par incréments de temps Δt , le mouvement amorti de la structure considérée comme pesante, de l'instant initial où on lui impose un déplacement des nœuds pilotes jusqu'à la position stable finale.

L'expérience montre qu'il n'est malheureusement pas possible de déplacer les nœuds pilotes directement jusqu'à la position finale, mais qu'il est nécessaire de les déplacer par incréments successifs.

Cette méthode ne correspond donc pas à un calcul dynamique de la structure, mais utilise un calcul dynamique amorti fictif de celle-ci afin de déterminer la position statique d'équilibre.

Les matrices de masse et d'amortissement étant fictives, il est donc possible de les choisir diagonales afin de découpler les équations de mouvement, ce qui permet d'obtenir un système d'équations linéaires.

Il est même possible, pour accélérer la convergence, de choisir des mesures différentes suivant les trois directions x , y et z .

La méthode la plus efficace pour résoudre ensuite ce système est la méthode des différences finies. La méthode des éléments finis est aussi utilisable mais s'avère cependant plus lourde.

Le **processus** de calcul est le suivant :

a) définition du maillage, introduction des coordonnées des nœuds et définition des nœuds fixes ;
b) imposition d'un incrément de déplacement des nœuds fixes et recherche de la position d'équilibre par relaxation dynamique.

Pour cela des matrices de masse et d'amortissement visqueux sont définies, et la déformée du système est calculée pour des incréments de temps successifs Δt .

Pour chaque incrément Δt sont calculées (généralement par la méthode des différences finies) :

- les forces résiduelles induites aux nœuds,
- les vitesses en chaque nœud,
- les nouvelles coordonnées des nœuds,

cela jusqu'à amortissement du système, ce qui permet d'obtenir la position d'équilibre ;

c) un nouvel incrément de déplacement des nœuds fixes est imposé jusqu'à atteindre la position finale des appuis.

La méthode de relaxation dynamique peut être améliorée comme l'a indiqué D. A. Cundall [10], en considérant un « amortissement » cinétique au lieu d'un amortissement visqueux. Dans ce cas, le système est en fait non amorti, et les vitesses nodales sont réinitialisées à zéro chaque fois que l'énergie cinétique de la membrane atteint un maximum, cela jusqu'à ce que cette énergie cinétique tende vers zéro.

Compte tenu de la similitude avec la méthode de Haug, les inconvénients et avantages des deux méthodes sont les mêmes.

Un **avantage supplémentaire** est cependant la possibilité de développer la méthode en vue de la recherche de la géométrie de découpe, l'inconvénient majeur étant la lourdeur et la longueur des calculs, qui en diminuent l'interactivité.

5.3.3.4 Méthode à énergie potentielle minimale

Le principe de la méthode [12] consiste à considérer la membrane sans rigidité élastique et soumise à son champ de tensions isotropes (type bulle de savon), et de déterminer la position d'équilibre en minimisant l'énergie potentielle totale.

Le **processus** de calcul est le suivant :

a) la surface initiale est discrétisée par un maillage triangulaire. Cette surface peut être quelconque, mais doit s'appuyer sur des contours fixés par le concepteur. La longueur des éléments de rive doit ainsi être fixée, même si leur déplacement est possible ;

b) un champ de contraintes isotrope est imposé à la membrane ;

c) l'énergie potentielle peut s'exprimer en fonction des dimensions et des tensions dans les éléments. Sa minimisation revient à la résolution d'un système d'équations non linéaires effectuée par un processus itératif du type Newton-Raphson qui donne les coordonnées de chaque nœud et les tensions dans chaque élément.

Les **avantages** principaux de la méthode sont :

- l'obtention d'une surface d'aire minimale ;
- l'obtention de tensions isotropes dans la membrane ;
- le contrôle total des longueurs de rives ;
- la possibilité, pour le concepteur, de fixer la prétension finale.

En revanche ses plus gros **inconvénients** sont :

- la lourdeur des calculs résultant d'une résolution d'un système non linéaire ;
- la difficulté, pour le concepteur, de choisir le champ de contraintes initiales et d'appréhender la surface qui en résultera.

5.3.3.5 Autres méthodes

Parmi les autres méthodes utilisées peut être citée en particulier la méthode surfacique douce [13].

Développée par une équipe de jeunes chercheurs de l'université de Stuttgart en 1974 [47], cette méthode a été adaptée avec succès aux membranes par le groupe ARCORA avec la réalisation d'un logiciel interne.

La méthode de recherche de forme est fondée sur une analogie de déformation de plaque qui induit des surfaces minimales proches des résultats obtenus par la méthode physique des bulles de savon.

Elle a l'avantage d'être rapide et maniable et de ne nécessiter qu'un nombre très faible de points de définition. Elle permet également l'obtention directe de la géométrie de découpe sans être conditionnée par un maillage de points.

Mais son inconvénient est d'être un outil strict de recherche de forme et donc de ne pas donner les contraintes, qu'il faut calculer par une autre méthode.

Par ailleurs, il n'existe à ce jour aucune commercialisation du logiciel.

5.3.3.6 Comparaison des différentes méthodes

Une comparaison détaillée des différentes méthodes a été réalisée par N. Pauli [11] à partir des critères concepteur, mécaniques et mathématiques (tableau 7).

Les conclusions principales qui en sont tirées sont les suivantes :

— les méthodes des densités de force et de relaxation dynamique avec atténuation de l'énergie cinétique semblent les plus performantes et les plus faciles d'emploi, avec un avantage pour la méthode des densités de force en ce qui concerne les temps et les coûts de calcul ;

— cependant, des problèmes de convergence peuvent se poser pour la méthode des densités de force. De plus, celle-ci nécessite une numérotation particulière des nœuds. Il est donc conseillé de lui adjoindre un programme automatique de génération et de numérotation du maillage ;

— le fait que la méthode de relaxation dynamique puisse être étendue à la recherche de la géométrie de découpe semble un avantage relatif. En effet, l'efficacité du développement de la méthode n'est actuellement pas établie.

5.4 Calcul de la structure sous charges extérieures

Une fois déterminées la géométrie d'équilibre de la membrane et la valeur des contraintes de prétension, la structure doit être calculée sous l'effet des charges extérieures, qui sont généralement les charges climatiques (neige et vent).

5.4.1 Détermination des charges climatiques

Il n'existe actuellement aucun document officiel ni règlement permettant d'évaluer précisément les charges climatiques s'exerçant sur les structures textiles tendues. Le document de base reste donc les Règles Neige et Vent (article *Règles neige et vent NV 65* [C 3 305] dans ce traité) qui sont pourtant non applicables à ce type de structures, compte tenu principalement de leur géométrie.

Tableau 7 – Comparaison des différentes méthodes de recherche de forme [11]

Critères		Méthodes			
		Densité de force	Relaxation dynamique	Haug	Énergie potentielle minimale
Concepteur	Configuration initiale S_0	Quelconque	Quelconque	Quelconque	Quelconque
	Maillage Numérotation	Quelconque Non quelconque	Quelconque Quelconque (1)	Quelconque Quelconque (1)	Quelconque Quelconque (1)
	Obligation du concepteur	Géométrie initiale Points fixes [Q]	Géométrie initiale Points fixes Incréments des points pilotes [K] et Δt (ou [M])	Géométrie initiale Points fixes Incréments des points pilotes [K]	Géométrie initiale Points fixes [Σ]
Mécaniques	Contrôle de la configuration d'équilibre S_e	Points fixes [Q]	Points fixes [K]	Points fixes [K]	Points fixes [Σ]
	Conséquences sur géométrie de découpe	Non	Oui (<i>a priori</i>)	Non	Non
	Configuration d'équilibre S_e	x, y, z [N] Aire mini si $q = Cte$	x, y, z [N]	x, y, z [N]	x, y, z [N]
	Comportement sous actions extérieures	Oui	Oui	Non (<i>a priori</i>)	Non (<i>a priori</i>)
Mathématiques	Système de résolution linéaire	Oui	Oui	Non	Non
	Nature de l'algorithme	Direct ou récursif mais simple	Différences finies	Newton-Raphson	Newton-Raphson
	Matrice à inverser	[S] ou pas si itératif	Non	[L] et [K]	Non
	Convergence	Aléatoire	Sûre (2)	Sûre (2)	Sûre (2)

(1) On notera que de la numérotation dépend la complexité du système à résoudre. Il convient alors de respecter une numérotation qui permet d'obtenir des matrices « bandes » afin de simplifier au mieux les systèmes à résoudre.

(2) Les conclusions sur la convergence sont ici à prendre au conditionnel, celles-ci étant issues de la bibliographie. Elles restent à confirmer par des résultats numériques.

[K] matrice des rigidités
[L] matrice des géométries des éléments
[M] matrice des masses fictives
[N] matrice des coordonnées des points de la surface
[Q] matrice des charges
[S] matrice des connexions
[Σ] matrice des déplacements des points

Aussi, le Cahier des règles de l'Art établi par le Club de la Structure Textile donne-t-il quelques recommandations pour l'application de ces règlements. Il y est, en particulier, précisé les modalités d'application de la règle de la demi-charge climatique dans les deux cas suivants.

■ **La structure est démontée pendant l'hiver** (il convient donc, suivant les pays et régions, de bien définir « l'hiver contractuel »). À la surcharge de vent égale à la moitié de celle donnée par les Règles Neige et Vent doit cependant être ajoutée une surcharge arbitraire de 30 daN/m² de haut en bas.

■ **La structure n'est pas démontée en hiver**, mais elle est chauffée intérieurement de telle sorte que la température intérieure soit constamment supérieure à 10 °C. La structure peut alors être calculée pour une surcharge de neige égale à 30 daN/m² associée aux coefficients prévus dans les Règles Neige et Vent. Elle doit également être dimensionnée pour la surcharge de vent totale prévue dans ces mêmes règles. Cependant, aucune combinaison de charge n'est envisagée, car il est considéré que les mouvements dus au vent extrême font glisser la neige restante.

Il est important de préciser que la demi-charge climatique due au vent est appliquée dans les régions II et III définies dans les Règles Neige et Vent, mais que pour la région I la vitesse du vent ne pourra être prise inférieure à 100 km/h, ce qui correspond à 50 daN/m² en valeur arrondie.

Concernant l'application des Règles Neige et Vent, les autres précisions suivantes sont données dans le Cahier des règles de l'Art concernant leur application :

— pour les **structures ouvertes**, pour lesquelles les règles prévues pour les toitures isolées éloignées du sol ne peuvent normalement être appliquées, l'influence des effets Venturi dus à la forme de la surface et à sa proximité du sol sera estimée.

Dans le cas où une telle estimation ne serait pas possible, les valeurs du coefficient de pression c données par les Règles Neige et Vent seront adoptées, ce qui permet en général de se placer en sécurité.

— pour les **structures simples ou suffisamment petites**, celles-ci seront assimilées à des solides sur lesquelles seront appliquées les Règles Neige et Vent.

Il apparaît donc que, compte tenu de l'énorme importance des effets climatiques sur le dimensionnement, la sécurité et le coût des ouvrages, une évaluation plus précise de ces sollicitations est indispensable.

Une meilleure quantification de ces effets peut en effet avoir une influence très grande sur le coût de ce type de structure, notamment au niveau des **fondations qui représentent environ 60 % de la valeur globale de la construction**.

Le Club a donc décidé, en 1990, de promouvoir une campagne d'essais aérodynamiques sur une série de formes simples couvrant 80 % des morphologies rencontrées en architecture textile, le but étant d'intégrer les résultats obtenus dans le Cahier des règles de l'Art.

Le programme général d'étude proposé et les résultats des essais réalisés au CEBTP sur le modèle du chapeau chinois sont présentés au paragraphe 5.6. Ces premiers essais ont d'ailleurs mis en évidence des coefficients de traînée et de portance de 2 à 5 fois plus faibles que ceux actuellement utilisés.

5.4.2 Critères de dimensionnement

Les caractéristiques du textile à prendre en compte pour le dimensionnement sont les critères de rupture.

Cependant, compte tenu des grands déplacements de la structure et des grandes déformations des membranes, la contrainte de rupture ne constitue que très rarement le critère de calcul. Le dimensionnement est donc mené prioritairement afin de limiter les déformations.

Le Cahier des règles de l'Art précise d'ailleurs en ce sens (article 1.5.4) que, compte tenu de la souplesse de ce type d'ouvrage, il ne peut être demandé une précision géométrique en plan comme en altitude supérieure à :

$$\varepsilon = \pm \left(10 + \frac{S}{100} \right)$$

avec ε (cm) erreur absolue par rapport aux cotes du plan,

S (m²) aire projetée de la surface ou de l'élément de surface de membrane considéré.

En outre, notamment pour les fibres de verre et les aramides, il est constaté une forte diminution de leur résistance à la rupture sous sollicitations importantes et de longues durées.

L'expérience montre qu'en général on obtient des déformations admissibles et un écart suffisant à la charge de rupture en ne sollicitant en tout point le matériau au-delà du 1/5 ou à la rigueur 1/4 des contraintes de rupture.

5.4.3 Méthodes de calcul statique

La géométrie initiale de la structure étant définie, le calcul sous sollicitations climatiques se rapproche des calculs de structures classiques, à la condition de bien prendre en compte :

- la non-linéarité géométrique due aux grandes déformations ;
- l'anisotropie du matériau et les directions de chaîne et de trame ;
- les lois de comportement particulières des tissus et en général leur non-linéarité structurelle ;
- les zones de renfort multicouches, etc.

Ce calcul peut être effectué par les méthodes utilisées pour la recherche de forme (§ 5.3.3 et en particulier le tableau 7). Il peut également être réalisé par la méthode des éléments finis avec l'utilisation d'éléments de membranes quadrangulaires ou triangulaires associés à des éléments de câbles ou de poutres. Cette méthode permet également la prise en compte de toutes les non-linéarités et données particulières liées à ce type de structure. Un exemple de ce type de logiciel est donné par le code de calcul MEFTX (figure 28 et référence [3]), qui intègre également une étape de définition de forme.

5.5 Recherche de la géométrie de découpe de toile

5.5.1 Objectifs

La géométrie d'équilibre ayant été déterminée sous l'effet de la prétension et des charges climatiques, les différentes bandes de toile, ou lés, doivent être définies afin que, une fois découpées et assemblées et la membrane mise en place, la géométrie de la structure et les efforts internes soient aussi proches que possible de ceux calculés, et qu'il n'y ait ni pli ni poche.

La découpe des lés doit répondre aux critères suivants :

- leur largeur doit respecter les contraintes de fabrication industrielle du tissu et les caractéristiques géométriques des produits commercialisés. La largeur nécessaire à l'assemblage des lés doit également être prise en compte ;
- la largeur maximale doit être recherchée afin de limiter les chutes de toile à la découpe ;
- l'assemblage des différents lés ne doit pas nuire à l'esthétique générale de l'ouvrage ;
- les directions de chaîne et de trame doivent correspondre le plus possible aux directions principales de contraintes afin de tenir compte de l'anisotropie du matériau.

5.5.2 Principe

Le processus de recherche des plans de découpe comporte trois étapes principales :

- des lignes définissant les séparations des différents lés sont générées sur la surface ;
- les portions de surface ainsi délimitées sont développées sur un plan (mise à plat) ;
- des corrections géométriques, appelées compensations, sont apportées aux surfaces ainsi définies afin de tenir compte de l'état non tendu des lés lors de la découpe et de l'assemblage, et afin de permettre le bon ajustage des lés adjacents (ajustement des distorsions dues à la mise à plat de surfaces non développables, afin que les bords des lés adjacents soient en particulier rigoureusement de même longueur).

5.5.3 Méthodes expérimentales

Deux méthodes expérimentales ont été longtemps utilisées.

La première consiste à réaliser une **maquette** sur laquelle sont appliquées des bandes de papier, cette maquette pouvant d'ailleurs ensuite servir pour des essais en soufflerie. La seconde utilise des **bulles de savon** qui sont éclairées par une source lumineuse filtrée par un réseau parallèle. La géométrie des lés est ensuite déterminée par une analyse photographique. Ces méthodes physiques d'utilisation simple sont malheureusement très imprécises et ne prennent pas en compte, en particulier, les tensions dans les membranes, ce qui peut entraîner la formation de pli ou de poche.

5.5.4 Méthodes numériques

Les méthodes numériques utilisées pour la détermination des plans de découpe peuvent être intégrées aux programmes de calcul statique ou même aux programmes de recherche de forme.

D'autres méthodes sont spécifiques à la détermination de la géométrie de découpe et peuvent s'adapter à n'importe quelle structure, quelles que soient les méthodes de recherche de forme et de calcul statique utilisées précédemment. Un exemple de ces dernières méthodes est donné par le code de calcul EASY dont les différentes étapes sont présentées sur la figure 32 [15].

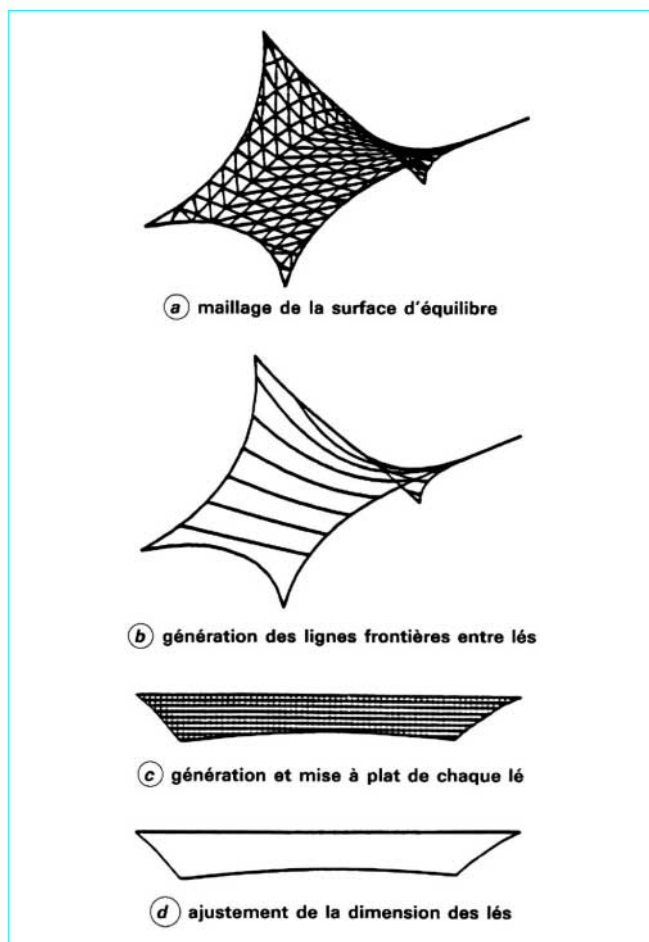


Figure 32 – Processus général de recherche des géométries de découpe de toile [15]

5.5.4.1 Définition des lignes frontières entre lés

Les lignes frontières peuvent être :

- issues des maillages utilisés pour le calcul statique ou de recherche de forme : câbles ou lignes génératrices dans le cas de maillages triangulaires ou quadrangulaires ;
- des lignes d'intersection de plans (par exemple verticaux) avec la surface de la membrane ;
- des lignes géodésiques tracées sur la surface.

Les lignes frontières doivent suivre le plus possible les directions principales et leur espacement doit répondre aux contraintes de fabrication du tissu, tout en donnant à la membrane un aspect esthétiquement acceptable.

Les lignes géodésiques peuvent être générées pas à pas à partir du maillage initial en utilisant la propriété d'orthogonalité entre le plan tangent et le plan contenant la ligne géodésique. Une autre méthode consiste à intégrer sur la surface des cordes élastiques ou de tension constante qui glissent sur celle-ci jusqu'aux lignes géodésiques, utilisant en cela leur propriété de correspondre à des minimums de distance entre deux points de la surface.

5.5.4.2 Génération dans l'espace et mise à plat des lés

Une fois la découpe spatiale de la membrane effectuée par la détermination des lignes frontières, les lés doivent être mis à plat, ce qui introduit des distorsions compte tenu que les surfaces ne sont pas développables. Des ajustements géométriques doivent ensuite être effectués afin de déterminer la forme des lés dans un état de contraintes nulles, et de bien assurer l'ajustement exact des lés adjacents.

La mise à plat des lés 3D peut s'effectuer par différentes méthodes.

La méthode de l'énergie potentielle minimale [16] réduit les approximations en minimisant l'énergie potentielle correspondant à la somme pondérée des carrés des distorsions subies par les différents côtés des triangles du maillage de chaque bande 3D, les distorsions étant les différences des longueurs en 3D et en 2D. Cette méthode est en particulier utilisée par le logiciel MEFTX [3].

Une autre méthode consiste à générer directement sur la surface des bandes « planes » (*paper-strip strategy* [14] [15]) en minimisant la distance de chaque point avec la surface 3D réelle.

Le processus est le suivant (figure 33) :

- un maillage triangulaire est défini sur la surface ;
- après la détermination des lignes géodésiques choisies comme lignes frontières entre les lés, une bande est générée à partir d'une de ces lignes de la façon suivante :

- une ligne parallèle à cette ligne géodésique est définie en générant un maillage quadratique et en minimisant, par un algorithme de moindres carrés, la distance des points de cette nouvelle ligne à la surface triangularisée,
- une nouvelle ligne parallèle est tracée de la même façon en prenant la précédente comme origine,
- ce processus est répété jusqu'à ce que le maillage quadratique coupe la ligne géodésique suivante, qui est alors interpolée dans ce maillage. Dans le cas où les lignes parallèles s'éloignent trop de la surface, une nouvelle ligne géodésique intermédiaire est déterminée et définie comme la nouvelle bordure de la bande ;
- la géométrie 2D des lés est alors simplement constituée du maillage quadratique qui est ensuite effacé, limité par les deux lignes géodésiques et éventuellement les bordures extérieures de la membrane ;
- des corrections de forme sont ensuite effectuées afin d'ajuster strictement les longueurs des bordures des lés à celles des lignes géodésiques sur la surface gauche, et de compenser les déformations dues à la prétension en distinguant les deux directions de chaîne et de trame.

5.5.4.3 Méthode d'optimisation des lés, dite « remontante »

Cette méthode a pour but d'optimiser la géométrie des lés [17]. Son principe est le suivant :

- on définit *a priori* la géométrie 2D des lés ;
- ceux-ci sont maillés triangulairement, en distinguant les éléments sur la bordure des lés de ceux placés à l'intérieur ;
- on impose aux éléments frontières de chaque lé des contraintes correspondant à la prétension. Si celles-ci ne sont pas connues, on estime la valeur de ces contraintes que l'on ajuste jusqu'à obtenir la géométrie finale de la membrane ;
- l'état d'équilibre dans l'espace de l'ensemble de la structure est calculé par assemblage des lés en tenant compte des conditions aux limites ;
- on calcule les nouvelles géométries 3D des éléments de frontière que l'on développe sur un plan ;
- on remplace les éléments frontières initiaux par ceux obtenus précédemment en effectuant des ajustements permettant leur assemblage ;
- on calcule le nouvel état d'équilibre virtuel de la surface avec ces nouveaux éléments frontières ;
- si l'état de contrainte est trop éloigné de la valeur voulue, le processus est répété jusqu'à ce que l'on obtienne la convergence.

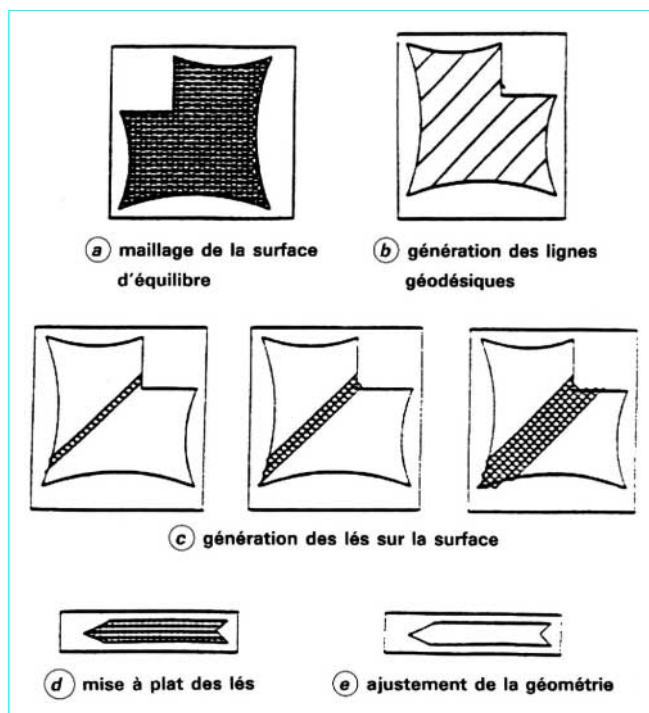


Figure 33 – Logiciel EASY de définition des géométries de découpe [14]

5.5.5 Analyses des différentes méthodes

Il apparaît que les logiciels de recherche des géométries de découpe sont beaucoup moins nombreux et développés que ceux concernant la recherche de forme ou le calcul statique. De plus, ils font souvent appel à l'empirisme et intègrent nombre d'ajustements manuels, ce qui requiert une bonne expérience de la part de l'utilisateur.

Le choix des lignes géodésiques comme lignes de séparation entre lés semble le plus judicieux. Le changement de géométrie entre les lés sous contraintes en 3D et les plans de découpe en 2D correspondant à des contraintes nulles n'est pas d'une évaluation facile, surtout si l'on tient compte de l'anisotropie du matériau. De plus, les déformations de fluage et de relaxation ne sont que très rarement prises en compte.

La première méthode pratiquée reste celle de la polygonation triangulaire. Des méthodes plus sophistiquées ont été élaborées depuis, qui consistent à reproduire des dégauchissements successifs.

Un travail de recherche et de développement important est donc encore à réaliser en la matière, pour automatiser complètement cette phase avant traçage d'atelier.

5.6 Études générales sur le chapeau chinois

5.6.1 But et programme de l'étude

Les essais sur le modèle rigide de chapeau chinois ont été réalisés au sein du laboratoire d'aérodynamique du CEBTP. Deux configurations différentes ont été étudiées :

— le chapeau chinois ouvert (sans soubassement) reposant sur trois poteaux ;

— le chapeau chinois fermé (avec soubassement) à sa base par un cylindre.

Dans chaque configuration ont été déterminées :

— les composantes stationnaires du torseur d'efforts : traînée F_x et portance F_z ;

— les pressions statiques moyennes locales suivant 13 méridiens espacés de 15° dont chacun comprend 9 points de mesures sur l'extrados et sur l'intrados.

5.6.2 Description du modèle

Le modèle rigide du chapeau chinois a été réalisé à l'échelle $1/50^e$.

Il comportait une double peau avec un évidement intérieur de 6 mm, et comprenait 18 prises de pression (9 sur l'extrados, 9 sur l'intrados).

Ce chapeau était fixé sur 3 poteaux métalliques d'un diamètre de 6 mm assurant sa liaison avec le barreau dynamométrique par l'intermédiaire d'un dispositif mécanique approprié.

Une fermeture cylindrique en *Coralen* a été également réalisée sans contact avec les poteaux et avec un jeu de 2 mm par rapport au chapeau. Ce jeu correspond à une perméabilité de 5 %, ce qui permet, d'après les règlements, de considérer la structure comme fermée.

Les mesures ont été réalisées dans la première zone d'essais de la soufflerie à couche limite turbulente, où la vitesse est constante dans toute la section et l'intensité de turbulence de l'ordre de 4 %.

5.6.3 Résultats des essais

Pour tenir compte de l'état de surface de l'extrados du modèle, trois types de rugosité ont été étudiés :

— extrados brut ;
— extrados poli ;
— extrados poli habillé par des bandelettes d'épaisseur 0,14 mm et de largeur 1,5 mm.

Les essais ont été effectués pour une vitesse du vent de l'ordre de 32 m/s, mesurée à 210 mm au-dessus du plancher de la veine, ce qui correspond à une hauteur de 10,5 m par rapport au prototype, c'est-à-dire à la structure réelle.

Les résultats d'essais concernant la pesée aérodynamique sont les suivants :

	Configuration	Coefficients actuellement utilisés	Coefficients d'essais
Coefficient de traînée C_x	ouverte	1,1	0,57
	fermée	0,9	0,22
Coefficient de portance C_z	ouverte	1,1 à 1,3	0,26
	fermée	0,6 à 0,7	0,31 (1)

(1) Cette valeur correspond à une perméabilité de 3 % située sous le chapeau ; si l'on supprime cette perméabilité en rendant le modèle étanche, la dépression moyenne de $-0,25$ détectée par des mesures de pressions s'ajoutera à ce coefficient C_z qui aura la valeur $0,31 + 0,25 = 0,56$.

Une première analyse permet de confirmer que les coefficients usuellement pratiqués tant pour l'entraînement que pour le soulèvement sont très sensiblement conservateurs.

Ce résultat pressenti peut avoir des incidences économiques importantes, non pas tant sur le matériau textile lui-même, mais plutôt sur les éléments supports et les fondations provisoires ou définitives.

6. Analyse des autres aspects techniques

6.1 Découpe et techniques d'assemblage des lés

6.1.1 Découpe

La découpe peut être définie à l'aide d'une modélisation ou de manière numérique.

Le traçage, préalable à la découpe, s'effectue selon les considérations suivantes :

- le choix de la position des lés sur la surface gauche : cette position doit correspondre à l'orientation générale des fils du tissu et des assemblages de lés entre eux ;
- la prise en compte des déformations (allongements) liées au fluage géométrique, ou embuvage, et au fluage sous l'action de la précontrainte, afin de déterminer les sous-cotes de découpe correspondantes.

Les dispositions générales à respecter pour la découpe et le traçage sont précisées dans le Cahier de règles de l'Art. La figure 34 indique les conventions de signes de la géométrie de découpe.

6.1.2 Assemblages des lés

6.1.2.1 Assemblages par couture

Ils sont illustrés par la figure 35.

Ce type d'assemblage, très utilisé en France pour les structures gonflables jusque vers 1975, est aujourd'hui peu utilisé. On y a substitué la soudure.

La couture doit, au moins, être double (figure 35a).

Il est possible, pour les tissus de fort grammage, de procéder à une double couture sur pli agrafé (figure 35b). La couture présente au moins 1,5 point au centimètre et au plus 2,5.

Les problèmes posés par la durabilité du fil (exposé au rayonnement UV) sont résolus par l'emploi de fils noirs ou de protection rapportée (en face exposée), sur la zone de couture, par film ou vernis.

6.1.2.2 Assemblages par soudure

Ils sont rendus possibles par la nature (PVC) des tissus enduits, les plus couramment utilisés.

Ce sont des assemblages par superposition (figure 35c), où les enductions en contact sont réchauffées puis soumises à une pression.

À l'origine, le réchauffage était obtenu par chalumeau à air chaud (type Leister). Aujourd'hui, seule la soudure haute fréquence est utilisée.

La réalisation des soudures haute fréquence nécessite des réglages fins et un contrôle régulier de ceux-ci. Les largeurs en recouvrement sont au minimum de 40 mm pour les constructions à caractère permanent.

Certains matériaux se soudent difficilement :

- c'est le cas du *Téflon*, que l'on parvient toutefois à souder en augmentant la largeur de recouvrement ou en procédant à la soudure d'une bande rapportée en sous-face des éléments à assembler qui sont bord à bord ;

- c'est aussi le cas des tissus enduits PVC avec finition fluorée de forte épaisseur (15 μm environ) qui nécessite de recourir à l'assemblage bout à bout avec bande rapportée en sous-face décrite à l'alinéa précédent.

6.1.2.3 Assemblages par soudure et couture (figure 35d)

La raison d'être de la couture est de maîtriser le fluage de l'assemblage sous l'action de la température et/ou des charges importantes (remarques ci-après concernant la résistance des assemblages).

6.1.2.4 Résistance des assemblages

Elle est déterminée par un essai de traction tel que défini au paragraphe 2.3.1.1 (norme NF G 37-103).

La spécification préconisée par le Cahier des règles de l'Art est que la soudure doit présenter une résistance au moins égale à 80 % de la résistance du tissu (dans le sens – chaîne ou trame – considéré). Cet essai est conduit à la température de 20 °C environ.

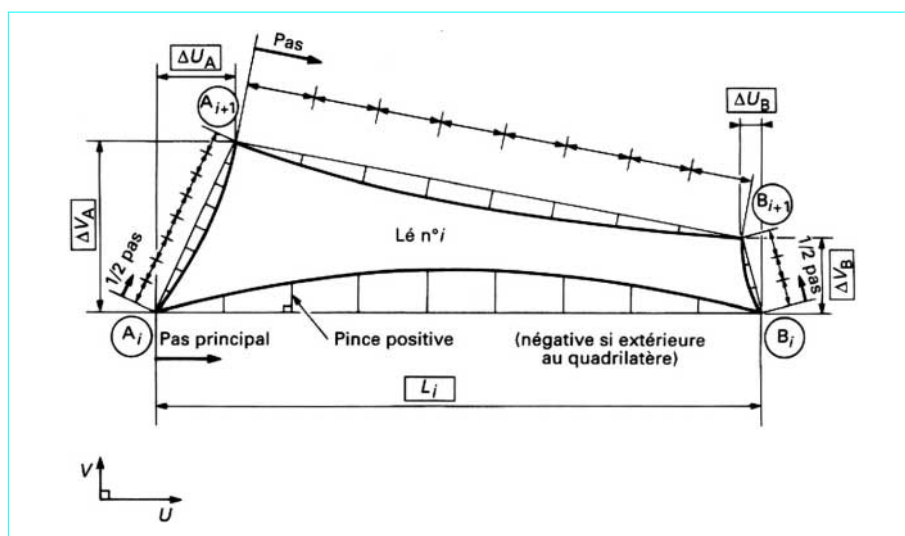


Figure 34 – Géométrie de découpe.
Convention de signes

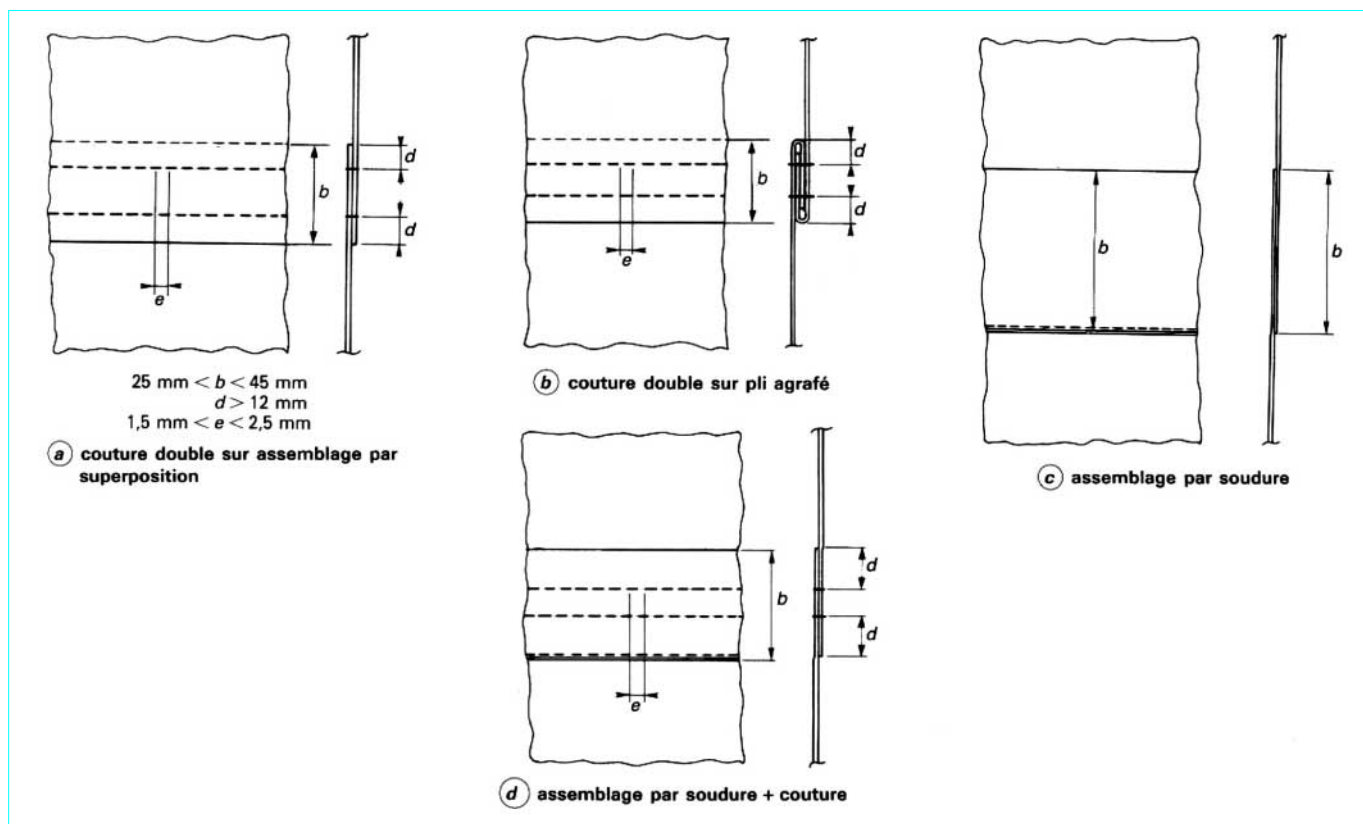


Figure 35 – Différents types d'assemblages

L'essai de résistance en traction instantanée des soudures ne rend qu'imparfaitement compte du comportement en situation de l'assemblage.

Les facteurs : température, contrainte permanente de traction et sollicitations climatiques cycliques sont à considérer pour l'évaluation de la résistance des assemblages.

Une méthodologie de prise en compte de ces facteurs combinés est esquissée dans le Cahier des règles de l'Art.

En matière de fluage en température et sous tension, on peut signaler la communication récente de M. Latteur (tableau 8) en matière d'expérimentation réalisée par la société Saint-Frères.

La solution décrite au paragraphe 6.1.2.3 (soudure + couture) permet, dans des cas de sollicitations élevées (pays chauds par exemple), de limiter les risques de fluage de l'assemblage. Elle présente cependant l'inconvénient déjà signalé de durabilité des fils, ce qui conduit généralement à compléter l'assemblage par l'application d'un film ou d'un vernis sur les zones soudées-cousues.

6.1.3 Lisières

Les rives de toiles, destinées à la liaison de la membrane sur l'ossature ou à l'assemblage de deux éléments constitutifs de la membrane, sont renforcées.

Ce renforcement est obtenu par un jonc métallique gainé de plastique sur lequel la membrane est retournée avant soudure (figure 36).

Selon le niveau des efforts appliqués sur les rives de toile, deux types d'accessoires sont utilisés pour permettre la liaison de la rive à l'ossature.

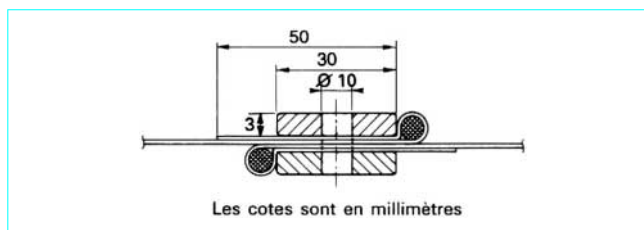


Figure 36 – Assemblage de deux éléments de membrane par plaquettes aluminium

■ Cèllets (figure 37a)

Ils sont en laiton, en aluminium, en acier inoxydable ou en *Rilsan*. Leur positionnement doit faire l'objet d'un soin attentif afin qu'ils viennent en butée contre le jonc de renfort.

Ils doivent présenter un diamètre intérieur de 16 mm et ont généralement un entre-axes de 150 mm.

■ Plaquettes (figure 37b)

Dans le cas où des efforts importants doivent être appliqués aux rives de toile, on substitue des plaquettes en aluminium aux cèllets.

Les rives avec plaquettes permettent le transfilage comme les bandes cèlletées, ou le boulonnage sur des cerces métalliques. Elles sont également utilisées pour le raccordement sur chantier de deux éléments constitutifs de la membrane (figure 37).

Tableau 8 – Résistance au fluage des assemblages soudés haute fréquence

(Origine : Saint-Frères. Communiqué lors de la réunion du Club de la Structure Textile du 23 janvier 1992)

	Type membrane	Référence commerciale	Sens soudure	Largeur soudure	Force appliquée	50 °C 4 h	60 °C 4 h	70 °C 4 h	80 °C 4 h	90 °C 4 h	100 °C 4 h	110 °C 4 h
A	≈ 84 kN/m Résistance au pelage : 25,4 N/cm à 20 °C	Sainter 847	Chaîne	30 mm	10 kN/m	+	+	+	+	(140 min)		
			Trame			+	+	+	+	+	(150 min)	
			Chaîne	50 mm	10 kN/m	+	+	+	+	+	+	(8 min)
			Trame			+	+	+	+	+	+	(71 min)
B	≈ 54 kN/m Résistance au pelage : 24,5 N/cm à 20 °C	Sainter 247	Chaîne	30 mm	10 kN/m	+	+	+	+	+	+	(6 min)
			Trame			+	+	+	+	+	+	(35 min)
Résultats partiels pour des temps/températures d’essai (cumulés) + bonne												
Conditions de soudage									A		B	
Puissance soudeuse.....									10 kW		10 kW	
Surface électrode (plate)									195 cm ²	250 cm ²	195 cm ²	250 cm ²
									(3 × 65)	(5 × 50)	(3 × 65)	(5 × 50)
Accord entre les 2 électrodes (réglage de la machine à souder)									80	80	85	85
Temps de soudage.....									3 s	3,5 s	3 s	3 s
Temps de refroidissement									4 s	4 s	4 s	4 s

Dans le cas des structures tendues, les bordures de toile en forme d'arches funiculaires sont ralinguées. Le câble de ralingage est généralement enfilé dans une ganse elle-même cousue, puis soudée à l'arche de toile.

La distance entre la couture la plus proche du câble et l'axe de celui-ci ne sera pas inférieure à quatre fois le diamètre de la ralingue.

La caractérisation des résistances mécaniques de lisière peut être déterminée par un essai de traction simulant le montage en œuvre de la toile (par exemple, bande œilletée + drisse sur un élément de barre de laçage).

Le résultat d'essais de ce type semble influencé par le principe de confection des éprouvettes et la dimension (longueur de la lisière) testée.

6.2 Prétension des toiles

Comme évoqué à plusieurs reprises dans les paragraphes précédents, la stabilité des structures textiles n'est rendue possible que par l'application d'efforts de tension préalables dans les membranes. Ces efforts sont destinés à conférer sa forme à l'ouvrage et à compenser les actions extérieures auxquelles cet ouvrage sera soumis en œuvre.

Le niveau des contraintes de prétension et les modalités d'application de cette précontrainte sont déterminés par le calcul dans chaque cas d'application.

À titre d'exemple, on peut signaler qu'une valeur de 200 daN/m est un niveau de précontrainte habituellement appliqué sur les rives illustrées par la figure 37a, par œilletage au pas de 150 mm buté sur ourlet renforcé par jonc PVC. À raison d'environ 30 daN par œillet, on obtient sensiblement 200 daN au mètre linéaire.

Dans le cas des structures tendues ponctuellement, l'organisation des pointes de toile doit permettre d'exercer, indépendamment les unes des autres, les actions de tension de la toile, d'une part, et des câbles de ralingage, d'autre part.

L'application de la précontrainte doit tenir compte du comportement des matériaux en matière de fluage (§ 2.3.3.1), qu'il s'agisse :

- du fluage géométrique, ou embuvage ;
- du fluage sous charge (et en température).

Dans le cas des rives lacées, le transfilage complémentaire par *Sandow* permet de compenser temporairement les relaxations de précontrainte.

Parmi les prescriptions de surveillance, celle visant la vérification du maintien de la tension des toiles est spécifique aux constructions textiles.

La fréquence des opérations de vérification est difficile à déterminer de façon commune à toutes les constructions.

Une surveillance des niveaux de tension, peu de temps après la tension initiale, puis un contrôle semestriel ou annuel par la suite, constituent des indications.

La remise en tension des membranes peut s'effectuer par l'intermédiaire des dispositifs de réglage prévus au raccordement des extrémités de toiles (cas le plus fréquent). Elle peut aussi être obtenue par le réglage des ossatures supports ou par l'action exercée sur des câbles modifiant la courbure des toiles.

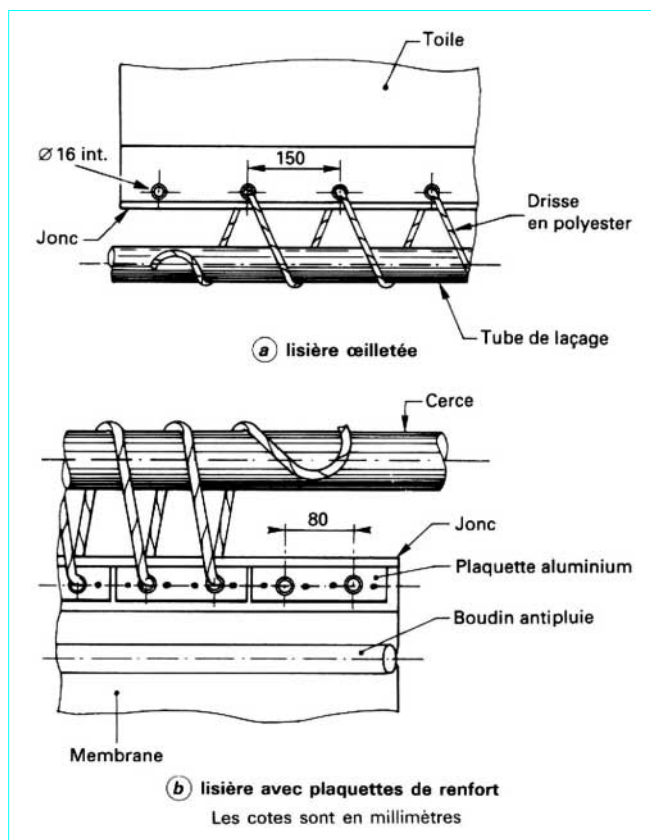


Figure 37 – Lisières

6.3 Récupération et évacuation des précipitations

Au stade de la conception des ouvrages, la recherche de formes, outre l'aspect stabilité, doit tenir compte des conditions d'évacuation des précipitations. Cette démarche conduit à segmenter la membrane en zones dénommées bassins versants.

Dans le cas de risques d'accumulation, certaines constructions ont recours à des dispositifs de **trop plein** ou à la mise en place d'**impluvium** rapporté (figure 38).

Pour ce qui a trait aux **chênaux périphériques** disposés en partie basse de la membrane, il convient de s'assurer que leur dimensionnement est adapté en fonction des critères principaux suivants :

- leur **dimensionnement général** en fonction des quantités – souvent importantes – d'eau collectées ;
- des risques de **surverse** occasionnés par la forte pente des membranes en raccordement sur les chênaux ;
- de la nécessité d'**accès pour entretien**, la circulation dans les seuls chênaux étant souvent la seule solution envisageable.

En ce qui concerne les **chênaux structuraux**, cette solution constitue un compromis avantageux (figure 39), mais il convient que les dispositifs d'assujettissement de la toile ne créent pas de rétention de débris et permettent le nettoyage aisé des chênaux.



Figure 38 – Exemple d'impluvium (Doc. ARCORA)

6.4 Éclairage

Les possibilités diffusantes de la lumière constituent une des caractéristiques d'emploi des membranes en architecture textile. En complément des indications du paragraphe 2.3.2.4, on peut relever que l'homogénéité de la transmission lumineuse (ou de teinte) des toiles constitutives d'un ouvrage préoccupe les concepteurs et les réalisateurs de structures textiles.

Des variations dans ce domaine peuvent avoir pour origine un défaut de régularité d'épaisseur des enductions, par exemple.

Les soudures de lés et les superpositions de toiles dans les zones de renfort justifient également d'être étudiées en fonction du tracé plus sombre qu'elles dessinent par rapport à la pleine toile.

Outre l'aspect transmission lumineuse à l'état initial, la préoccupation majeure des concepteurs et utilisateurs est son évolution dans le temps.

Les développements récents des finitions de surface des enductions PVC ou le recours aux toiles verre-*Téflon* (caractérisées par un aspect « jaune » initial mais évoluant vers le blanc) attestent de l'importance accordée au comportement lumineux des toiles dans le temps.

Dans le domaine des bâtiments à usage sportif, où l'éclairage naturel correctement diffusé des aires d'évolution est particulièrement recherché, on peut signaler une étude (sur sept bâtiments) confiée au CSTB par le secrétariat d'État à la Jeunesse et aux Sports [30].

Les conclusions de ce rapport signalent le caractère très favorable au confort de l'environnement visuel des structures toiles, moyennant quelques précautions de choix détaillées dans ce rapport.

De plus, le recours à l'éclairage artificiel intérieur indirect bénéficie de la forte réflectivité du matériau d'enduction (PVC laqué ou PTFE) et contribue, de surcroît, à obtenir, de nuit, un effet signal.

Même dans le cas d'une utilisation en double peau, la translucidité est maintenue aux environs de 3 %.

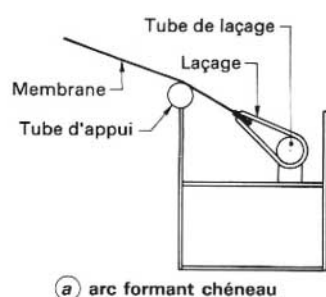


Figure 39 – Éléments structuraux formant chéneau
(Doc. ARCORA)

6.5 Thermique et condensation

L'emploi, général, des membranes textiles en **monoparoi** de faible résistance thermique entraîne deux conséquences :

- la résistance thermique est majoritairement caractérisée par les **résistances superficielles** sur les deux faces de la paroi (c'est-à-dire un coefficient de transmission thermique surfacique K voisin de $5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$) ;

- la température superficielle de la paroi séparant les ambiances intérieure et extérieure peut occasionner des risques de **condensation intérieure**, si l'occupation du local recouvert est génératrice de vapeur d'eau.

Les structures à **double paroi** sont parfois utilisées pour corriger les déperditions thermiques de l'enveloppe (le coefficient K est sensiblement divisé par 2 du fait de la résistance thermique de la lame d'air : $K = 2,7 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$).

Cette disposition entraîne cependant une perte de la transmission lumineuse. On peut en outre s'interroger sur le caractère éventuellement aggravant de l'échauffement prolongé sur le vieillissement de la membrane intérieure.

Certaines recherches paraissent avoir été conduites (brevet Esmary-Caron) pour améliorer la résistance thermique de la lame d'air. Elles consistent à revêtir chaque membrane, sur la face en contact avec la lame d'air, d'un revêtement métallique réfléchissant. Cette solution conduirait toutefois à faire perdre toute translucidité au complexe de double membrane.

En ce qui concerne la maîtrise des condensations intérieures, on ne peut guère que préconiser (par un taux de renouvellement de l'air intérieur adapté) le maintien d'une hygrométrie intérieure faible ou moyenne dans le local recouvert.

6.6 Comportement en cas d'incendie

La réglementation française est très détaillée dans le domaine de la sécurité contre l'incendie dans les bâtiments à enveloppe textile.

Elle est essentiellement constituée par les règles applicables :

- aux structures gonflables (type SG) [46] [47] ;
 - aux chapiteaux, tentes et structures (type CTS) [45] [46] [47] ;
- ces derniers visant les bâtiments soit itinérants, soit à implantation prolongée (implantées plus de six mois), soit les structures fixes dès le départ.

6.7 Entretien et maintenance

Le nettoyage des membranes textiles peut s'effectuer à l'aide de canons à mousse. Les produits employés pour le nettoyage doivent être utilisés sur les conseils ou après accord des fabricants de toile.

La fréquence de ces nettoyages dépend du lieu d'implantation de la structure textile et de son âge.

La maintenance comporte également les opérations de vérification et de rétablissement, si nécessaire, de la prétension des toiles (§ 6.2) et la surveillance des charpentes et accessoires divers, principalement en ce qui concerne l'intégrité de leur revêtement protecteur contre la corrosion.

7. Réglementation. Codification technique et assurance

7.1 État de la question

■ Les structures textiles sont-elles des bâtiments ? (aspect assurance)

Cette question a été soulevée quant à l'application de la loi du 4 janvier 1978, notamment en ce qui concerne l'obligation d'assurance.

Elle se pose bien évidemment aussi quant à l'obligation du constructeur de répondre aux caractères de stabilité et de durabilité aux moins égaux à ceux de la garantie décennale qui est due aux termes de l'article 1792 du Code civil.

La notion de bâtiment – avec toutes les conséquences qu'elle entraîne – a été retenue pour qualifier les constructions textiles : « construites sur le sol, dont la destination n'est pas d'être mobile (même si elles sont démontables), qui servent à abriter l'homme dans son travail et ses loisirs et qui présentent un caractère de permanence caractérisé, notamment, par leur liaison avec des équipements incorporés au sol ».

■ **Procédure d'appréciation technique d'expérimentation**

Cette procédure, instituée en 1983 sous l'égide du CSTB, met à la disposition des innovateurs une procédure rapide pour l'appréciation technique de tout produit, procédé ou équipement ne faisant pas encore l'objet d'un Avis technique et dont la mise au point nécessite une utilisation expérimentale sur un ou plusieurs chantiers.

Lorsqu'elle est favorable, cette appréciation dite « Appréciation Technique d'Expérimentation » (ATEX) est destinée notamment à :

- faciliter au bénéficiaire l'expérimentation de l'innovation ainsi que la réalisation de références pour l'obtention d'un Avis technique ;
- favoriser la couverture des risques à des conditions adaptées pour les sociétés d'assurances ;
- inciter les maîtres d'ouvrage à favoriser l'expérimentation.

La procédure ATEX a été appliquée à six bâtiments métallo-textiles pour une surface totale couverte de 60 000 m² (tableau 9).

■ **Règlements antipanique et sécurité incendie** (paragraphe 6.6)

■ **Normalisation nationale existante et projets de normes CEN et ISO**

Les normes d'essais françaises NF ont été détaillées au paragraphe 2 du présent article. Il n'existe pas de norme de spécification de produit pour l'application des membranes textiles dans le bâtiment.

Les travaux normatifs européens ou internationaux en cours concernent :

- le feu ;
- les propriétés physiques et chimiques ;
- les textiles à usage technique (TUT) ;
- les tissus enduits.

Sur le plan national, les travaux de coordination au niveau du TC 248 (comme des normes ISO) sont assurés par le Syndicat Français des Enducteurs-Calandriers et fabricants de revêtements de sols et murs (SFEC).

7.2 Propositions en matière de codification technique

■ **Cahier des règles de l'Art du Club de la Structure Textile (CST)**

Le Club de la Structure Textile (créé en 1987) diffuse un document intitulé *Cahier des règles de l'Art. Structures Membranes Textiles Tendues* établi en 1984 par Dominique Malinowsky avec la participation de Marc Malinowsky et de Corentin Queffelec. Ce cahier

récapitule de façon synthétique les divers aspects à prendre en compte pour le choix des matériaux et les conditions de dimensionnement, de calcul et de mise en œuvre.

Le Cahier des règles de l'Art comporte, dans certains domaines, des orientations quant à l'application de spécifications, qu'il s'agisse des matériaux ou des conditions de calcul. Ces spécifications ont été rappelées dans plusieurs paragraphes du présent article.

Il comporte aussi, souvent, des descriptions plus qualitatives, en termes de résultats, sans fixer de normes pour les atteindre.

Quoi qu'il en soit, le Cahier des règles de l'Art est une contribution tout à fait utile. Il a constitué, jusqu'alors, la référence pour les professionnels concernés.

Le Club de la Structure Textile a saisi (à l'automne 1990) la Commission Générale de Normalisation Bâtiment en vue d'entreprendre des travaux de codification technique sur les constructions textiles tendues. Une réunion exploratoire sur ce thème a été organisée par le Bureau National des Tisseurs Enducteurs et Confectionneurs (BNTEC) en octobre 1990. Le Club de la Structure Textile a tout naturellement proposé comme base de réflexion pour cette réunion le Cahier des règles de l'Art précité.

■ **Recensement des voies de codification en fonction des thèmes (conception-calcul, mise en œuvre, matériaux)**

Le Cahier des règles de l'Art du CST regroupe dans un même document des aspects très diversifiés qui relèvent d'intervenants et de domaines de codification distincts.

Il semble qu'une codification technique dans le domaine, et la réalisation des études préalables à son élaboration, justifient d'être scindées en trois grands thèmes :

- la **conception** (modélisation, calcul, dispositions constructives d'ensemble) demeure l'apanage des concepteurs ; une codification à ce niveau n'est envisageable que sur des principes de dimensionnement et règles de calcul ;
- les **membranes** (et autres matériaux ou produits constitutifs) justifient le développement d'une codification spécifique qui devrait être performancielle (quelles caractéristiques des toiles sont nécessaires au bon fonctionnement de l'ouvrage et à sa justification par le calcul ? quelles autres permettent de tabler sur telle durée de vie de l'ouvrage ?). Cette démarche implique que les méthodes de mesure ou d'évaluation des caractéristiques ainsi que les spécifications ou classes de toiles soient déterminées en fonction de la destination spécifique de ces produits dans leur usage en architecture textile ;
- la **réalisation** (découpe-assemblage, montage, surveillance et maintenance) relève d'un document du type « DTU/norme de mise en œuvre », qui précise l'essentiel des dispositions constructives dans les différents cas.

Tableau 9 – Bâtiments soumis à la procédure ATEX

Réalisation	Maître d'ouvrage	Concepteur	Entreprise	Contrôleur technique
BOP, zone fret nord Aérogare de Roissy	Air France	Groupe ARCORA	Esmery-Caron	Bureau Veritas
Zénith de Montpellier	SERM	Chaix et Morel Groupe ARCORA	Esmery-Caron	Qualiconsult
Gare douanière de Bâle-Mulhouse	Ministère de l'Économie, des Finances et de la Privatisation	Aéroport de Paris	Esmery-Caron	Bureau Socotec
Hall expo à Bordeaux	SBEPEC	SBA Architectes assisté de ARCORA	Voileries du Sud-Ouest	CETEN-APAVE
Gare TGV voyageurs, hall sud à Massy	SNCF	SNCF assisté de ARCORA	Voileries du Sud-Ouest	Bureau Socotec
Plateau de sports à Montmorency	Mairie de Montmorency	Atelier Agopyan assisté de Technip, Géoproduction et MTI	Spironef	CEP

8. Conclusions

Le présent article analyse et détaille les dispositions existantes en matière de conception et d'évaluation des structures textiles tendues.

Il permet de situer l'état de la question et de jeter les bases des études qu'il convient d'entreprendre pour une meilleure compréhension du comportement des ouvrages ou parties d'ouvrage. Ces études sont nécessaires pour arrêter les dispositions de codification technique souhaitées par les professionnels du domaine concerné.

Le paragraphe 7.2, dans la décomposition qu'il introduit entre conception, réalisation et produits, oriente les conclusions et précise les axes de recherche à développer.

Si l'on se réfère aux motivations des professionnels en matière de codification technique ou de recours à la procédure ATEx pour les bâtiments métallo-textiles, on constate aisément que l'aspect pérennité de l'ouvrage et adéquation des constituants aux contraintes d'emploi est le plus important.

Cette analyse conduit logiquement à préconiser, en premier lieu, le développement d'une réflexion détaillée sur les toiles (et leurs moyens de liaison).

Il est clair – et l'importance du paragraphe 2 le confirme – que les bases d'une démarche d'évaluation des principales caractéristiques des toiles existent.

Les orientations d'étude à entreprendre sont également suggérées dans le paragraphe 2. On peut identifier les points principaux suivants :

- adaptation des **méthodes de mesure ou d'évaluation** existantes aux caractéristiques performanciennes des toiles en architecture textile ;
- évaluation comparée des **caractéristiques des toiles** selon les essais monodirectionnels ou bidirectionnels (pertinence et limites de la méthode d'essai biaxial, essais interlaboratoires) ;
- recherche des **méthodes d'endommagement accéléré** les plus pertinentes quant aux conditions d'emploi des toiles et à leur nature constitutive ;
- mise au point d'une **procédure harmonisée de présentation des caractéristiques des toiles** à usage de bâtiment.

Le volet étude sur les membranes doit logiquement incorporer les méthodes de caractérisation des assemblages de lés et les principes de finition et de raccordement des rives de toile.

Les paragraphes 6.1.2 et 6.1.3 précisent l'état actuel des études sur les assemblages et lisières. Ils précisent également les recherches en cours qu'il conviendrait de poursuivre et de coordonner.

Dans le cadre des travaux de normalisation CEN (CEN TC 248, par exemple), il est utile d'exercer une mission de « veille » afin de s'assurer que les actions codificatives sur les matériaux, considérés

isolément de leur contexte d'application, ne sont pas en contradiction avec les caractéristiques performanciennes des toiles en architecture textile.

En complément de l'évaluation des membranes, celle des autres constituants des bâtiments textiles doit principalement porter sur :

- le choix des **niveaux de protection** adaptée **contre la corrosion** des ossatures métalliques et organes d'assemblage de celles-ci ;
- la démarche spécifique d'**évaluation des accessoires** particuliers à la technique (câbles en fils de synthèse, accastillages divers par exemple).

Les points ci-dessus constituent les axes du programme de recherche que le CSTB, en concertation avec les professionnels et laboratoires concernés, souhaite entreprendre.

L'analyse des méthodes de dimensionnement et de calcul faite au paragraphe 5 a montré la grande diversité et la grande richesse des méthodes et des codes de calcul mis au point par les concepteurs, ainsi que leur évolution rapide.

Il apparaît cependant que le problème essentiel concerne l'**estimation des sollicitations dues aux vents** qui ont une très grande importance sur le dimensionnement de la structure, en particulier des supports et fondations. Les premières mesures réalisées sur le chapeau chinois ont clairement montré la nécessité de poursuivre le programme d'essais en soufflerie élaboré par le Club de la Structure Textile, afin de couvrir l'ensemble des formes habituellement rencontrées.

Les résultats obtenus permettront de compléter les règles de l'Art actuelles. Ils pourront également servir de base à la mise au point de logiciels spécifiques du type chargeurs automatiques, qui pourront être utilisés entre la détermination de la forme et le calcul statique.

Des règles ou principes de calcul devraient également être définis concernant :

- les **lois de comportement** à prendre en compte aux diverses étapes de la conception (élasticité linéaire ou bilinéaire, visco-élasticité, petites ou grandes déformations...) ;
- les **déformations de fluage** (géométrique ou sous charge), et de relaxation sur les bordures ;
- les **angles limites** admissibles entre les directions des fils et les directions des contraintes principales ;
- le **comportement dynamique** d'ensemble ou local de la membrane.

Ces différents aspects nécessitent la mise au point de protocoles d'essais adaptés, permettant en particulier la détermination des caractéristiques mécaniques des membranes (par des essais uni et/ou biaxiaux).

Enfin, l'évaluation des méthodes de calcul ainsi que la validation des hypothèses utilisées ne sont possibles qu'à la condition de connaître le comportement réel des structures. En ce sens, l'instrumentation au moins partielle d'une ou plusieurs structures représentatives serait le plus grand intérêt.

Structures textiles

par **Marc MALINOWSKY**

Consultant Structure. Groupe ALTO
Président du Club de la Structure Textile

et **Christian LYONNET**

Centre Scientifique et Technique du Bâtiment (CSTB)

Bibliographie

Références

- [1] MOTRO (R.) et MALINOWSKY (M.). – *Formes, forces et matériaux en architecture textile*. Textile Composites in Building Construction, Part 2, p. 89-98, Pluralis (1990).
- [2] BLUM (R.). – *Méthodes pour la conception d'un ouvrage à membrane tendue. Caractéristique des matériaux à prendre en compte*. Textile Composites in Building Construction, Part 2, p. 121-137, Pluralis (1990).
- [3] POURROY (F), TROMPETTE (O.) et QUOST (D.). – *Conception des structures textiles tendues*. Textile Composites in Building Construction, Part 2, p. 71-78, Pluralis (1990).
- [4] SHECK (H.J.). – *The force density method for form finding and computation of general networks*. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 3, p. 115-134 (1977).
- [5] PAULI (N), PIERRE (D.) et MOTRO (R.). – *A CAD tool for membranes*. Textile Composites in Building Construction 92, Part 1, p. 203-212, Pluralis (1992).
- [6] HAUG (E.). – *Analytical shape finding for cable nets*. IASS Pacific Symposium on Tension Structures and Space Frames, Tokyo-Kyoto, p. 83-92 (1972).
- [7] DAY (A.S.). – *A introduction to dynamic relaxation*. The Engineer, janv. 1965.
- [8] BARNES (M.R.). – *Form finding and analysis of tension space structures by dynamic relaxation*. Thèse Ph. D., City University, Londres (1977).
- [9] BARNES (M.R.) et WAKEFIELD (D.S.). – *Form finding, analysis and patterning of surface-stressed structures*. 1st Oleg Kerensky Memorial Conference, Londres, MacGraw-Hill, juin 1988.
- [10] CUNDALL (D.A.). – *Explicit finite difference methods in geomechanics*. Proc. E.F. Conf. num., Meth. in geomechanics, p. 132-150, juin 1976.
- [11] PAULI (N.). – *Recherche de forme et choix des plans de découpe pour les membranes textiles utilisées en architecture*. Mémoire de DEA, laboratoire de Génie Civil USTL Montpellier II, juil. 1990.
- [12] *Analytic shape determination for membrane structures*. IASS World Congress Of Space Enclosures (WCOSE), p. 137-148 (1976).
- [13] MALINOWSKY (M.). – *Présentation des différentes méthodes de modélisation des formes*. Club de la Structure Textile, Compte rendu n° 3 (1992).
- [14] GRÜNDIG (L.) et BÄUERLE (J.). – *Cutting pattern for structural membranes : precise physical modelling using a general toolkit*. Textile Composites in Building Construction, Part. 1, p. 231-242, Pluralis (1992).
- [15] GRÜNDIG (L.) et BÄUERLE (J.). – *Automated cutting pattern determination and control for prestressed membranes*. Textile Composites in Building Construction, Part 2, p. 109-120, Pluralis (1990).
- [16] LINKWITZ (K.) et GRÜNDIG (L.). – *Strategies of form finding and design of cutting patterns for large sensitive membrane structures*. Proc. Int. Conf. Design and Construction of non-conventional Structure, Londres (1987).
- [17] TSUBOTA (H.) et YOSHIDA (A.). – *Theoretical analysis for determining optimum cutting pattern for membranes structures*. Proceeding IASS Symposium, Madrid, sept. 1989.
- [18] *Architecture textile*. A Tempera Editions (1990).
- [19] *Structures membranes textiles tendues (Cahier des règles de l'Art)*. Club de la Structure Textile, oct. 1990.
- [20] *Structures membranes textiles tendues (Cahier des règles de l'Art)* proposé par Dominique Malinowsky du Groupe ARCORA, sept. 1984.
- [21] MAJOWIECKI (M.). – *Tenso struttura : progetto e verifica*. Via Tizzano 46/2 - I-40033, Casalecchio di Reno (Bologne).
- [22] *Le tenso struttura a membrana per l'architettura*. Maggioli éd., fév. 1993.
- [23] *Les structures gonflables*. Synthèse bibliographique par J.C. LARGER. Cahier du CSTB, n° 162, sept. 1975.
- [24] *Recommendations for air-supported structures*. International Association for Shell and Spatial Structures. Rapport du Working Group nr. 7, Madrid (1985).
- [25] *Structures nouvelles*. Industrialisation. Technique et Architecture n° 5 (1969).
- [26] *Matières Plastiques n° 5*. Technique et Architecture n° 3, avril 1971.
- [27] *Recherche de forme et choix des plans de découpe pour les membranes textiles utilisées en architecture*. DEA de Nicolas PAULI, USTL de Montpellier II, juil. 1990.
- [28] *Travaux de développement de l'Institut des fils industriels sur le plan des tissus enduits et caoutchoutés*. ENKA, Julius EICHERT, Réunion EUROFABRIC (1986).
- [29] *Membrane structures in Australia*. Kensington, Australie (1982).
- [30] *Utilisation des structures à faible coût dans les équipements sportifs du type gymnase. Éclairage naturel et lumière du jour*. CSTB, Pierrette CHAUVEL (non publié), juil. 1990.
- [31] *Optimisation de la résistance et contrôle de qualité des jonctions de tissus enduits à base de fibres synthétiques*. Second International Symposium Plastic and Rubber Waterproofing in civil Engineering. Liège (1984).
- [32] *Construction Materials*. Éd. D.K. Doran. Butterworth/Heinemann. Article *Fabrics* de M. Malinowsky, janv. 1992.
- [33] *Structures textiles tendues. Les matériaux poussent le marché*. Les Cahiers Techniques du Bâtiment n° 120, oct. 1990.
- [34] *La prétension sans prétention*. Le Moniteur, fév. 1990.
- [35] *De la soie à la couverture textile*. Le Moniteur, avril 1990.
- [36] *Une entreprise d'architecture*. Les Cahiers Techniques du Bâtiment, déc. 1991.
- [37] *ANVAR. Une bourse aux textiles*. Le Moniteur, fév. 1991.
- [38] *Le point sur les constructions en toile. Des matériaux à géométrie maîtrisée*. Le Moniteur, avril 1990.
- [39] *L'architecture textile gonfle ses toiles*. Urbapress Informations, mai 1992.
- [40] *Toile tendue. 900 m² pour rénover une piscine*. Les Cahiers Techniques du Bâtiment, avril 1992.
- [41] *Le tipi de Toulouse-Lautrec*. Le Moniteur, mars 1992.
- [42] *Toiles tendues vers le Zénith*. Le Moniteur, avril 1990.
- [43] *Certification des matériaux textiles ignifugés*. Les Cahiers Techniques du Bâtiment, sept. 1991.
- [44] *Les matériaux textiles élargissent leur gamme*. Le Moniteur, nov. 1991.

[45] *Nouveau règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les chapiteaux, tentes et structures*. Revue Technique du Bâtiment et des Constructions Industrielles n° 128, sept.-oct. 1988.

[46] *Établissements de plein air, structures gonflables*. Sécurité contre l'incendie dans les ERP (éd. JO).

[47] *Chapiteaux, tentes et structures*. Sécurité contre l'incendie dans les ERP (éd. JO).

[48] ARGYRIS (J.H.), BICHAT (B.) et ANGELOPOULOS (T.). – *A general method for the shape finding of lightweight tension structures*. Vol. 3, n° 1. North Holland Publishing, Amsterdam, janv. 1974.

Ouvrage

LYONNET (C.). – *Les structures textiles tendues. Analyse de l'existant et identification des problèmes posés*. Cahiers du CSTB n° 2633, Livraison 336, janv.-fév. 1993.

Normalisation

France

Association française de Normalisation AFNOR

NF G 07-001	1-73	Essais des tissus. Détermination de la force de rupture et de l'allongement de rupture par traction (essai sur bande effilochée ou découpée). Méthode simplifiée.
NF EN 20811	12-92	Étoffes. Détermination de la résistance à la pénétration de l'eau. Essai sous pression hydrostatique.
NF G 07-111	4-73	Essais des étoffes. Détermination de la perméabilité et de la porosité à l'air d'un tissu ou d'un tricot.
NF G 07-150	9-84	Essais des étoffes. Détermination de la masse surfacique des tissus et des tricots.
NF G 07-155	8-84	Méthodes d'analyse de certaines caractéristiques de construction des tissus. Détermination du nombre de fils par unité de longueur.
BF G 07-162	9-88	Textiles. Essais des étoffes. Détermination de la transmission lumineuse.
NF G 37-102	10-80	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Détermination des caractéristiques des supports textiles revêtus en rouleaux.
NF G 37-103	10-86	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Essai conventionnel de résistance et d'allongement à la rupture par traction. Méthode de la bande préparée.
NF G 37-105	12-85	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Vieillessement artificiel à l'étuve et essais de tenue à la chaleur.
NF G 37-106	10-86	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Essai d'imperméabilité à l'eau.
NF G 37-107	10-83	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Essai d'adhérence entre revêtement et support textile.
NF G 37-110	10-86	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Essai de comportement au froissement.
NF G 37-122	12-81	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Résistance à l'hydrolyse.
G 37-130	9-85	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Détermination de la résistance au déchirement sur éprouvette trapézoïdale.
NF G 37-131	10-87	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Détermination de la souplesse. Méthode de la boucle plate.
NF P 92-503	12-85	Bâtiment. Essais de réaction au feu des matériaux. Essai du brûleur électrique applicable aux matériaux souples d'une épaisseur inférieure ou égale à 5 mm.
NF P 92-505	12-85	Bâtiment. Essais de réaction au feu des matériaux. Essai de goutte au radiateur applicable aux matériaux fusibles (essai complémentaire).
P 92-507	12-85	Bâtiment. Matériaux de construction et d'aménagement. Classement selon leur réaction au feu.
NF T 46-008	12-90	Caoutchouc vulcanisé ou thermoplastique. Détermination de l'adhérence aux textiles.
NF X 41-514	12-81	Protection des matières plastiques. 2 ^e partie : détermination du comportement sous l'action des champignons et des bactéries. Évaluation par estimation visuelle ou par mesurage des variations de masse ou de caractéristiques physiques.

NF X 41-600 3-71 Essais de résistance aux microorganismes des textiles cellulosiques (naturels ou artificiels). Méthode par ensemencement mixte (spores/mycelium).

Allemagne

DIN Deutsches Institut für Normung eV

6836 Gummi. Kautschuk

53563 5-79 Prüfung von Latex ; Bestimmung des Gehaltes an Trockensubstanz.
Testing of latex ; determination of total solids Content.

Normes internationales

ISO International Organization for Standardization

ISO 105 B04	1988	Textiles. Essais de solidité des teintures. Solidité des teintures aux intempéries. Lampe à arc au xénon.
ISO 1419	1977	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Essais de vieillissement accéléré et de tenue à la chaleur.
ISO 1420	1987	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Détermination de la résistance à la pénétration de l'eau.
ISO 1421	1977	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Détermination de la résistance à la rupture et de l'allongement à la rupture.
ISO 2231	1989	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Atmosphères normales de conditionnement et d'essai.
ISO 2286	1986	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Détermination des caractéristiques des rouleaux.
ISO 2411	1991	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Détermination de l'adhérence du revêtement.
ISO 3011	1981	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Détermination de la résistance aux craquelures dues à l'ozone dans des conditions statiques.
ISO 3303	1990	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Détermination de la résistance à l'éclatement.
ISO 4637	1979	Supports textiles revêtus de caoutchouc. Détermination de l'adhérence du caoutchouc au textile. Méthode par traction directe.
ISO 4646	1989	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Essai de choc à basse température.
ISO 4674	1977	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Détermination de la résistance au déchirement.
ISO 4675	1990	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Essai de flexion à basse température.
ISO 5470	1980	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Détermination de la résistance à l'usure.
ISO 5473	1979	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Détermination de la résistance à l'écrasement.
ISO 5978	1990	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Détermination de la résistance au blocage.

ISO 5979	1982	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Détermination de la souplesse. Méthode de la boucle plate.	ISO 8095	1990	Supports textiles revêtus de PVC utilisés pour toile à bâches. Spécifications.
ISO 5981	1982	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Détermination de la résistance à l'effet simultané de froissement dû à l'application d'un couple et de frottement.	ISO 8096-1	1989	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique pour vêtements imperméables à l'eau. Spécifications. Partie 1 : Tissus revêtus de poly(chlorure de vinyle).
ISO 6179	1989	Feuilles de caoutchouc vulcanisé et supports textiles revêtus de caoutchouc vulcanisé. Détermination du taux de transmission des liquides volatils (technique gravimétrique).	ISO 8096-2	1989	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique pour vêtements imperméables à l'eau. Spécifications. Partie 2 : Tissus revêtus de polyuréthane ou d'élastomère silicone.
ISO 6449	1982	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Détermination de l'altération due à la fumée de cigarette.	ISO 8096-3	1988	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique pour vêtements imperméables à l'eau. Spécifications. Partie 3 : Tissus revêtus de caoutchouc naturel ou de caoutchouc synthétique.
ISO 7854	1984	Supports textiles revêtus de caoutchouc ou de plastique. Détermination de la résistance à la flexion (méthode dynamique).			

Organismes

APAVE (Association des Propriétaires d'Appareils à Vapeur et Électriques)
 CEBTP (Centre Expérimental de Recherches et d'Études du Bâtiment et des Travaux Publics)
 CEP (Contrôle et Prévention)
 CST (Club de la Structure Textile)
 CSTB (Centre Scientifique et Technique du Bâtiment)

ITF (Institut Textile de France) Lyon
 LNE (Laboratoire National d'Essais)
 Qualiconsult
 Socotec (Société de Contrôle Technique)
 Bureau Veritas

Réalisateurs

ACML (l'Auxiliaire de Construction Métallique de la Loire)
 ACS Production (Aluminium Composite Structure)
 Bachmann
 Bazantay
 Central Court
 CIAT (Cie Internationale André Trigano)
 Couverdure
 Dalo
 Esmery-Caron

Hors Série
 Saint-Frères
 SMV (Société Métallique du Vexin)
 Soliso-Cauvin
 Spécial Textile
 Tell
 TMB (Techniques Michel Brochier)
 VSO (Voileries du Sud-Ouest/Walter)

Fournisseurs

Tissus
 Dickson-Saint-Clair
 Saint-Frères Protection
 Ferrari

Accastillage
 ACOM (Accastillage Moderne)
 AGECA Architecture et Ingénierie
 Epi Câbles Composite Système
 SARMA Architecture marine et industrie

Bureaux d'études. Concepteurs

Biostructures
 Groupe Alto
 Groupe Arcora
 AGIBAT/MTI (Métal Textile Informatique)

Prat Bureau d'études
 Séchaud et Bossuyt
 Toile et Structures