

COMPTE RENDU DU WORKSHOP CONSTRUIRE LE COURBE GROUPE CONTREVENTEMENT



École des Ponts
ParisTech

Khalil Bejjani
Lucie Gustin
Emmeline Treuil
Antoine Truffaut

PRÉSENTATION DU CONTREVENTEMENT



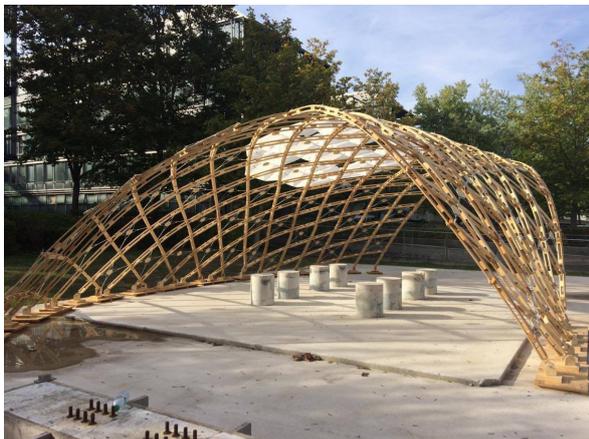
Il s'agissait de définir le principe de contreventement du Gridshell, ainsi qu'un système d'assemblage permettant de bloquer les câbles de contreventement au niveau des boulons lors du montage. Le contreventement s'effectue une trame sur deux afin d'optimiser le temps de montage et de permettre un gain de matière. Le câble de contreventement est dédoublé pour éviter une dissymétrie du détail structural d'accroche qui aurait pu fatiguer le bois.

Moyen mise à disposition :

2 Imprimantes 3D avec logiciel Cura, Rhino
1 Decoupe laser, AutoCAD
Plaques de contreplaqué 8mm
Plaque de medium pour test prototype
Ficelle, corde synthétique (5 x 100m)
Cable acier (50m)
Prototype du Gridshell de Toulouse



Le Gridshell est «élastique», le contreventement doit donc être lâche au montage de la grille pour lui permettre de prendre sa forme finale. Ensuite les câbles de contreventements sont tirés puis serrés à chaque extrémité et enfin, chaque nœud est serré grâce aux pions serreurs. Cela a pour effet d'isoler les mailles ; la tension doit donc être réglée à l'intérieur de chacune d'elles. Notre principal objectif a donc été de trouver une pièce de contreventement avec laquelle on puisse régler la tension des câbles selon chaque maille après le montage de la grille. Après de multiples essais sur prototype, notre choix s'est arrêté sur une solution simple dans sa fabrication et sa mise en œuvre. Nous avons décomposé le «tensionneur» en deux parties. D'une part une plaque centrale écarte les câbles au préalable puis des pièces en forme de S permettent d'adapter la tension dans chaque maille. Cela permet d'allonger le parcours du câble et ainsi de le tendre d'avantage. La plaque centrale, en contre-plaqué 8mm, est creusée d'une gorge dans chaque angle pour guider les ficelles



de contreventement et maintenir leur stabilité. Cette pièce est identique pour toutes les mailles. Les pièces en S permettent de tendre a posteriori et d'adapter la tension sur les différentes mailles. La mise en œuvre de ce système est facile et rapide. Elle nécessite seulement une personne et la tension peut être ajustée à n'importe quel moment après le montage.

PION AUX NŒUDS

Cette pièce a pour enjeu fonctionnel de permettre le maintien vertical et le glissement des cordes de contreventement lors du déploiement de la structure plane. Le pion sert alors un usage provisoire, temporaire. La pièce se situe sur la partie supérieure des assemblages. Elle est intégrée au système de connexion et se place au-dessus des lattes supérieures et avant les éléments de couvertures.

La contrainte principale, contre laquelle la résolution de la forme du pion s'efforce d'être optimale, consiste en la réduction drastique du temps d'impression 3D. Elle se travaille à deux niveaux : le design formel du pion et ses caractéristiques techniques et structurelles résultantes de l'impression.

Plusieurs solutions ont été proposées pour le dessin formel de la pièce. Parmi les dernières retenues un modèle composé de deux pièces (mâle et femelle) pinçait les fils entre eux. Ce type de pion avait une résistance forte pour le glissement mais l'extrémité qui avait comme but de maintenir le câble cassait facilement. De plus, le temps d'impression se trouvait supérieure aux délais à tenir et l'installation sur chantier était délicate vue la nécessité d'installer deux pièces. La pièce retenue se remarque par sa simplicité. Elle se compose d'une rondelle percée pour l'accroche à la vis, contenue par deux montants assez hauts pour incorporer 2 rondelles métalliques et les câbles. Sa forme simple permet une impression 3D rapide et de qualité. Plusieurs options ont été testées pour optimiser la pièce : ajout de striures pour éviter le glissement des cordes, surélévation de la première rondelle pour faciliter la prise en main lors du



Montage des nœuds sur les modules du Gridshell en atelier



Impression des pions serreurs à l'imprimante 3D Ultimaker²



Test modèle mâle femelle (non retenu)

montage. Ils se sont révélés défaillants ou trop gourmands en temps d'impression.

Un travail minutieux s'effectue sur le logiciel Cura pour réduire le temps d'impression sans perdre la résistance en compression nécessaire. L'épaisseur des couches d'impression, le pourcentage de remplissage, la vitesse d'impression et de déplacement permettent de minimiser le temps. Ce travail est tout autant primordial que le design de la pièce dans la course contre le temps. Pour le dernier modèle retenu, un pion avec 0,3mm d'épaisseur de couche s'imprime en 6min, soit 17h50 pour les 179 pions nécessaires, contre 8min pour un modèle avec 0,2mm par couche, soit 23h50. Des tests manuels sont effectués pour vérifier la tenue de la pièce à l'écrasement par les fils lors du serrage des boulons supérieurs et inférieurs.

Les 179 pièces sont imprimées en une nuit et une demi-journée sur deux machines par plateau de 50 pour éviter des pertes inconcevables en cas de problèmes.

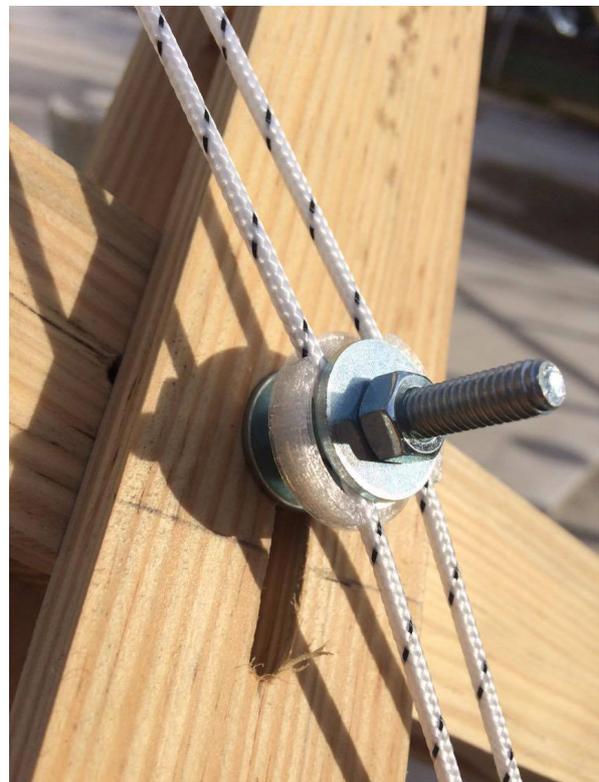


Nœud sur câble en acier

TENSIONNEUR

Cette pièce s'inspire du tensionneur utilisée pour le projet de Toulouse réalisé il y a quelques mois. Il s'agit d'un carré central en médium 5mm dans lequel on insère des pièces à chaque angle qui permettent de guider les cordes de contreventement. Ce dispositif tend les cordes en les écartant. Cette pièce crée un écartement unique alors que la maille du Gridshell est irrégulière et nécessite des tensions différentes selon les endroits.

En effet le Gridshell est «élastique», le contreventement doit donc être lâche au montage de la grille pour lui permettre de prendre sa forme finale. Ensuite les câbles de contreventements sont tirés puis serrés à chaque extrémité et ensuite chaque nœud est serré. Cela a pour effet d'isoler les mailles ; la tension doit donc être réglée à l'intérieur de chacune d'elles. Notre principal objectif a donc été de trouver une pièce avec laquelle on puisse régler la tension des câbles selon chaque maille après montage de la grille.



Nœud sur câble en corde

1e essai : pièce ronde avec trous

L'idée est d'enrouler les ficelles de contreventement sur elles-mêmes afin de les tendre. Une fois la tension souhaitée obtenue, un mécanisme permet de bloquer la rotation des deux pièces comme un axe central et ainsi conserver la tension dans les cordes. Ce dispositif était trop fin, il a très vite cédé.

2e essai : deux pièces en H

Comme dans l'essai précédent, les deux pièces permettent d'enrouler les cordes afin de les tendre puis un axe central bloque leur rotation. Le principal problème de ce système est qu'il est très difficile à mettre en œuvre. Il nécessite d'être deux voire trois personnes lors du montage, afin de tendre suffisamment les cordes, maintenir les pièces puis mettre l'axe central. Malgré tout, ce système est le plus économique en termes de matière.

3e essai : plaque centrale + pièces d'accroche + cale centrale

Pour ce système nous sommes partis du contreventement réalisé à Toulouse. En conservant l'idée première de tendre les cordes en les écartant, il nous fallait trouver une solution pour apporter différentes longueur d'écartement et ainsi pouvoir adapter la tension selon les câbles. Le dispositif est donc composé d'un carré central, et d'une pièce à chaque angle qui guide les cordes. Deux écartements sont possibles, en ajoutant une cale centrale qui permet d'éloigner les quatre pièces des angles et donc d'écarter les cordes de manière plus significative.

4e essai : pièces de réglages prises en sandwich entre deux plaques

Ce système est toujours dans l'idée de pouvoir régler la tension grâce à la pièce centrale. Il se compose de quatre pièces guidant les câbles qui se placent entre deux plaques perforées. Les perforations permettent de placer les petites pièces à différents degré d'écartement et ainsi régler de manière précise la tension des cordes. Ce dispositif est long à mettre en œuvre et



Essai 1 : deux pièces rondes avec trous pour bloquer la rotation



Essai 2 : pièces en H qui permettent d'enrouler les câbles sur eux même

difficile au vu du nombre de pièces. De plus, en écartant les pièces des plaques centrales, elles ne sont plus maintenues et deviennent de plus en plus fragile. Lors des essais sur prototype, l'une d'elle a cédé.

5e essai : plaque simple + S

Dans l'optique d'un système plus simple, nous avons songé à décomposer en deux parties le tensionneur. D'une part une plaque centrale écarte les ficelles au préalable puis des pièces en S permettent d'adapter la tension dans chaque maille.

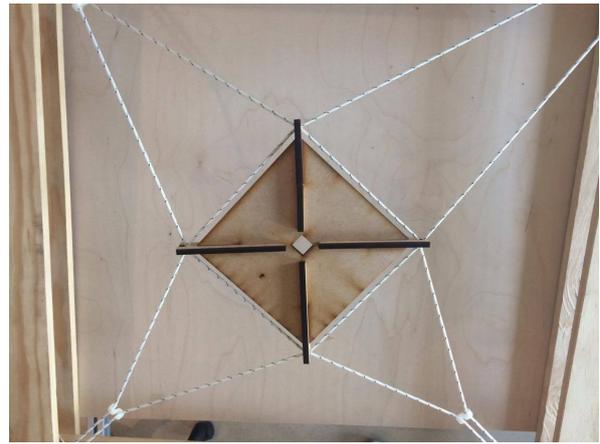
La géométrie de la plaque centrale n'est pas optimale dans ce cas, en effet les cordes appuient sur les angles qui sont ainsi fragilisés. Nous avons décidé de garder le principe qui est simple et qui fonctionne en changeant l'accroche des cordes à la plaque centrale.

6e essai : solution finale, une plaque centrale taillée dans la tranche + S

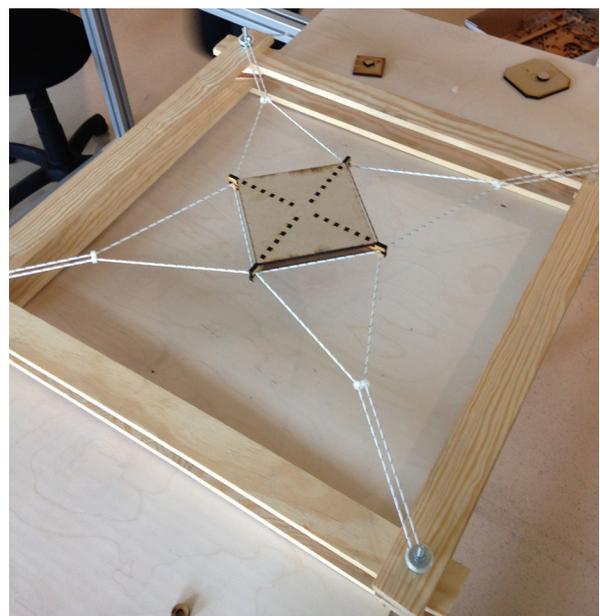
Afin d'éviter les efforts tranchants à la plaque et permettre qu'elle travaille seulement dans son plan, nous avons creusé une gorge dans les angles de la plaque octogonale afin d'y glisser les cordes de contreventement. Cela a été possible car les plaques de contreplaqué fournies sont de 8mm, laissant une épaisseur suffisante pour évider dans la masse.

Comme pour l'essai précédent, la plaque centrale tend au préalable les cordes, elle est identique pour toutes les mailles. Les pièces en S permettent de tendre a posteriori et d'adapter la tension sur les différentes mailles.

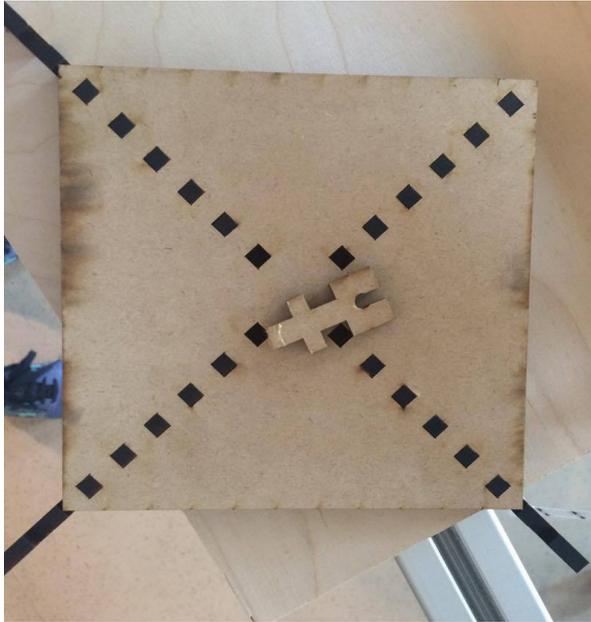
La mise en œuvre de ce système est facile et rapide. Elle nécessite seulement une personne et la tension peut être ajustée à n'importe quel moment après le montage grâce aux 4 pièces en S indépendantes.



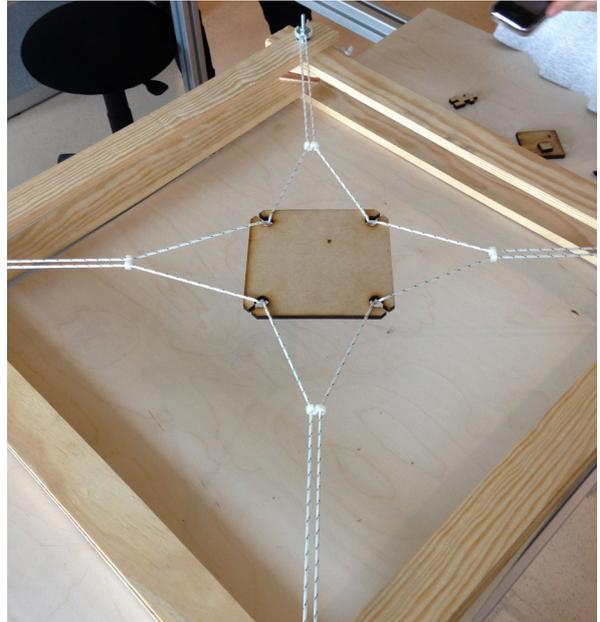
Essai 3 : plaque centrale + pièces d'accroche + cale centrale



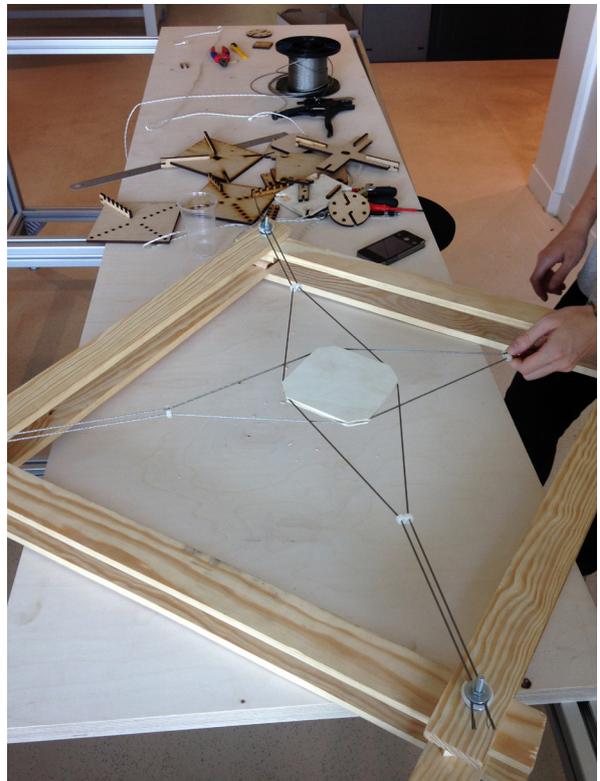
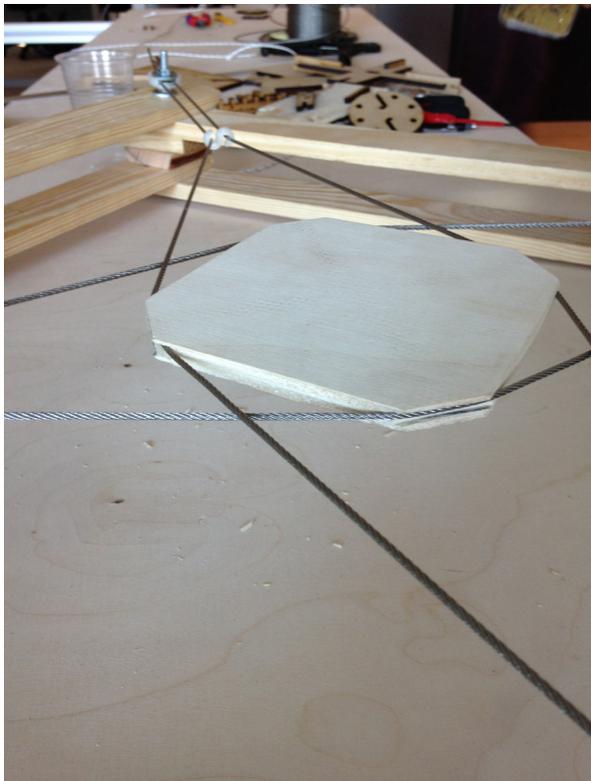
Essai 4 : pièces de réglages entre deux plaques



Essai 4 : rupture du système



Essai 5 : plaque simple + S (non concluant)



Essai 6 : solution retenue

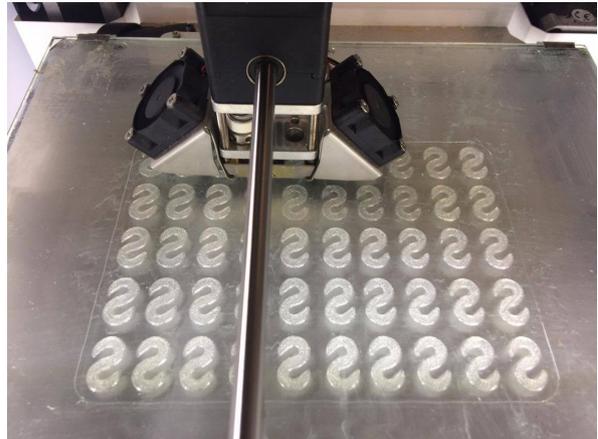
LES « S »

Cette pièce consiste en un élément additionnel afin de mettre en tension les câbles. Le principe repose sur un réglage manuel de la tension afin d'encaisser sur le long terme le comportement élastique de la corde. L'allongement de la corde sous contrainte est repris par ce tendeur supplémentaire. L'utilisation des tensionneurs et des S permet d'allonger la longueur de parcours du fil et ainsi tendre les câbles d'avantage. Il a pu être remarqué que certaines croix de contreventement étaient plus tendues que d'autres, ainsi le positionnement des S varie d'une maille à l'autre.

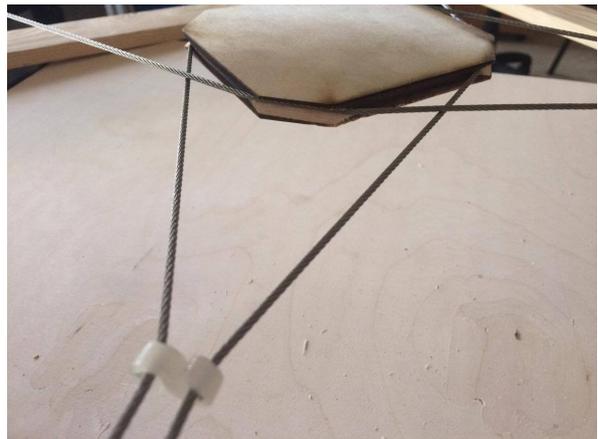
Ici encore le temps d'impression influe sur le choix du dessin final. Plusieurs prototypes sont effectués avec pour objectif la rapidité et facilité d'installation et le comportement du système dans le temps, notamment pour éviter le glissement des raidisseurs. Notamment un système de deux cônes avec le même principe que des clavètes jouait sur le frottement des deux câbles pour empêcher le retour du tendeur. Cependant les câbles étaient trop tendres et le plastique trop dure pour bloquer le câble et l'installation des cônes devait être effectuée sur chantier lorsque le Gridshell est toujours plat. Des raidisseurs avec des bords aigus afin d'augmenter le frottement ne convenait pas non plus car l'introduction des câbles lors du montage se voyait être délicate.

Le modèle retenu procède d'une optimisation d'un système par bagues. L'inconvénient majeur des bagues résidait dans la mise en place des éléments qui devait être antérieur à la pose des câbles. De plus, une pièce n'aurait pu être remplacée en cas de défaut.

L'idée a été de percer ces bagues, initialement par une seule entrée, pour introduire la pièce après levage du Gridshell, puis par deux entrées opposées pour obtenir une résistance plus homogène ; la forme finale donnant un « S ». Des striures ont été ajoutées dans le trou des câbles pour réduire le retour du S sous la tension. Au total, environ 400 S ont été produits : 360 pour le Gridshell, une quarantaine de plus afin de pouvoir les remplacer en cas de défaillance.



Impression des S à l'imprimante 3D



Résultat final sur prototype en atelier

CÂBLES

Il s'agissait de calculer les longueurs de câbles nécessaires, avec une marge de 10% une fois la structure en place. Certains câbles se raccourciront et d'autres devront s'allonger. Il fallait prévoir ces transformations afin de pouvoir couper les longueurs et réaliser le montage sur site. De plus, nous nous sommes rendus compte que la quantité de câbles fournis serait tout juste suffisant pour réaliser le contreventement, Une stratégie a été adopter pour la découpe afin d'optimiser l'usage des câbles et ne pas avoir de chutes trop importantes qui nous empêcherait de faire la totalité du contreventement. De plus, du câble fut aussi utiliser pour réaliser les tests sur le prototype. Enfin, il fallait prévoir une marge de 1,5m de chaque cote de la corde afin de pouvoir tirer dessus et ainsi tendre le contreventement de la structure.



Après deux semaines, certaines pièces sont fragilisées du à la tension dans les câbles de contreventement (surtout au niveau des câbles en acier)

CONCLUSION

Le montage du système de contreventement sur le Gridshell a plat a été efficace et relativement rapide.

Deux semaines plus tard, on constate que les tensionneurs en bois contre collé ont été cintrée du fait des croix de contreventement qui ne sont pas situé sur le même plan. Ce cintrage a été accentué par la pluie qui a humidifié le bois semble-t-il. De plus, à certain endroit soumis a beaucoup de tension, quelques S ont cédé, nous les avons remplacé et veillons chaque semaine à la structure afin de corriger les éventuels défauts des éléments de contreventement. La plupart de ces défauts ont été remarqué au niveau des câbles en acier.



Certaines pièces se sont déformées suite à l'humidité (pluie) ainsi que la forte tension (surtout dans les câbles en acier)