©2015, 2019 Jean Marc TEISSIER

Le câble a été inventé pour remplacer les cordes ou les chaînes, aussi bien pour la réalisation de ponts suspendus, que pour être installé sur des appareils de levage.

Les cordes étaient obtenues par le tressage de fibres naturelles, principalement le chanvre et le sisal. L'utilisation de ces cordes remonte au-delà de l'antiquité¹.

Le pont suspendu fut très tôt un moyen de franchissement dans les zones montagneuses. Les civilisations chinoises, incas ou africaines l'ont utilisé il y a plus d'un millénaire.

Il s'agissait en fait plus d'un pont de lianes que d'un pont suspendu. Le « tablier/platelage » suivant la forme de la suspension.





Système « Tibétain »

Système « Chinois »

On distingue le système « Chinois » avec le supportage en-dessous, et le système « Tibétain » avec le supportage sur les côtés.

L'utilisation des chaînes, qui est beaucoup plus récente, a suivi le développement des techniques sidérurgiques.

Au moins une structure suspendue à chaîne aurait été réalisée en Suisse au XIIIème siècle, mais il n'existe que peu d'éléments relatifs à cette construction.

L'histoire commence en France autour des ponts suspendus.

Les premiers ponts suspendus à chaînes ont été réalisés au tout début du XIXème siècle. Ils seront conçus et fabriqués par des ingénieurs américains (James Finley) ou anglais (Thomas Telford).



Pont de James Finley (1810)

Ces premiers ouvrages ont été réalisés de façon plutôt empirique.

Claude Navier, polytechnicien de son état, généralement connu pour ses travaux en mathématiques appliquées notamment à la mécanique des fluides (les « équations de Navier-Stokes »), était également ingénieur des Ponts et Chaussées. A ce titre il a été à l'origine de la construction à Paris du premier pont des Invalides.



Pont des Invalides (1826)

Ce pont suspendu à chaînes devait être un exemple d'optimisation, par opposition aux ponts du même type construits en Angleterre et aux USA. Claude Navier, expert en mathématiques, développera une théorie complète sur le sujet du calcul des ponts suspendus. Du fait de la finesse de l'approche théorique, les coefficients de sécurité ont été réduits. Malheureusement il ne restait plus assez de place pour l'incertitude. Lors de la mise en place des chaines une fissure est apparue dans la maçonnerie. En septembre 1826, alors que le pont est presque totalement construit, une rupture de canalisation intervient sur une berge, ce qui change les conditions de fonctionnement des fondations. Une des piles du coté Champs Elysées se déplace vers la rivière. Le pont sera finalement démoli avant même sa mise en exploitation². Le pont Alexandre III sera construit en lieu et place.

Claude Navier publiera en 1823 un ouvrage « Rapport et Mémoire sur les ponts suspendus »³, qui sera réédité en 1830 avec un complément spécifique au pont des Invalides. Ce document restera l'ouvrage de référence sur le sujet de la conception des ponts suspendus. Bien que rédigé pour des ponts avec une suspension à chaînes, les théories développées s'appliquent parfaitement aux ponts suspendus à câbles. De nos jours l'équation de l'équilibre d'un fil pesant s'appelle toujours « équation de la chaînette ».

Le câble à fils de fer sera inventé à cette époque.

L'invention du câble métallique est usuellement créditée au profit de Marc Seguin.

L'histoire est un peu plus compliquée.

Marc Seguin travaille sur la construction du pont de Tournon dès le début des années 1820. Il réalise en 1822 une passerelle prototype sur la Cance. La construction du pont de Tournon prend du retard, parce que le projet d'une passerelle piétonne est élargi à celui d'un pont routier, et également du fait de l'action de Claude Navier, qui voyait d'un mauvais œil la concurrence que le câble pouvait faire à la chaîne. Les problèmes rencontrés par Navier sur le pont des Invalides affaibliront sa position. Le pont de Tournon sera mis en service le 22 août 1825⁴.

Indépendamment du projet de Tournon, les autorités suisses gèrent le projet de la passerelle Saint Antoine à Genève. Marc Seguin est consulté, mais le contrat est finalement octroyé à Guillaume Henri Dufour⁵. La passerelle piétonne sera ouverte au public le 1^{er} août 1823⁶. Il s'agit de fait du premier pont suspendu à câbles de l'histoire.



Pont de Tournon (1825)

Passerelle Saint Antoine (1823)

Il est cependant d'usage d'attribuer la paternité de l'invention du câble à Marc Seguin, car d'une part le projet de Marc Séguin était prêt avant celui de Dufour, et d'autre part le pont de Tournon est de plus grande ampleur que la passerelle de Genève.

Les ponts suspendus en fils de fer présentent de nombreux avantages. Ils connaîtront un vif succès, et un très grand nombre de ponts de ce type seront construits jusqu'en 1850. Ces ponts suspendus sont réalisés avec des câbles à fils parallèles.



Câble à fils parallèles (Marc Seguin) (photo extraite de "The invention of the cable made of numerous thin iron wires"⁷

Ces câbles répondaient aux besoins pour la réalisation de pont suspendus.

L'histoire se prolonge en Allemagne puis en Angleterre autour des appareils de levage.

La solution pour les appareils de levage sera mise au point par Julius Albert qui était ingénieur à la mine de Clausthal en Allemagne. Il s'agit du premier câble toronné de l'histoire.

Le câble est constitué de plusieurs torons. Chaque toron est constitué de plusieurs fils enroulés en hélice. Plusieurs torons sont à leur tour enroulés en hélice pour former le câble.

Le câble Albert avait un diamètre de 18 mm et était constitué de trois torons de quatre fils de 3,5 mm chacun.



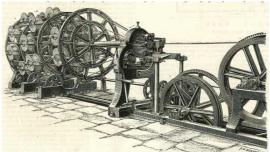
Câble à torons (Julius Albert) – section théorique (Image extraite de "A Short History of Wire Rope"8



Réplique du câble Albert fabriquée par Roland Verreet (Photo Jean-Marc Teissier)

Ce câble a été installé le 23 juillet 1834 dans un puits de 484 m de profondeur de la mine Caroline près de Clausthal.

Le câble toronné, qui a été inventé en Allemagne, était fabriqué manuellement. Il sera par la suite aussi développé en Angleterre. Andrew Smith et Robert Newall seront les principaux acteurs des évolutions techniques, ils seront à l'origine de la fabrication des premières câbleuses. Concurrents, ils ne cesseront de se disputer l'origine de leurs inventions. Newall proposera vers 1840 un câble constitué de 6 torons de 19 fils enroulés sur une âme textile et entièrement fabriqué sur une câbleuse⁹. Les anglais resteront à la pointe de la technique en matière de fabrication de câble.



Câbleuse dans les ateliers Bullivant & Co - Londres (1889)

L'histoire s'écrit également aux Etats-Unis.

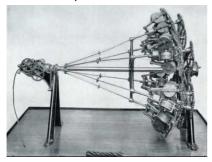
John August Roebling a obtenu son titre d'ingénieur de travaux publics à l'université de Berlin, où il a pris connaissance du traité de Navier ainsi que des rapports relatifs aux travaux de Marc Seguin. En 1831, il décide de s'installer aux Etats-Unis. Il fondera une colonie de fermiers dans la région de Pittsburg, dans un lieu qu'il nommera Saxonburg. Rapidement il doit prendre un poste d'ingénieur pour l'état de Pennsylvanie car les revenus issus de la ferme ne sont pas suffisants. Il sera impliqué dans la construction de canaux et de voies ferrées¹⁰.

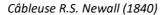
John August Roebling, qui était indiscutablement meilleur ingénieur que fermier, sera très vite reconnu pour ses qualités qui dépassent d'ailleurs le seul champ technique¹¹.

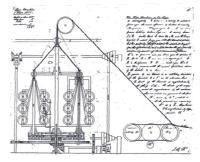
Il sera ainsi amené à travailler pour l'amélioration du système de traction du « Allegheny Portage Railroad », qui était alors équipé d'une corde en chanvre. Dans un premier temps il tentera d'utiliser un câble de type Seguin (câble avec des fils parallèles). Ce fut un échec car ce genre de câble n'est pas adapté à un enroulement sur tambour.

Il cherchera une autre solution. C'est ainsi qu'en 1841 il met au point un câble avec 7 torons de 19 fils (6 torons enroulés en hélice sur une âme qui est un toron de la même composition que les torons extérieurs), qui se comporte excellemment. Ce câble, qui est fabriqué manuellement à Saxonburg, a une architecture qui est en fait très proche de celle du câble de Newall.

Le succès de ce câble est tel que Roebling construit en 1849 une usine à Trenton (New Jersey) pour produire des câbles et qu'il fabrique (1855) une câbleuse¹² (avec un axe vertical – alors que celle de Newall a un axe horizontal).







Câbleuse J. A. Roebling (1855)

Dès 1845, John August Roebling intervient également sur des ouvrages d'art. Il commencera par réhabiliter des ouvrages existants et en 1849, il réalisera l'aqueduc de Delaware (Pennsylvanie), qui sera son premier ouvrage neuf.

Retour en France, pendant l'âge d'or des ingénieurs français de ponts suspendus.

Pendant ce temps, en France, la construction de ponts suspendus bat son plein. De nombreuses entreprises s'improvisent constructeurs.

Le câble est constitué d'un faisceau de fils parallèles qui sont assemblés au sol au pied du pont, et retenus par un système de ligature qui assure le maintien de la forme circulaire du câble. Le câble est ensuite mis en place sur les têtes des piles, il prend alors une forme parabolique. Il faut que les fils glissent entre eux afin de permettre l'ajustement des longueurs (les fils situés sur l'intrados sont trop longs, et ceux situés sur l'extrados sont trop courts), mais ces mouvements sont contrariés par les ligatures évoquées cidessus. Il devient in fine très difficile d'assurer une égale répartition de la charge entre tous les fils.

Un nombre très important d'ouvrage est réalisé. La qualité et la rigueur de fabrication n'est pas toujours à la hauteur des enjeux, surtout pour ce qui concerne les câbles.

L'administration des Ponts et Chaussées mandate Louis Vicat afin qu'il conduise une évaluation de plusieurs ponts en construction¹³. Louis Vicat, qui est polytechnicien comme Navier et Dufour, a obtenu sa notoriété lors de la découverte en 1817 du ciment artificiel. En 1830, il aura la charge de la réalisation du pont suspendu d'Argentat sur la Dordogne¹⁴.

Louis Vicat cherchera des solutions pour améliorer le comportement des câbles. Il imaginera la fabrication de câbles avec une section rectangulaire¹⁵ ainsi qu'une technique de fabrication du câble en position. Les fils sont déposés selon la courbure finale du câble, ils ont donc directement la bonne longueur¹⁶. John August Roebling utilisera et brevettera cette technique¹⁷ pour la fabrication des câbles du pont suspendu au dessus de la rivière Niagara. Cette technique dite du « Spinning » est encore utilisée de nos jours.

Charles Ellet Jr, est un ingénieur américain qui porte un grand intérêt aux ponts suspendus. Lors d'un voyage d'étude en France (1830 – 1831), il visitera de nombreux ouvrages et suivra des cours à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées (ENPC). Il deviendra plus tard un représentant de l'école française aux Etats-Unis.

L'enseignement à l'ENPC s'appuie sur les théories développées par Navier qui font l'objet d'un large consensus, à l'exception du sujet de la raideur du tablier. Sur ce point, John August Roebling n'est pas d'accord avec Claude Navier et considère que le tablier doit être rigide, surtout si la portée est grande. L'accident survenu en 1831 sur le pont de Broughton aurait du être pris plus au sérieux. Une compagnie de 60 hommes trouvant « agréable » la vibration causée par leur passage, chercha à l'amplifier en marchant au pas, ce qui provoqua l'effondrement du pont¹⁸. Il faudra attendre l'effondrement du pont de Tacoma (1940) pour que ce type de phénomène vibratoire soit réellement pris en compte. Par contre la technique de réalisation de l'ancrage des câbles ne fait pas débat. Tous les experts s'accordent sur la solution qui consiste à noyer les chambres d'ancrage avec de la chaux. L'ancrage n'est pas visitable, mais il n'y a (théoriquement) pas de risque de corrosion. John August Roebling partage ce point de vue.

Joseph Chaley est un des nombreux ingénieurs français qui construisaient des ponts suspendus pendant cette période. Il construira notamment le pont de Fribourg (Suisse) en 1834 qui, avec sa portée de 273 m, détiendra le record du monde jusqu'en 1849, quand Charles Ellet Jr construira le pont de Wheeling. En 1838, il réalisera le pont de Basse-Chaîne à Angers.

L'accident du pont de Basse-Chaine, l'histoire se fige en France.

Le 16 avril 1850, le 11ème régiment d'infanterie légère franchit le pont de Basse-Chaine à Angers (49). Les conditions météorologiques sont très mauvaises (pluie et vent fort). Le pont oscille sous la sollicitation du vent, les hommes doivent se déplacer latéralement de droite à gauche pour maintenir leur équilibre. Ces déplacements ont eu pour effet d'amplifier les mouvements du pont. Finalement, quand la tête du 3ème bataillon atteint l'extrémité du pont, les hommes de troupe couvrent donc tout le pont, un des ancrages des câbles casse, projetant les soldats dans la rivière¹⁹.

Cet accident fait plus de 200 morts.

Les risques liés à la vibration du pont étaient connus depuis l'accident de Broughton (1831). La marche au pas avait été stoppée avant l'entrée sur le pont.

Les conclusions de l'expertise sont sans appel. Il y a eu rupture de l'ancrage de câbles porteurs fragilisés par l'oxydation, malgré la présence de chaux censée les préserver de l'humidité dans leur ouvrage de confinement.

Il ne s'agit pas d'une erreur de fabrication, il ne s'agit pas d'une non-conformité vis-à-vis des textes applicables. Cet accident met en évidence un défaut des exigences réglementaires. Tous les ponts construits sur la base des textes en vigueur à cette date sont donc potentiellement dangereux. Une inspection détaillée de tous les ouvrages a été réalisée. De nombreux ouvrages seront détruits principalement du fait de ces inspections.

C'est ainsi par exemple qu'il ne reste plus aucun pont suspendu à Paris, qui en comptait pourtant au moins trois, le pont d'Arcole (1828), le pont de Bercy (1832) et le pont Louis Philippe (1833). Plus aucun pont suspendu ne sera construit en France avant 1879.

Pendant ce temps l'histoire continue aux Etats-Unis.

John August Roebling et Charles Ellet Jr sont les deux principaux acteurs dans le domaine des ponts suspendus. Ellet, s'appuyant sur ce qu'il a appris en France, propose des ouvrages légers. Roebling qui, à l'opposé, est convaincu de l'importance qui doit être accordée à la rigidité, propose des ouvrages plus lourds donc plus chers.

C'est ainsi qu'en 1849 Charles Ellet Jr remporte l'appel d'offre pour la construction du pont de Wheeling qui avec une portée de 308 m, devient l'ouvrage le plus long au monde.

Quelques années plus tard, en 1854, le tablier du pont s'effondrera lors d'une tempête. Un nouveau tablier beaucoup plus rigide sera reconstruit, et Roebling ajoutera plus tard des haubans dans la suspension.

Les deux hommes sont également en concurrence pour la construction du pont suspendu ferroviaire sur la rivière Niagara²⁰. Charles Ellet Jr obtient le marché de la construction de l'ouvrage provisoire. Des différents d'ordre financier opposeront Ellet à son client, et c'est finalement Roebling qui construira le pont ferroviaire. Ce pont d'une portée de 244 m sera ouvert au public en 1854 et le premier train, qui avait un poids de 200 T, circulera le 18 mars 1855.²¹



Pont ferroviaire sur la rivière Niagara (1855)

Ce pont est probablement l'ouvrage de référence. John August Roebling y a investi tout son potentiel créatif sans rien concéder à la rigueur qui le caractérise. Roebling fera tout ce qui est possible pour augmenter la rigidité de cet ouvrage. Le tablier est à double pont, les trains sur le pont supérieur, les piétions et chevaux sur le pont inférieur. Il en résulte des dimensions qui lui confèrent une grande rigidité, même si initialement réalisé en bois. Les suspentes de liaison avec les câbles de suspension sont inclinées, des câbles sous tendeurs sont installés sous le tablier.

Pour la fabrication « en place » des câbles de suspension, Roebling utilisera et brevettera²² le procédé imaginé en 1831 par Louis Vicat.

Dans son rapport aux actionnaires de la société de construction du pont qui a été publié en 1855, Roebling présente l'accident du pont de Wheeling comme étant le plus grave accident connu pour un pont suspendu. Il est donc manifeste qu'à cette date, John August Roebling n'avait pas connaissance de l'accident du pont de Basse-Chaîne, donc de ce qui se passait en France. Il est donc très probable qu'il n'a pas copié Louis Vicat, mais qu'il a eu la même idée que lui.

Les chambres d'ancrage des câbles étaient non visitables et noyées avec de la chaux (comme sur le pont de Basse-Chaîne). John August Roebling était convaincu que cette solution était bonne, il avait déposé un brevet en 1846. De son vivant il s'opposera à ce que ces ancrages soient inspectés²³. Roebling décédera en 1869 lors de la construction du pont Brooklyn à New York, qui sera achevée par son fils Washington²⁴. Le fils n'avait pas les idées aussi arrêtées que le père pour ce qui concerne les ancrages, il acceptera une inspection. Un rapport de synthèse établi dès 1881 par l'ingénieur américain L.L. Buck²⁵ mettra en évidence que ces ancrages montraient les mêmes dégradations que ceux du pont de Basse-Chaîne. Des travaux de rénovation seront entrepris à partir de 1887.

Que serait-il advenu des ponts suspendus si après le pont de Basse-Chaîne, le pont sur la rivière Niagara s'était également effondré ?

John August Roebling aura plus de concurrence dans le domaine des câbles de levage. Les techniques anglaises de fabrication seront introduites en Californie sous l'impulsion d'Andrew Smith. Son fils, sous le nom d'A.S. Hallidie, créera une usine en Californie en 1857 et fabriquera des câbles pour les mines d'or²⁶, pour les ponts suspendus et ensuite pour les « cable car ». La notoriété d'A.S. Hallidie est surtout associée a son implication dans la création des systèmes de « cable car » à San Fransisco (1872)²⁷.

L'histoire redémarre en France, Ferdinand Arnodin entre en scène.

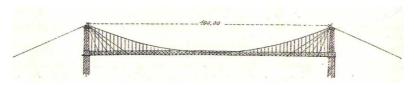
Ce n'est qu'à partir de 1870 que la construction de ponts suspendus sera de nouveau autorisée en France. Ferdinand Arnodin, dont le père travaillait pour Marc Seguin, connaissait très bien le câble et les ponts suspendus réalisés par ce dernier. Il en assurait la surveillance et la maintenance.

En 1872, il crée sa propre entreprise pour la construction de ponts suspendus. Il sera le successeur de fait de Marc Seguin après la mort de ce dernier en 1875.

En 1870, l'administration des Ponts et Chaussées mandate l'ingénieur Emile Malézieux pour faire un voyage aux Etats-Unis, afin d'étudier les réalisations américaines en matière de travaux publics. En 1873, Emile Malézieux publie un rapport de mission sous le titre « Travaux Publics des Etats-Unis d'Amérique en 1870 »²⁸.

Ce rapport comporte une section dédiée aux ponts suspendus, et notamment au pont sur la rivière Niagara réalisé en 1855 par John August Roebling. L'ouvrage y est décrit dans les moindres détails. C'est sur la base de ce rapport que les ingénieurs français, Ferdinand Arnodin en tête, vont bâtir la nouvelle école française.

D'une manière générale le rapport Malézieux fait office de référence, de réglementation. Le système de suspension de John August Roebling a la particularité d'intégrer à la fois des suspentes de liaison avec le tablier, et des câbles obliques de liaison directe entre les extrémités du tablier et la tête de pile. Il s'agit de la suspension dite « à l'américaine ».



Suspension « à l'américaine » (extrait audition de Ferdinand Arnodin par la commission des ponts suspendus)²⁹

L'ingénieur Jollois, qui aura la charge des études du pont de Saint Ilpize (43), imaginera un système de suspension avec une poutre de rigidité dite « à la française ». Il s'agit en fait d'un système américain dans lequel il n'y a pas de cumul des suspentes et des câbles obliques.

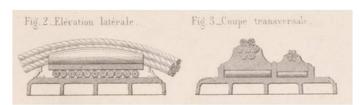


Suspension « à la française » (extrait audition de Ferdinand Arnodin par la commission des ponts suspendus)

L'ingénieur Maurice Lévy développera des calculs très approfondis à ce sujet³⁰. Il publiera un mémoire relatif à ces travaux en 1886.

L'ingénieur Jollois suivra les indications du rapport de Malézieux pour ce qui concerne les câbles de suspension. Il choisira donc des câbles toronnés pour toute la suspension.

Hors ce rapport comporte une erreur quand il indique que les câbles paraboliques de suspension des ponts américains étaient réalisés à partir de câbles toronnés. En fait Roebling n'a utilisé ses câbles toronnés que pour les suspentes et les câbles obliques.



extrait du rapport d'Emile Malézieux

Les câbles de suspension utilisés par Roebling sont des câbles de type Seguin, qui ont été réalisés « en place » avec une méthode identique à celle décrite par Louis Vicat en 1831.

L'entreprise de Ferdinand Arnodin aura la charge de la construction du pont de Saint Ilpize, ainsi que de tous les ponts suspendus qui seront réalisés à cette époque ; Chilhac (43), Lamothe (43), rénovation de Tonnay-Charente (17).

La construction du pont de Saint Ilpize, premier pont suspendu français de l'après Basse Chaine, sera terminée en 1879.

Les câbles toronnés, utilisés en tant que câbles de suspension, ne donnent pas satisfaction.

Ferdinand Arnodin connaissait très bien les inconvénients des câbles Seguin. Il découvre maintenant les inconvénients des câbles toronnés (qui de toute façon n'avaient pas été conçus pour cette utilisation). C'est à ce moment qu'il invente son câble à torsion alternative, qui est en fait une combinaison des deux autres câbles.

Faisant suite à une demande de Ferdinand Arnodin, une commission spéciale est instituée le 27 août 1885 pour l'étude des questions concernant les ponts suspendus, et plus particulièrement les évolutions et améliorations des ponts suspendus modernes (par opposition aux ponts anciens, ceux d'avant 1850). Ferdinand Arnodin qui, à ce moment, était le constructeur de référence de ponts suspendus, était soit à l'origine, soit le porteur de ces évolutions : le principe d'amovibilité, le câble à torsion alternative, la poutre de rigidité à la française, les garde-corps articulés.

Les travaux de cette commission se sont appuyés sur les retours d'expérience principalement documentés dans des rapports publiés dans les Annales des Ponts et Chaussées^{31 32}, et sur un important travail de calcul qui a été réalisé par l'ingénieur Maurice Lévy. Ce dernier publiera en 1886 un « Mémoire sur le calcul des ponts suspendus rigides »³³.

Cette commission rendra publique les conclusions de ces travaux en Juillet 1889³⁴.

Elle plébiscitera le principe d'amovibilité ainsi que le câble à torsion alternative³⁵, fixera des limites pour l'utilisation des haubans de rigidité (suspension à la française)³⁶, et rejettera catégoriquement le gardecorps constitué de pièce articulées de Ferdinand Arnodin³⁷.

Tout comme d'autres grands hommes, John August Roebling par exemple, Ferdinand Arnodin n'acceptait pas la remise en cause. Il continuera donc à installer des haubans de rigidité trop inclinés, ainsi que son garde-corps articulé.

Quelques années plus tard, il croisera le chemin de d'Alberto de Palacio. En 1893, ces deux hommes seront à l'origine de la construction à Bilbao du premier pont transbordeur. Pour ses ponts transbordeurs, Ferdinand Arnodin utilisera les techniques des ponts suspendus.

C'est ainsi que de mars 1898 à juillet 1900, Ferdinand Arnodin construit le pont transbordeur de Martrou sur les mêmes principes que ceux de Bizerte (Tunisie) reconstruit à Brest (29) et de Rouen (76), soit un tablier avec son garde-corps articulé et des haubans trop inclinés. Il utilise également son câble à torsion alternative.

Par contre, pour le pont transbordeur de Newport³⁸ (1906), d'une part le tablier n'intègre pas le gardecorps articulé, mais dispose d'une géométrie qui lui confère une grande rigidité, et d'autre part l'inclinaison des haubans de rigidité respecte les recommandations établies par la commission en 1889. Ce pont est toujours en service avec son tablier d'origine, alors que pour les ponts transbordeurs de Rouen et de Martrou³⁹, les tabliers ont rapidement montré des signes de faiblesse et ont du être remplacés.

Ferdinand Arnodin abandonnera définitivement la suspension « à la française » dans les années 1920⁴⁰.

Pour le pont de Newport, Ferdinand Arnodin a été assisté par Georges Camille Imbault, un ingénieur Art et Métiers qui avait débuté sa carrière en 1895 dans son entreprise. Georges Camille Imbault démissionnera en 1901 pour aller travailler en Angleterre, puis dans d'autres pays à l'étranger pour le compte d'entreprises anglaises, notamment à Sydney pour la construction du Harbour Bridge. Ferdinand Arnodin et Georges Camille Imbault ont toujours entretenu de bonnes relations, ce qui ne fut absolument pas le cas entre Gaston Leinekugel Le Cocq, le gendre et successeur officiel de Ferdinand Arnodin, et Georges Camille Imbault. Il faut garder à l'esprit que Georges Camille Imbault a décidé de partir en Angleterre juste après que Gastion Leinekugel Le Cocq ait épousé Aline, la fille de Ferdinand Arnodin. La volonté d'améliorer son anglais a probablement été un prétexte pour cacher un amour déçu...

Basile Baudin qui était contremaitre dans les ateliers l'entreprise de Ferdinand Arnodin à Châteauneuf sur Loire quittera l'entreprise pour prendre la direction de la centrale électrique de Châteauneuf. En 1919, il créera l'entreprise Basile Baudin et Cie (qui deviendra plus tard Baudin Châteauneuf) avec pour objet la fabrication des pylônes pour les lignes électriques. Il n'y avait à ce moment aucune concurrence entre l'entreprise de Basile Baudin et celle de Ferdinand Arnodin, qui accompagnera cette création (le fils ainé de Ferdinand Arnodin était un des actionnaires fondateurs de l'entreprise de Basile Baudin). Ce ne sera plus le cas quelques années plus tard.

Bien qu'expatrié hors de France, Georges Camille Imbault sera la tête pensante de Basile Baudin dès la création de l'entreprise Basile Baudin et Cie. A la mort de Ferdinand Arnodin (1925), les deux hommes décideront de prendre la place de l'entreprise Arnodin dans le domaine des ponts suspendus⁴¹, ils fabriqueront une câbleuse pour produire des câbles à torsion alternative. En 1932, suite à un accident cérébral de Basile Baudin, Georges Camille Imbault rentre en France et prend la direction des Etablissements Basile Baudin. L'entreprise de Basile Baudin et l'entreprise d'Arnodin se livreront alors une guerre fratricide jusqu'à la mort de l'une d'elles, tant pis pour la mémoire de Ferdinand Arnodin.

Les legs de Ferdinand Arnodin : son câble, sa câbleuse.

Les câbles à fils parallèles pour ponts suspendus inventés par Marc Seguin et Guillaume Henri Dufour avaient une architecture très simple. Les câbles de levage inventés par Julius Albert puis développés entre autres par Robert Newall, Andrew Smith et John August Roebling, avaient une architecture beaucoup plus sophistiquée. Ces deux types de câbles n'avaient pas la même destination, ils ne répondaient pas aux mêmes besoins.

Sur les ponts suspendus, des câbles statiques supportent des efforts de traction (le problème de l'enroulement ne se pose que pour le transport, donc en l'absence de charge), alors que pour les appareils de levage, les câbles sont en mouvement et s'enroulent en charge sur des poulies ou des tambours, subissant ainsi des sollicitations simultanées et répétées de traction et de flexion. Les câbles à fils parallèles vivront leur âge d'or entre 1825 et 1850, avant l'accident du pont de Basse-Chaîne.

Les câbles de levage seront dès 1834 utilisés pour des systèmes de transport verticaux ou inclinés, notamment pour des puits de mines. Dans les années 1860, faisant suite à la ruée vers l'or dans l'Ouest américain, ils seront également utilisés pour les téléphériques⁴². Dès le début des années 1870, les systèmes de « cable car »⁴³ offriront un nouveau débouché pour ces produits. Ces applications sont très exigeantes et seront à l'origine de nombreuses évolutions techniques, qui porteront principalement sur la conception des torons. Notamment le toron « Seale », qui sera mis au point par Thomas Seale (1885) alors qu'il était directeur technique d'une ligne de « cable car », le toron « Filer », qui fut mis au point par James Stone (1889)⁴⁴ également afin de réduire les phénomènes d'usure des fils du câble⁴⁵. Toutes ces évolutions avaient principalement pour objet d'augmenter la durée de vie en fatigue (de flexion) des câbles.

Ces câbles dits de levage sont remplacés fréquemment à cause des phénomènes de fatigue générés lors du passage sur les poulies (et/ou tambours), et également lors du serrage dans les pinces de liaison aux véhicules. Ils n'ont donc généralement pas le temps de subir les assauts de la corrosion.

Pour les ponts suspendus le problème est totalement différent, d'une part car les câbles sont statiques, et d'autre part car ils sont installés pour le long terme. La corrosion, qui a donc tout le temps d'agir, devient un paramètre capital.

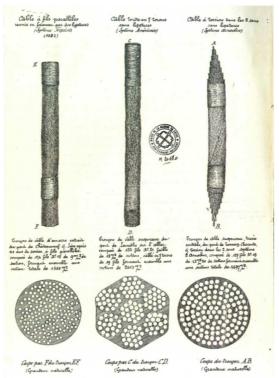
Ferdinand Arnodin, qui était le successeur de fait de Marc Seguin connaissait très bien les défauts des câbles à fils parallèles : obligation de fabrication sur le site, difficultés pour obtenir une égale répartition des charges entre tous les fils, problèmes de géométrie – des fils trop courts à l'extrados et trop longs à l'intrados – cependant pratiquement résolus avec la technique de Louis Vicat⁴⁶, mais nécessitant de fabriquer le câble en position, enfin une forte sensibilité à la corrosion, car il est difficile de maîtriser la position de tous les fils, et il se crée alors des canaux dans les interstices facilitant la propagation de l'eau dans le câble.

Ferdinand Arnodin a découvert les câbles toronnés lorsque leur utilisation a été imposée suite à la publication du rapport Malézieux. Il les nomme « câbles américains », mais ils étaient également appelés « câbles à fils tordus »,

Il reconnait à ces câbles des avantages par rapport aux câbles à fils parallèles, mais les premiers retours d'expérience montrent que des problèmes subsistent pour les ponts suspendus.

C'est dans ce contexte que Ferdinand Arnodin imaginera son câble ; le câble à torsion alternative. Le moment n'est pas daté avec précision, mais il se situe entre 1879, date de la construction du pont de Saint Ilpize, et 1883, date du début de la construction du pont de Lamothe, sur lequel le câble Arnodin a été expérimenté pour la première fois, uniquement pour les haubans. Le premier pont à être intégralement équipé de câbles Arnodin sera le pont de Tonnay-Charente lors de sa reconstruction en 1886⁴⁷.

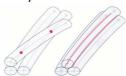
C'est ainsi que Ferdinand Arnodin comparera son câble d'une part avec le câble Seguin, et d'autre part avec le câble «américain »⁴⁸.



Comparaison des différents types de câble (extrait audition de Ferdinand Arnodin par la commission des ponts suspendus)

Le principe d'amovibilité qui était une règle d'or pour Ferdinand Arnodin, impose l'utilisation de plusieurs petits câbles. Ces câbles seront fabriqués en usine puis acheminés et mis en place sur le site. Ferdinand Arnodin reprend l'idée des fils tordus, donc du toron des américains, mais la met en œuvre au niveau du câble. Il crée en fait le câble mono-toron, également appelé câble spiroïdal. Avec cette géométrie le même fil passe alternativement de l'intrados à l'extrados du câble. Le positionnement du câble selon un rayon (forme parabolique des câbles de suspension) génère un léger déplacement des fils à l'intérieur du câble, pour transférer les variations de longueurs selon le positionnement de chaque fil. Ceci confère une bonne flexibilité au câble.

Pour un câble de levage, il fallait impérativement rendre le toron le plus « compact » possible. Les différentes couches de fils du toron étaient donc enroulées dans le même sens, ce qui permet de ranger les fils les uns dans les autres (câblage parallèle).



Câblage non parallèle (à gauche) et câblage parallèle (à droite)

Il en résulte que la longueur des fils sur chaque couche est imposée par la géométrie de la couche inférieure.

Cette disposition n'était pas applicable pour un pont suspendu, car pour garantir une égale répartition de la charge entre tous les fils, il faut adapter la longueur du fil en fonction du niveau de la couche (le pas de câblage augmente si le niveau de la couche augmente). Ceci est d'autant plus important que le nombre de couche est élevé. Il n'y a en général que 2, voire 3 couches de fils dans les torons d'un câble de levage, alors que pour le câble Arnodin, ce nombre sera finalement de 10 couches. Le pas de câblage doit donc changer en fonction de la couche. Le fil central ne peut pas respecter cette règle, il est de fait le plus court de tous les fils et donc celui qui casse le premier lors d'un essai de traction. Il n'est finalement qu'un fil de calage sur lequel s'appuie la seconde couche.

Une telle construction est réalisable avec toutes les couches enroulées dans le même sens, mais Ferdinand Arnodin optera pour une direction d'enroulement qui change alternativement d'une couche à l'autre. Ceci donne câble une bonne flexibilité et en plus un comportement relativement anti-giratoire. Pour les câbles Arnodin, tous les fils du câble ont le même diamètre et chaque couche comporte 6 fils de plus que la couche inférieure (1+6+12+18+24+...).

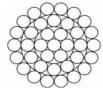


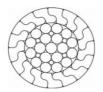
Câble à torsion alternative- Musée de la marine de Loire (photo Jean-Marc Teissier)

Les phénomènes de corrosion seront pris en compte par deux types de disposition relative, d'une part à la géométrie et d'autre part à la fabrication. Même si la suspension d'un pont est réalisée avec plusieurs câbles (principe d'amovibilité), ces câbles ont un plus gros diamètre que les torons des câbles de levage, ils sont donc réalisés avec des fils de diamètre significatif, donc moins sensibles à la corrosion que des fils de petit diamètre. Du fait de l'enroulement en hélice les « caniveaux » créés entre deux fils de la même couche ont une pente variable, qui en fonction de la position de l'hélice et de la pente du câble, peut s'opposer à l'écoulement de l'eau et à son accumulation sur l'ancrage aval.

Des dispositions particulières sont prises lors de la fabrication, elles sont en relation avec la câbleuse mise au point par Ferdinand Arnodin. Le fil central et chacun des fils de la première couche sont passés dans un bain de « composition anti-oxydable ». Lorsque la structure initiale (1+6) est fabriquée, elle passe à nouveau dans le bain de « composition anti-oxydable », ainsi que les fils de la couche supérieure. Ce processus est répété jusqu'à la fabrication de la dernière couche. Il en résulte que tous les vides intérieurs du câble sont remplis par cette « composition anti-oxydable »⁴⁹.

Le câble de Ferdinand Arnodin a inspiré d'autres personnes, notamment Arthur Latch et Telford Batchelor, inventeurs en 1884 du câble clos (câble mono toron avec des fils extérieurs en forme de Z).





Câble spiroïdal (Arnodin) à gauche et câble clos (Latch et Batchelor) à droite

Initialement toutes les couches étaient câblées dans le même sens, ce qui rendait le câble difficile à mettre en place, car il développait un couple important. En 1887, Latch & Batchelor ont construit leurs câbles avec un câblage des couches de fils en sens alterné, ce qui rendait le câble plus stable en rotation, reprenant ainsi l'idée de Ferdinand Arnodin.

A l'époque de l'invention de son câble par Ferdinand Arnodin (1880 – 1882), il existait déjà, notamment en Angleterre et aux Etats-Unis, des câbleuses pour la fabrication des câbles multi-torons (7 torons de 19 fils). Il est très peu probable que Ferdinand Arnodin ait eu connaissance de ces machines. Il imaginera et fabriquera une machine pour répondre à ses besoins propres.





Câbleuse de Ferdinand Arnodin dans l'usine de Saint Pantaléon de Larches (Photos Stéphanie Charpentier)

Le processus de fabrication comporte de nombreuses interventions manuelles, notamment pour la mise en œuvre de la protection anticorrosion.

Ferdinand Arnodin tenait absolument à ce tous les interstices entre les couches de fils soient remplis par de la « composition anti-oxydable » afin d'éviter que de l'eau ne s'y introduise et donc d'assurer une protection contre la corrosion pérène.

La machine intègre 8 trains, chacun équipé de 6 bobines. Pour la fabrication du toron initial (1+6), un seul train est utilisé et il tourne dans un sens de rotation. Pour la mise en place de la seconde couche de fils, deux trains sont utilisés. Ils tournent tous les deux dans le même sens, qui est opposé à celui pour la fabrication de la couche inférieure. En répétant ce processus, cette machine permettait la fabrication de câbles avec 217 fils répartis sur 8 couches, soit un diamètre de 68 mm pour des fils de 4 mm de diamètre.

La câbleuse de Ferdinand Arnodin a été construite dans les ateliers Arnodin à Châteauneuf sur Loire au début des années 1880.

Lorsqu'en 1925, Georges Camille Imbault et Basile Baudin décident de se lancer dans la construction de ponts suspendus, ils fabriqueront une autre câbleuse, qui sera aussi installée à Châteauneuf sur Loire, où était également située l'entreprise de Basile Baudin.



Câbleuse Baudin Chateauneuf (1925). Cette machine est souvent, par erreur, présentée comme étant la câbleuse de Ferdinand Arnodin (Musée de la Marine de Loire à Châteauneuf sur Loire, et l'ouvrage Ingénieur des Ponts par Didier Leinekugel Le Cocq)

Pour concevoir cette nouvelle machine, Georges Camille Imbault, qui résidait en Angleterre depuis les années 1905, s'inspirera des câbleuses qui y ont été développées dès les années 1840⁵⁰. Cette nouvelle câbleuse fabrique des câbles avec 4 couches de fils en une seule opération, mais le processus de protection contre la corrosion ne peut plus être réalisé comme prévu par Arnodin. Il faut noter qu'en 1925, grâce au progrès du procédé de galvanisation⁵¹ des fils galvanisés commençaient à être disponible.

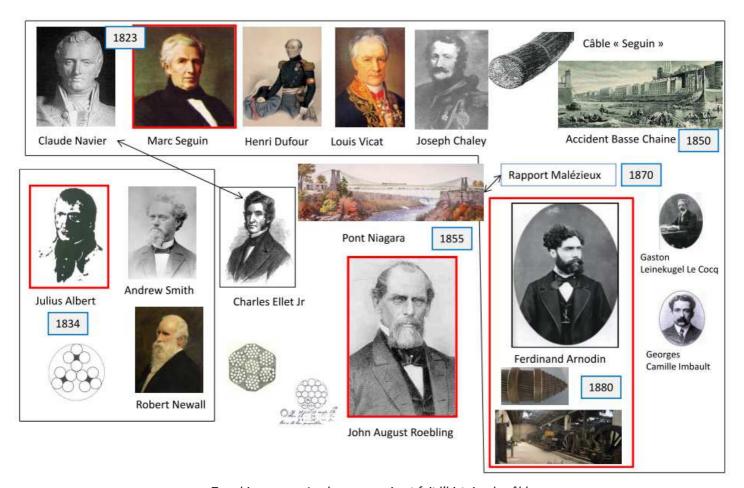
La production étant réalisée avec un meilleur rendement, les coûts sont plus faibles qu'avec la machine de Ferdinand Arnodin. Ainsi de façon surprenante mais logique, les ateliers Arnodin seront les premiers clients de la câblerie Baudin⁵²...

La câbleuse de Ferdinand Arnodin sera finalement transférée par Gaston Leinekugel Le Cocq à Saint Pantaléon de Larches dans ses nouveaux ateliers. Elle sera rallongée pour permettre la production de câbles avec 10 couches de fils (voir photos ci-dessus).

C'est dans cet atelier qu'en 2013 elle sera sauvée in extremis de la destruction ...

Mémoire de l'invention la plus significative de Ferdinand Arnodin (les câbles spiroïdaux actuels sont toujours réalisés selon les principes établis par Ferdinand Arnodin), cette machine est maintenant à l'abri dans un hangar à Rochefort dans l'attente d'une réhabilitation.

Jean Marc TEISSIER (avec le soutien de Donald Sayenga)



Trombinoscope – Les hommes qui ont fait l'histoire du câble

Les épreuves en charge du pont de Martrou ont du être stoppées à cause de déformations du tablier. Ce dernier bien que renforcé montrera des signes faiblesse dès le début de l'exploitation de l'ouvrage. La charge utile du pont sera très rapidement réduite de 26T à 14T. Malgré plusieurs opérations de renforcements le tablier montrera toujours des signes de faiblesse qui seront finalement à l'origine de l'arrêt de l'exploitation du pont, dans l'attente du remplacement du tablier (et de la suspension).

¹ Ridge, Isabel. *The development of rope*, OIPEEC, Bulletin 65, 1993.

² Drewry, Charles Stewart. A memoir on suspension bridge, London: A. and R. Spottiswoode, 1832, pages 100-101

³ Navier, Claude. *Mémoire sur les ponts suspendus*, Paris : Imprimerie Royale, 1823.

⁴ Seguin, Ainé. *Des ponts en fil de fer*, Paris : Bachelier, 1824

⁵ Peters Tom Frank. *Transition in engineering, Guillaume Henri Dufour and the Early 19th Century Cable Suspension Bridges*, Birkhäuser, 1987

⁶ Dufour, Guillaume-Henri. *Description du pont suspendu en fil de fer construit à Genève*, Genève : J-J Paschoud, 1824

⁷ Cotte, Michel. The invention of the cable made of numerous thin iron wires, OIPEEC, 2009

⁸ Verreet, Roland. A Short History of Wire Rope, Aachen: PRGmbH, 2002

⁹ Forestier-Walker, E.R. A history of the wire rope industry of Great Britain, London: 1952

¹⁰ Sayenga, Donald. Ellet and Roebling, 1983

¹¹ Sayenga, Donald. Washington Roebling's Father, ASCE Press, 2009

¹² Sayenga, Donald. Washington Roebling's Father, ASCE Press, 2009, page 189

¹³ Vicat, Louis. *Ponts suspendus en fil de fer sur le Rhône*, Paris : Annales des Ponts et Chaussées, 1831 1^{er} semestre, pages 93 à 144.

¹⁴ Vicat, Louis. Description du pont suspendu construit sur la Dordogne à Argentat, Paris: Carilland-Geoury, 1830

¹⁵ Vicat, Louis. *Nouvelle manière de confectionner des câbles en fil de fer*, Paris : Annales des Ponts et Chaussées, 1834 1^{er} semestre, pages 120 à 142.

¹⁶ Vicat, Louis. *Ponts suspendus en fil de fer sur le Rhône*, Paris : Annales des Ponts et Chaussées, 1831 1^{er} semestre, pages 110 à 113.

¹⁷ Savenga, Donald. Washington Roebling's Father, ASCE Press, 2009, page 152

¹⁸ Chute du pont suspendu de Broughton. Bibliothèque Universelle des Sciences Belles Lettres et Arts de 1831 – Tome II, pages 335 - 336

¹⁹ Rapport de la commission d'enquête nommée pour rechercher les causes et les circonstances qui ont amené à la chute du pont suspendu de la Basse-Chaine, Paris : Annales des Ponts et Chaussées, 1850 2^{eme} semestre, pages 394 à 411.

²⁰ Werner, Göran. John August Roebling – The Niagara Railway Suspension Bridge, 2006

²¹ Roebling, John August. *Final report to the Presidents and Directors of the Niagara Falls Suspension Bridge Company*, New York: Rochester, 1855.

²² Sayenga, Donald. Washington Roebling's Father, ASCE Press, 2009, page 152

²³ Sayenga, Donald. *Cement shoes – Niagara Folies*, Wire Rope News & Sling Technology, June 2015, August 2015, October 2015

²⁴ Wagner, Erica. *Chief Engineer*, Bloomsbury, 2017

²⁵ Buck Leiffret L. Report on the renewal of the Niagara suspension bridge, New York: C.W. Ames &Co, 1881

²⁶ Trennert, Robert A. *Riding the high wires*, University Press of Colorado, 2001

²⁷ Hilton, George W. *The cable car in America*, Stanford University Press, 1997

²⁸ Malézieux, Emile. *Travaux public des Etats-Unis d'Amérique en 1870*, Paris : Dunod , 1873

²⁹ Audition de Ferdinand Arnodin par la commission des ponts suspendus, Musée de la Marine de Loire

³⁰ Levy, Maurice. *Mémoire sur le calcul des ponts suspendus rigides*, Paris : Annales des Ponts et Chaussées, 1886 2^{eme} semestre, pages 179 à 247.

³¹ M. de Boulogne. *Notes sur la construction des ponts suspendus modernes*, Paris : Annales des Ponts et Chaussées, 1886 1^{er} semestre, pages 150 à 181.

³² Nicou. *Notes sur les ponts suspendus de Saint Ilpize et de Lamothe*, Paris : Annales des Ponts et Chaussées, 1886 2^{eme} semestre, pages 660 à 683.

³³ Levy, Maurice. *Mémoire sur le calcul des ponts suspendus rigides*, Paris : Annales des Ponts et Chaussées, 1886 2^{eme} semestre, pages 179 à 247

³⁴ Rapport au nom d'une commission spéciale instituée par décision ministérielle du 27 Aout 1885 pour l'étude de questions concernant les ponts suspendus. Annales des chemins vicinaux, Juillet 1889, pages 226 à 238

³⁵ Note 34: pages 232 et 233

³⁶ Note 34: pages 229

³⁷ Note 34 : pages 231

³⁸ Mawson Barry et Lark Bob, Newport Transporter Bridge – An historical perspective. Proceedings of ICE, 2000

³⁹ Rapport de l'ingénieur en chef, Pont transbordeur de Matrou, 1932.

Cet ouvrage présente notamment les erreurs suivantes :

Les ponts suspendus ont été utilisés en tant que pont ferroviaire dès 1855 aux Etats-Unis, bien avant l'invention du pont Gisclard.

La câbleuse présentée sur la photo en fin de l'ouvrage n'est pas celle de Ferdinand Arnodin, mais celle fabriquée en 1925 par l'entreprise Basile Baudin et Cie.

- ⁴¹ Huguet Fernand. Histoire de la société Baudin Chateauneuf, 1987 (Archives Brives) page 6
- ⁴² Trennert, Robert A. Riding the high wires, University Press of Colorado, 2001
- ⁴³ Hilton, George W. *The cable car in America*, Stanford University Press, 1997
- ⁴⁴ Verreet, Roland. A Short History of Wire Rope, Aachen: PRGmbH, 2002
- ⁴⁵ Sayenga, Donald. *Modern History of Wire Rope*, 1990
- ⁴⁶ Vicat, Louis. *Ponts suspendus en fil de fer sur le Rhône*, Paris : Annales des Ponts et Chaussées, 1831 1^{er} semestre, pages 110 à 113.
- ⁴⁷ Audition de Ferdinand Arnodin par la commission des ponts suspendus, Musée de la Marine de Loire, page 13
- ⁴⁸ Audition de Ferdinand Arnodin par la commission des ponts suspendus, Musée de la Marine de Loire, page 12
- ⁴⁹ Arnodin, Ferdinand. *Note sur les avantages des câbles à fils tordus sans ligatures comparés aux câbles à fils parallèles réunis en faisceaux par des ligatures*, 1894
- ⁵⁰ Sayenga, Donald. *Modern History of Wire Rope*, 1990
- ⁵¹ Le procédé de galvanisation tel que nous le connaissons aujourd'hui a été inventé en 1836 par l'ingénieur français Stanislas Sorel. Le brevet a été déposé en 1837. Le nom de « galvanisation » a été choisi pour faire honneur aux découvertes de Galavani (électricité métallique et protection cathodique).
- ⁵² Huguet Fernand. *Histoire de la société Baudin Chateauneuf*, 1987 (Archives Brives) page 6, note 3

⁴⁰ Leinekugel Le Cocq, Didier. Ingénieurs des ponts, Editions La vie du rail, 2010