HAL open science

Eiffel innovateur avant l'heure

Robert Jeansoulin

To cite this version:

Robert Jeansoulin. Eiffel innovateur avant l'heure. 2023, pp.28. hal-04496562

HAL Id: hal-04496562

https://hal.science/hal-04496562v1

Submitted on 8 Mar 2024

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Public Domain

EIFFEL INNOVATEUR AVANT L'HEURE

[1]

EIFFEL, NOTRE CONTEMPORAIN ?

EIFFEL INNOVATEUR ?

QUELLES LEÇONS[2] TIRER AUJOURD'HUI ?

[1] Timbre émis par La Poste le 23 mars 2023 pour le centenaire de la mort de Gustave Eiffel le 27 décembre 2023.
[2] Livret à vocation pédagogique, de transmission des savoirs en sciences et génie, mission commune aux trois partenaires qui le parrainent

Parrainage

ASSOCIATION FRANCAISE POUR L'AVANCEMENT DES SCIENCES (AFAS). Fondée en 1872, reconnue d'utilité publique en 1876, l'Association met en avant, dès ses débuts, des principes qui sont toujours d'actualité : rassembler des spécialistes de toutes disciplines, s'ouvrir au monde industriel, informer le public. L'AFAS joue alors un rôle éminent, comme en témoignent ses archives, qui constituent un corpus exceptionnel retraçant le progrès des connaissances. Les scientifiques se doivent de répondre aux interrogations du public : il ne s'agit pas seulement de vulgarisation, mais bien d'un véritable dialogue entre la communauté scientifique et les citoyens. Association indépendante, l'AFAS est à même de remplir sereinement le rôle de terrain neutre pour ce débat dont chacun reconnaît la nécessité.

INGENIEURS ET SCIENTIFIQUES DE FRANCE (IESF). La France compte aujourd'hui plus d'un million d'ingénieurs et de deux cent mille chercheurs en sciences. Par les associations d'ingénieurs et de diplômés scientifiques qu'il fédère, IESF est l'organe représentatif, reconnu d'utilité publique depuis 1860, de ce corps professionnel qui constitue 4% de la population active de notre pays. Parmi ses missions figurent notamment la promotion d'études scientifiques et techniques, le souci de leur qualité et de leur adéquation au marché de l'emploi ainsi que la valorisation des métiers et des activités qui en sont issues. A travers ses comités sectoriels, IESF s'attache ainsi à défendre le progrès, à mettre en relief l'innovation et à proposer des solutions pour l'industrie et pour l'entreprise. Notre profession s'inscrit pleinement dans le paysage économique et prend toute sa part dans le redressement national.

UNIVERSITE GUSTAVE EIFFEL. L'Université Gustave Eiffel est créée en 2020 sur un modèle innovant rassemblant pour la première fois en France le triptyque université/écoles/organisme de recherche. Fruit d'une histoire commune entre une université (Université Paris-Est - Marne-la-Vallée), un institut de recherche (Ifsttar), 3 écoles d'ingénieurs (ESIEE Paris, Ecole Nationale des Sciences Géographiques, Ecole d'Ingénieurs de la Ville de Paris) et une école d'architecture (École d'architecture de la ville & des territoires Paris-Est).

Remerciements

aux membres de « Eiffel-2023 » de l'IESF : Jean-François Coste, Michel Coureau, Marie-Claude Ponchon, Jean-Pierre Rozelot, Patrice Selosse, pour le travail d'information, de partage et de correction dans la réalisation de ce document et pour leur enthousiasme et leur amitié. Merci aux directions de IESF, de l'AFAS, et de l'Université G. Eiffel pour leurs encouragements à le publier.

Robert Jeansoulin *(Ingénieur ENSEEIHT, PhD, ex-DR émérite CNRS, ex-enseignant à l'Université G.Eiffel)*

Table des matières

Introduction 5
Innovation : le mot dans son évolution historique 5
Eiffel et « les grandes constructions métalliques » : il énumère lui-même les défis affrontés 5
(1). G. Eiffel et le « fonçage par pression hydraulique des piles » 7
Le problème des fondations dans l'eau 7
Compresseurs à air comprimé 7
Invention de Triger 7
Eiffel démarre sa carrière avec l'air comprimé 8
(2). Eiffel et l'assemblage sur chantier 9
L'idée de bâtiments préfabriqués 9
Eiffel et la préfabrication 9
Le rivetage à chaud 10
Le pont de Bordeaux dans la carrière de Eiffel 10
(3). Eiffel entre fer et acier : adaptation aux contraintes 11
Fonte, fer puddlé et acier. 11
Caractéristiques techniques 11
Les choix de Eiffel, diplômé de chimie de l'Ecole Centrale en 1855. 12
(4). La « Liberté éclairant le Monde » : questions « d'interfaces » 13
La Statue de la Liberté 13
L'interface armature - piédestal 13
L'interface armature – peau de la statue 13
L'interface fer – cuivre entre l'armature et la peau de la statue 14
(5). Eiffel concepteur de « prêt-à-ponter » 15
L'idée des ponts montables / démontables 15
« Ponts portatifs économiques, système Eiffel » 15
(6). Hornby / Eiffel : the construction in kit takes the name of Meccano 17
The Hornby-Eiffel (from a distance) story. 17
Meccano and the Frenchies, from workers to engineers: a love story 17
(7). La Science au service de l'Ingénierie et réciproquement 19
Aérodynamisme : les débuts entre expérimentation et science 19
Résistance de l'air : de « l'appareil de chute » à la « chambre Eiffel » 19
La soufflerie Eiffel, de la Tour à Auteuil et toujours en activité 20
(8). Eiffel la télégraphie et la météo 21
Télégraphie et Météorologie scientifique 21

La Tour Eiffel sauvée par la Télégraphie et la Météorologie..... 21
(9). Le prototype d'avion « LE » du Laboratoire Eiffel 23
Les débuts de la conception aéronautique 23
L'avion « LE » du « Laboratoire Eiffel » 23
Un destin malheureux mais une conception qui deviendra la règle..... 24
(10). Eiffel l'esthète..... 25

Conclusion : la figure d'Eiffel aujourd'hui : un exemple communicatif..... 28

Introduction

Durant sa longue et riche carrière, Gustave Eiffel est considéré -ou se présente lui-même- comme ingénieur, architecte, ou constructeur, selon les chantiers et son rôle dans les contrats. Il devient patron entrepreneur dès la création de son entreprise et reste ou redevient un scientifique en fin de carrière.

Ce qui définit une « époque », outre les changement sociaux et les nouveautés technologiques, c'est aussi le vocabulaire. Le mot « innovation » n'avait pas alors l'usage qu'il a aujourd'hui.

Si « *innover c'est introduire quelque chose de nouveau pour remplacer quelque chose d'ancien dans un certain domaine* » (Larousse), avoir une carrière d'innovateur, c'est cultiver l'art de tirer parti de toute nouveauté pour réaliser des produits ou des processus de fabrication inédits, améliorés en termes de services rendus, de performances ou d'exécution. Cet opportunisme intelligent, flair d'opportunités mais aussi de recrutement d'ingénieurs de talent, et sa vision à long terme, sont ce que nous retenons de la carrière de Gustave Eiffel dans cette publication.

« Ingénieurs et Scientifiques de France » (IESF), issu de la « Société des Ingénieurs Civils de France », présidée par Gustave Eiffel lors de l'inauguration de sa Tour, a pris l'initiative de cette sélection de facettes de l'œuvre d'Eiffel, revues au prisme du vocabulaire actuel, en accord avec l'Association Française pour l'Avancement des Sciences (AFAS) et l'Université Gustave Eiffel (UGE).

Innovation : le mot dans son évolution historique

Le mot ***innovation*** connait une inflexion[3] dans son usage et sa signification dans les années 1960.
Il semble pertinent de relire la carrière d'Eiffel sous l'angle de cette inflexion.

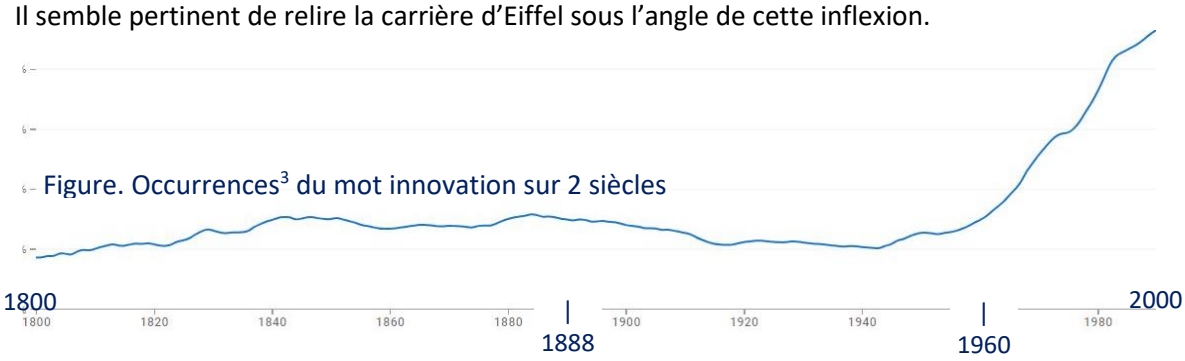


Figure. Occurrences[3] du mot innovation sur 2 siècles

Eiffel et « les grandes constructions métalliques » : il énumère lui-même les défis affrontés

En 1888, Gustave Eiffel, présente un panorama[4] des progrès mondiaux dans la construction (ponts, charpentes, ouvrages portuaires, sous-marins, navires …) et parle des défis rencontrés par les ingénieurs. En voici une liste, restituée selon la chronologie de ses réalisations :

- Les fondations sous-marines : sa première conduite d'un chantier important (Bordeaux) ;
- Préparation en atelier, assemblage et rivetage sur chantier : planification ;

[3] occurrences fournies par « *Google Books Ngram Viewer* » sur leur corpus français entre 1800 et 2000.
[4] Eiffel, G. *Les grandes Constructions Métalliques*. Comptes Rendus de la 17ème session de l'Association Française pour l'Avancement des Sciences. Conférence du 10 mars 1888, pp. 68-81.
https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k2011682/f186.item

- Fonte, Fer, Acier : p.69-70 il vante l'élasticité (« *incomparable supériorité du métal »*) et la légèreté du fer vis-à-vis de la pierre : « *j'ai étonné plus d'une personne qui s'inquiétait de la charge* [*de la Tour*] *sur le sol, en disant qu'il ne serait pas plus chargé que celui d'une maison de Paris* ». Il clame sa confiance dans les progrès qui feront de « *l'acier le métal de l'avenir* ».
- Ponts lancés et piles métalliques : innovations dans la conception des chantiers ;
- Préfabrication et précision : industrialisation, économies d'échelle ;
- Météorologie et Télégraphie : ouverture sur les nouveautés de l'époque.
- … nous y ajoutons les interfaces chimiques et la corrosion, l'aérodynamique et l'aéronautique, … et l'esthétique, non mentionnées dans sa liste.
- … et il faudrait ajouter : la première pile métallique pour un pont (Viaduc de Rouzat), la maitrise du procédé de construction par lancement incrémentale (Viaduc de la Tardes), la suspension flottante de la coupole de l'Observatoire de Nice…

Au moment de cette conférence devant l'AFAS, Eiffel est vice-président de la Société des Ingénieurs Civils de France (aujourd'hui IESF). Il a terminé le premier étage de la « Tour » et déclare que les difficultés principales sont désormais passées. Il est élu Président[5] de la Société des Ingénieurs Civils en 1889, année de l'Exposition du Centenaire de la Révolution. Il en sera ultérieurement nommé Président d'Honneur.

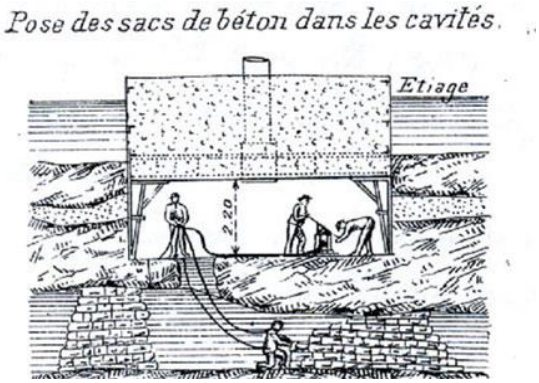
Lectures complémentaires proposées :
Un passionnant résumé historique[6] de « l'Entreprise Eiffel » et une liste chronologique de ses œuvres[7].

[5] Durville, J-L. et Pilot, G. (2023). https://www.iesf.fr/offres/doc_inline_src/752/Gustave+Eiffel+1889-final.pdf
[6] Lemoine, B. (1995). *L'Entreprise Eiffel*. Histoire, économie & société, 14-2 pp. 273-285. https://www.persee.fr/doc/hes_0752-5702_1995_num_14_2_1773
[7] Barral, G. (1891) with list: https://www.wonders-of-the-world.net/Eiffel-Tower/Gustave-Eiffel.php

(1). G. Eiffel et le « fonçage par pression hydraulique des piles »

Le problème des fondations dans l'eau

L'objectif est d'enfoncer progressivement un caisson métallique à travers des couches de terrain de mauvaise qualité (argiles, sables ...) jusqu'à atteindre le sol de fondation apte à recevoir la charge de l'ouvrage, en maintenant dans le caisson une pression supérieure à la pression hydraulique de l'eau de façon à permettre aux ouvriers de travailler à sec. Au fur et à mesure que les ouvriers creusent, le caisson chargé en tête s'enfonce. Arrivé au niveau de sol choisi, le caisson est rempli de maçonnerie.



Cette technique[8] est utilisée pour les fondations des piles de pont à la fin du XVIIIème siècle (image).

Compresseurs à air comprimé

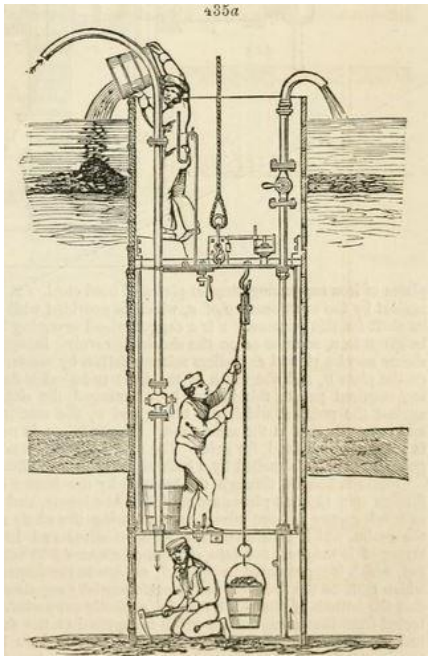
L'apparition des compresseurs à air comprimé[9] commandés par des machines à vapeur au cours du XIXe, introduit une amélioration considérable. C'est en 1851, pour le pont de Rochester en Angleterre, qu'elle est employée pour la première fois pour réaliser des fondations.

Invention de Triger

Le procédé Triger est une amélioration de cette technique de creusement, fondée sur l'utilisation d'un caisson, inventée par l'ingénieur français Jacques Triger dans les années 1840. Il la met au point pour les piles d'un pont sur la Loire.

L'illustration ci-contre[10] montre les trois compartiments du cylindre Triger : le compartiment intermédiaire sert de sas pour l'air comprimé destiné au compartiment de travail dans le lit du fleuve.

Au début du XXème siècle, ce procédé est abandonné car doublement dangereux pour les ouvriers : par le risque de venues brutales d'eau appelées « renards » si on rencontre une nappe d'eau sous pression, ou le risque d'accidents de décompression mal gérée lors d'une remontée trop rapide[11].



[8] Henri Blerzy. Les Fondations par l'air comprimé. La Nature - Revue des sciences, nos 1 à 26, 1873 (p. 148-151). https://fr.wikisource.org/wiki/Les_Fondations_par_l%E2%80%99air_comprim%C3%A9
[9] https://www.planete-tp.com/les-xixe-et-xxe-siecles-a1052.html
[10] https://www.planete-tp.com/caissons-a-air-comprime-a233.html
[11] https://www.planete-tp.com/IMG/pdf/conditions_travail_caissons_cle2f6b11-1.pdf

Eiffel démarre sa carrière avec l'air comprimé

Dès son premier ouvrage important, la Passerelle de Bordeaux en 1858, Eiffel utilise l'air comprimé pour réaliser les fondations des piles dans la Garonne[12]. Il vient d'être embauché par l'Entreprise de Charles Nepveu : a 26 ans il n'a alors travaillé que sur un pont de petite taille, c'est son premier vrai chantier.

Il s'inspire de Triger pour rédiger cette étude : « *Le fonçage par pression hydraulique des piles* » :

il perfectionne le procédé Triger, en coulant des colonnes en fonte de 25 mètres de haut, qu'il transporte sur place comme des bûches flottantes après en avoir obturé les deux extrémités. Une fois redressées à la verticale, elles sont coulées au fond du fleuve et enfoncées au moyen de vérins hydrauliques après avoir été transformées en enceintes pressurisées pour faciliter le travail de creusement sans infiltrations d'eau jusqu'à l'atteinte du sol résistant[13].

La maîtrise de ces techniques permet un chantier rapide (moins de 2 ans) et moins onéreux, ce qui lui assure une première renommée.

Eiffel y aura recours à plusieurs reprises, notamment pour les deux piliers de sa Tour, côté Seine.

Ci-contre[14], les caissons à air comprimé pour les fondations des piliers nord et est de la Tour Eiffel, dont la profondeur se situe sous le niveau de la Seine.

A noter que la Tour pèse 10000 tonnes et ne s'est jamais enfoncée depuis deux siècles.

A noter aussi qu'il n'y a eu aucun accident mortel du travail sur le chantier principal. Le seul mort à déplorer ce fut durant les travaux d'installation de l'ascenseur Roux-Combaluzier.

[12] Ananth Ramaswamy. Alexandre Gustave Eiffel: An Engineer Scientist. In *Resonance-Journal of Science Education*, **14**, 9. Sept. 2009, pp 840-848. https://www.ias.ac.in/article/fulltext/reso/014/09/0840-0848

[13] https://anabf.org/pierredangle/dossiers/les-ponts/gustave-eiffel-le-constructeur-de-lextreme

[14] https://www.musee-orsay.fr/fr/oeuvres/travaux-de-construction-de-la-tour-eiffel-caisson-metallique-air-comprime-larriere-plan-au-centre-le-trocadero-66017

(2). Eiffel et l'assemblage sur chantier

L'idée de bâtiments préfabriqués

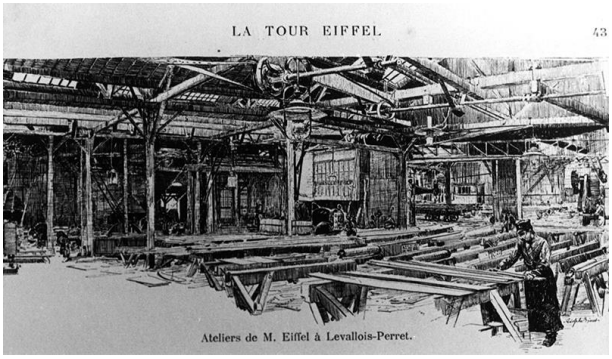
Les principes de *division du travail*, de *traitement continu* et de *pièces interchangeables* sont introduits dans le monde industriel vers 1830[15], pour aboutir aux chaines de montage automatisée vers 1870, début de la seconde révolution industrielle[16]. Dans le domaine de la construction, en dehors des habitats mobiles des populations nomades, l'idée de « *pièces préfabriquées* » apparait en 1837 pour les maisons destinées aux émigrants anglais en Australie, avec un pic d'exportation en 1853[17]. Le matériau est le bois, mais l'idée de la production d'éléments de construction en série est lancée.

La notion de *pièces interchangeables* permet la production en série, qui permet des économies d'échelle par la spécialisation des postes de travail. Intermédiaire entre la production en (grande) série et la production sur mesure (individuelle), est identifiée la production par lot[18].

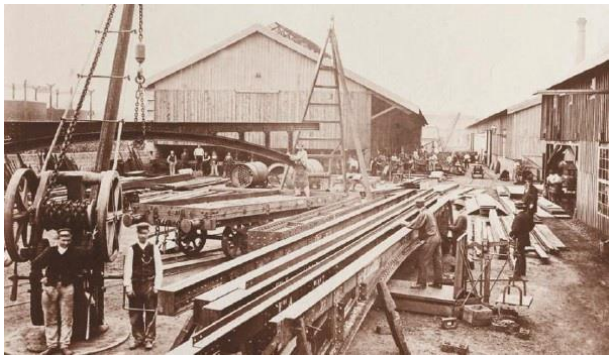
La soudure à l'arc n'existe pas encore (il faut attendre 1890[19]), le seul moyen d'assembler des pièces métalliques n'est possible que par l'invention du rivet, équivalent au clou pour la menuiserie et fabriqué par les mêmes forges, comme celle des Etablissements Dervaux[20] qui ont fourni les 2,5 millions de rivets de la Tour Eiffel (image ci-contre).

Eiffel et la préfabrication

Pour les ouvrages en maçonnerie ou en bois, l'essentiel de la construction se fait sur place à partir de matériau brut. Ce n'est plus le cas avec le métal qui nécessite un usinage important. Les ateliers de Eiffel à Levallois-Perret (images des années 1880) donnent une idée de l'importance de l'usinage nécessaire.



@ https://www.toureiffel.paris/



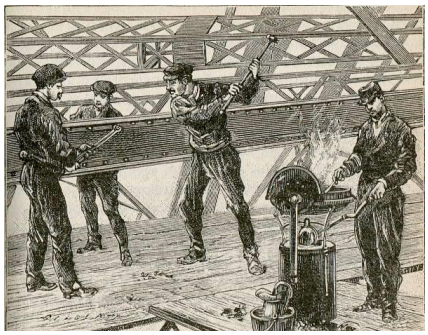
@ https://fr.ulule.com/tour-eiffel/

Dès son premier ouvrage, en 1858, Eiffel, qui travaillait chez Charles Nepveu, est confronté à ce problème : le transport de pièces fabriquées en région parisienne pour être assemblées à Bordeaux impose un coût et des délais. L'idée est de pré fabriquer les pièces, de taille transportable, et de réaliser un minimum d'assemblage sur place. Contrainte : une qualité de haute précision.

---

[15] https://www.encyclopedia.com/science-and-technology/technology/technology-terms-and-concepts/assembly-line
[16] https://ushistoryscene.com/article/second-industrial-revolution/
[17] https://builtoffsite.com.au/news/prefab-heritage/
[18] https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/batch-manufacturing
[19] https://www.millerwelds.com/resources/article-library/the-history-of-welding
[20] https://www.chavcr.com/histoire-des-ets-dervaux/

Le rivetage à chaud



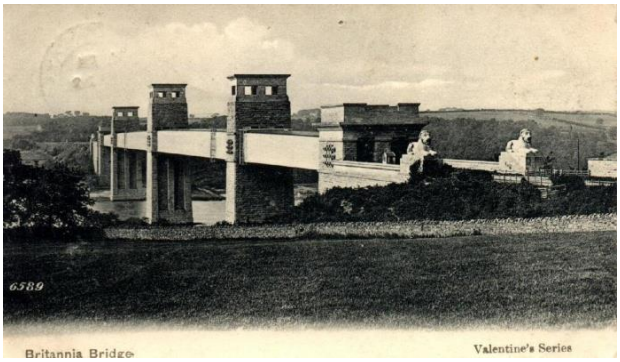
La majorité des rivets doit être posée durant la préfabrication car la seule possibilité pour poser des rivets sur place est la forge portative : c'est l'idée du « rivetage à chaud ». La forge portative est de petite taille. La seule contrainte est de s'assurer d'une très grande précision en préfabrication : les ouvriers travaillent au dixième de millimètre.

Ci-contre (image Bnf) : brigade de 4 ouvriers et leur forge portative sur la chantier de la Tour. Sur 2,5 millions de rivets, seuls 800000 sont rivetés sur place.

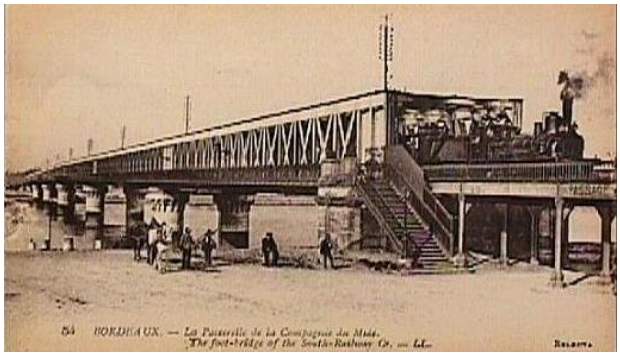
Cette technologie est encore pratiquée de nos jours, lors de la restauration des ouvrages anciens de la fin du XIXe siècle, notamment pour le viaduc de Garabit ou la gare Matabiau[21] (vidéo ci-dessous).

Le pont de Bordeaux dans la carrière de Eiffel

Charles Nepveu, admirateur du Britannia Bridge construit en 1850 par Robert Stephenson au Pays de Galles (Bangor), confie le chantier au jeune Eiffel. La forme tubulaire à section carrée est la même, mais au lieu des tôles pleines de Stephenson (Fig.gauche), Eiffel utilise des contreventements en croix de St. André, similaires à ceux d'un autre Centralien, Camille Polonceau vers 1840[22], et qui le suivront tout le long de sa carrière. Il ne cessera jamais de les améliorer pour des raisons de résistance de l'air : il multiplie les croisillons métalliques pour remplacer les parties pleines qui offrent trop de prise au vent.



@ https://structurae.net/en/structures/britannia-bridge



@ https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3852318

[21] https://lesyeuxcarres.com/portfolio/marquise-de-gare-matabiau/
[22] https://fr.wikipedia.org/wiki/Camille_Polonceau

(3). Eiffel entre fer et acier : adaptation aux contraintes

Fonte, fer puddlé et acier.

La fonte[23], connue depuis l'antiquité en Chine, introduite au XIVe en Europe, est produite à une température de 1200°. Trop fragile pour construire des bâtiments à cause des impuretés.

Le « puddlage » (brassage)[24], inventé par Henry Cort en 1784, débarrasse la fonte des impuretés à la température de fusion : 1538°.
Ci-contre, le puddleur brasse la fonte à l'aide d'un crochet appelé « ringard » qui « exige des efforts rudes dans des conditions fatigantes ».

© passerelles.essentiels.bnf.fr

En 1851, le Crystal Palace de Londres est bâti en un temps record pour la première Exposition universelle, ce qui popularise l'architecture de fer.

L'acier[25], découvert par Benjamin Huntsmann vers 1745, n'est produit à échelle industrielle qu'après l'invention du procédé Bessemer en 1856. Jusqu'en 1880 l'acier est encore trop cher et trop peu étudié. Aujourd'hui on parle plutôt "*des aciers*" car il existe des variétés pour divers usages.

Caractéristiques techniques

Fonte, fer puddlé ou acier ne sont pas un élément chimique pur (100% Fe) mais un mélange avec des éléments, dont le carbone, qui modifient la structure microscopique du produit et influencent :

- La résistance en compression : capacité à supporter le poids de la construction sur elle-même ;
- La résistance en traction[26] : élasticité, flexibilité aux efforts, mesurée par la force qu'il faut exercer pour déformer le métal de 0.2% : indice *Rp0.2* ;
- La résistance à la corrosion[27] : réaction au contact de l'air (oxygène, polluants) ou d'un autre métal,
- La dilatation selon la température.

. ***La fonte*** (carbone : 2.5 < **C** < 6%) est résistante en compression, à la corrosion, faible dilatation thermique, mais elle est trop cassante (*Rp0.2* trop faible).
. ***Le fer puddlé*** (**C** <0.1%) présente une alternance de scories et d'oxydes au milieu de fer presque pur. Résistant en compression ; en traction (*Rp0.2* trois fois meilleur que la fonte, mais inférieur à l'acier) ; il est sensible à la corrosion à cause des inclusions.

Corrosion du fer en présence d'humidité :

1. ionisation :

$Fe \rightarrow 2\ e^- + Fe^{++}$ *ion ferreux*

$Fe^{++} \rightarrow e^- + Fe^{+++}$ *ion ferrique*

2. combinaison avec air humide:

$Fe^{++} + 2(OH^-) \rightarrow Fe(OH)_2$ *hydroxyde ferreux*

$Fe(OH)_2 + O_2 \rightarrow Fe(OH)_3$ *hydroxyde ferrique = rouille*

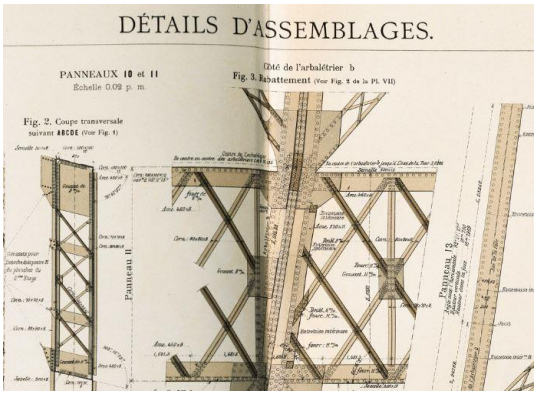
---

[23] Henri Blerzy. La Métallurgie du fer et de l'acier. La Nature - Revue des sciences, 1, nos 1 à 26, 1873 (p. 184-186). https://fr.wikisource.org/wiki/La_M%C3%A9tallurgie_du_fer_et_de_l%E2%80%99acier_proc%C3%A9d%C3%A9_Siemens
[24] https://passerelles.essentiels.bnf.fr/fr/ >> Le métallier >> Fer forgé et fer battu, le procédé de puddlage
[25] https://notech.franceserv.com/materiau-acier.html
[26] https://materion.com/-/media/files/alloy/newsletters/technical-tidbits/issue-no-47---yield-strength-and-other-near-elastic-properties.pdf
[27] https://notech.franceserv.com/corrosion.html

. ***Les aciers*** (0.1 < **C** < 2%) sont plus légers, plus élastiques, mais mal calibrés à l'époque de Eiffel, qui écrit en 1888 : «*La fabrication de l'acier est très délicate, et ce n'est que ces dernières années qu'on est arrivé à produire un métal qui réponde parfaitement aux qualités spéciales que l'on exige de lui. [ ] On peut, je crois, dire sans se tromper que l'acier est le métal de l'avenir*. ».

Les choix de Eiffel, diplômé de chimie de l'Ecole Centrale en 1855.

Eiffel est formé à l'étude de la composition chimique des matériaux. Il étudie le fer puddlé et en déduit ses paramètres physiques avec précision. Il écrit : « *à surface égale, le fer est dix fois plus résistant que le bois et vingt fois plus résistant que la pierre* ». C'est son matériau privilégié pour la Tour[28].



© passerelles.essentiels.bnf.fr

Il joue la sécurité avec le fer puddlé[29], plus lourd que l'acier mais résistant en compression : un bon choix pour supporter les 10000 tonnes de la structure de la Tour et des aménagements, selon ses calculs démarré dès 1883.

Il calcule les paramètres de traction et la résistance de l'air par grand vent, que peut supporter sa structure. Il est sûr de lui, confiant dans la nouvelle *Science de la résistance des matériaux*, qui lui permet à la fois d'alléger sa structure et de la rendre moins sensible aux efforts de traction, ce qui compense un faible coefficient *Rp0.2*.

Il sait par contre que la corrosion finira par s'installer dans le fer puddlé et choisit avec soin l'indispensable peinture protectrice[30] (en souvenir de la société de peinture de son oncle ?)

Il anticipe l'avenir lointain : il recommande que la Tour soit repeinte tous les sept ans (cf. image de gauche). Ce qui est le cas depuis et pour la 19e fois cette année 2023, avec 60 tonnes de peinture, rouge comme à l'origine, après décapage de plus de 30 tonnes des anciennes couches.

Eiffel commence à utiliser l'acier pour les ponts « provisoires » du Morbihan en 1885, puis pour les ponts portatifs, vendus à l'armée française pour les colonies (notamment au Viet Nam), car l'acier, plus léger est un avantage pour leur transport.

L'incertitude sur les calculs de résistance des matériaux, pour cet acier, n'est pas un problème majeur pour des ponts aux contraintes simples et de portée limitée (rarement au-delà de 50 mètres).

Il adapte ainsi ses choix selon les objectifs assignés à ses produits dans une perspective de temps long.

[28] https://metalblog.ctif.com/2021/10/25/la-structure-en-fer-puddle-de-la-tour-eiffel/
[29] https://www.merveilles-du-monde.com/Tour-Eiffel/Fer-de-la-tour-Eiffel.php
[30] https://www.eiffeltowertour.com/blog/eiffel-tower-paint-jobs-a-colorful-history-and-its-new-shade/

(4). La « Liberté éclairant le Monde » : questions « d'interfaces »

La Statue de la Liberté

Trois maîtres d'œuvre pour trois ouvrages :

- Bartholdi, sculpteur de la « peau » extérieure en cuivre,
- Morris Hunt, architecte du piédestal,
- Eiffel concepteur de la structure intérieure en fer forgé.

Deux interfaces :

- armature-piédestal : piliers de Eiffel de 30 mètres,
- armature-peau : rubans et cavaliers « isolants » de Eiffel

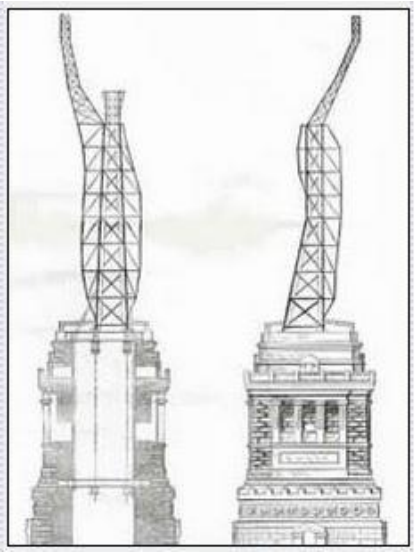


Fig.1. Interface Support / Piédestal[32]

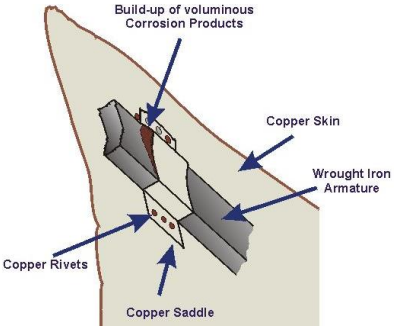


Fig.2. Interface cuivre / fer[31]

Fig.3. détail des fixations

L'interface armature - piédestal

L'armature est bâtie autour d'une tour centrale à quatre piliers en fer (Fig.1 gauche) qui doivent aussi supporter le poids de la peau en cuivre, répartir les efforts de sa conception asymétrique et résister aux tractions et torsions d'une importante superficie (non représentée dans Fig.1) soumise à la résistance de l'air. Ils s'enfoncent de 28 mètres dans le béton du piédestal (le béton était d'un usage nouveau à cette époque) et sont réunis à des poutres en fer disposé en carré horizontal à la base (visible dans Fig.1 gauche).

L'interface armature – peau de la statue

L'interface entre l'armature métallique, construite autour du squelette central pour s'approcher du dessin général de la statue, et la « peau » en cuivre de cette statue, pose deux types de problèmes.

Le premier problème de l'interface armature-peau est celui de la fixation « souple ». La peau extérieure de la statue, constituée de 350 plaques de cuivre (épaisseur 2,5 mm), rivetées entre elles à leur jointure, forme un tuilage continu d'une superficie importante. La pression exercée par des vents violents dans cet estuaire commun à l'Hudson et East River est souvent considérable. Les ponts d'Eiffel sont formés de treillis très ouverts : « le vide est plus solide que le plein », dit-il depuis son premier pont à Bordeaux. Mais dans le cas de la Statue, il doit inventer autre chose. Sa solution est de soutenir chaque plaque de cuivre par un ruban métallique en fer (5cm de large). Ces rubans sont inclinés vers le haut à 60° et agissent comme des ressorts, permettant à la tunique en cuivre de plier sans être endommagée par des vents violents ou des fluctuations extrêmes de température. Ainsi « flotte » la tunique de la liberté, afin de soulager sa structure interne : à la tête de la statue les fluctuations latérales peuvent être de ±10 cm.

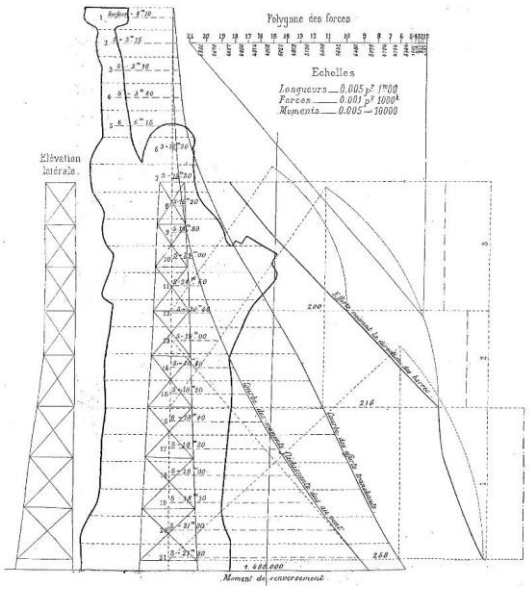
[31] https://corrosion-doctors.org/Landmarks/statue-construction.htm
[32] https://www.copper.org/education/liberty/

L'interface fer – cuivre entre l'armature et la peau de la statue

L'autre problème, déjà connu à cette époque, est celui de la corrosion galvanique. Le contact entre le cuivre et le fer, deux métaux ayant des conductivité électriques différentes, provoque une corrosion à la suite d'une exposition prolongée à un électrolytique (eg. eau salée). Il faut donc les isoler au maximum. La solution imaginée par Eiffel est d'utiliser des « cavaliers » en cuivre fixés par des rivets en cuivre sur la peau en cuivre, afin de plaquer les rubans en fer, entourés d'isolants (Fig.2). Il y a 1500 cavaliers (*U-shaped copper saddles*) et 300000 rivets de cuivre (Fig.3).

Lors du remontage de la Statue à New York, Eiffel reprend la suggestion d'ingénieurs américains d'utiliser comme isolant de l'amiante engluée dans de la gomme-laque (les matières plastiques n'existent pas !) pour protéger chaque fixation. Un autre avantage des cavaliers est de permettre aux deux métaux de se contracter ou s'étirer indépendamment, car ils n'ont pas la même inertie thermique.

Reproduction d'un croquis synthétique de Eiffel pour démontrer que la résistance des barres de sa structure est suffisante (6kg) pour supporter les vitesses de vent considérées. Photographie de la statue construite à Levallois-Perret, avant d'être démontée pour son transport à New York.



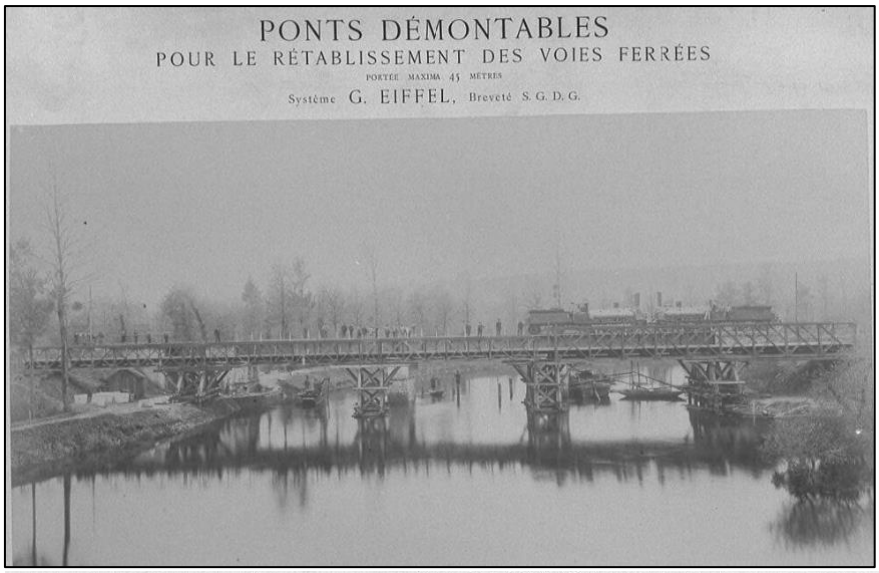
En 1984, un siècle après son inauguration, un travail de restauration est entrepris, notamment avec la participation de American Society of Civil Engineers ASCE. Les rubans, avec leurs cavaliers et rivets, sont tous remplacés, par groupes de 4 afin de conserver la solidité de la structure. Le chantier dure jusqu'en 1986. L'amalgame d'amiante et gomme-laque est remplacé par du téflon.

Sources :
parc national : https://www.nps.gov/stli/learn/historyculture/alexandre-gustave-eiffel.htm
tout sur le cuivre de la statue : http://www.copper.org/education/liberty/
sur le financement : https://www.history.com/news/statue-of-liberty-funding-pulitzer
details : https://www.wonders-of-the-world.net/Statue-of-Liberty/Construction-of-the-statue-of-Liberty.php
aussi : https://intrans.iastate.edu/news/why-should-i-care-statue-of-liberty-without-construction-workers/
rare : https://twistedsifter.com/2013/05/rare-photos-of-the-statue-of-liberty-under-construction/
ASCE-restoration : https://www.ascemetsection.org/committees/history-and-heritage/landmarks/statue-of-liberty

(5). Eiffel concepteur de « prêt-à-ponter »

L'idée des ponts montables / démontables

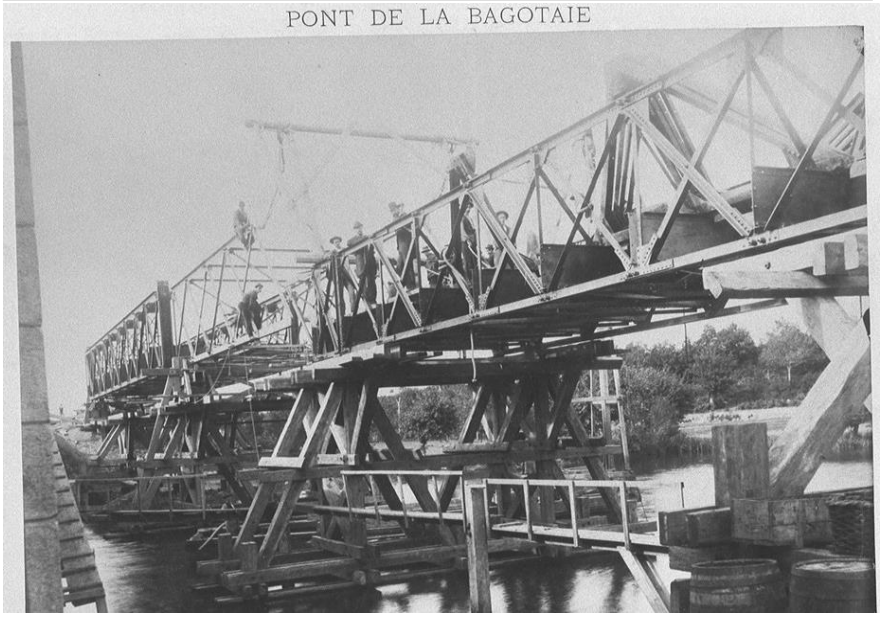
Eiffel reçoit une commande de l'armée pour construire en 1868 à Verdun[33] la structure d'une gare « facilement démontable ». Quand la Compagnie d'Orléans lui commande 3 ponts provisoires, il imagine une solution réutilisable, qui lui permette de récupérer la majorité des pièces pour des ponts ultérieurs.



Ponts démontables pour la déviation provisoire de la ligne de Questembert à Ploërmel, de la Compagnie des Chemins de Fer d'Orléans (chantier de M. Liébeaux ingénieur).

Test d'un convoi de 75 tonnes, en 1885 : les déformations constatées sont insignifiantes.

@ https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b12002084/f5.item



Pont de la Bagotaie, les détails de la construction, rendent la structure mieux visible.

@ https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/btv1b12002084/f2.item

« Ponts portatifs économiques, système Eiffel »

Au Vietnam Eiffel fournit à l'armée française le matériel pour 19 ponts portatifs, présentés par l'ingénieur Colin dans la « communication sur leur application en Cochinchine et au Tonkin »[34].

[33] https://fr.wikipedia.org/wiki/Gare_de_Verdun
[34] https://cnum.cnam.fr/PDF/cnum_ECCMC6.49.pdf pages 36-51

L'assemblage ci-contre est réalisé à partir des pièces :

. éléments courants

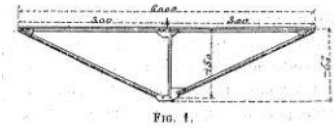


Fig. 1.

. éléments d'extrémités

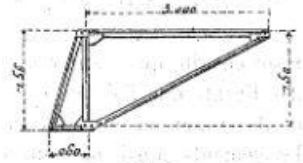


Fig. 2.

. éléments transversaux (« pièces de pont »)

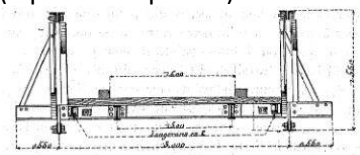


Fig. 7.

. boulons coniques

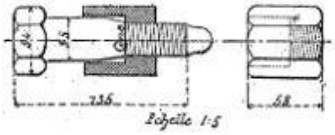


Fig. 6.

Formation d'une poutre (fig. 3). — Pour concevoir la formation d'une poutre avec ces éléments et ces tirants, il suffit d'imaginer une

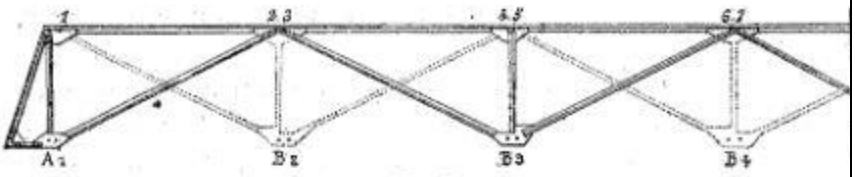


Fig. 3.

première file d'éléments placés à la suite les uns des autres, dont les cornières sont toutes tournées du même côté. Nous aurons ainsi derrière ces éléments une surface plane, sur laquelle nous vien-

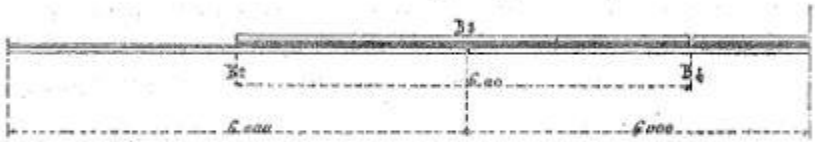


Fig. 4.

drons appliquer une seconde file d'éléments, disposés comme les autres, mais retournés et placés de manière que chaque élément de cette seconde série recouvre les joints de la première.

On donne à la poutre la longueur désirée et on termine ses deux bout par un élément d'extrémité. Pour compléter la poutre, il ne

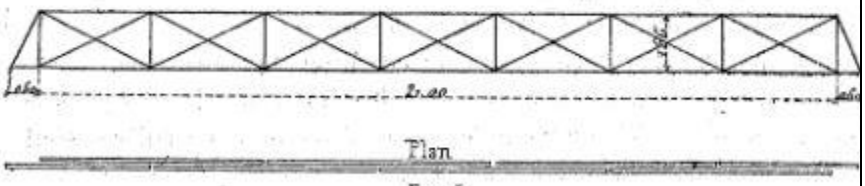


Fig. 5.

reste ensuite qu'à réunir les sommets inférieurs des éléments par des tirants que l'on dispose en entrecroisant les joints, de sorte qu'ils se marient entre eux sur la moitié de leur longueur comme les éléments, ainsi que cela est indiqué figures 4 et 5.

Eiffel innove[35] à plusieurs titres : (1) il utilise l'acier plus léger pour le transport sur routes difficiles et dans un contexte de tractions peu sévères ; (2) il facilite l'assemblage avec des boulons coniques au lieu de rivets ; (3) le guide de montage est simple, avec peu de pièces différentes ; (4) le caractère modulable permet de s'adapter à des portées variables, multiples de 3m. De 27m à 78m pour le pont de Sông-Hóa.

Pont ferroviaire actuel de Bac Giang, sur la même ligne, qui garde la structure originale de Eiffel. Deux travées de 21 m.

[35] Le Masson P. , Weil B. 2010. La conception innovante comme mode d'extension et de régénération de la conception réglée : expériences oubliées. https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-00696132

(6). Hornby / Eiffel : the construction in kit takes the name of Meccano

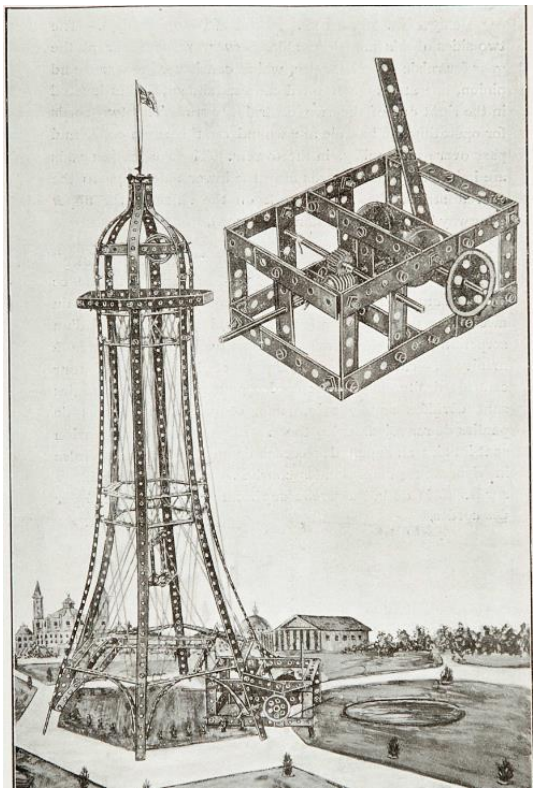
(cet article est écrit dans la langue de Hornby clin d'œil aux métallos de Calais ou d'ailleurs qui fabriquent les pièces Meccano qui ont enchanté les enfants de tout âge depuis plus d'un siècle et dont l'usine ferme en cette fin 2023)

Meccano is a brand of model construction system created in 1898 by Frank Hornby in Liverpool, England. Reusable metal strips, plates... with nuts and bolts, to enabling the building of working models and mechanical devices, ... the first toys were marketed in 1901 (did Eiffel grandsons play with Meccano?).

In 2013, the Meccano brand is acquired by the Canadian toy company Spin Master. Meccano maintains a manufacturing facility in Calais, France, since 1954. Unfortunately, Spin Master decides to shut down the Calais factory, by October 2023[36].

The Hornby-Eiffel (from a distance) story.

The Eiffel Tower is inaugurated in 1889, for the Centenial of the French Revolution. "Mechanics Made Easy" (original name of Meccano) is created nine years later, and the first catalog of models proposes a "Model of Tower" of a somehow familiar shape with the Union Jack floating over.



That 1904 Catalog is bilingual French-English (funny with French accents added by hand).

In 1908, the Catalog counts many more models, one being entitled "*Model of Eiffel Tower*" : Hornby is 45, Eiffel 76.

Meccano and the Frenchies, from workers to engineers: a love story

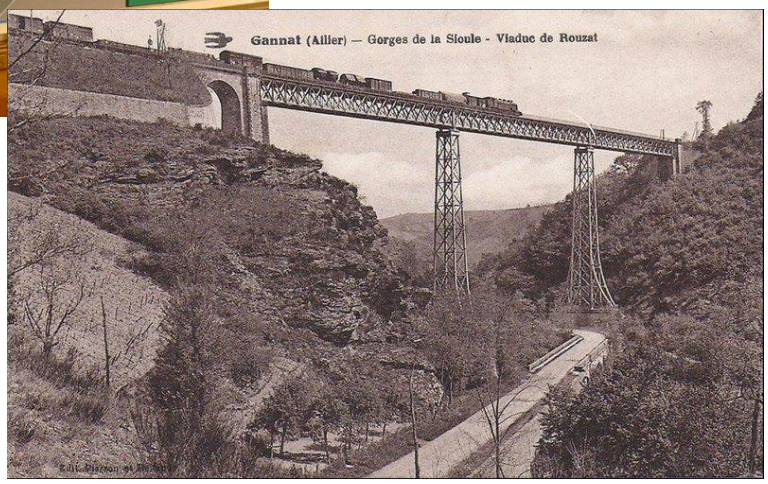
The name Meccano is believed to come from an amalgam of "make and know". It requires planning and to developing skills to projection in space. Meccano toys were sold in France to kids from a broad social range: from worker families to highly educated families.

[36] https://www.theguardian.com/world/2023/feb/23/last-dedicated-meccano-factory-to-close-in-france

Many French engineers, long after their childhood, are still passionate in the challenging construction of large-format Meccano mock_ups of Eiffel works. Here are two outstanding examples.

Viaduc de Rouzat (Auvergne, France). Built 1869, by the recently created Société Eiffel & Co, and supervised by Thierry Seyrig, the Eiffel associate. For the first time, Eiffel uses metal for the construction of the piles of the bridge.

Left: the Meccano model , to be compared with the old postcard (right)



Right: Gannat (Allier) Gorges de la Sioule. Viaduc de Rouzat).

And, of course: the Tour Eiffel (left):

Meccano model, by a "centralien", exhibited in the "Eiffel Building" of the Ecole Centrale-Supelec, in Saclay (June 2023).

Gustave Eiffel is a graduate engineer from the *Ecole Centrale*.

Remembering Eiffel passing away (1923-12-27)

The Council of "*Ingénieurs et Scientifiques de France*", direct heir of the *Société des Ingénieurs Civils*, of which Eiffel was President in 1889, participates in school activities (eg. forums) to encouraging scientific vocations. By using the example of Eiffel and organizing Meccano challenges about his works.

(7). La Science au service de l'Ingénierie et réciproquement

Aérodynamisme : les débuts entre expérimentation et science

L'état de l'art[37] à la fin XIXe fait apparaitre une polémique entre deux modes d'expérimentation :
- « mobile » : objet en chute libre. Mais l'expérimentation et la mesure sont difficiles.
- « fixe » : objet fixe, c'est l'air qu'on souffle en puissance. Mais les détracteurs doutent de sa validité.

Toute sa carrière, Eiffel est confronté à la pression de l'air : depuis l'air comprimé pour les piles de la Passerelle de Bordeaux(1858-60), aux vents violents de Upper Bay pour la Statue de la Liberté (1881-84). La nuit du 26 janvier 1884, des vents de 160 km/h emportent 130 mètres de tablier déjà installés du viaduc de la Tardes[38]. Eiffel adapte alors ses calculs pour la construction du pont de Garabit et pour la Tour, déjà à l'étude. Sa préoccupation constante pour l'aérodynamisme est dans l'aphorisme « *le vide est plus solide que le plein* », que ses contemporains rapportent

Il s'attache à démontrer que le mode « fixe » est tout à fait valide et permet d'aller bien au-delà des possibilités de la chute libre. En particulier il montre que sa chambre expérimentale hermétique ne provoque aucun remous parasite[39]. Il demande à Poincaré de relire ses calculs, qui lui répond : « il est clair que seul le mouvement relatif importe »[22].

Résistance de l'air : de « l'appareil de chute » à la « chambre Eiffel »

Les premiers essais aérodynamiques de Eiffel sont menés de 1903 à 1906, avec « l'appareil de chute » : coulissant le long d'un câble, depuis 2nd étage de la Tour, il mesure la résistance de l'air sur des formes géométriques simples. Mais les débuts de l'aéronautique posent des problèmes plus complexes.

En 1909, il construit une soufflerie au pied de sa Tour : « la Chambre Eiffel », qui produit un vent artificiel autour d'une maquette. Il teste dans ce tunnel plus d'une vingtaine d'aéroplanes.

Fig.7.1. l'appareil de chute[40]

← Fig.7.2 Test d'aéroplane[22]

[37] B. Chanetz (2017). "A century of wind tunnels since Eiffel", *CR Mécanique*, 345/8, 2017, pp. 581-594 https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1631072117300888
[38] https://chestofbooks.com/crafts/scientific-american/sup3/Destruction-Of-The-Tardes-Viaduct.html https://www.lamontagne.fr/gueret-23000/actualites/les-ouvriers-boulonnent-avec-entrain_14347511/
[39] G. Hartmann (2007). Aérodynamique - Eiffel, https://hydroretro.net/etudegh/les_travaux_de_m._eiffel.pdf
[40] http://pietondeparis.canalblog.com/archives/2011/03/17/20654746.html

La soufflerie Eiffel, de la Tour à Auteuil et toujours en activité

En 1912 il ouvre une nouvelle soufflerie à Auteuil : 2 m de diamètre, 2.37 m de long, vent de 0-30 m/s, turbulence faible < 2 %. Pendant la guerre on y teste des ogives d'obus. Eiffel travaille avec des avionneurs ou avec la Société Peugeot pour améliorer les performances d'une voiture de course. La soufflerie et sa « *balance* » mesurent toujours les principaux coefficients aérodynamiques. Classée Monument Historique, elle est utilisée par le CSTB[42] pour étudier l'aérodynamique des véhicules et des constructions.

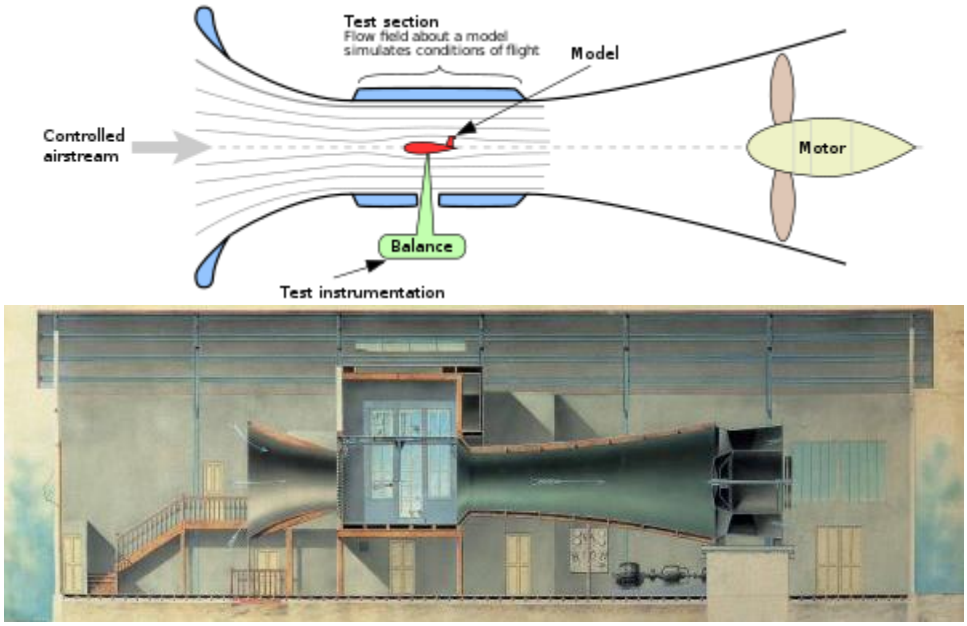


Fig.7.3. Coupe longitudinale de la soufflerie d'Auteuil (extrait de [41] et [42])

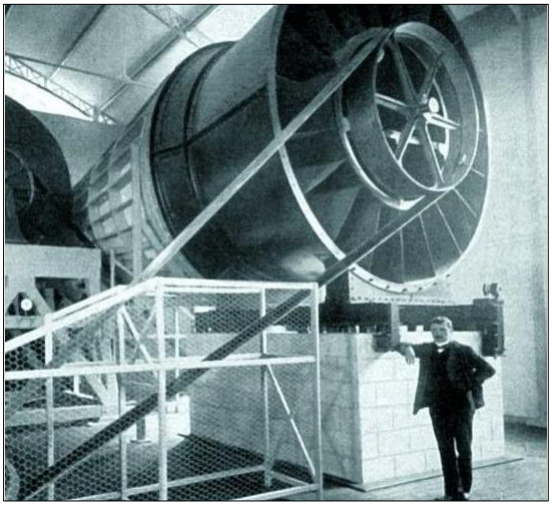


Fig.7.4. Le ventilateur principal (extrait de [41])

Fig.7.5. Eiffel dans la chambre de mesure [41]

[41] https://fr.wikipedia.org/wiki/Soufflerie
[42] https://exploreparis.com/fr/95-aerodynamique-eiffel.html

(8). Eiffel la télégraphie et la météo

Télégraphie et Météorologie scientifique

En 1820, Ampère propose de baser la télégraphie sur les principes de l'électromagnétisme. Cooke et Wheatstone installent un télégraphe[43] sur le Great Western Railway (UK, 21 km) en 1838.

Samuel Morse fait construire en 1843 la première ligne télégraphique entre Baltimore et Washington.

Grace au télégraphe, le vice-amiral britannique Fitz-Roy, préoccupé par la perte de nombreux navires, publie ses premiers avertissements de tempête en 1860. La physique des tempêtes commence à être comprise[44].

En 1861, Fitz-Roy publie ses prévisions générales indiquant le temps probable pour les deux jours à venir.

Ci-contre[45] :"first Times weather forecast" 01/08/1861.

METEOROLOGICAL REPORTS.

Wednesday, July 31, 8 to 9 a.m.	B.	E.	M.	D.	F.	C.	I.	S.
Nairn..	29·54	57	56	W.S.W.	6	9	o.	3
Aberdeen	29·60	59	54	S.S.W.	5	1	b.	3
Leith	29·70	61	55	W.	3	5	c.	2
Berwick	29·69	59	55	W.S.W.	4	4	c.	2
Ardrossan . ..	29·73	57	55	W.	5	4	c.	5
Portrush	29·72	57	54	S.W.	2	2	b.	2
Shields	29·80	59	54	W.S.W.	4	5	o.	3
Galway	29·83	65	62	W.	5	4	c.	4
Scarborough ..	29·86	59	56	W.	3	6	c.	2
Liverpool.. ..	29·91	61	56	S.W.	2	8	c.	2
Valentia	29·87	62	60	S.W.	2	5	o.	3
Queenstown ..	29·88	61	59	W.	3	5	c.	2
Yarmouth.. ..	30·05	61	59	W.	5	2	c.	3
London	30·02	62	56	S.W.	3	2	b.	—
Dover..	30·04	70	64	S.W.	3	7	o.	2

... ...

General weather probable during next two days in the—
North—Moderate westerly wind ; fine.
West—Moderate south-westerly ; fine.
South—Fresh westerly ; fine.

Explanation.

B. Barometer, corrected and reduced to 32° at mean sea level ; each 10 feet of vertical rise causing about one-hundredth of an inch diminution, and each 10° above 32° causing nearly three-hundredths increase. E. Exposed thermometer in shade. M. Moistened bulb (for evaporation and dew-point). D. Direction of wind (true—two points *left* of magnetic). F. Force (1 to 12—estimated). C. Cloud (1 to 9). I. Initials :—b., blue sky ; c., clouds (detached) ; f., fog ; h., hail ; l., lightning ; m., misty (hazy) ; o., overcast (dull) ; r., rain ; s., snow ; t., thunder. S. Sea disturbance (1 to 9).

https://library.metoffice.gov.uk/Portal/Default/en-GB/recordview/index/631787

Le premier réseau français de postes météorologiques dédiés à la prévision du temps[46], tenus par des observateurs humains, est mis en place en 1855.

Les observateurs notent chaque jour les températures minimales et maximales, les heures de début / fin d'orage, les éclairs, tonnerre, pluie, grêle, etc. Le Bureau central météorologique (BCM), ancêtre militaire de Météo-France, est fondé en 1878.

Ci-contre[32] : https://meteofrance (meteo et histoire / les observations)

La Tour Eiffel sauvée par la Télégraphie et la Météorologie.

En 1903, il met sa tour, menacée de démolition, à disposition de l'armée et finance lui-même les essais de la TSF (Télégraphie sans fil), menés par le capitaine Ferrié. Celui-ci est chargé en 1904 par le ministère

[43] https://www.arts-et-metiers.net/sites/arts-et-metiers/files/2021-10/field_media_document-444-fo_telegraphe-electrique.pdf
[44] Henri Blerzy. Les Prédictions météorologiques. Revue des Deux Mondes, 2e période, tome 47, 1863 (p. 170-196). https://fr.wikisource.org/wiki/Les_Prédictions_météorologiques (dernière partie)
[45] "The birth of the weather forecast" (BBC, 2015): https://www.bbc.com/news/magazine-32483678
[46] https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/magazine/meteo-et-histoire/lhistoire-de-lobservation/les-observations

de la Guerre de gérer le poste radiotélégraphique de la tour Eiffel. L'émetteur possède alors l'antenne la plus haute du monde avec une portée de 400 km, et fonctionne sans interruption depuis cette date.

Eiffel, conscient des dangers des événements météorologiques extrêmes (cf. 1884 épisode du Viaduc de la Tardes) est à l'origine de l'installation de plusieurs laboratoires météo, dans ses maisons de Beaulieu-sur-Mer[47] (Alpes-Maritimes), Salleboeuf[48] Vacquey (Gironde), Ploumanach[49] (Côtes-du-Nord), à Meudon. Avec l'aide du physicien Éleuthère Mascart (fondateur de Supélec), il en installe un au sommet de la Tour[50, 51].

Ces "laboratoires" mesurent chaque jour température, pression, humidité, précipitation, vitesse du vent et résistance de l'air. De son coté, le BCM organise la collecte des observations transmises par six stations régionales et diffuse des bulletins à 2h15, 8h15, 14h15, 19h30. Ainsi l'observation de 7h00 de Biarritz est reçue à 7h15 à Toulouse, qui centralise le Sud-Ouest et retransmet à Paris à 7h40. À 8h15, toutes les observations sont réunies en un seul bulletin national diffusé par la tour Eiffel aux stations météo locale, située en général sur un aérodrome. Le premier est transmis en novembre 1920[52].

En 1921, une radio civile est installée au sommet de la Tour. Deux ans plus tard, à 91 ans, Eiffel assiste aux premières tentatives de transmission d'un « bulletin météo » public.

Revue « la Science et la Vie », 1er juin 1950, pages 37-65 :

Texte associé :
« Réception et transcription -au tableau… noir- du premier bulletin météorologique radiodiffusé lors de l'émission d'essai du 12 juin 1923. »

En 2022, le groupe TDF réalise un héliportage exceptionnel pour installer sur la Tour une antenne radio de six mètres de haut, destinée à la diffusion de la radio numérique terrestre DAB+. Avec les antennes déjà installées TDF diffuse 30 chaînes de la Télévision Numérique Terrestre (TNT) et 32 radios dans un rayon de près de 70 km autour du monument[53].

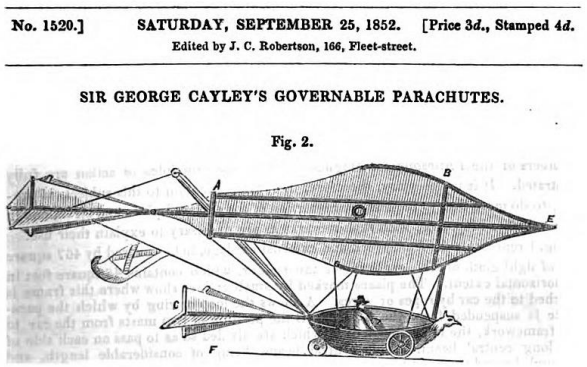
---

[47] Villa Salles : https://gustaveeiffel.com/la-villa-salles-ancienne-propriete-deiffel/
[48] Le Château Vacquey : http://petit-patrimoine.com/fiche-petit-patrimoine.php?id_pp=33496_1
[49] Villa Ker Awel : https://www.pop.culture.gouv.fr/notice/merimee/IA22006934
[50] https://www.toureiffel.paris/fr/le-monument/tour-eiffel-et-sciences
[51] https://www.toureiffel.paris/fr/actualites/130-ans/la-tour-laboratoire-scientifique (Bertrand Lemoine)
[52] https://meteofrance.com/actualites-et-dossiers/meteo-histoire/meteo-fait-histoire/il-y-100-ans-la-tour-eiffel-emettait-ces-1ers-radio-telegrammes
[53] https://www.tdf.fr/la-tour-eiffel-prend-de-la-hauteur-le-groupe-tdf-installe-une-nouvelle-antenne/

(9). Le prototype d'avion « LE » du Laboratoire Eiffel

Les débuts de la conception aéronautique

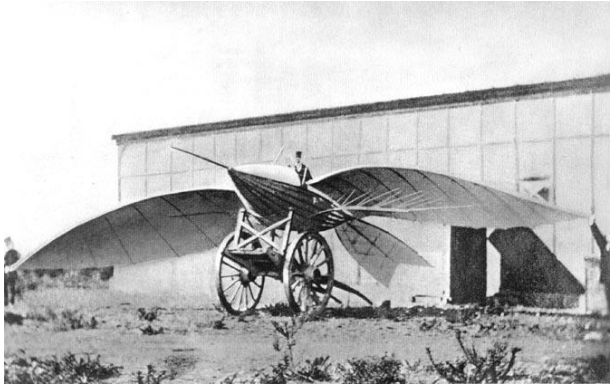
George Cayley identifie en 1799 le principe de la portance d'une aile[54] et pose le principe d'un avion à aile fixe à forme dissymétrique cambrée, séparant portance et propulsion (cf. *Silver Disc machine*). Il publie en 1809 son *Traité de la Navigation aérienne* et en 1853 fait voler son cochet sur un planeur. En France, Jean-Marie Le Bris effectue un vol plané similaire sur son *Albatros* en 1868.


No. 1520.] SATURDAY, SEPTEMBER 25, 1852. [Price 3d., Stamped 4d.
Edited by J. C. Robertson, 166, Fleet-street.

SIR GEORGE CAYLEY'S GOVERNABLE PARACHUTES.

Fig. 2.

Fig. Sir George Cayley en 1852.



Jean-Marie Le Bris en 1868 sur le planeur l'Albatros.

En octobre 1890, Clément Ader fait décoller *Éole* de 20 cm sur 50 m. En décembre 1903 les frères Wright effectuent les premiers vols contrôlés de l'histoire de l'aviation, à Kitty Hawk Caroline du Nord. Le 25 juillet 1909 Louis Blériot traverse la Manche entre Calais et Douvres en 37 minutes. En mars 1910 Élise Deroche devient la première femme pilote brevetée au monde.

Si le bois est le matériau majoritaire des débuts de l'aviation, l'aluminium apparait dès le début du XXe : légèreté et résistance[55]. Les Allemands sont les premiers à l'utiliser dans la structure des Zeppelins. Le métal utilisé résulte d'un progrès spectaculaire en 1908 avec le brevet d'Alfred Wilm pour le *duralumin*, un alliage aluminium-cuivre-magnésium, présentant le degré de résistance d'un « acier doux ».

L'avion « LE » du « Laboratoire Eiffel »

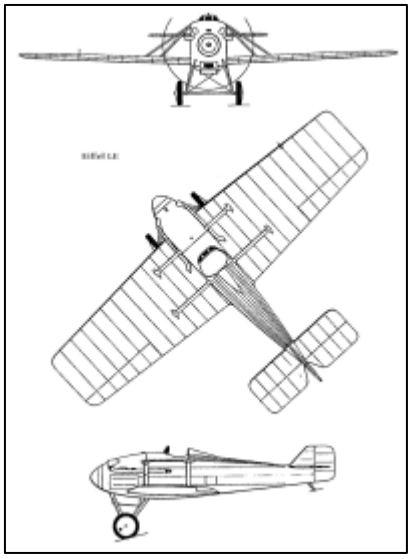
Pendant la Première Guerre mondiale, le laboratoire Eiffel, rue Boileau, teste des modèles d'avions français, d'une envergure jusqu'à 2,5 mètres avec une vitesse d'écoulement allant jusqu'à à 63 m/s[56]. Et naturellement Eiffel met au point un concept d'avion à voilure basse, désigné Avion LE (= Laboratoire Eiffel). Pour cette époque, l'avion à voilure basse est sans précédent. Eiffel dépose le Brevet n° 503 363 du 16 mai 1917 pour « *un avion de chasse à grande vitesse* ».

En juillet, le projet présenté à Paul Painlevé, ministre de la Guerre, est prometteur : à l'altitude de 4000m –atteinte en 10 minutes - la vitesse doit atteindre 265 km/h et le plafond parviendrait à 8000 m !

Le ministre désigne l'entreprise Breguet pour la réalisation[57].

---

[54] https://fr.wikipedia.org/wiki/Chronologie_de_l'aéronautique
[55] https://www.mines-paris.org/en/revue/article/l-aluminium-dans-les-structures-aeronautiques/501
[56] http://www.airwar.ru/enc/fww1/eiffelle.html
[57] https://fr.wikipedia.org/wiki/Breguet_Laboratoire_Eiffel



L'aile basse Eiffel est fixée au fuselage par 2 paires d'entretoises. Les longerons en duralumin sont censés garantir un facteur de sécurité de 6. Le reste de la structure de l'avion est en bois et un revêtement en tissu (à l'exception du capot moteur en tôle d'aluminium). Le fuselage est à section rectangulaire.

La conception est supervisée par le directeur du Laboratoire d'aérodynamique, l'ingénieur Vladimir Margulis (originaire de Russie). La construction est confiée à Vullierm, l'ingénieur en chef chez Bréguet.

Les ailes sont réalisées par la Société de Construction de Levallois mais retardées par une pénurie de *duralumin*. L'appareil, baptisé Breguet-LE, est équipé d'un moteur sans engrenage Hispano-Suiza 8Ab V-8 de 180 chevaux (132 kW) refroidi par liquide

Le **Breguet-LE** de 1918

Le **Breguet-16** de la même année.

Un destin malheureux mais une conception qui deviendra la règle

Mars 1918, le Lt. Jean Sauclière, pilote d'essai, effectue le premier test du prototype à Villacoublay, aboutissant au bris du train d'atterrissage principal. Un nouveau vol est prévu le 28 mars et doit être contrôlées à l'aide d'un équipement cinématographique. Au jour dit, le Breguet-LE décolle de la piste après une courte course, vole devant les caméras et s'écrase de façon inattendue. Sauclière est tué. La vitesse mesurée est de 220 km/h, à comparer à la vitesse maximale de 211 km/h, du chasseur biplan français SPAD XVII, équipé d'un moteur Hispano-Suiza 8Fb de 300 chevaux (220 kW).

Vladimir Margulis affecté par la mort du pilote, s'oppose à la poursuite des essais. Mais le Département technique de l'aviation militaire exige la poursuite des travaux sur un chasseur à aile basse. Breguet en reste aux appareils biplan, mais en 1921, au Salon du Bourget, le prototype LeO.9 du chasseur Lioré et Olivier, développé par V. Margulis est présenté : il ressemble à un Breguet LE. Le 24 septembre 1923, en vol au-dessus de Villacoublay, la console de voilure du prototype LeO.9 se détache, le pilote G. Martin, décède...

Le monoplan à voilure basse devient la règle en aviation dans les années 1930, y compris chez Bréguet.

Crédits images : Wikimedia + airwar.ru[58] pour les images du Bréguet-LE

[58] http://www.airwar.ru/enc/fww1/eiffelle.html

(10). Eiffel l'esthète

Réponse de Gustave Eiffel à la protestation des artistes du 14 février 1887

publiée[59] dans « *Le Temps* ».

Parce que nous sommes des ingénieurs, croit-on que la beauté ne nous préoccupe pas ? et qu'en même temps que nous faisons solide et durable nous ne nous efforçons pas de faire élégant ? Est-ce que les véritables conditions de la force ne sont pas toujours conformes aux conditions secrètes de l'harmonie ? Le principe de l'esthétique architecturale est que les lignes essentielles soient déterminées par la parfaite appropriation à sa destination. De quelle condition ai-je eu à tenir compte dans ma tour ? De la résistance au vent. Eh bien, je prétends que les courbes des arêtes du monument telles que fournies par le calcul, donneront une impression de beauté, car elles traduiront aux yeux la hardiesse de sa conception.

Il y a dans le colossal une attraction, un charme propre auxquels les théories d'art ordinaires ne sont guère applicables. Est-ce par leur valeur artistique que les pyramides ont frappé l'imagination des hommes si fortement ? Qu'est-ce autre chose, après tout, que des monticules artificiels ? Et pourtant quel est le visiteur qui reste froid en leur présence ? Qui n'en est revenu rempli d'une irrésistible admiration ? Où est la source de cette admiration, sinon dans l'immensité de l'effort et dans la grandeur du résultat ? Ma tour sera le plus haut édifice qu'aient jamais élevé les hommes. Ne sera-t-elle pas grandiose à sa façon ? Pourquoi ce qui est admirable en Égypte deviendrait-il hideux et ridicule à Paris ?

En témoignage de sa conception de la beauté[60], voici quelques exemples d'ouvrages réalisés par Eiffel.

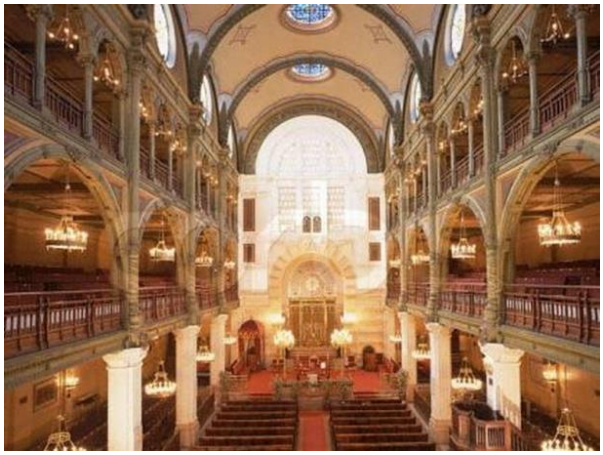
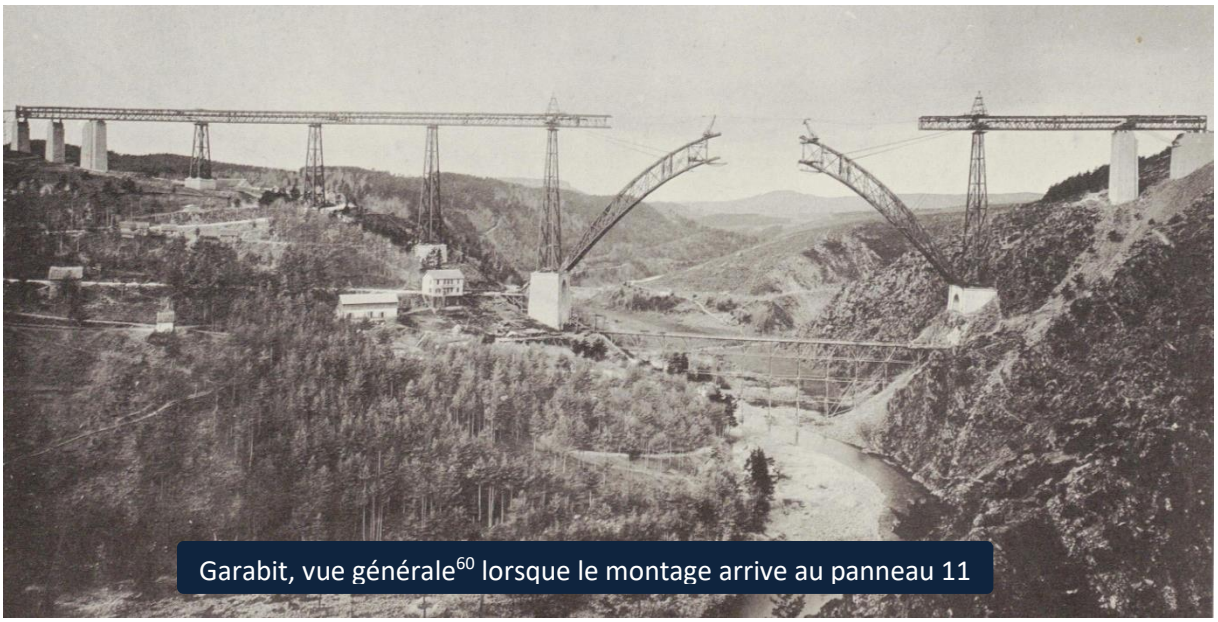


Fig. Crédits Images[61] pour la Synagogue de la rue des Tourelles à Paris, et pour la Coupole de l'Observatoire de Nice.

[59] https://fr.wikisource.org/wiki/Réponse_de_Gustave_Eiffel_à_la_protestation_des_artistes_du_14_février_1887
[60] Voir aussi : https://www.lefigaro.fr/voyages/centenaire-de-la-disparition-de-gustave-eiffel-tour-du-monde-en-images-de-ses-plus-belles-realisations-20230327?shem=ssusxt
[61] https://www.wonders-of-the-world.net/Eiffel-Tower/Gustave-Eiffel.php



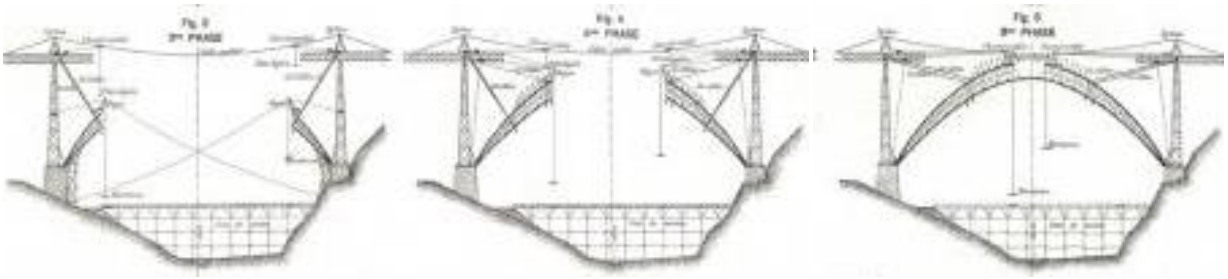


Fig. Phases de construction de l'arc[62], plan Gustave Eiffel © Archives municipales de Saint-Flour

Fig. images de la Gare de l'Ouest, alias Gare de Budapest-Nyugati[63]

[62] https://vpah-auvergne-rhone-alpes.fr/ressource/le-viaduc-de-garabit & https://doi.org/10.3931/e-rara-19965
[63] https://www.pinterest.com/pin/87186942761949345 & https://www.pinterest.com/pin/517702919663764310

Publication : Décembre 2023

EIFFEL INNOVATEUR AVANT L'HEURE

En réponse à trois questions liminaires :
Eiffel, notre contemporain ? Eiffel innovateur ? Quelles leçons pour relever les défis du temps présent ?
ce document présente certaines facettes d'Eiffel qui donnent à voir ce qu'il y a d'actuel dans son œuvre.

Au-delà du patrimoine encore existant : la Tour, la Statue de la Liberté, la dizaine de viaducs en France et à l'étranger … qui démontre que ses constructions résistent au temps, au-delà aussi de procédés toujours utilisés (lancement de pont, soufflerie), tout un ensemble de qualités sont mises en valeur :

- sa curiosité et sa soif de connaissances multi- disciplinaires qui lui permettent d'être toujours au courant des nouveautés en génie civil, en matériaux, en mécanique,
- sa capacité à adapter des résultats d'une discipline dans un contexte différent qui s'en trouve ainsi renouvelé (une *innovation incrémentale* au sens actuel, plutôt qu' *innovation de rupture*),
- sa capacité à s'entourer de partenaires de qualité (on parlerait de *casting* ou de *DRH* aujourd'hui !),
- sa capacité de dialogue avec les grands noms de l'art (Bartholdi), de la mathématique (Poincaré), de l'architecture … mais aussi de grands entrepreneurs (des chemins de fer, de la métallurgie), sa force de conviction auprès des grands donneurs d'ordre publics, dans le gouvernement ou l'armée,
- sa foi en la science, en la mathématique, jamais disparue derrière l'entrepreneur et le patron, et même révélée avec vigueur dans la dernière période de sa vie qui lui apporte une renommée internationale en aérodynamique, qui le transforme en météorologue et en concepteur d'avion.

Alors oui, Eiffel est contemporain, Eiffel est innovateur, et il y a des leçons à tirer de lui et à transmettre. C'est ce qui réunit les parrains de ce livret, chacun avec sa vocation propre.

L'AFAS dont la première mission est de répondre aux interrogations du public, face aux inquiétude devant les conséquences économiques, sociales, environnementales des nouvelles technologies et découvertes scientifiques, au-delà de la simple vulgarisation, mais par un véritable dialogue entre la communauté scientifique et les citoyens. Susciter des vocations chez les jeunes est l'autre mission de l'AFAS : la figure de Eiffel est particulièrement pertinente dans cette optique, car elle est populaire, consensuelle, positive, mais généralement très superficielle, ce qui ne demande qu'à être approfondi.

L'IESF qui représente la grande famille de ceux qui cherchent, innovent, entreprennent , construisent, conçoivent les outils ou les produits pour répondre aux besoins et aux défis actuels, et aussi dialoguent et veulent peser sur les grandes décisions dans un esprit de raison et de responsabilité. La promotion des métiers de l'ingénieur et du scientifique est l'une des principales activités d'IESF auprès des publics scolaires : c'est par l'exemple concret des ingénieurs d'aujourd'hui et de l'œuvre de ceux d'hier que cet état d'esprit positif et cette ambition de progrès est transmise aux nouvelles générations.

L'Université éponyme retient de sa vision de Gustave Eiffel l'objectif de valoriser l'esprit créatif et le dialogue entre les disciplines, ce qui est mis en valeur dans le documentaire "Cent ans après : quand les étudiantes s'inspirent de l'œuvre de Gustave Eiffel". En trois parties : création d'histoires autour de la vie de Eiffel (podcast), l'image de Eiffel parmi les étudiants étrangers (interviews) et une immersion imaginaire dans la peau de Gustave Eiffel en réalité virtuelle.