

Quand la fatigue des matériaux faisait encore débat. Partie 1

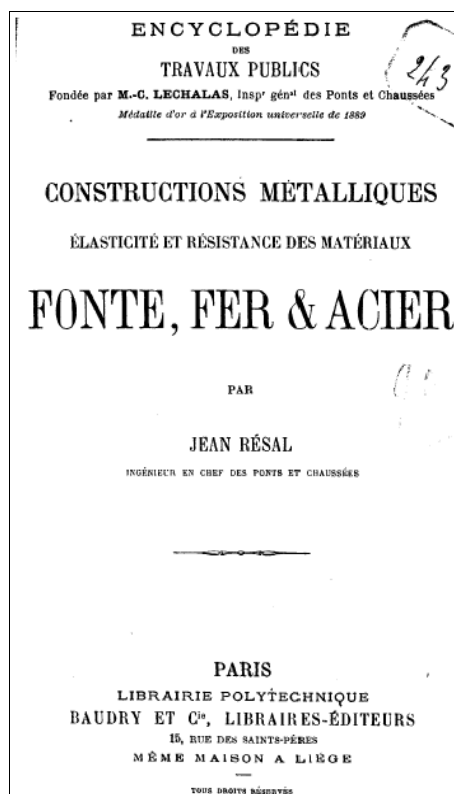
En cette seconde moitié du XIX^{ème} siècle, la fatigue des matériaux n'en est qu'à ses débuts. En Allemagne, en 1837, on publie le premier essai de fatigue [1]. En Angleterre, en 1854, on commence juste à parler de « fatigue » [2]. Plus tard, vers 1860-1880, Wöhler et Bauschinger publient leurs premiers résultats [2-3].

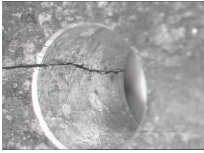
Mais comment ces travaux sont-ils accueillis en France ?

Grâce à la base de données électronique Gallica de la Bibliothèque nationale de France, j'ai pu me plonger dans 2 ouvrages de Jean Résal, Ingénieur en chef des Ponts et Chaussées, datant de 1892 et 1898 :

- Constructions métalliques, élasticité et résistance des matériaux, fonte, fer et acier. Jean Résal. 1892.
- Résistance des matériaux : cours de l'École des ponts et chaussées. Jean Résal. 1898.

Attardons-nous sur l'ouvrage de 1892.





Dans l'ouvrage de Jean Résal de 1892, il apparaît que l'endommagement est supposé en cas de dépassement de la limite d'élasticité N :

« Toute déformation permanente d'un corps hétérogène non plastique impliquerait probablement la formation de fissures intermoléculaires ou imperceptibles, isolées et disséminées dans la masse, et certainement le développement d'actions moléculaires latentes » Article 21 p54

Dans ce cas précis, la fatigue est même largement acceptée :

« Le métal, soumis d'une façon intermittente à des efforts dépassant un peu la limite d'élasticité, finit par perdre sa cohésion, par se désagréger ou se rompre. [...] Si l'on plie un certain nombre de fois une tôle mince, celle-ci finit par se fissurer et se casser, quoiqu'ayant résisté sans dommage apparent aux premières épreuves » Article 21 p55

Par contre, pour des contraintes inférieures à la limite d'élasticité :

« Le travail élastique ne saurait en aucune circonstance offrir de danger, tant qu'il ne dépasse pas une limite fixe qui est la limite d'élasticité » Article 21 p68

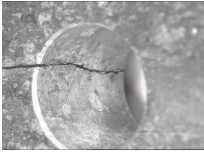
En l'état actuel des connaissances sur le sujet, un dimensionnement sans prise en compte de la fatigue même pour des contraintes toujours inférieures à la limite d'élasticité, surtout dans le ferroviaire, laisserait imaginer de très nombreuses ruptures en service. Elles ont été nombreuses mais pas tant qu'on imaginerait. En réalité une marge de sécurité était appliquée pour 3 motifs (incertitude sur les propriétés matériaux, incertitude sur les formules de résistance, corrosion) :

« Il est indispensable d'établir les constructions métalliques dans des conditions telles que leurs éléments constitutifs ne soient jamais exposés à travailler au-delà de la limite d'élasticité. [...] Mais, en appliquant strictement et rigoureusement cette règle, on s'exposerait à coup sûr à de graves mécomptes » Article 21 p55

Les auteurs prennent donc un coefficient de sécurité :

« limite d'élasticité N [...] limite de sécurité R, ou limite pratique de travail [...] Pour le fer et l'acier, le rapport R/N est généralement compris entre 1/3 et 1/2 » Article 21 p57

(il est ironique de noter que ce coefficient de sécurité certainement empirique a amené les ingénieurs de l'époque à dimensionner pour des contraintes finalement proches de la limite de fatigue du matériau ! Voir les travaux de synthèse du CETIM [4-5])



Jean Résal admet alors que selon « *des expériences récentes* », cette marge est « *juste suffisante* » en raison « *d'efforts intermittents et alternatifs* ». L'auteur commence là à parler des travaux globalement récents (moins de 30 ans) de Wöhler et Bauschinger.

Tout d'abord, il énonce les lois de Wöhler qu'on résumera ainsi :

« *Pour toute pièce soumise à des efforts variables, qui font passer alternativement le travail élastique du métal par les valeurs extrêmes T et T' , il existe une limite dangereuse D que [...] T' ne saurait dépasser sans que la stabilité ou la durée de la pièce fût compromise [...] Si enfin T est de signe opposé à T' [...], D est inférieur à N* ». Article 22 p61. N étant la limite d'élasticité du métal.

Ce qui est totalement nouveau dans cette théorie, c'est que Wöhler suggère que le métal puisse se dégrader si les efforts sont répétés, même si les efforts ne dépassent jamais la limite d'élasticité.

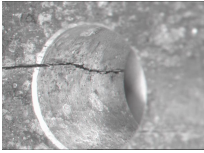
Ensuite, sur la base de mesures faites par Bauschinger, Jean Résal pose la question de la possibilité de déformations permanentes infimes, même pour un chargement sous la limite d'élasticité. Ces déformations pourraient s'accumuler et dégrader la structure. La possibilité de fatigue sous la limite d'élasticité serait-elle acceptée par l'auteur ?

Pas vraiment !

En effet, Jean Résal consacre tout l'article suivant à une nouvelle analyse des résultats de Wöhler et Bauschinger (*Article 23. Objections contre les lois de Woehler. Effets produits sur les corps élastiques par les actions dynamiques*). Il étudie l'influence, sur les molécules de la matière, d'un chargement appliqué de façon rapide que l'on peut résumer comme ceci : si le chargement est rapide et non quasi-statique, les molécules entrent en vibration et l'effort vu au sein du métal est supérieur à l'effort extérieur imposé. L'effort vu au sein du métal peut alors dépasser la limite d'élasticité usuelle. L'auteur quantifie cette influence et retombe sur les formules proposées par Wöhler !

Derechef, Jean Résal conclut :

« *Les résultats de ces expériences pourraient donc ne présenter aucune contradiction avec l'ancienne théorie d'après laquelle le travail élastique ne saurait [...] offrir de danger, tant qu'il ne dépasse pas [...] la limite d'élasticité [...] à la condition de supposer que ces auteurs ont fait leurs observations sur des pièces métalliques soumises à des efforts [...] instantanés [...] or il se trouve précisément que dans les expériences de Wöhler les efforts alternatifs se succédaient très rapidement* » Article 23 p68



état d'équilibre statique : la puissance, c'est-à-dire la force additionnelle variable, sera donc toujours égale à la résistance, c'est-à-dire à la résultante des actions moléculaires développées dans une section transversale de la barre durant la période de déformation.

On aura finalement $F = (T' - T)\Omega$, et, si l'on désigne par λ la variation de longueur subie par la barre, le travail mécanique qui aura déterminé sa déformation sera représenté, en vertu de la loi de Hooke, soit par $\frac{F\lambda}{2}$ (travail moteur), soit par $\frac{T' - T}{2} \Omega \lambda$ (travail résistant). Il y aura égalité entre ces deux quantités, puisqu'à aucun moment de la déformation la matière n'aura été animée d'une force vive appréciable.

Supposons maintenant qu'on applique instantanément la force F, en lui donnant immédiatement toute son intensité, qui demeurera invariable pendant la déformation. La puissance se trouvant d'abord supérieure à la résistance, qui ira en croissant au fur et à mesure que la barre se déformera, les molécules devront être animées de vitesses telles qu'à un moment quelconque le travail moteur (ou travail mécanique correspondant au déplacement du point d'application de F) soit égal au travail résistant (ou travail mécanique des actions moléculaires) augmenté de la force vive du corps.

Soit λ_1 la variation de longueur subie par la barre au moment où, le travail résistant étant devenu égal au travail moteur, les molécules se retrouvent immobiles dans l'espace, et leur force vive réduite à zéro ; ce moment correspondra à la fin de la vibration simple imprimée à la barre par l'application de la force instantanée.

Le déplacement du point d'application de la force constante F aura été égal à λ_1 .

Le travail moteur sera donc représenté par $F\lambda_1$. Quant au travail résistant, il sera donné, en vertu de la loi de Hooke, par le produit $\frac{T_1 - T}{2} \Omega \lambda_1$, où T_1 désigne le travail élastique corrélatif de la déformation λ_1 .

On aura donc l'égalité :

$$F\lambda_1 = \frac{T_1 - T}{2} \Omega \lambda_1,$$

ou

$$2F = \Omega (T_1 - T).$$

Or nous avons vu plus haut que, dans le cas de la déformation statique, on avait : $\Omega (T' - T) = F$.

Donc : $T_1 - T = 2(T' - T)$.

Le travail élastique déterminé par une force instantanée est ainsi le double de celui que produirait la même force appliquée graduellement, de façon à n'imprimer aux molécules du corps, pendant sa déformation, que des vitesses négligeables.

En vertu de la loi de Hooke, on a aussi :

$$\frac{\lambda_1}{\lambda} = \frac{T_1 - T}{T' - T}.$$

D'où $\lambda_1 = 2\lambda$. L'amplitude de l'oscillation est égale au double de l'allongement statique correspondant à la même force de traction F.

La relation, où figure T_1 , peut être mise sous la forme : $T_1 = 2T' - T$.

Soit D la limite dangereuse que le travail élastique de la matière ne peut dépasser sans que la stabilité soit compromise. Dans l'hypothèse de la force F agissant instantanément, il faudra satisfaire à la condition :

$$T_1 \leq D,$$

$$\text{ou } 2T' - T \leq D.$$

Cette inégalité peut s'écrire comme il suit :

$$T' (2T' - T) \leq DT',$$

$$\text{ou } T' \leq D \frac{T'}{2T' - T} = \frac{D}{2} \frac{1}{1 - \frac{T}{2T'}} = \frac{D}{2} \frac{1}{1 - \frac{\gamma}{2}}.$$

On peut donc, dans le cas d'une force instantanée, déterminer les conditions de stabilité du corps comme s'il se trouvait en état d'équilibre statique, à condition de substituer à la limite dangereuse D la nouvelle limite fournie par l'expression :

$$\frac{D}{2} \frac{1}{1 - \frac{\gamma}{2}}.$$

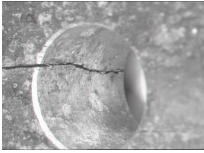
Nous retrouvons précisément le coefficient de réduction $\frac{1}{1 - \frac{\gamma}{2}}$, auquel conduisent les expériences de Wöhler et de Bauschinger.

Les résultats de ces expériences pourraient donc ne présenter aucune contradiction avec l'ancienne théorie d'après laquelle le travail élastique ne saurait en aucune circonstance offrir de danger, tant qu'il ne dépasse pas une limite fixe qui est la limite d'élasticité, mais à la condition de supposer que ces auteurs ont fait leurs observations sur des pièces métalliques soumises à des efforts, alternatifs ou successifs, instantanés, et par suite imprimant aux molécules, pendant la déformation, des mouvements vibratoires. Or, il se trouve précisément que, dans les expériences de Wöhler, les efforts alternatifs se succédaient très rapidement, à raison parfois de 72 alternances par minute ; la durée d'application de chaque force était limitée à $\frac{1}{10}$ ou $\frac{1}{12}$ de seconde.

Il est donc permis de supposer que chaque action nouvelle imprimait à la pièce un mouvement vibratoire qui n'était pas complètement amorti et éteint quand l'action suivante entrait en jeu.

C'est là évidemment une objection très grave, puisque, si elle était justifiée, les lois de Wöhler, et les règles pratiques qui en découlent, devraient être considérées comme non avenues, ou du moins ne seraient applicables qu'aux pièces soumises à des actions dynamiques, organes de machines, bielles d'accouplement, essieux de voitures, etc.

Or, à ce point de vue, les lois de Wöhler ne constituent pas une nouveauté, car on a reconnu de tout temps la nécessité d'abaisser la limite de sécurité pour les pièces de cette catégorie, quand on calcule leurs dimensions par des méthodes ne tenant pas compte de l'influence des vibrations. Mais en doit-il être de même lorsqu'il s'agit d'un élément de pont ou de construction métallique, soumis à l'action de forces extérieures variant avec une lenteur suffisante pour que les vibrations y soient sinon insensibles, du moins sans grande importance, leurs amplitudes, que l'on peut mesurer, ne représentant qu'une faible fraction de la déformation totale ?



Les lois de Wöhler proposant une modification de la limite d'élasticité suite aux chargements répétés sont alors considérées comme « *non avenues* » !

Pour des structures soumises à des chargements lents, l'auteur réfute donc l'idée de fatigue pour des contraintes inférieures à la limite d'élasticité telle que proposée par Wöhler. Pour des structures soumises à des chargements rapides, il accepte les résultats de Wöhler mais les explique par l'aspect dynamique du chargement imposé lors des essais, qui donne une excitation dynamique aux molécules, augmentant artificiellement l'effort vu par la pièce et faisant passer cet effort au-delà de la limite d'élasticité.

« Si leurs expériences sont en désaccord avec notre manière de voir, c'est, d'après nous, qu'ils n'ont pas suffisamment tenu compte dans leurs recherches des actions dynamiques auxquelles étaient soumises les barres » Article 79 p377

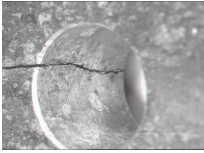
Jean Résal continue donc de croire qu'un dimensionnement sous la limite d'élasticité « *ne saurait en aucune circonstance offrir de danger* ».

En conclusion, lors des premiers travaux sur la fatigue des matériaux, l'influence néfaste d'efforts répétés et sa prise en compte dans le dimensionnement ont été rapidement acceptées. Les essais étaient là et ne pouvaient être ignorés. Mais peu de documents rappellent qu'à cette époque, les résultats des essais de fatigue allemands avaient été expliqués en France par une théorie basée sur la vibration des molécules lors d'un chargement rapide. La fatigue comme on l'entend aujourd'hui n'a donc pas été acceptée si facilement !

Pour mieux comprendre, il faut voir que dès le début le terrain n'était pas propice à l'acceptation de la notion de fatigue ou plus précisément l'acceptation d'un endommagement pour des contraintes inférieures à la limite d'élasticité :

« Supposons qu'après avoir soumis un corps à l'action de certaines forces extérieures, on fasse cesser cette action. Si le corps est parfaitement élastique, il reviendra exactement à sa forme primitive, et, toutes ses molécules ayant repris respectivement leurs positions initiales dans l'espace, les actions moléculaires, corrélatives des déplacements élastiques, s'annuleront » Article 21 p53

On sait aujourd'hui que même avec de faibles vitesses de chargement, la rupture en fatigue se produira car elle est due à une irréversibilité du glissement : les « *molécules* » ne reviennent pas toute à leur place initiale. Mais il faudra attendre 1934 pour voir émerger la notion de dislocations et 1957 pour voir les intrusions/extrusions en surface lors d'un chargement cyclique.



Dans un prochain article je m'attarderai sur l'ouvrage de Jean Résal de 1898. L'auteur aura-t-il changé d'avis ? La suite au prochain épisode !

Je tenterai aussi d'expliquer plus en détail la théorie proposée par Jean Résal. Et je parlerai plus tard de l'ouvrage d'Arthur Morin « Résistance des matériaux » de 1862.

Références

- 1-W. A. J. Albert, Uber Treibseile am Harz. Archiv für Mineralogie, Geognosie. Bergbau und Hiittenkunde 10, 215-234 (1837).
- 2-Schütz, W. A history of fatigue, Eng. Frac. Mech. Vol 54., 2, p263-300, 1996
- 3-J. Bauschinger, Ober das Kristallinischwerden und die Festigkeitsverminderung des Eisens durch den Gebrauch. Dinglers J. 235, 169-173 (1880).
- 4-Techniques de l'Ingénieur B5050
- 5-Techniques de l'Ingénieur M4170

Liens

<http://gallica.bnf.fr/>