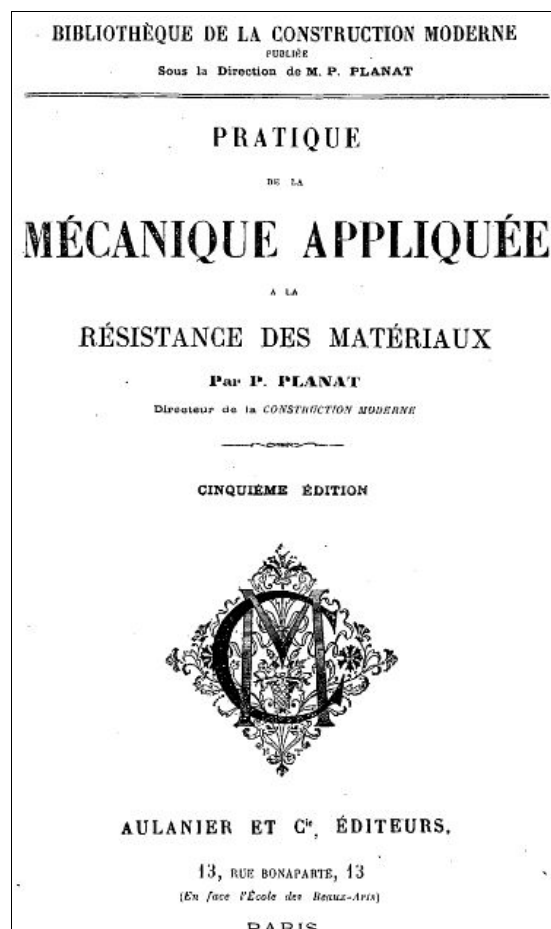


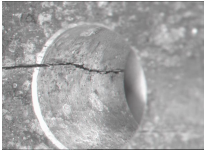
Quand la fatigue des matériaux faisait encore débat. Part 3

Rappel des épisodes précédents : fin XIXe la fatigue faisait encore débat et les premiers résultats d'essais de fatigue étaient expliqués par une autre théorie que celle connue aujourd'hui

Dans les parties [1](#) et [2](#) de cet article, je résumais des ouvrages datant de la fin du XIXe, rédigés par Jean Résal, ingénieur des Ponts et Chaussées. Ce dernier réfutait la théorie de la fatigue des matériaux proposée par August Wöhler, ingénieur allemand.

Dans cette dernière partie, je résumerai le chapitre consacré aux travaux de Wöhler dans l'ouvrage de [Paul Planat](#), « [Pratique de la Mécanique Appliquée à la Résistance des Matériaux](#) ». Cet ouvrage datant de la fin du XIXe permet de comprendre la réticence des Français face à la théorie des ingénieurs allemands.





Ouvrage de Paul Planat « Pratique de la Mécanique Appliquée à la Résistance des Matériaux » 18XX

Dans cet ouvrage, Mr Planat résume un échange entre Allemands, Anglais et Français, sur le thème du dimensionnement des structures : *« une très importante discussion s'est élevée entre les ingénieurs allemands, anglais et français, sur la résistance dont le métal est capable [...] les arguments en faveur de chaque opinion ont été mis en présence ».*

D'un côté, les *« constructeurs français »* qui *« se préoccupent, avant tout, de ne pas dépasser la limite d'élasticité »*, et veillent à ce que les contraintes ne dépassent pas la moitié ou le tiers de cette valeur.

De l'autre, les *« ingénieurs étrangers »* qui *« ont principalement en vue les phénomènes de rupture »*. Les Anglais et Allemands mesurent la charge de rupture et prennent, comme charge limite, le sixième de cette charge.

Selon Mr Planat, *« la méthode française paraît plus rationnelle »*.

Mais un statut quo est quand même possible car en prenant un sixième de la charge de rupture comme les Allemands et Anglais, ou le tiers de la limite d'élasticité comme les Français, *« les deux procédés conduisent au même résultat »*.

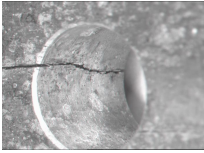
Quand « l'École française » se trouve menacée

Mais de récents résultats viennent bouleverser la théorie des Français basée sur la limite d'élasticité : ce sont [les essais de fatigue de Mr Wöhler](#) !

En effet, sur la base des essais de Mr Wöhler, *« les ingénieurs allemands se sont crus autorisés à calculer d'une manière très précise la charge limite qui cesse de produire la rupture, quel que soit le nombre de répétitions des chargements ou déchargements. Ils prennent une fraction de cette charge, le tiers par exemple, et obtiennent ainsi la limite du travail qu'il convient de ne pas dépasser dans l'évaluation de la résistance. Comme on le voit, ils rejettent toute considération de la limite d'élasticité. »*

Analysons plus en détail la réaction de Mr Planat.

Tout d'abord, ce dernier résume les résultats de Mr Wöhler : *« Lorsqu'une pièce subit un certain nombre de fois des efforts provenant d'une charge alternativement appliquée et enlevée [...] la rupture se produit ».*

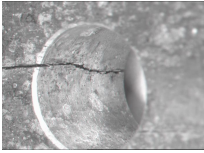


DIVERS MODES D'APPRECIATION DE LA CHARGE DE SECURITE. 101	102 CONSEQUENCES PRATIQUES.																																																										
<p>à peu, pour un même métal, sous l'influence de charges répétées et suivant le mode de chargement.</p> <p>Voici les lois qui semblent découler des expériences de M. Vöhler. Ces expériences n'ont pas encore été assez nombreuses ni toujours faites dans des conditions assez conformes à la réalité, pour qu'on puisse les admettre comme absolument définitives; il y a cependant grande probabilité qu'elles soient exactes :</p> <p>1° Lorsqu'une pièce subit un certain nombre de fois des efforts provenant d'une charge alternativement appliquée et enlevée, ou bien diminuée seulement, la rupture se produit sous une moindre charge que si l'on eut chargé doucement ;</p> <p>2° Si l'on applique successivement une charge faible puis une charge forte, et cela un grand nombre de fois de suite, le nombre de répétitions nécessaire pour produire la rupture est d'autant plus grand que la limite supérieure de la charge est restée plus faible, si la limite inférieure reste la même ;</p> <p>3° Inversement, si c'est la limite supérieure de charge qui ne varie pas, le nombre de répétitions nécessaires avant d'amener la rupture est d'autant plus grand que la limite inférieure est plus élevée ;</p> <p>4° Si la limite supérieure de la charge qu'on ne dépasse pas dans les expériences reste elle-même au-dessous d'un certain chiffre, on peut répéter indéfiniment l'opération de chargement et de déchargement sans jamais amener la rupture ;</p> <p>5° Cette limite de non-rupture est d'autant plus élevée que la faible charge correspondant à un déchargement partiel est elle-même plus élevée.</p> <p>L'énoncé seul de ces lois suffit à montrer quelles conséquences pratiques les constructeurs en peuvent tirer. Nous montrerons comment les ingénieurs allemands ont voulu, un peu trop tôt peut-être, en déduire une théorie nouvelle, et quelles sont les critiques adressées par nos ingénieurs français à ces tentatives.</p> <p>Quoi qu'il en soit, et quelle que soit la méthode que l'on adoptera de préférence, les faits acquis montrent qu'il faut tenir compte d'un élément négligé autrefois, l'action très manifeste qu'exerce la répétition d'efforts tantôt plus grands, tantôt plus faibles, cette « éducation » du métal dont parlait M. Tresca.</p> <p><i>Expériences de M. Vöhler.</i> — Nous allons résumer d'abord les résultats numériques des nouvelles expériences.</p> <p>Voici quel était le but des recherches de Vöhler: Lorsque, par exemple,</p>	<p>on fait travailler une pièce par flexion en la chargeant puis la déchargeant un grand nombre de fois, on observe que si le travail imposé aux fibres les plus fatiguées est de 41^{re}. 25 par millimètre carré, la rupture ne se produira qu'après 170,000 répétitions; après 480,000, si la charge est de 33^{re}. 75 seulement, comme l'indique le tableau suivant :</p> <table border="1" data-bbox="909 548 1292 649"> <tr> <td>41^{re}. 25</td> <td>170,000 répétitions.</td> </tr> <tr> <td>33^{re}. 75</td> <td>480,000 »</td> </tr> <tr> <td>30^{re}. 00</td> <td>1,320,000 »</td> </tr> <tr> <td>27^{re}. 00</td> <td>4,033,000 »</td> </tr> </table> <p>Enfin, lorsque le travail descend à 22 kilog. 50, la pièce ne rompt plus quel que soit le nombre des répétitions. C'est ce travail limite, n'amenant jamais la rupture, qui a été déterminé par l'expérimentateur avec autant de précision que peut le permettre une recherche aussi délicate.</p> <p>Le mode de chargement a été varié de plusieurs manières :</p> <p>1° On opérât par traction simplement sur une tige métallique, qu'on laissât ensuite revenir à sa longueur primitive ; après quoi recommençait la traction, et ainsi de suite.</p> <p>2° Une pièce étant posée sur ses appuis, on la fléchissait, elle revenait librement à sa forme première, etc.</p> <p>3° La pièce était alternativement fléchie dans un sens, puis dans l'autre, sans jamais revenir au repos.</p> <p>4° On a ensuite déterminé, pour chaque pièce expérimentée, la charge ordinaire de rupture, ou <i>charge statique</i> que l'on observe lorsqu'on charge progressivement et avec précaution jusqu'à ce que le métal se rompe.</p> <p>Les résultats observés sont les suivants, ramenés au millimètre carré :</p> <table border="1" data-bbox="813 1041 1404 1276"> <thead> <tr> <th></th> <th>Traction simple. kil.</th> <th>Flexion simple. kil.</th> <th>Flexion en sens contraire. kil.</th> <th>Charge statique. kil.</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Fer du Phénix.....</td> <td>23.4 à 26.3</td> <td>21.9</td> <td>10.2 à 11.7</td> <td>32.6</td> </tr> <tr> <td>« de Westphalie.....</td> <td>23.4</td> <td>26.3</td> <td>17.5</td> <td>»</td> </tr> <tr> <td>« anglais.....</td> <td>»</td> <td>»</td> <td>14.6 à 17.5</td> <td>»</td> </tr> <tr> <td>«</td> <td>29.2</td> <td>»</td> <td>17.5</td> <td>42.8</td> </tr> <tr> <td>Acier Krupp.....</td> <td>21.9 à 36.5</td> <td>32.0 à 43.9</td> <td>19.9 à 22.7</td> <td>53.4 à 75.2</td> </tr> <tr> <td>« fondu de Bochum..</td> <td>»</td> <td>32.9</td> <td>19.0</td> <td>64.7</td> </tr> <tr> <td>« » Vickers..</td> <td>»</td> <td>»</td> <td>16.1</td> <td>42.4</td> </tr> <tr> <td>« de Fisth.....</td> <td>33.6</td> <td>32.9</td> <td>16.1 à 17.5</td> <td>84.0</td> </tr> <tr> <td>« fondu de Borsig..</td> <td>»</td> <td>»</td> <td>14.6 à 18.3</td> <td>50.4 à 58.6</td> </tr> </tbody> </table> <p>Une dernière série d'expériences a été faite dans des conditions différentes: après avoir chargé fortement la pièce, on ne la laissait pas revenir librement à son état primitif, on la ramenait seulement à une charge</p>	41 ^{re} . 25	170,000 répétitions.	33 ^{re} . 75	480,000 »	30 ^{re} . 00	1,320,000 »	27 ^{re} . 00	4,033,000 »		Traction simple. kil.	Flexion simple. kil.	Flexion en sens contraire. kil.	Charge statique. kil.	Fer du Phénix.....	23.4 à 26.3	21.9	10.2 à 11.7	32.6	« de Westphalie.....	23.4	26.3	17.5	»	« anglais.....	»	»	14.6 à 17.5	»	«	29.2	»	17.5	42.8	Acier Krupp.....	21.9 à 36.5	32.0 à 43.9	19.9 à 22.7	53.4 à 75.2	« fondu de Bochum..	»	32.9	19.0	64.7	« » Vickers..	»	»	16.1	42.4	« de Fisth.....	33.6	32.9	16.1 à 17.5	84.0	« fondu de Borsig..	»	»	14.6 à 18.3	50.4 à 58.6
41 ^{re} . 25	170,000 répétitions.																																																										
33 ^{re} . 75	480,000 »																																																										
30 ^{re} . 00	1,320,000 »																																																										
27 ^{re} . 00	4,033,000 »																																																										
	Traction simple. kil.	Flexion simple. kil.	Flexion en sens contraire. kil.	Charge statique. kil.																																																							
Fer du Phénix.....	23.4 à 26.3	21.9	10.2 à 11.7	32.6																																																							
« de Westphalie.....	23.4	26.3	17.5	»																																																							
« anglais.....	»	»	14.6 à 17.5	»																																																							
«	29.2	»	17.5	42.8																																																							
Acier Krupp.....	21.9 à 36.5	32.0 à 43.9	19.9 à 22.7	53.4 à 75.2																																																							
« fondu de Bochum..	»	32.9	19.0	64.7																																																							
« » Vickers..	»	»	16.1	42.4																																																							
« de Fisth.....	33.6	32.9	16.1 à 17.5	84.0																																																							
« fondu de Borsig..	»	»	14.6 à 18.3	50.4 à 58.6																																																							

Puis l'auteur apporte deux commentaires sur les expériences réalisées.

Le premier est qu'elles « ne sont pas assez nombreuses encore pour que l'on puisse baser sur elles des formules aussi précises ».

Le second est que pour « produire dans un temps raisonnable les milliers [...] de déchargements successifs qui sont nécessaires, Vöhler opérât au moyen de roues dentées ». Or « ces chocs qui se succèdent avec une grande rapidité ne permettent pas à l'élasticité naturelle du métal d'opérer sa détente complète, le travail extérieur s'emmagasine ainsi peu à peu à l'intérieur du métal qui arrive promptement à un état de tension exagérée ».



Ainsi, comme Jean Résal (voir parties 1 et 2 de l'article), l'auteur ne réfute pas les résultats des essais, *« les faits acquis montrent qu'il faut tenir compte d'un élément négligé autrefois, l'action très manifeste qu'exerce la répétition d'efforts tantôt plus grands, tantôt plus faibles »*, mais n'adhère pas à la théorie de la fatigue des allemands (possibilité d'un endommagement du matériau pour des contraintes inférieures à la limite d'élasticité) et entend bien le faire savoir *« les ingénieurs allemands ont voulu, un peu trop tôt peut-être, en déduire une théorie nouvelle »*.

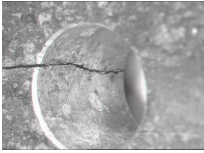
L'auteur démontre ensuite que les ingénieurs allemands ont établi des règles qui s'avèrent similaires aux règles aujourd'hui utilisées.

Il commence par leur principale conclusion : la charge de non rupture en fatigue serait la moitié de la charge de rupture en statique (c'est aujourd'hui une corrélation admise et utilisée couramment pour une estimation rapide de la limite d'endurance). Or selon l'auteur, *« la limite d'élasticité se trouve être également moitié à peu près de cette dernière »*. L'auteur conclut *« les Allemands [...] reviennent, par une autre voie, au résultat ordinaire »*.

Un autre résultat des essais de Mr Wöhler est l'effet très néfaste des flexions alternées en sens inverse. Pour l'auteur, *« qu'en faut-il conclure ? C'est que les pièces qui travaillent alternativement par tension et compression, ne sauraient être calculées comme les pièces qui travaillent par flexion simple »*. Or selon Mr Planat, *« ce fait est connu depuis longtemps et l'on en a toujours tenu compte »* !

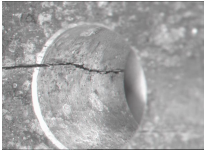
La conclusion de Mr Planat est alors virulente :

« Voilà à quoi se bornent, en fait, si on les dépouille de leur appareil scientifique, les modifications récemment apportées aux méthodes connues. On appréciera facilement, sur cet exposé des faits, s'il y a lieu d'opposer une nouvelle méthode, triomphante, à une méthode soi-disant surannée et détrônée, qu'il faudrait reléguer dans les débris du passé. Nous pensons qu'il faut approuver la conclusion très sage et très digne par laquelle le président de la Société a clos cette discussion des ingénieurs civils, lorsqu'il a dit : « Je crois, Messieurs, que la discussion a été aussi complète que possible ; et, en résumé, on peut dire que, tout en rendant pleine et entière justice aux travaux remarquables de nos savants expérimentateurs allemands, chacun de nous, ici, reste attaché au principe de la limite d'élasticité qui, en France, a servi de base à la théorie et aux formules pratiques de la résistance des matériaux, et qui, suivant l'expression des ingénieurs anglais, caractérise l'École française »



On comprend maintenant la réticence des ingénieurs français face aux résultats de fatigue des ingénieurs allemands : au-delà du fâcheux épisode guerrier de 1870 qui n'a pas tellement du arranger les choses..., c'est jusqu'à « l'École Française » qui se trouvait menacée par cette notion de fatigue !

<p>DIVERS MODES D'APPRECIATION DE LA CHARGE DE SÉCURITÉ. 105</p> <p>se trouve alors modifiée, et qu'on peut la reculer jusqu'à ce qu'elle atteigne le point de rupture.</p> <p>Si nous considérons donc les cas de tension et flexion simples, nous voyons que la déformation du métal sous la charge se divise en deux périodes : l'une qui va jusqu'à la limite d'élasticité ou de non-rupture, comme on voudra l'appeler, dans laquelle les phénomènes sont très réguliers et toujours les mêmes, quel que soit le mode de chargement; l'autre, qui s'étend au delà, jusqu'à la rupture définitive, où tout est variable, où tout change, limite d'élasticité, point de rupture, suivant le mode de chargement.</p> <p>Voilà ce qui paraît bien établi aujourd'hui. Quelle influence ces faits constatés peuvent-ils exercer sur notre méthode de calcul? — Aucun, car, du moment où tout le monde convient qu'il faut pratiquement se tenir bien au-dessous de la limite qui clôt la première période, que nous importe pratiquement ce qui se passe dans la seconde? Dans la construction des charpentes, nous n'avons donc rien à modifier à nos procédés actuels.</p> <p>Mais il est certains cas où Vöhler a observé que la rupture commençait à se produire, sous des répétitions répétées, bien avant la limite d'élasticité; ce sont les cas où l'on procédait par flexions alternées en sens inverses. Ainsi l'on a vu que le travail qui peut amener la rupture dans ces conditions ne dépasse parfois pas 11 à 12 kilog. pour le fer, tandis que la limite d'élasticité se trouvait à 21 ou 22 kilog. Ce que nous disions tout à l'heure ne s'applique donc plus ici.</p> <p>Qu'en faut-il conclure? c'est que les pièces, comme bielles, tiges de pistons, qui travaillent alternativement par tension et compression, ne sauraient être calculées comme les pièces qui travaillent par flexion simple; que le fer ne doit pas y travailler à 6 ou 8 kilog., mais seulement à 3 ou 4 kilogr., par exemple. Ce fait est connu depuis longtemps, et l'on en a toujours tenu compte; seulement, en partant des expériences faites par Vöhler, les ingénieurs pourront en tenir compte avec plus de précision qu'on ne le faisait auparavant. Il faut se rappeler toutefois que ces expériences ne donnent, comme nous le rappelions tout à l'heure, que des indications approximatives, les conditions d'expérience n'étant pas celles de la réalité pratique.</p> <p>Voilà à quoi se bornent, en fait, si on les dépouille de leur appareil scientifique, les modifications récemment apportées aux méthodes connues. On appréciera facilement, sur cet exposé des faits, s'il y a lieu d'opposer une nouvelle méthode, triomphante, à une méthode soi-disant surannée et détrônée, qu'il faudrait reléguer dans les débris du passé.</p>	<p>106 CONSÉQUENCES PRATIQUES.</p> <p>Nous pensons qu'il faut approuver la conclusion très sage et très digne par laquelle le président de la Société a clos cette discussion des ingénieurs civils, lorsqu'il a dit : « Je crois, Messieurs, que la discussion a été aussi complète que possible; et, en résumé, on peut dire que, tout en rendant pleine et entière justice aux travaux remarquables des savants expérimentateurs allemands, chacun de nous, ici, reste attaché au principe de la <i>limite d'élasticité</i> qui, en France, a servi de base à la théorie et aux formules pratiques de la résistance des matériaux, et qui, suivant l'expression des ingénieurs anglais, caractérise l'École française. »</p>
--	---



Conclusion

L'endommagement d'un matériau pour des contraintes inférieures à la limite d'élasticité, base de la fatigue, est aujourd'hui accepté par tout le monde.

Mais à la fin du XIXe, 60 ans après les premières publications, cette théorie proposée par les Allemands n'était pas acceptée en France et suscitait même de vives réactions. En effet, les Français avaient fondé leurs règles de dimensionnement sur le principe que toute contrainte inférieure à la limite d'élasticité ne peut causer de dommage, et ils basaient leur dimensionnement sur cette limite d'élasticité. Une nouvelle théorie supposant un endommagement pour des contraintes sous la limite d'élasticité et des règles de dimensionnement ne se basant pas sur cette valeur mettaient sérieusement en cause les bases de la théorie de la résistance des matériaux établies en France !

Après ce constat, on peut se demander comment la fatigue des matériaux a finie par être acceptée en France. Ce sera l'objet de mes prochains articles.