

Fatigue de la charpente métallique d'un pont mixte

Clément DESODT - Hélène HORSIN MOLINARO
Hadrien RATTEZ

Edité le 22/05/2018

Cette ressource est issue du dossier d'ingénierie d'agrégation Génie Civil d'Hadrien Rattez. Cette étude de cas s'appuie sur le cas concret du pont Jeanne d'Arc de Rouen ; les détails sur cet ouvrage d'art et sa restauration, sont à consulter dans la ressource « Etude du renforcement d'un pont mixte ».

Une structure soumise à des charges d'intensité variable peut, au bout d'un certain nombre de cycles, rompre alors que sa résistance statique n'est pas atteinte. Ce phénomène appelé fatigue, est particulièrement dangereux, la rupture est brutale et de type fragile. Les ponts-routes ou les ponts rails sont particulièrement exposés à ce phénomène de part leur structure élancée et des types de charges qu'ils reprennent. Le tablier du pont Jean d'Arc de Rouen souffre principalement de ce phénomène.

La fatigue des ouvrages métalliques est connue et partiellement prise en compte depuis longtemps dans les dispositions constructives et le choix de certaines épaisseurs minimales. Cependant les règles de l'art permettant la vérification complète en fatigue datent de 1996 et le pont Jeanne d'Arc de Rouen a été construit en 1956. Cet ouvrage est aussi traversé par des charges roulantes qui n'étaient pas prévues au moment de sa construction.

Cette ressource vise à comparer deux méthodes différentes pour compter le nombre de cycles de fatigue : la méthode de la goutte d'eau (qui est programmée dans le logiciel Pythagore [1]) et la méthode du réservoir (qui est recommandée par le SETRA¹ pour les calculs manuels)[2].

Les termes comportant une * sont définis dans la ressource « Petit lexique du pont mixte ».

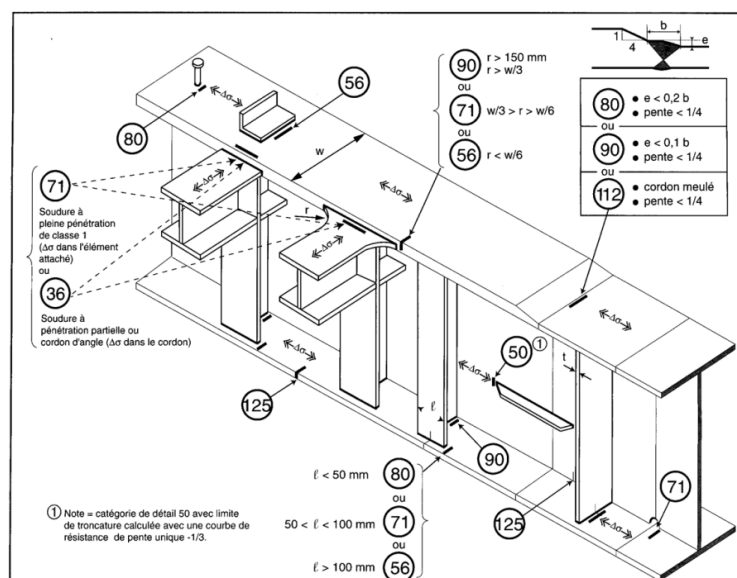


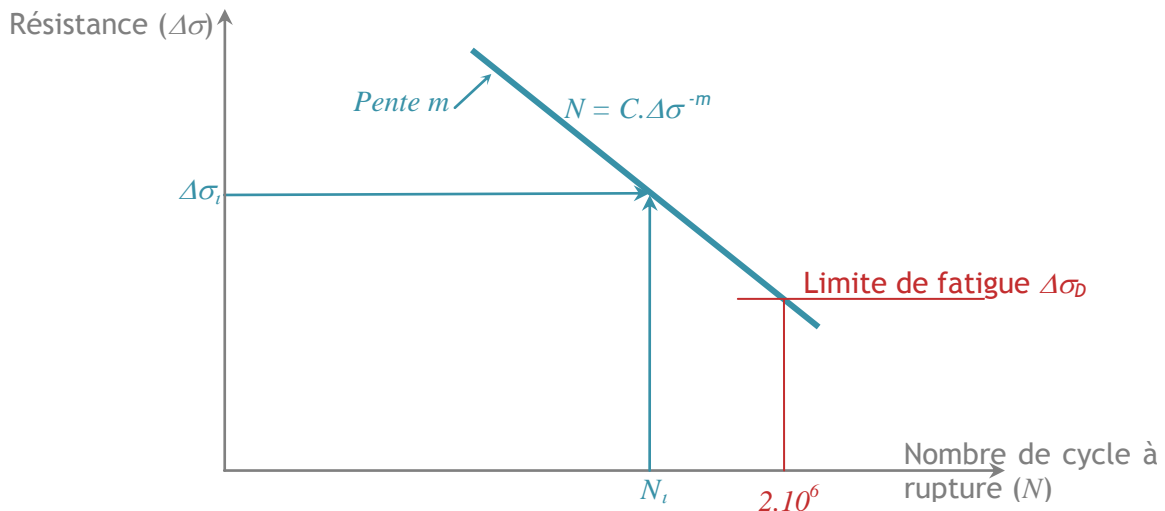
Figure 1 : Schéma avec différentes classes de détail issues des recommandations du SETRA [3]

¹ Service d'Études sur les Transports, les Routes et leurs Aménagements

1 – Principe de la vérification à la fatigue

La fatigue des ouvrages métalliques est l'objet du chapitre 9 de l'Eurocode 3. La première étape consiste à déterminer les « classes de détails » présents sur l'ouvrage à partir des schémas présentés dans l'Eurocode, c'est-à-dire les détails constructifs qui vont être sensibles à ce phénomène.

Une fois les détails sensibles repérés, un tableau nous donne une résistance $\Delta\sigma_c$ (chiffres entourés figure 1) qui correspond à la valeur de résistance à 2.10^6 cycles. Elle permet de connaître la courbe de résistance de ce détail, appelée courbe de Wöhler. Toutes les courbes dans ce diagramme $\Delta\sigma$ en fonction de N (le nombre de cycles à rupture) sont parallèles entre elles, donc les coordonnées d'un point permettent de connaître toute la courbe.



Il s'agit ensuite de déterminer les variations de contraintes dans l'élément à partir de chargement réglementaires (définis dans l'Eurocode) et le nombre de répétitions N en analysant les charges que va rencontrer la structure au cours de son existence.

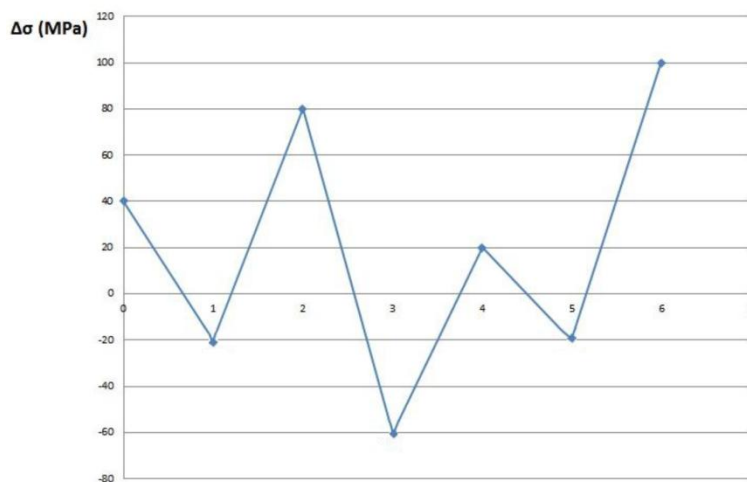


Figure 3 : Exemple de variation de contraintes due à un chargement

La vérification à la fatigue utilise deux types de format : chargement d'amplitude constante ou chargement d'amplitude variable.

² Du nom d'August Wöhler (1819-1914), ingénieur allemand spécialisé dans le comportement mécanique des fontes et des aciers.

Dans le cas d'un chargement d'amplitude constante, on vérifiera : $\Delta\sigma \leq \frac{\Delta\sigma_R}{\gamma_M}$

Avec $\Delta\sigma$ l'étendue de contraintes agissant N fois ; $\Delta\sigma_R$ est la résistance à la fatigue du détail concerné pour N cycles (à partir de la courbe de Wöhler) ; γ_M est un coefficient partiel de sécurité.

Dans le cas d'un chargement d'amplitude variable, on vérifiera que le dommage cumulé est inférieur à 1 : $D \leq 1$

Ce dommage est calculé des différentes étendues de contraintes $\Delta\sigma_i$ agissant chacune n_i fois. On applique la formule de Palmgren-Miner : $D = \sum \frac{n_i}{N_i}$

N_i est le nombre de cycles d'étendue $\Delta\sigma_i \cdot \gamma_M$ conduisant à la ruine pour le détail concerné.

Pour appliquer cette loi, il faut classer et compter le nombre n_i de cycles d'étendue $\Delta\sigma_i$ à partir de l'histoire des contraintes. Pour ce faire, il existe deux méthodes principales de comptage des cycles : la goutte d'eau et le réservoir.

2 – Méthode du réservoir

Cette méthode (schématisée figures 4 et 5) consiste à « remplir d'eau » entre deux points hauts sur la séquence de référence, à l'image d'un réservoir, puis de vider ce réservoir à partir des points les plus bas. Les différences de niveaux d'eau correspondent aux $\Delta\sigma_i$.

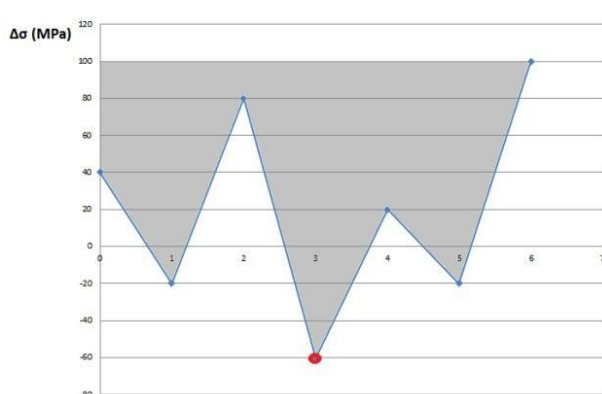


Figure 4 : Remplissage du réservoir fictif

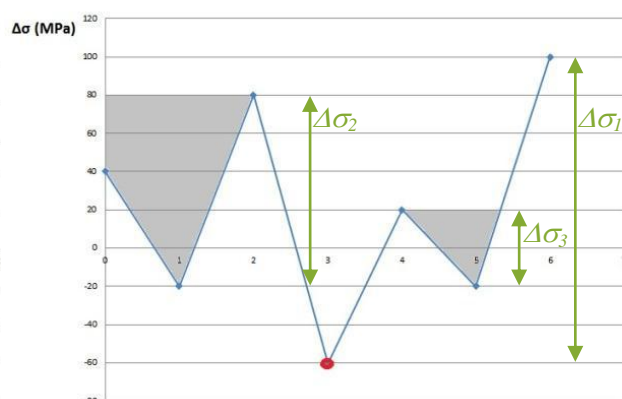


Figure 5 : Vidange par le point le plus bas

Pour cet exemple, on obtient : $\Delta\sigma_1 = 160$ MPa, $\Delta\sigma_2 = 100$ MPa, $\Delta\sigma_3 = 40$ MPa.

3 – Méthode de la goutte d'eau

Son nom vient du fait que pour l'appliquer, le graphique de variations de contraintes est tourné de 90° , afin d'imaginer que celui-ci est un relief sur lequel descend une goutte d'eau en partant d'un des extrema, tout en respectant un certain nombre de contraintes :

- En partant d'un maximum la goutte s'arrête là où le trajet a déjà été emprunté ou si le chemin va être emprunté par une goutte provenant d'un maximum supérieur à celui du départ (figure 6, la goutte partant du point 0 ne continue pas son chemin sur la branche du dessous car elle va être empruntée par la goutte provenant du point 2, la valeur la plus élevée).
- Il en est de même en partant d'un minimum.

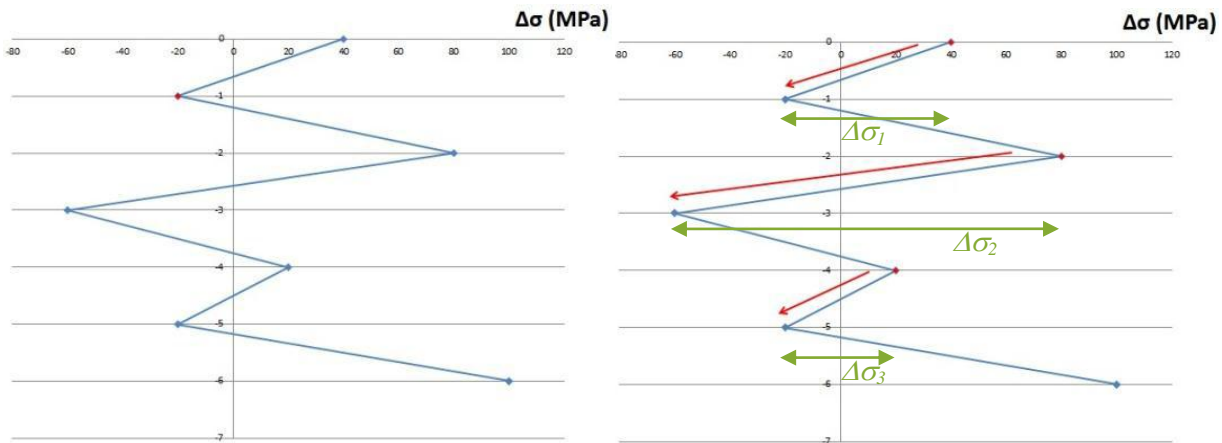


Figure 6 : Illustration de la méthode de la goutte d'eau

Pour cet exemple, on obtient : $\Delta\sigma_1 = 60 \text{ MPa}$, $\Delta\sigma_2 = 140 \text{ MPa}$, $\Delta\sigma_3 = 40 \text{ MPa}$

Cette méthode n'est pas conseillée pour les calculs à la main, les risques d'erreurs étant plus élevés. En revanche, elle est souvent programmée dans les logiciels de calcul.

4 – Chargement à considérer pour ce pont

Pour étudier la fatigue du pont Jeanne d'Arc, toutes les phases de son existence depuis sa construction sont à considérer. Il y a trois grandes périodes à étudier :

De 1956 à 1994 : le pont Jeanne d'Arc est utilisé uniquement comme pont routier. L'Eurocode 1 définit cinq modèles de charges pour étudier la fatigue des ponts routiers. Les deux premiers sont trop pessimistes et servent à identifier les zones concernées par la fatigue. Le troisième permet simplement des vérifications courantes pour une amplitude de variation de contraintes uniforme. Le modèle 4 propose certaine répartition du trafic, contrairement au modèle 5, c'est pourquoi nous allons l'employer.

On considère une utilisation en deux fois deux voies sur cette période, avec une voie lente dans chaque direction. Le nombre de poids-lourds par an est de $N = 0,125 \cdot 10^6$. Cinq types de poids-lourds vont circuler sur l'ouvrage (figure 7).

Type de véhicule			Type de trafic			
1	2	3	4	5	6	7
			Longues distances	Distances moyennes	Trafic local	
Camion	Espacement des essieux (m)	Charges d'essieu équivalentes (kN)	Pourcentage de camions	Pourcentage de camions	Pourcentage de camions	Type de roue
	4,5	70 130	20,0	40,0	80,0	A B
	4,20 1,30	70 120 120	5,0	10,0	5,0	A B B
	3,20 5,20 1,30 1,30	70 150 90 90	50,0	30,0	5,0	A B C C
	3,40 5,00 1,80	70 140 90 90	15,0	15,0	5,0	A B B B
	4,80 3,60 4,40 1,30	70 130 90 80 80	10,0	5,0	5,0	A B C C C

Figure 7 : Différents types de poids lourds pour les modèles de charge

PL Type 1	PL Type 2	PL Type 3	PL Type 4	PL Type 5	Nombre/jour
					134
					9
					9
					9
					9
268	18	18	18	18	Total par jour/sens
79%	5,2%	5,2%	5,2%	5,2%	Proportion PL

Figure 8 : synthèse des modèles de charges pour la période 1956-1994

De 1994-2012 : le pont Jeanne d'Arc est désormais utilisé avec trois voies routières, et on considère une seule voie lente dans chacune des directions. Le nombre de poids lourds considérés par an est $N = 0,05.10^6$.

Le pont Jeanne d'Arc est utilisé par le métro dont il faut prendre en compte les charges. Le poids d'une rame avec son chargement caractéristique est de 62 tonnes, avec $N = 0,0803.10^6$ passage par an.

Rame 30m CCM voie1	Rame 30m CCM voie1	PL Type 1	PL Type 2	PL Type 3	PL Type 4	PL Type 5	Nbre/jour
							50
							56
							3
							3
							3
							3
							102
							56
							3
							3
							3
							3
							102
220	200	112	6	6	6	6	Total par jour/sens
		82%	4,5%	4,5%	4,5%	4,5%	Proportion PL

Figure 9 : synthèse des modèles de charges pour la période 1994-2012

De 2012 à 2042 : l'utilisation du pont Jeanne d'Arc est identique à celle de la période précédente, la seule différence est le poids des rames qui est désormais de 95 tonnes.

5 – Comparaison des deux méthodes

Une des parties les plus concernées (en rouge figure 11) par le phénomène de fatigue est la soudure du gousset* (figure 10) à une poutre caisson de l'entretoise* à la clé* de la travée* centrale (voir ressource « *Etude du renforcement d'un pont mixte* »).



Figure 10 : Soudure du gousset entretoise/poutre caisson

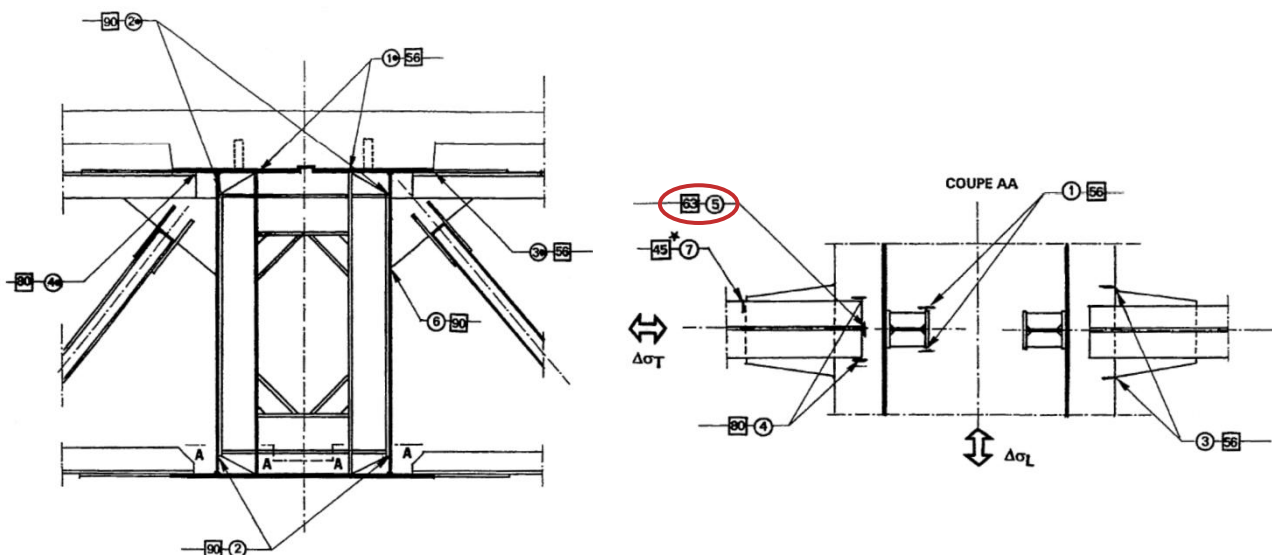


Figure 11 : Classe de détail au niveau des entretoises du pont (étude réalisées par SOFRESID)

5.1 - Méthode de la goutte d'eau

À l'aide du logiciel Pythagore [1], tous les chargements sont appliqués sur le modèle exhaustif du pont. Le logiciel enregistre l'historique des contraintes en différents points de la structure. Le nombre de passage de chaque historique de contraintes est spécifié lors de l'utilisation du post traitement « FAT » du logiciel Pythagore qui applique la méthode de la goutte d'eau ; la valeur du coefficient D pour chaque point étudié est alors déterminée.

Les valeurs de l'endommagement D ont été calculées sur les trois périodes (1956-1994 : 2x2 voies routières, 1994-2012 : 3 voies routières et 2 voies de tramway, 2012-2042 : 3 voies routières et 2 voies de métro avec rames plus lourdes) et l'effet du renforcement sur les valeurs de l'endommagement pour ce détail a été étudié.

Les résultats des endommagements sont données période par période, cellule par cellule (la cellule 1 est coté amont soit sous le métro), et cas de charge par cas de charge. Pour chaque cellule les valeurs sur les deux diagonales, diagonale amont et diagonale avale (en bleu figure 12) sont extraites. Les diagonales ajoutées lors du renforcement ne sont pas prises en compte ainsi

que l'endommagement des cellules qui ne sont pas situées sous les voies de métro, elles présentent moins de risques.

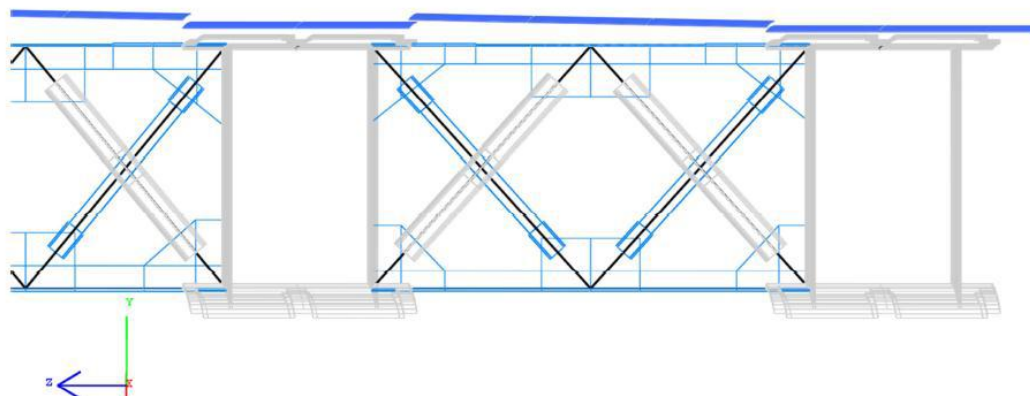


Figure 12 : Vue d'une cellule de l'entretoise 14 (extrait du logiciel Pythagore [1])

Valeurs de l'endommagement D sur la période 1956 -1994 :

	Cellule 1	Cellule 2	Cellule 3	Cellule 4
Diagonale amont	0,03	0	0	0
Diagonale aval	0,03	0	0,01	0,01

Les valeurs de l'endommagement sont faibles sur cette période car les convois ne sont que des convois de poids lourds.

Valeurs de l'endommagement D sur la période 1994 -2012 :

	Cellule 1	Cellule 2	Cellule 3	Cellule 4
Diagonale amont	0,13	0,05	0,25	0,08
Diagonale aval	0,09	0,05	0,36	0,07

La construction du métro entraîne une nette augmentation de l'endommagement.

Valeurs de l'endommagement D sur la période 2012 -2042 (ouvrage non renforcé) :

	Cellule 1	Cellule 2	Cellule 3	Cellule 4
Diagonale amont	1,69	1,32	0,6	0,48
Diagonale aval	0,81	1,32	1,27	0,17

À plusieurs endroits l'endommagement dépasse déjà la valeur 1.

Récapitulatif des valeurs de l'endommagement D (somme sur les trois périodes) pour l'ouvrage non renforcé entre 1956 et 2042 :

	Cellule 1	Cellule 2	Cellule 3	Cellule 4
Diagonale amont	1,84	1,37	0,85	0,56
Diagonale aval	0,93	1,37	1,64	0,25

Plusieurs diagonales risquent d'arriver à la rupture, c'est la raison de leur renforcement (voir ressource « Etude du renforcement d'un pont mixte »). On calcule alors le nouvel endommagement pour le pont renforcé.

Valeurs de l'endommagement D sur la période 2012 -2042 avec l'ouvrage renforcé :

	Cellule 1	Cellule 2	Cellule 3	Cellule 4
Diagonale amont	0,22	0,82	0,3	0,06
Diagonale aval	0,11	0,82	0,62	0,01

La valeur de l'endommagement baisse nettement, on calcule alors l'endommagement total du pont avec la dernière période renforcée.

Récapitulatif des valeurs de l'endommagement D entre 1956 et 2042 pour l'ouvrage renforcé à partir de 2012 :

	Cellule 1	Cellule 2	Cellule 3	Cellule 4
Diagonale amont	0,37	0,87	0,55	0,14
Diagonale aval	0,23	0,87	0,99	0,09

La résistance à la fatigue est assurée jusqu'en 2042.

5.2 - Méthode du réservoir

Pour appliquer la méthode du réservoir, les valeurs des contraintes dans la diagonale de l'entretoise sont collectées et les $\Delta\sigma$ sont calculées en traçant les historiques de contraintes.

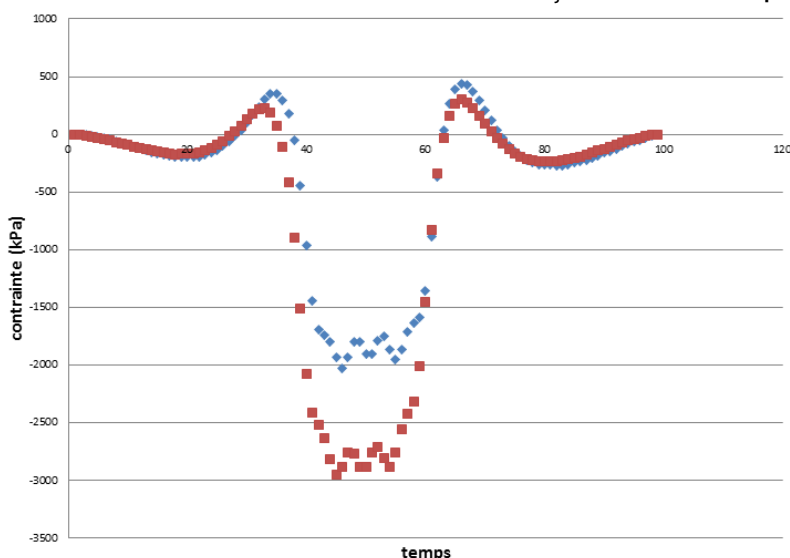


Figure 13 : Exemple de variations de contraintes dans la diagonale lors du passage d'un cas de charge

Les valeurs des variations de contraintes sont ensuite réparties en vingt intervalles réguliers. Les résultats des deux méthodes comparés sont en général différents. Par exemple, pour le cas de la diagonale amont de la cellule 3 entre 2012 et 2042 pour la géométrie renforcée et le cas de charge du passage d'un métro seulement sur la voie 2, les résultats obtenus sont :

Méthode de la goutte d'eau

Intervalles de $\Delta\sigma$	0-2318	2318-4636	44046-46365
Endommagement	3,5	0	1,5

Méthode du réservoir

Intervalles de $\Delta\sigma$	0-2318	2318-4636	44046-46365
Endommagement	3	1	1

La valeur de D avec la méthode du réservoir pour la diagonale amont de la cellule 3 entre 2012 et 2042 pour l'ouvrage renforcé est calculée.

Le n_i pour chaque cycle est donné par le nombre de répétition de ce cycle sur une courbe de contraintes (voir les deux tableaux ci-dessus) multiplié par le nombre de passage sur toute la période de ce type de charge.

Le N_i correspondant au nombre de cycles à rupture est obtenu grâce à la courbe de Wöhler et l'équation :

$$\log(N_i) = B - 3 \cdot \log(\Delta\sigma)$$

B est l'ordonnée à l'origine de la courbe (calculée à partir de la valeur à 2×10^6 cycles) et la pente de la courbe est $m=3$ (voir figure 2). On obtient :

Méthode du réservoir	Cellule 1	Cellule 2	Cellule 3	Cellule 4
Diagonale amont	0,15	0,86	0,46	0,08
Diagonale aval	0,13	0,85	0,62	0,08

Méthode de la goutte d'eau	Cellule 1	Cellule 2	Cellule 3	Cellule 4
Diagonale amont	0,22	0,82	0,3	0,06
Diagonale aval	0,11	0,82	0,62	0,01

Les résultats sont relativement proches et les différences entre les endommagements proviennent soit des arrondis sur les contraintes et les nombres de cycles à rupture N_i soit des nombres de cycles comptés sur une courbe de contraintes par une des deux méthodes. En effet, une différence de 0,5 (comme sur l'exemple de variations de contraintes donnés plus haut) sur le nombre de cycle peut entraîner, pour un chargement donné, une différence d'endommagement jusqu'à 0,2.

6 – Conclusion

Cette ressource vise à comparer deux méthodes différentes pour compter le nombre de cycles de fatigue : la méthode de la goutte d'eau et la méthode du réservoir. À la suite de la ressource « *Étude du renforcement d'un pont mixte* », une autre étude de cas est proposée « *Influence des dénivellations d'appuis d'un pont mixte* ».

Références :

[1]: <http://www.tpi.setec.fr/FR/050-rd/pythagore.php>

[2]: Bourrier, Pierre, Brozzetti, Jacques, Construction métallique et mixte acier-béton - Tome 1, Calcul et dimensionnement selon les Eurocodes 3 et 4, Paris, Eyrolles, « Construction métallique », 2000, 553 p.

[3]: Ponts métalliques et mixtes. Résistance à la fatigue. Guide de conception et de justifications, Sétra - CTICM - SNCF, 1996 ; référence Sétra F9611.