

# Apport des mesures de l'auto-échauffement sous sollicitations cycliques pour la détermination des propriétés en fatigue polycyclique d'un matériau très inclusionnaire

S. SIRE<sup>a</sup>, S. BEN SAAD<sup>b</sup>, C. DOUDARD<sup>b</sup>, S. CALLOCH<sup>b</sup>

a. Laboratoire Brestois de Mécanique et des Systèmes (LBMS), IUP GMP, 6 avenue Le Gorgeu, CS 93837, 29238 BREST Cedex 3

b. Laboratoire Brestois de Mécanique et des Systèmes (LBMS), ENSTA Bretagne, 2 rue François Verny, 29806 BREST Cedex 9

## Résumé :

*Des essais d'auto-échauffement sous chargement cyclique sur des éprouvettes en fer puddlé (fin XIX<sup>e</sup> siècle) ont été mis en œuvre afin de déterminer la limite d'endurance moyenne de ce matériau. Celui-ci étant hétérogène et fortement inclusionnaire (inclusions riches en phosphore), la question de la représentativité se pose. Nous analysons la dispersion des mesures d'auto-échauffement sur de éprouvettes de faible section. Un encadrement de la limite d'endurance moyenne est obtenu. Un modèle probabiliste à deux échelles dans lequel la limite élastique de chaque inclusion (au sens mécanique) est représentée par une loi de Weibull est proposé pour reproduire les observations expérimentales.*

## Abstract :

*Self heating tests under cyclic loadings have been carried out on puddle iron specimens (end of XIX<sup>th</sup> century) in order to determine the fatigue properties of this material. Since its inclusions ratio is very high (inclusions have a high phosphorus level) and their distribution is heterogeneous in the ferritic matrix, the question of the definition of a REV (representative elementary volume) arises. The self-heating measurements scatter is analysed with small cross section specimens. The mean fatigue limit can be estimated. We use a two-scale probabilistic model in which the yield stress of each site where the microplasticity takes place is represented by a Weibull law.*

**Mots clefs : fatigue, auto-échauffement, matériau inclusionnaire**

## 1 Introduction

Le fer puddlé est aujourd'hui le matériau constitutif de près de 40% en masse des tabliers des ponts ferroviaires en France. Construits entre 1850 et 1900, ces ouvrages sont principalement rivetés. Ils font l'objet de restauration ou de remplacement lorsque la question de leur intégrité se pose ; connaître l'état de fatigue de ce matériau est donc crucial.

L'étude porte sur le fer puddlé du viaduc de Lambézellec (Brest), construit entre 1891 et 1893. Long de 109 mètres, large de 3,60m et composé de sept piles triangulaires espacées de 13,50 mètres, cet ouvrage d'art franchit le ruisseau du Spernot, minuscule affluent de la Penfeld. Espacées de 13,50m, les piles supportent un tablier métallique composé de deux poutres maîtresses distantes de 2 mètres, hautes de 0,90m sur lesquelles reposent des semelles de 200mm de large. Des voûtains en brique supportent le ballast, les traverses et la voie ferrée. Ce viaduc est l'œuvre des ingénieurs français Louis Harel de la Noë (1852-1931) et Armand Considère (1841-1914) [1].

Abîmé pendant la seconde guerre mondiale et fortement corrodé, le viaduc de Lambézellec subit une restauration complète des piles et du tablier. Des cornières en fer puddlé ont été remplacées. Les éprouvettes utilisées pour les différents essais de caractérisation ont ainsi pu être prélevées dans des cornières de renforcement des piles, voir figure 1.



FIG. 1 – Le viaduc de Lambézellec.

## 2 Caractérisation du matériau

Le fer puddlé objet de l'étude est issu de cornières obtenues par laminage. Celles-ci ont été prélevées dans toutes les piles du viaduc. Elles mesurent 60mm de côté et font 6mm d'épaisseur.

Une analyse de la composition chimique par spectrométrie d'émission plasma a été effectuée sur l'une d'entre elle ; la composition en masse de ce fer quasiment pur est présentée dans le tableau suivant :

C	Mn	Si	S	P	Ni	Cr	Mo	Cu	Al	Fe
≤ 0,03	≤ 0,05	0,11	0,052	0,54	0,039	≤ 0,01	≤ 0,01	≤ 0,01	0,028	bal.

FIG. 1 – Composition chimique moyenne du fer puddlé de 1892 du viaduc de Lambézellec.

Ce fer puddlé présente de nombreuses inclusions riches en phosphore, elles sont allongées dans le sens du laminage. La taille du grain ferritique est grande par endroits et la distribution de phosphore est très hétérogène comme le montre la micrographie après une attaque au réactif d'Oberhoffer, voir figure 2. Les zones sombres correspondent à des régions déphosphorées entourant les inclusions.

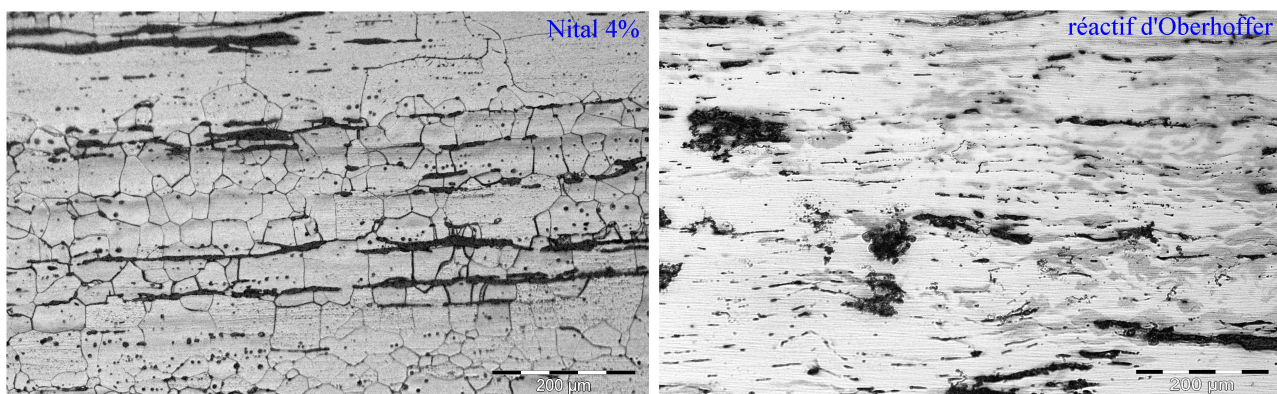


FIG. 2 – Micrographies du fer puddlé après attaques au Nital (gauche) et au réactif d'Oberhoffer (droite).

L'hétérogénéité du matériau rend difficile sa caractérisation mécanique. Comme le montrent les résultats de la figure 3, les essais de traction et de résilience ne sont pas reproductibles. Il existe une dispersion forte dans les caractéristiques mécaniques (essais menés jusqu'à rupture). Les essais de résilience montrent également une température de transition ductile/fragile élevée due à la taille du grain ferritique ainsi qu'un plateau ductile très bas à cause de la teneur inclusionnaire.

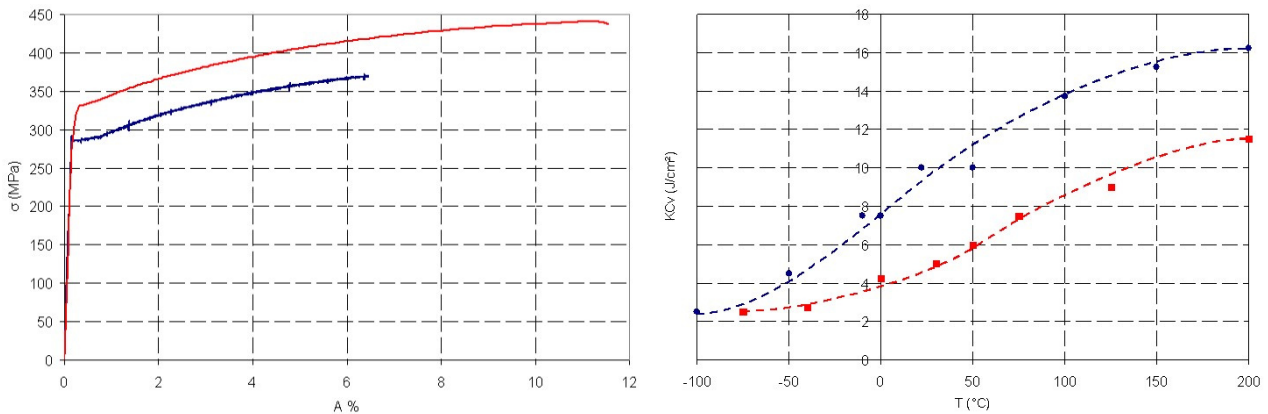


FIG. 3 – Caractérisation mécanique du fer puddlé.

### 3 Essais d'auto-échauffement

Depuis une dizaine d'années, les travaux de recherche sur la détermination rapide des propriétés à la fatigue à grand nombre de cycles à partir d'essais d'auto-échauffement se développent [2, 4]. La méthode consiste à mesurer l'évolution de la température moyenne d'une éprouvette à des paliers successifs de chargements sinusoïdaux. Dans le cas du fer puddlé, la température moyenne mesurée par thermocouples se stabilise rapidement, au bout de 300 secondes environ. À partir d'un certain niveau de chargement, cette température stabilisée augmente significativement par la présence de mécanismes dissipatifs de micro-plasticité à l'origine de l'endommagement du matériau. La limite d'endurance moyenne du matériau étudié est déterminée empiriquement à partir du comportement asymptotique des derniers points de la courbe d'auto-échauffement qui exprime la température stabilisée en fonction de l'amplitude des contraintes, voir figure 4.

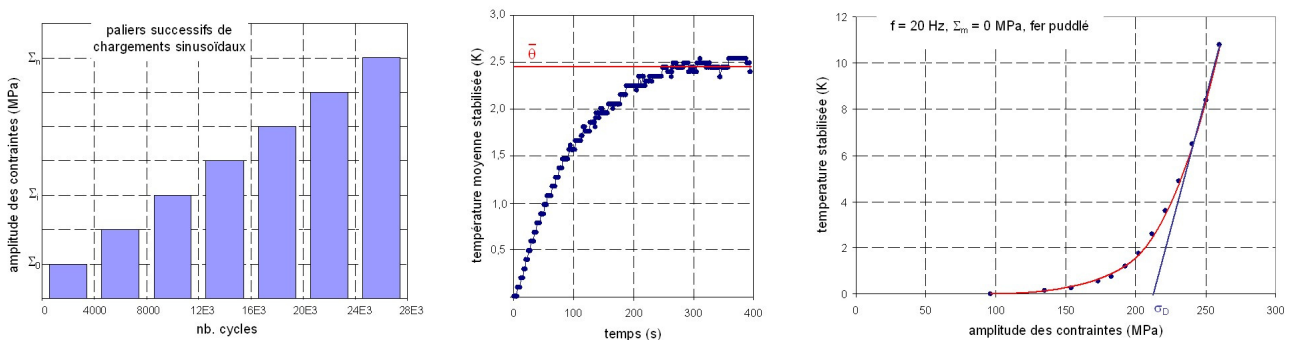


FIG. 4 – Principe des essais d'auto-échauffement, détermination empirique de la limite d'endurance moyenne.

Les recherches sur le comportement en fatigue du fer puddlé et des structures anciennes rivetées sont difficiles du fait de l'hétérogénéité du matériau et donc de la dispersion des résultats [5, 8]. Les essais d'auto-échauffement menés sur des éprouvettes de section  $5 \times 10 \text{ mm}^2$  soulèvent le même problème de représentativité du volume de fer étudié, les inclusions étant très nombreuses et de taille millimétrique pour les plus grosses. Ces essais permettent néanmoins de proposer un encadrement de la limite d'endurance moyenne  $\sigma_D$  du fer puddlé. Ainsi, à partir des courbes d'auto-échauffement présentées sur la figure 5 (représentation de la température stabilisée sur la constante de temps caractéristique des conditions thermiques en fonction de l'amplitude des contraintes), nous obtenons une limite d'endurance comprise entre 195 MPa et 225 MPa. La moyenne des résultats est proche de 210 MPa.

Les éprouvettes se rompant dans le domaine ductile (analyse des faciès de rupture au MEB), nous avons développé un modèle probabiliste à deux échelles dans lequel chaque inclusion élasto-plastique (au sens mécanique) est noyée dans une matrice élastique. Nous considérons donc un ensemble d'inclusions dont chaque limite élastique microscopique notée  $\sigma_i$  est représentée par une distribution de Weibull dont les paramètres sont  $S_0$  et  $m$  [9, 10]. La fonction de répartition  $f_0$  est donnée par l'équation (1).

$$f_0 = \frac{m}{S_0} \left( \frac{\sigma_y}{S_0} \right)^{m-1} \exp \left[ - \left( \frac{\sigma_y}{S_0} \right)^m \right] \quad (1)$$

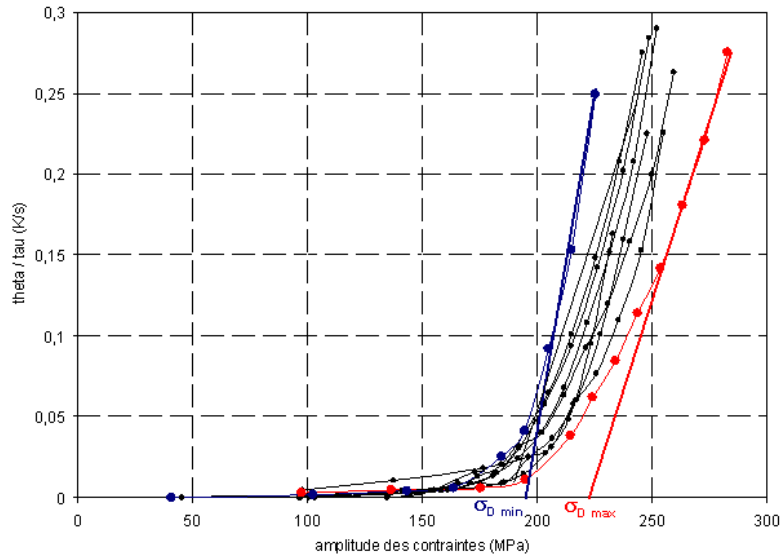


FIG. 5 – Courbes d'auto-échauffement du fer puddlé et encadrement de la limite d'endurance moyenne.

À partir de l'expression de la dissipation cyclique d'une inclusion de limite élastique  $\sigma_y$  sous un chargement  $\Sigma_0$  (2), il est possible de déterminer la somme des dissipations associées à chaque inclusion de limite élastique variable pondérée par la probabilité que l'inclusion ait cette limite dans le volume étudié.  $V_0$  représente le volume des sites dissipatifs et  $\langle \cdot \rangle$  est la partie positive de ' $\cdot$ '. En injectant une distribution de Weibull (1) dans le calcul de cette somme, on détermine l'expression de la dissipation cyclique volumique  $D$  dans laquelle  $f_v$  est la fraction volumique de l'inclusion et  $h$  une constante liée au matériau (3) [2].

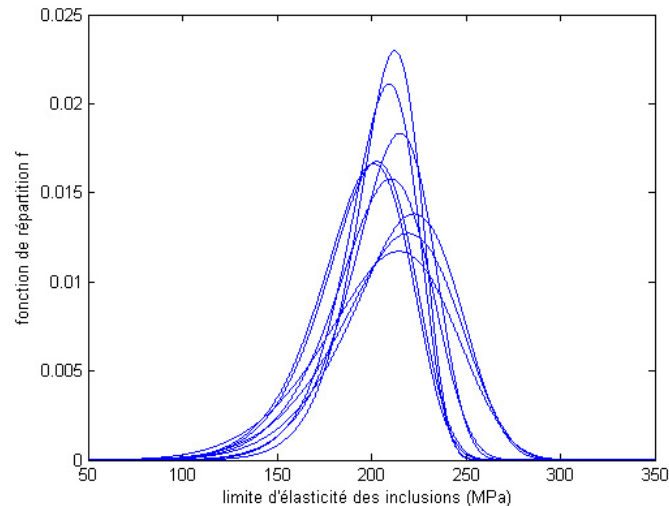
$$D(\sigma_y) = \frac{4V_0 \sigma_y}{h} \langle \Sigma_0 - \sigma_y \rangle \quad (2)$$

$$D = \frac{4f_v S_0^2}{h} \left( \frac{\Sigma_0}{S_0} \gamma \left[ \left( \frac{\Sigma_0}{S_0} \right)^m, 1 + \frac{1}{m} \right] - \gamma \left[ \left( \frac{\Sigma_0}{S_0} \right)^m, 1 + \frac{2}{m} \right] \right) \quad \text{avec } \gamma(x, a) = \int_0^x t^{a-1} \exp(-t) dt \quad (3)$$

La résolution de l'équation de la chaleur (4) où le terme  $S_t$  est fonction de la dissipation cyclique volumique  $D$  permet d'exprimer rapidement l'expression de la température moyenne stabilisée  $\bar{\theta}$  dont la forme est identique à celle de la dissipation.

$$\dot{\theta} + \frac{\theta}{\tau_{eq}} = S_t \quad (4)$$

Pour chaque courbe d'auto-échauffement, nous pouvons déterminer les paramètres  $m$  et  $S_0$  de la distribution de Weibull. L'ensemble de ces résultats est présenté sur la figure 6 suivante.  $S_0$  est caractéristique de la valeur moyenne des limites d'élasticité microscopiques, il varie entre 200 et 220 MPa pour une valeur moyenne égale à 210 MPa. Ce paramètre varie donc peu sur le lot d'éprouvettes testées. En revanche, le module de Weibull  $m$ , qui représente la dispersion de ces limites d'élasticité est compris entre 7 et 13. La dispersion relevée sur le comportement thermique du fer puddlé est donc en partie liée à la variation de  $m$ .

FIG. 6 – Fonctions de répartition de  $\sigma_y$  pour le lot d'éprouvettes testées

Une étude sur l'influence du module de Weibull sur la détermination de la dissipation cyclique volumique (et donc sur la température stabilisée d'après l'équation (4)) a ainsi été menée. Pour  $S_0$  égal à 210 MPa, l'influence de  $m$  compris entre 7 et 13 sur la réponse thermique a été analysée. Pour un lot d'éprouvettes dont le module de Weibull est différent ( $m$  obéit lui-même à une loi de Weibull), l'évolution de la température stabilisée sur le temps caractéristique est présentée sur la figure 7 suivante. Un faisceau des courbes est obtenu représentant la dispersion des résultats. Afin de mieux prévoir le comportement asymptotique de ces courbes, le modèle doit encore être amélioré pour tenir compte de la fraction volumique de l'inclusion qui est *a priori* différente selon l'éprouvette considérée.

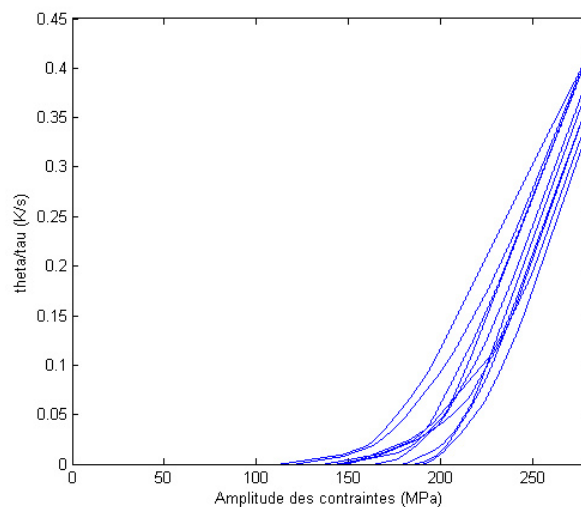


FIG. 7 – Courbes d'auto-échauffement obtenues par le modèle probabiliste développé

## 4 Conclusions

Des travaux de recherche sur le comportement en fatigue polycyclique d'un fer puddlé hétérogène ont été menés. Pour cela, la mise en œuvre d'essais d'auto-échauffement sous sollicitations cycliques a permis de mettre en évidence une dispersion des résultats, en particulier un encadrement de la limite d'endurance moyenne. Un modèle probabiliste à deux échelles basée sur une répartition de Weibull de la limite élastique des sites dissipatifs a été développé et a mis en évidence l'influence du module de Weibull sur la réponse thermique. Ce modèle traduit une dispersion de la dissipation et donc de la température stabilisée en fonction de l'amplitude des contraintes, ce qui est observé expérimentalement. Il doit encore être amélioré pour notamment prendre en considération la variation du nombre d'inclusions et de leur géométrie qui est variable selon l'éprouvette considérée.

## Références

- [1] Sire S., Les ponts métalliques à Brest au XIX<sup>e</sup> siècle, les exemples du pont tournant de Recouvrance et du viaduc de Lambézellec, *L'art du vide, trois siècles de génie français, XVIII<sup>e</sup> - XX<sup>e</sup>*, Somogy éditions d'art, ISBN : 978-2-757-20357-6, 64-75, 2010.
- [2] Doudard C., Détermination rapide des propriétés en fatigue à grand nombre de cycles à partir d'essais d'échauffement, Thèse de doctorat, ENS Cachan, 2004.
- [3] Doudard C., Calloch S., Influence of hardening type on self-heating of metallic materials under cyclic loadings at low amplitude, *European Journal of Mechanics – A/Solids*, 28(2), 233-240, 2009.
- [4] Rosa G.L., Risitano A., Thermographic methodology for rapid determination of the fatigue limit of materials and mechanical components, *International Journal of Fatigue*, 22, 65-73, 2000.
- [5] de Jesus A.M.P., de Silva A.L.L., Correia J.A.F.O., Figueiredo M., Maeiro J., Ribeiro A., Fernandes A., Analysis of low-cycle fatigue data of materials from several Portuguese riveted metallic bridges, *Iberian Conference on Fracture and Structural Integrity*, Porto, 2010.
- [6] de Jesus A.M.P., da Silva A.L.L., Identification of the net effective strain-life model for a puddle iron from the Portuguese Fão riveted road bridge, *Procedia Engineering* 2, 1181-1190, 2010.
- [7] DiBattista J.D., Adamson D.E.J., Kulak G.L., Evaluation of remaining fatigue life for riveted truss bridges. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 25, 678-91, 1998.
- [8] Jesus A.M.P., Pinto H., Fernández-Canteli A., Castillo E., Correia J.A.F.O., Fatigue Assessment of a Riveted Shear Splice Based on a Probabilistic Model, *International Journal of Fatigue*, 32, 453–62, 2010.
- [9] Weibull W., A statistical theory of the strength of materials, *Royal Swedish Institute for Engineering Research*, Report 151, 1939.
- [10] Weibull W., A statistical distribution function of wide applicability, *ASME Journal of Applied Mechanics*, 18, 293-297, 1951.