

# Estimation de la durée de vie pour une voie ferrée sur dalle au travers d'une approche d'endommagement cumulatif

D. Gonzalez Velasco<sup>1</sup>, D. Duhamel<sup>1</sup>, G. Foret<sup>1</sup>,  
T. Hoang<sup>1</sup>, Hervé Lenglin<sup>2</sup>, Bertrand Findinier<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Laboratoire Navier, UMR 8205, Ecole des Ponts ParisTech, Université Gustave Eiffel, CNRS, Champs-sur-Marne, France.  
{david.gonzalez-velasco,denis.duhamel,gilles.foret,tien.hoang}@enpc.fr

<sup>2</sup> Getlink, BP69, 62904 Coquelles Cedex, France.  
{herve.lenglin,bertrand.findinier}@eurotunnel.com

---

## Résumé —

L'estimation de la durée de vie des structures suscite un intérêt tant chez les industriels que chez les chercheurs. L'objectif revient à déterminer jusqu'à quel point l'utilisation des matériaux composant les structures peut se faire sans compromettre leur qualité. Cette étude se concentre sur l'estimation de la durée de vie d'une section spécifique de voie ferrée sur dalle soumise à des charges cycliques hétérogènes dues au passage des trains. Une attention particulière est portée à la détermination de sa durée de vie lorsqu'une section de la voie est endommagée, entraînant des surcharges dans le voisinage de cette section.

**Mots clés** — endommagement cumulatif, voie ferrée sur dalle, durée de vie, lois de fatigue.

---

## 1 Introduction

Les structures sont conçues en vue de fournir un service pour une durée de vie qui s'établit et se calcule lors de leur conception initiale, tout en veillant à ce que leur qualité ne compromette jamais la sécurité de leurs utilisateurs. Plusieurs facteurs interviennent dans la détermination de la durée de vie attendue d'une structure. Parmi ces facteurs, il est possible de citer la fréquence prévue de sollicitation de la structure, le niveau de charge qu'elle devra supporter, ainsi que les propriétés mécaniques spécifiques des matériaux qui la composent.

Les voies ferrées sont des structures qui peuvent être très sollicitées en fonction du trafic supporté. Le transport ferroviaire assure de nos jours le déplacement des passagers, mais aussi, l'échange de services et marchandises. C'est le cas, par exemple, de la voie ferrée du tunnel sous la Manche, une des plus sollicitées au monde. Dû au fort trafic, le système des supports actuel qui soutient le rail, s'endommage et cet endommagement peut augmenter jusqu'à un niveau pour lequel les supports ne résistent plus et arrivent à la ruine. Ce dernier fait, marque le début d'un état de surcharge sur les supports voisins qui entreront alors dans une phase d'endommagement accélérée. À ce moment et dans le but de prendre des mesures conséquentes, il devient donc important de connaître le comportement de la voie lorsqu'elle se dégrade et d'estimer la réduction de durée de vie occasionnée par cet endommagement.

Dans le but de prédire cette durée de vie, différentes approches peuvent être utilisées. En premier, nous pouvons citer la mécanique de l'endommagement qui permet de quantifier la manière dont un matériau se dégrade sous l'effet des charges qui lui sont appliquées. L'endommagement se manifeste par des altérations des propriétés mécaniques du matériau. Initialement, le matériau se trouve dans un état sain, pouvant être considéré comme un corps continu. Lorsque le matériau est soumis à des charges, des fissures se forment et se propagent, augmentant ainsi les discontinuités dans le matériau. Cela peut être quantifié en introduisant une variable d'endommagement, généralement désignée par 'd'.

Paas et al. [9] se sont intéressés à l'étude de la fatigue du béton, étant approchée par l'évolution de l'endommagement. Ils ont défini un potentiel thermodynamique dépendant de trois paramètres matériaux,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma > 1$ . De son côté, Mai [5] propose de combiner le formalisme de Marigo [6], pour considérer que l'endommagement peut avoir une évolution même quand un matériau est chargé dans sa zone élastique, avec le modèle d'endommagement de Mazars [7], qui prend en compte la dissymétrie

du comportement du béton. Cela permet finalement d'avoir une formulation pour calculer l'évolution de l'endommagement dû aux chargements cycliques.

Une deuxième approche pour l'étude de la durée de vie se fait au travers de la mécanique de la rupture. Des modèles discrets sont proposés dans le but d'étudier la propagation des fissures sur des milieux qui étaient en principe continus.

L'autre possibilité existante afin de prédire la durée de vie d'une structure est d'utiliser les lois de fatigue. Ces dernières sont des expressions mathématiques issues des expériences qui relient la contrainte appliquée à un matériau avec le nombre de cycles qu'il est capable de supporter jusqu'à arriver à sa fin de vie, tout en faisant interagir des propriétés des matériaux avec certains paramètres expérimentaux. Vers le début des années 1970, des chercheurs tels que Aas-Jakobsen se sont intéressés à proposer des lois de fatigue qui puissent être appliquées de manière généralisée pour le béton. Néanmoins, au travers des années, il a été constaté que les résultats obtenus peuvent être très différents à l'heure de travailler avec ce matériau.

H.A.W. Cornelissen [2] a réalisé une large étude sur la fatigue du béton en tension et par la suite a proposé diverses expressions mathématiques dans le but de construire la courbe de durée de vie pour le béton selon divers types de sollicitations. Parmi les modes de chargement étudiés se trouvent la sollicitation en traction seule ou traction - compression de manière concentrée, ainsi que la flexion de manière à créer des contraintes de traction dans l'éprouvette. Ce dernier mode de chargement s'obtient en se plaçant dans une configuration en flexion 3 points, et en appliquant un chargement harmonique, tel que présenté sur la figure 1.

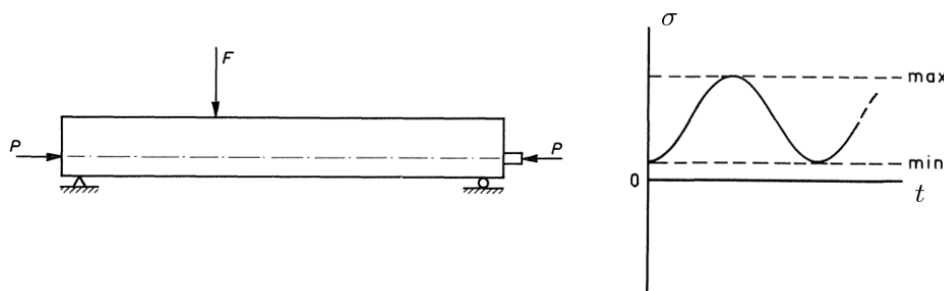


FIGURE 1 – Configuration en flexion 3 points et plage de variation de contraintes pour les essais de fatigue menées par Cornelissen. [2]

Dans le cas particulier où  $\sigma_{min} = 0$ , Cornelissen propose l'expression suivante dans le but de calculer la durée de vie de la structure :

$$\log N = 12.53 - 10.95 \frac{\sigma_{max}}{f_c} \quad (1)$$

Dans cette dernière expression,  $N$  correspond au nombre de cycles avant d'atteindre la ruine,  $\sigma_{max}$  correspond à la contrainte maximale en traction et  $f_c$  correspond à la résistance en flexion.

Ce travail cherche à estimer la durée de vie d'une voie ferrée sur dalle. En raison du trafic ferroviaire, la voie est sollicitée par différents niveaux de chargements qui entraînent divers niveaux de contraintes à reprendre par les supports. L'identification des chargements comme données d'entrée sera donc d'importance pour les calculs qui perdront en compte l'hétérogénéité du chargement. Le but final est d'arriver à quantifier la différence entre la durée de vie pour une voie saine et une voie endommagée. Deux configurations différentes de voie ferrée, un pour chaque cas, seront par conséquent étudiées.

## 2 Modélisation de la voie ferrée

### 2.1 Présentation de la structure

La structure d'intérêt est une voie ferrée sur dalle ayant des systèmes de support discrets écartés de 60 cm le long de la voie. Le système comprend principalement un blochet en béton reposant sur une semelle élastique, entouré d'un chausson en caoutchouc qui offre une protection contre les vibrations et le bruit tout en assurant une grande flexibilité. Une deuxième semelle élastique est placée à l'interface

entre le blochet en béton et le rail. L'ensemble de ces composants élastiques permet au système complet d'atténuer efficacement les vibrations, qu'elles soient de basses ou de hautes fréquences. La figure 2 complète la description précédente.

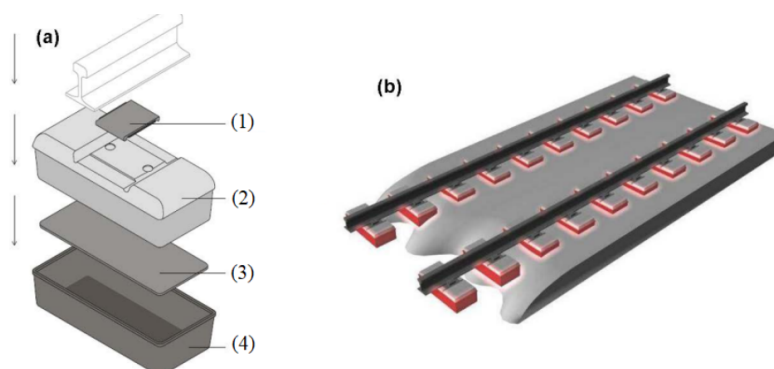


FIGURE 2 – a) Système de support constitué de (1) semelle sous rail, (2) blochet, (3) semelle sous blochet, (4) chausson en caoutchouc. (b) Voie ferrée complète installée sur une dalle en béton non armé.

Le blochet en béton étant le composant qui supporte la majeure partie des efforts subis par le système, il est la composante qui se voit le plus affecté et de lui va donc dépendre la durée de vie du système complet. Les analyses suivantes se concentreront par conséquent sur le blochet en béton.

## 2.2 Stratégie pour aborder le sujet

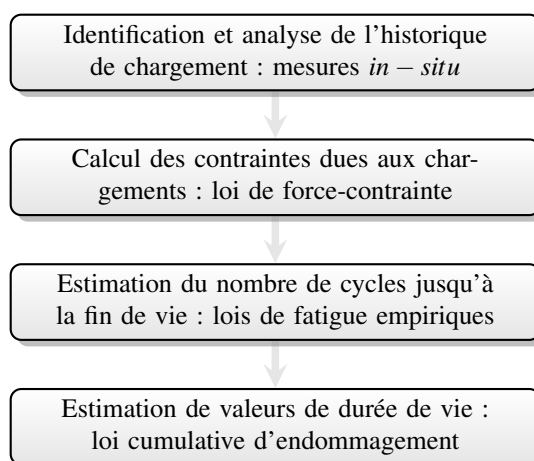


FIGURE 3 – Proposition des étapes à suivre pour faire l'estimation de la durée de vie pour une voie ferrée saine et une voie endommagée.

Afin d'arriver à l'objectif final de savoir quantifier la durée de vie de la structure qui nous concerne, nous avons élaboré une stratégie classique qui suit plusieurs étapes. Cette stratégie est reproduite dans la figure 3. Chacune des étapes sera développée dans chacune des sous-sections subséquentes.

### 2.2.1 Identification et analyse de l'historique de chargement

La sollicitation répétitive des structures induit de l'endommagement et, en fonction de la manière dont elles sont sollicitées, leur durée de vie peut varier. Le premier point à apporter est alors un historique du chargement qui permettra de constituer les données d'entrée afin de réaliser les calculs de durée de vie. En vue d'acquérir des valeurs de chargement réalistes, des mesures *in - situ* sont faites sur une portion de la voie pour récupérer des valeurs de déformation et postérieurement obtenir les histogrammes contenant les chargements en force, tel que présenté sur la figure 4.

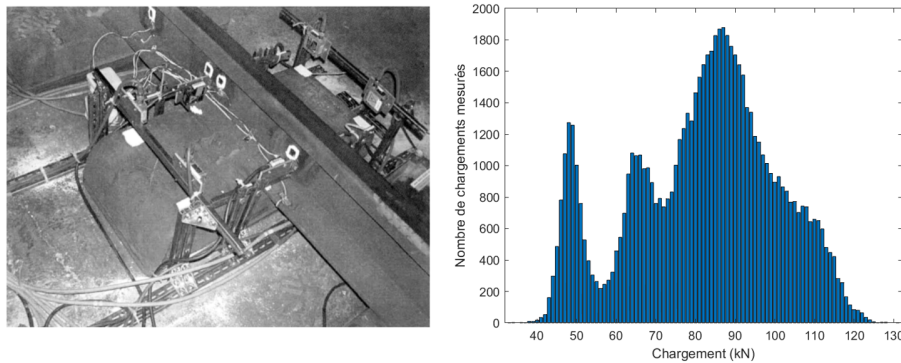


FIGURE 4 – Modèle de système d’instrumentation pour l’identification des sollicitations permettant de construire l’histogramme de chargement (gauche). Histogramme contenant la distribution de chargements statiques obtenus lors d’une campagne de mesure (droite).

## 2.2.2 Calcul des contraintes dues aux chargements

L’étape suivante consiste à déterminer les efforts que subissent les supports de la voie ferrée. Pour le moment, les informations de sollicitation sont disponibles en termes de chargements (forces). Néanmoins, au moment d’utiliser les lois de fatigue, les données d’entrée pour utiliser les expressions mathématiques sont les contraintes supportées par l’objet d’étude, plus précisément la contrainte maximale en traction.

Les travaux de Hoang et al. [3, 4], postérieurement repris par Claudet et al. [1], se concentrent sur le développement d’un outil permettant de déterminer les déplacements et forces de réaction des supports dans une voie ferrée représentée au travers d’un modèle de poutre périodiquement appuyée sur une fondation viscoélastique non uniforme. Cette dernière est chargée au travers d’une force mobile qui simule le passage des essieux du train par la voie.

En utilisant l’outil précédemment mentionné, il est donc possible de connaître la force de réaction de chacun des supports. Divers cas devront être étudiés avec l’objectif d’estimer la surcharge que perçoivent les supports se trouvant près des zones endommagées. Les divers scénarios à étudier sont présentées sur la figure 5.

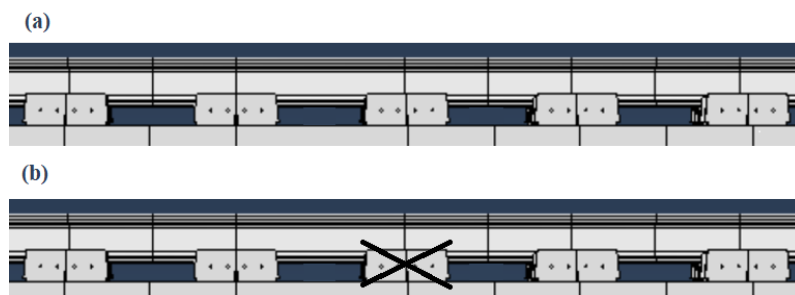


FIGURE 5 – Différents scénarios de voie à étudier, les supports croisés par un "X" représentent des supports cassés. (a) Voie saine, (b) Voie endommagée.

Considérant le fait que la valeur d’intérêt pour utiliser les lois de fatigue est la contrainte, un modèle éléments finis est construit dans le but de reproduire une des périodes de la voie et de solliciter le blochet avec la force de réaction déterminée précédemment à l’aide du modèle analytique de poutre périodiquement appuyée. Il est possible de déterminer la contrainte de traction maximale en flexion dans les blochets pour l’état de chargement correspondant. Le modèle éléments finis construit pour reproduire le blochet et son environnement sur une période de la voie est représenté sur la figure 6. Le maillage contient deux types d’éléments. Les éléments du type hexagonaux quadratiques (C3D20R) sont utilisés pour mailler la dalle et ont une taille moyenne de 15 mm. D’autre part, les éléments du type hexagonaux linéaire (C3D8R) ont été utilisés pour mailler le blochet avec ses renforts longitudinaux et la semelle sous blochet. Le modèle éléments finis a été réalisé sur le logiciel de calcul ABAQUS, comptant avec un

nombre d'éléments total de 276,746, ainsi que 526,461 nœuds.

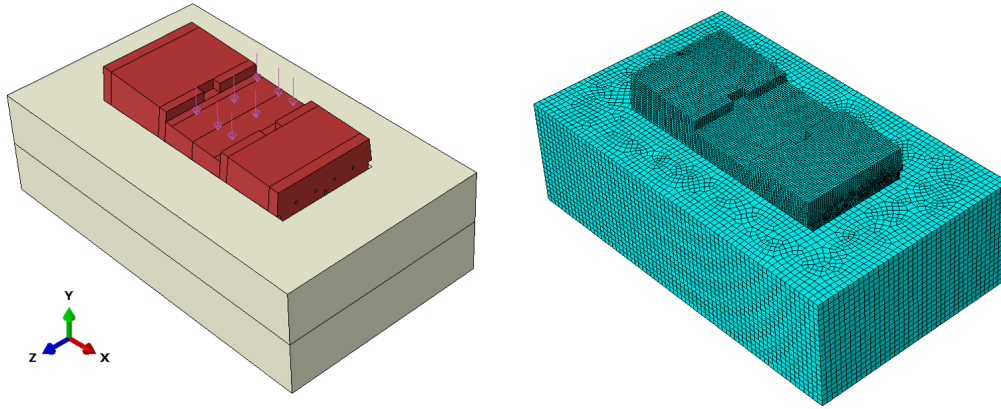


FIGURE 6 – Modèle éléments finis pour trouver la contrainte de traction maximale dans le blochet sous la force de réaction.

Tenant compte du fait que la relation entre la force de sollicitation et la contrainte est linéaire pour le cas proposé, il est possible de construire une loi permettant de lier les forces de réaction des blochets avec la contrainte maximale de traction. En créant cette loi, il n'est donc plus nécessaire de devoir utiliser les éléments finis pour trouver la contrainte maximale de traction. Dans cet ordre d'idée, il sera donc possible par la suite d'introduire directement l'expression reliant la force de réaction avec la contrainte dans les lois de fatigue.

### 2.3 Estimation de la durée de vie

Afin d'estimer la durée de vie, on utilise une approche d'accumulation d'endommagement par fatigue. Cette approche permet de prendre en compte des variations dans les sollicitations pour prédire la durée de vie. Au fur et à mesure que la structure est soumise à des chargements, des dommages par fatigue s'accumulent jusqu'à ce que la structure présente un endommagement critique, entraînant sa défaillance.

Au fil des années, différentes lois d'accumulation d'endommagement par fatigue ont été proposées. Cependant, la loi de Miner [8] reste la plus couramment utilisée en raison de sa praticité, surtout lorsque l'on travaille avec des historiques de chargement présentant des séquences variables.

Miner a développé une loi d'endommagement cumulative dans laquelle il établit qu'en soumettant une structure à une contrainte donnée  $l_1$ , on peut définir un rapport entre le nombre de cycles subis par la structure ( $n_1$ ) à cette contrainte  $l_1$  et le nombre total de cycles ( $N$ ) que la structure peut supporter sous cette contrainte  $l_1$ . Pour la contrainte  $l_1$ , un rapport  $\frac{n_1}{N_1}$  est défini. Miner stipule que lorsqu'une structure est soumise à des niveaux de contraintes variables, tel qu'affiché sur la figure 7, il est possible de faire la somme des contributions  $\frac{n_i}{N_i}$ , afin de déterminer le nombre de cycles que peut supporter la structure avant sa défaillance.

La défaillance survient lorsque la variable d'endommagement  $d$ , qui est la somme des rapports  $\frac{n_i}{N_i}$ , atteint la valeur de 1. Plus formellement, la loi de Miner s'exprime comme suit,

$$d_{miner} = \sum_{i=1}^l d_{miner,i} = \sum_{i=1}^l \frac{n_i}{N_i} \quad (2)$$

L'équation 2 représente une expression simple, mais elle présente des limitations importantes. L'un des inconvénients majeurs est qu'elle ne tient pas compte de l'ordre d'application des charges. En d'autres termes, le résultat serait le même, que nous appliquions d'abord un groupe de charges importantes suivi de charges très faibles, ou que nous commencions par des charges très faibles avant d'appliquer des charges importantes. Dans la réalité, l'ordre des chargements pourrait avoir un impact significatif, pouvant entraîner des résultats différents en fonction de l'ordre choisi. Il s'agit donc d'une limitation importante à prendre en compte.

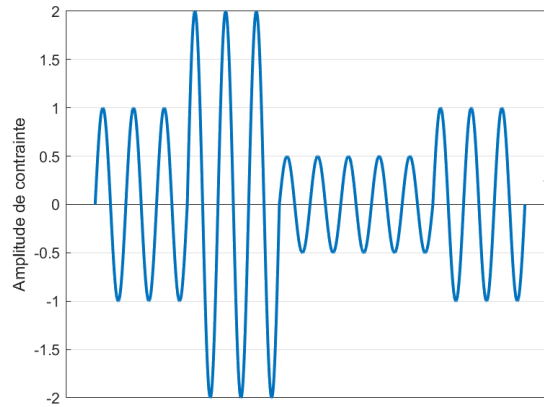


FIGURE 7 – Historique de chargement à amplitude de contrainte variable.

Pour déterminer les valeurs à utiliser dans l'équation 2,  $n_i$  représente les cycles de charge que l'on obtient en mesurant les charges sur la voie, ce qui est généralement une valeur connue. En ce qui concerne  $N_i$ , on utilise des lois de fatigue telles que celle présentée dans l'équation 1 pour calculer ces valeurs.

## 2.4 Exemple

Nous examinons deux voies, telles que présentées dans la figure 5. La voie saine, comme son nom l'indique, est constituée de supports en bon état, capables de répartir efficacement les charges lors du passage des trains. En revanche, dans le cas de la voie endommagée, nous considérons le cas où l'un des supports est arrivé à l'état de ruine, il est donc cassé. Cette situation entraîne des surcharges au niveau des supports voisins lors du passage des trains.

Pour suivre la méthodologie illustrée dans la figure 3, il est essentiel d'établir un historique de chargement en tant que donnée d'entrée pour le modèle d'analyse de la durée de vie. Dans ce cas, l'historique de chargement provient de celui affiché à droite sur la figure 4. Cet histogramme contient un enregistrement continu de l'historique de chargement statique de la voie ferrée d'étude, obtenu sur le terrain, sur une période d'environ 103 heures. L'historique d'entrée comprend divers niveaux de chargement associés au passage des essieux, classés en catégories (par exemple, 10 chargements de 50 kN, 37 chargements de 100 kN, etc.). Il convient de noter que ces chargements ne sont pas classés par ordre d'application.

À l'aide de l'outil mentionné dans la section 2.2.2, la force de réaction des supports est calculée pour chacune des forces qui se déplacent le long de la voie ferrée, à la fois pour le cas de la voie saine, comme pour le cas de la voie endommagée. Les calculs sont effectués en plaçant une force mobile qui se déplace le long de la voie à une vitesse  $v = 37 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Les réactions obtenues correspondent à  $R_{max}$ , c'est-à-dire la force de réaction au moment où la force mobile représentant un essieu passe au-dessus du support. À titre illustratif, la figure 8 présente la distribution de la force de réaction lorsqu'une force  $Q = 90 \text{ kN}$  se déplace le long de la voie.

Par la suite, nous prenons les forces maximales appliquées aux supports, 32.52 kN pour la voie saine et 40.96 kN pour la voie endommagée dans le cadre du cas traité sur la figure 8. Ces forces maximales sont appliquées sous forme de pression sur le support tel que présenté sur la figure 6 dans le but de trouver la contrainte maximale en traction nécessaire pour utiliser les lois de fatigue. Compte tenu du fait que nous travaillons dans un cas statique et avec des matériaux qui dans son ensemble ont un comportement linéaire, il est possible de créer une loi linéaire pour relier la force de réaction avec la contrainte maximale en traction des blochets. Cela dans le but de ne pas devoir effectuer des calculs pour chacune des forces de réaction nécessaires au développement du sujet. Pour ce cas-ci, la loi linéaire utilisée est de la forme,

$$\sigma_{11,max} = 0.304 \cdot R_{max} \quad (3)$$

Par la suite, nous avons déjà une manière de traduire les forces d'excitation par des contraintes en traction dans le blochet, permettant de pouvoir utiliser les lois de fatigue pour trouver les valeurs  $N_i$ , nécessaires à l'utilisation de la loi de Miner (équation 2). La loi de fatigue utilisée dans le cadre de cet exemple est celle proposée par H.A.W. Cornelissen [2] et décrite par l'équation 1, qui peut être réécrite comme,

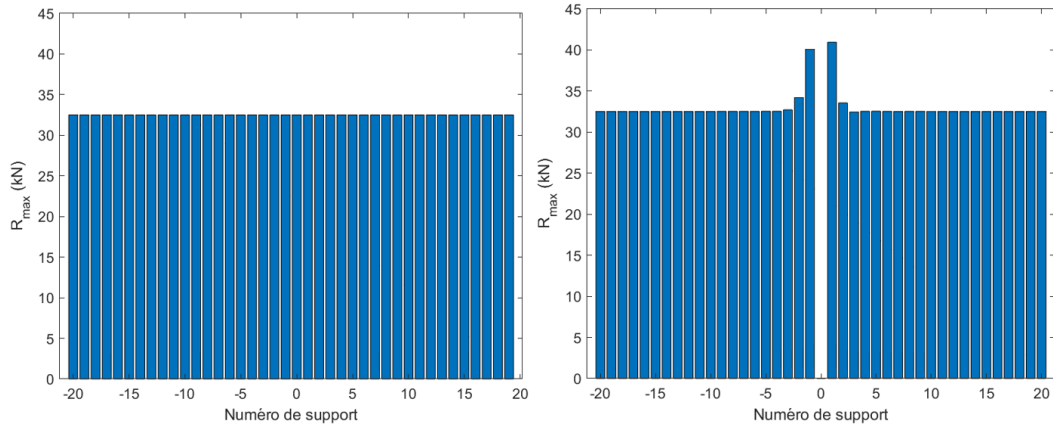


FIGURE 8 – Forces maximales appliquées aux supports pour une voie saine (gauche) et une voie possédant un support endommagé (droite).

$$\log N_i = 12.53 - 10.95 \left( \frac{0.304 \cdot R_{max,i}}{f_c} \right) \quad (4)$$

À partir des éléments précédemment présentés, il est possible d'utiliser l'équation 2 pour évaluer le dommage cumulé pour l'historique de référence présenté sur la figure 4. Pour le cas de la voie saine, un cumul de  $4.506 \cdot 10^{-6}$  est obtenu quand toutes les sollicitations de l'histogramme ont été appliquées. En revanche, pour le cas de la voie endommagée, le cumul obtenu est de  $2.057 \cdot 10^{-5}$ . En faisant itérer pour l'historique de chargement de référence jusqu'à ce que le paramètre d'endommagement cumulatif  $d$  soit égal à 1, ce qui veut dire que l'on atteint la ruine, nous obtenons les résultats présentés sur la figure 9.

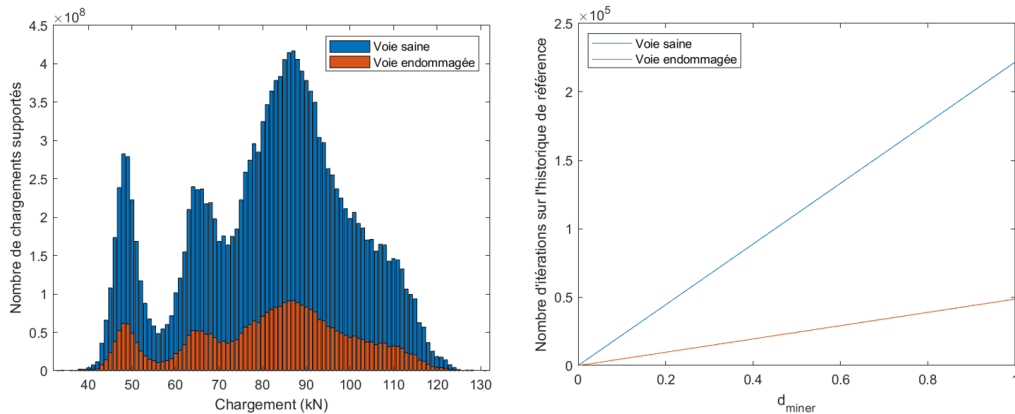


FIGURE 9 – Distribution totale de forces exercées par les essieux que le blochet est capable de supporter avant la ruine (gauche). Évolution du paramètre d'endommagement cumulatif en faisant itérer sur l'historique de chargement de référence dans la figure 4 (droite).

Les résultats présentés dans la figure 9 révèlent une différence significative de durée de vie entre la voie saine et la voie endommagée. En termes de cycles, la voie saine peut encore supporter l'historique de référence 221,922 fois, tandis que la voie endommagée n'y parvient que 48,595 fois avant la ruine.

À titre indicatif, nous avons répété cette analyse en prenant en compte des surcharges dynamiques qui affectent la voie, liées par exemple à des défauts de roues ou à des imperfections dans le nivellement de la voie. Les résultats indiquent que lorsque ces surcharges dynamiques sont prises en compte, la voie saine et la voie endommagée peuvent résister à une histoire de chargement égale à respectivement 3,381 et 72 fois pour l'historique de chargement de référence. En termes de durée de vie estimée, cela signifie que la voie saine pourrait durer environ 39 années, tandis que la voie endommagée n'aurait une durée de vie que de 10 mois. Il est important de noter que ces estimations de durée de vie se basent sur l'hypothèse selon laquelle l'historique de chargement de référence correspond à 103 heures de service continu de la voie.

### 3 Conclusion

Ce travail présente une première approche pour estimer la durée de vie d'une voie ferrée sur dalle à travers l'utilisation d'une loi d'endommagement cumulatif. La démarche proposée ici est une méthode permettant un pré-dimensionnement initial, afin d'obtenir une première estimation de la durée de vie d'une structure ferroviaire. Les résultats mettent en évidence que les charges responsables de la dégradation significative de la voie sont principalement les surcharges dynamiques qui se produisent fréquemment lors du passage des trains.

De plus, il existe une différence significative entre la durée de vie d'une voie en bon état (voie saine) et celle d'une voie endommagée. Cette observation souligne l'importance de développer des stratégies visant à prévenir les surcharges sur les supports adjacents aux supports endommagés. En effet, de telles surcharges entraînent une dégradation accélérée des composants qui étaient initialement en bon état.

Enfin, il convient de souligner l'importance cruciale de l'étape d'identification de l'historique de chargement de la voie. Ces données d'entrée garantissent la crédibilité des résultats obtenus grâce à la méthode proposée dans cette étude. Un travail ultérieur visant à affiner chacune des étapes présentées ici pourrait incontestablement conduire au développement d'un outil permettant un dimensionnement précis de la durée de vie d'une voie ferrée.

### Références

- [1] B. Claudet, D. Duhamel, G. Foret, T. Hoang, *A Comparison of Beam Models for the Dynamics of Railway Tracks on a Non-Uniform Viscoelastic Foundation*, In : ICSV2021, 1-8, Ostrava, Czech Republic, 2021.
- [2] H.A.W. Cornelissen. *Fatigue Failure of Concrete in Tension*, Civil Engineering and Geosciences Delft University of Technology, HERON,29(4), 1984.
- [3] T. Hoang, D. Duhamel, G. Foret, J.-L. Pochet, F. Sabatier, *Response of a Periodically Supported Beam on a Non-Uniform Viscoelastic Foundation subject to Moving Loads*, Proceedings of the Third International Conference on Railway Technology : Research, Development and Maintenance, Cagliari, Italy. pp.185, 2016.
- [4] T. Hoang, D. Duhamel, G. Foret, *Dynamical response of a Timoschenko beams on periodical nonlinear supports subjected to moving forces*, Engineering Structures, 176, pp.673-680, 2018.
- [5] S.H. Mai, *Étude de dégradation des voies ferrées urbaines*, Thèse de doctorat, Université Paris-Est, 2011.
- [6] J.J. Marigo. *Modelling of brittle and fatigue damage for elastic material by growth of microvoids*, Engineering Fracture Mechanics, Volume 21, 861-874, 1985.
- [7] J. Mazars, *Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure*, Thèse de doctorat, Université Paris V, 1984.
- [8] M. Miner, *Cumulative Damage in Fatigue*, Journal of Applied Mechanics, 12(3) : A159–A164, 1945.
- [9] M.H.J.W. Paas, P.J.G. Schreurs, W.A.M. Brekelmans. *A continuum approach to brittle and fatigue damage : Theory and numerical procedures*, International Journal of Solids and Structures, Elsevier BV, 579-599, 1993.