

# MODÉLISATION DE LA STÉNOSE ARTÉRIELLE INDUITE PAR LES VIBRATIONS TRANSMISES À LA MAIN : UN MOYEN DE PRÉVENIR LE RISQUE VIBRATOIRE VASCULAIRE ?

Les effets sur la santé des vibrations transmises au système main – bras s’installent au long cours. Il est difficile de les connaître précisément, sans l’apport d’études épidémiologiques qui peuvent s’avérer complexes à mener. De ce fait, la modélisation est de plus en plus utilisée pour prédire l’évolution du vivant. Cet article présente une modélisation de la dégradation d’une artère de la main, qui a permis d’obtenir de précieuses indications sur les conséquences délétères des vibrations, et qui pourrait *in fine* contribuer à une meilleure prévention du risque vasculaire vibratoire.

CHRISTOPHE NOËL,  
MAHA REDA  
INRS,  
département  
Ingénierie des  
équipements  
de travail

EMMANUELLE JACQUET  
Université  
de Franche-  
Comté, CNRS

NICLA SETTEMBRE  
Département  
de chirurgie  
vasculaire,  
CHRU Nancy,  
Université de  
Lorraine

## Contexte

Une exposition prolongée à des vibrations de niveau élevé transmises à la main est susceptible d’engendrer des troubles vasculaires tels que le syndrome de Raynaud d’origine vibratoire, appelé également maladie des doigts blancs (*Vibration White Finger* – en anglais VWF). Un grand nombre d’études physiologiques, histologiques et épidémiologiques [1] ont mis en évidence que la dose réglementaire d’exposition aux vibrations main – bras, évaluée selon la norme ISO 5349 [2], tend à sous-estimer les lésions vasculaires induites par les vibrations.

Afin de définir, à terme, une dose d’exposition vibratoire qui refléterait mieux ces atteintes sur les artères, des travaux ont été conduits sur la base de deux éléments de réflexion [3]. Tout d’abord, une première hypothèse a été posée selon laquelle les vibrations peuvent diminuer la contrainte de cisaillement<sup>1</sup> (*Wall Shear Stress* – WSS) exercée par le sang sur la couche interne de l’artère, directement en contact avec le sang. Une seconde hypothèse, induite grâce à plusieurs études dans des domaines différents de celui des vibrations [4], est qu’une baisse répétée de ce WSS pourrait entraîner un rétrécissement du diamètre de la lumière des artères des doigts (sténose artérielle). Cette sténose artérielle a été observée chez les travailleurs souffrant d’un syndrome de Raynaud d’origine vibratoire. Elle est une caractéristique, parmi d’autres,

de ce trouble vasculaire. L’approche en deux étapes a dès lors consisté à :

- évaluer la relation entre les propriétés des vibrations (fréquence, amplitude) et la diminution du WSS;
- tenter de lier cette baisse de WSS induite par les vibrations et la sténose artérielle résultante, *via* un modèle de calcul qualifié de « mécano-biologique », car il implique à la fois des notions de mécanique et de biologie des artères.

Le présent article vise à établir comment cette stratégie pourrait *in fine* ouvrir la voie à une nouvelle façon de prévenir le risque vasculaire vibratoire.

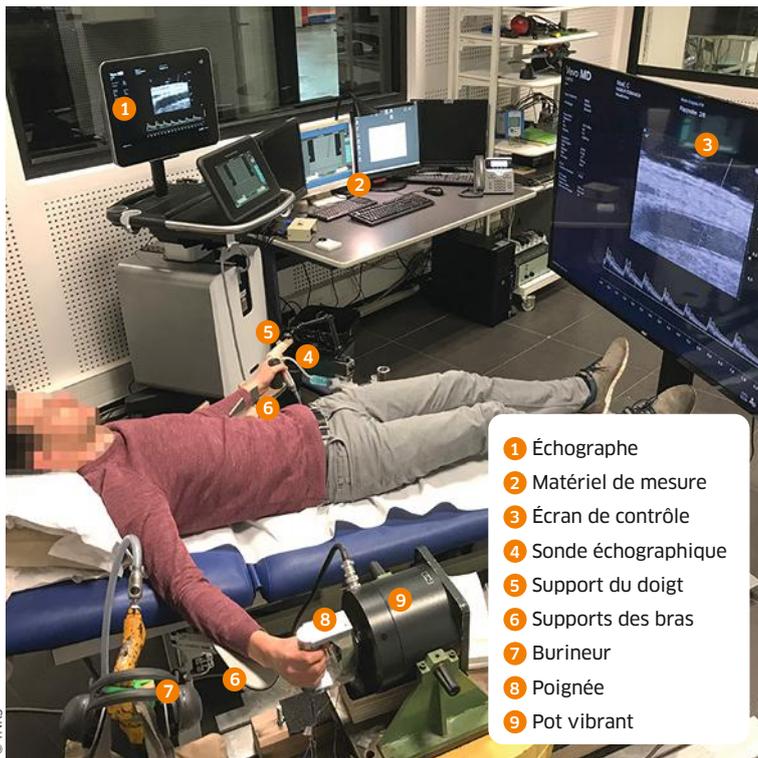
## Matériel et méthode

### Évaluation de la baisse du WSS induite par les vibrations

Dans la palme de la main et les doigts se trouvent des capteurs sensoriels qui permettent de ressentir les vibrations. Quand le cerveau reçoit, *via* ces capteurs biologiques, l’information qu’une vibration est entrée dans la main, il envoie un signal chimique qui cause la fermeture des très petites artères de l’ensemble des extrémités. Ainsi, quand la main gauche est vibrée, le flux sanguin de la main droite est aussi réduit. La réduction de ce débit sanguin entraîne une diminution du WSS dans l’artère de l’index, qui a été mesurée.

Un dispositif expérimental a été développé pour évaluer le WSS induit par les vibrations dans une





- 1 Échographe
- 2 Matériel de mesure
- 3 Écran de contrôle
- 4 Sonde échographique
- 5 Support du doigt
- 6 Supports des bras
- 7 Burineur
- 8 Poignée
- 9 Pot vibrant

↑ FIGURE 1  
Banc d'essais pour mesurer le WSS.

artère de l'index gauche au niveau de l'articulation située entre la deuxième et la troisième phalange [5]. La main droite, elle, était soumise à des vibrations mécaniques. Cette recherche a reçu l'autorisation du CPP n° 2018-A00614-651 en date du 6 décembre 2018.

Le dispositif développé (Cf. Figure 1) était principalement constitué d'un échographe avec une grande résolution spatiale (30 micromètres) et d'un pot vibrant. Au total, 24 volontaires<sup>2</sup> en bonne santé et non-fumeurs, âgés de 19 à 39 ans (moyenne d'âge : 25,1 ans) ont participé à la campagne de mesures du WSS à température ambiante contrôlée (23 °C ± 0,5 °C). Le protocole consistait à estimer le WSS pendant trois phases consécutives de 10 secondes (s) chacune : repos, exposition aux vibrations, et retour au calme. La vibration était une accélération harmonique pure à 125 Hz pour six

amplitudes : 1, 2, 5, 10, 20 et 40 m.s<sup>-2</sup> en valeur efficace, non pondérée par le filtre de pondération de la norme ISO 5349 [2]. Les données brutes mesurées étaient le diamètre de l'artère obtenu avec l'échographe et la vitesse maximale du sang acquise par mesure Doppler. Diamètre et vitesse étaient ensuite introduits dans un modèle de mécanique d'écoulement de fluide pulsé pour en déduire le WSS. Les moyennes temporelles des WSS (*Time Averaged WSSs* – *TAWSSs*) sur chacune des trois phases de 10 s ont ensuite été calculées.

### Modélisation de la sténose artérielle induite par les vibrations

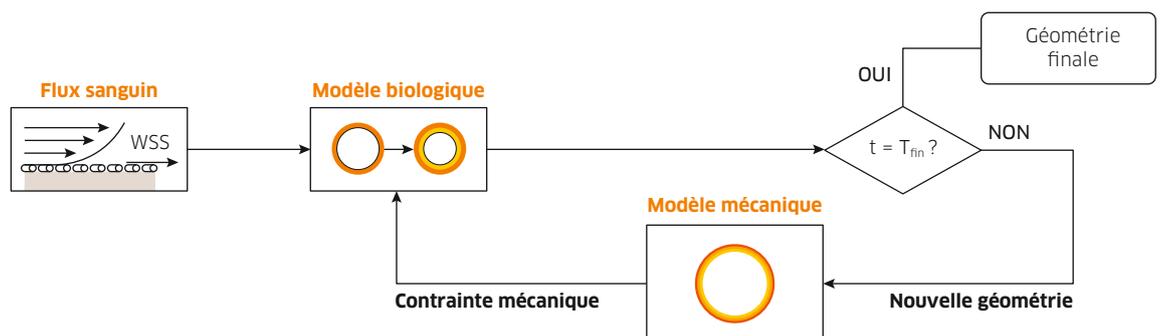
Les simulations mécano-biologiques de la sténose artérielle s'appuient sur le couplage d'un modèle d'agents (*agent-based model* – *ABM*) simulant, sur des temps longs (années d'exposition aux vibrations), certains mécanismes biologiques conduisant à la diminution du diamètre de l'artère et d'un modèle de biomécanique pour prédire les forces mécaniques à l'intérieur de l'artère (Cf. Figure 2). Chacun de ces modèles est adapté de la littérature. Pour construire le modèle biologique, nous avons formulé l'hypothèse selon laquelle la sténose artérielle résulte de la prolifération et de la migration de certaines cellules de la paroi de l'artère qui s'accumulent vers la partie la plus interne de l'artère (intima). Cette accumulation de cellules, associée à une génération excessive de collagène, tend à boucher l'artère. Le système multi-agents (ABM) décrit les phénomènes biologiques impliqués dans la sténose de l'artère au niveau cellulaire et moléculaire [6]. Ces phénomènes sont en partie influencés, d'une part par les valeurs du WSS, introduites comme données d'entrée, et d'autre part par les contraintes mécaniques dans l'artère qui sont simulées par le modèle mécanique.

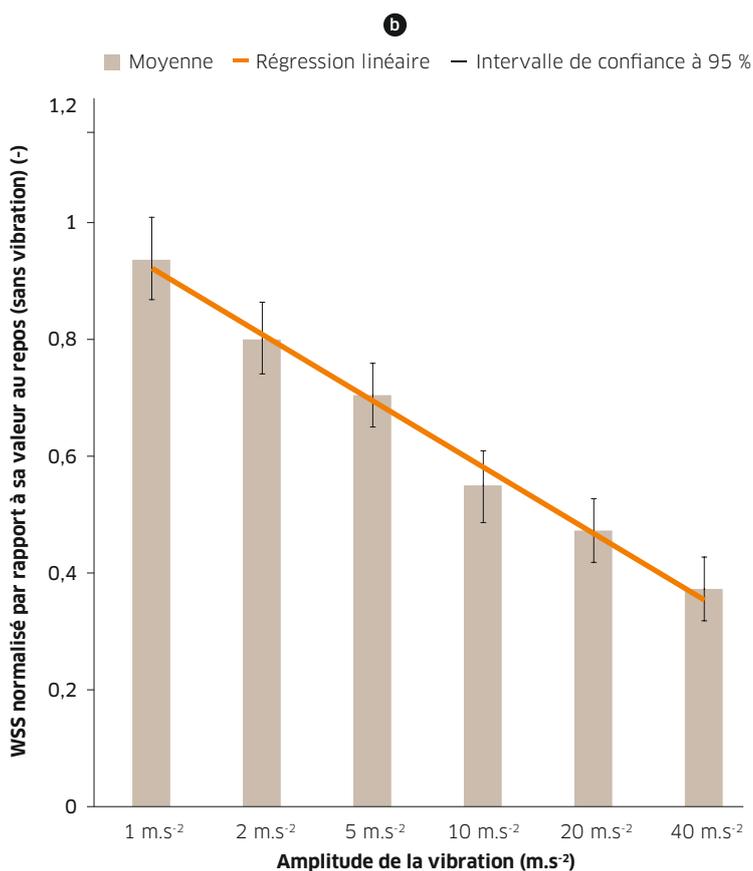
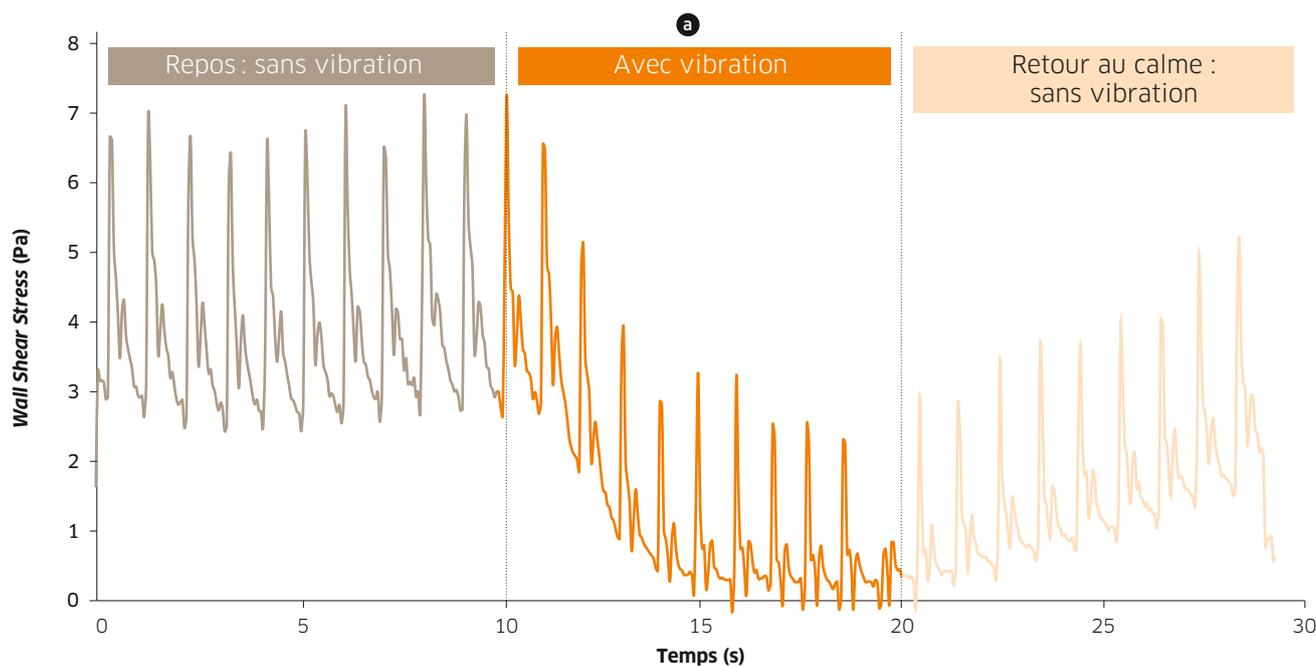
### Résultats

#### Effet aigu des vibrations sur l'hémodynamique artérielle

La diminution du WSS relative à une exposition aux vibrations se produit quelques

FIGURE 2 → Schéma synoptique de la modélisation mécano-biologique pour simuler la croissance artérielle chronique.





↑ FIGURE 3

Effets des vibrations sur le flux sanguin :

- (a) baisse du WSS consécutive à l'exposition à une vibration d'amplitude 40 m.s<sup>-2</sup> à 125 Hz;
- (b) influence de l'amplitude des vibrations sur la baisse relative de WSS.

secondes après le début de l'excitation vibratoire (Cf. Figure 3a). Les oscillations rapides (environ 1 s) observées dans ce signal correspondent au cycle systole-diastole (pouls) du sujet. La baisse du WSS peut être appréciée en regardant l'évolu-

tion temporelle de l'enveloppe de la courbe tracée (Cf. Figure 3a).

Les TAWSSs normalisés par rapport à l'état sans vibration (Cf. Figure 3b) dépendent de l'amplitude de la vibration de manière statistiquement significative. Ils suivent une loi de régression linéaire log<sub>2</sub> de l'amplitude de la vibration (Cf. droite orange sur la Figure 3b). Cette étude a également montré que la baisse du WSS n'est pas influencée par la fréquence des vibrations.

### Réponse chronique de l'artère à l'échelle tissulaire et moléculaire due à la chute du WSS induite par les vibrations

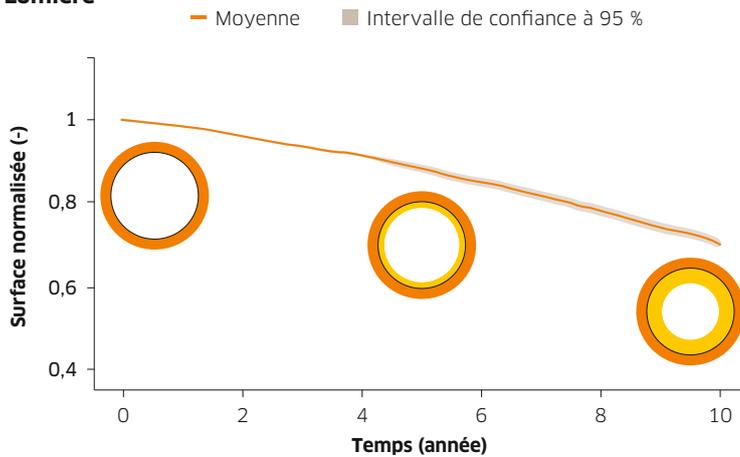
Selon le modèle mécano-biologique utilisé pour simuler le cas d'un travailleur exposé tout au long de sa carrière, la surface normalisée de la lumière artérielle (Cf. Figure 4) diminue continuellement avec le nombre d'années d'exposition aux vibrations. La réduction de cette surface est de 12 % à 5 ans et de 30 % après 10 ans d'exposition.

### Abaques de prédictibilité de la sténose artérielle

Le degré de sténose artérielle (exprimé en pourcentage) est défini comme la surface de la lumière de l'artère rapportée à sa valeur initiale. L'abaque de prédiction de la sténose artérielle obtenu à l'aide des simulations mécano-biologiques (Cf. Figure 5) mentionne un degré de sténose artérielle de 20 % pour un travailleur exposé aux vibrations 2,5 heures par jour pendant 10 ans. D'après le modèle, ce même niveau de sténose est également atteint après 15 ans de travail pour une exposition quotidienne aux vibrations d'environ 1 h 10 minutes.

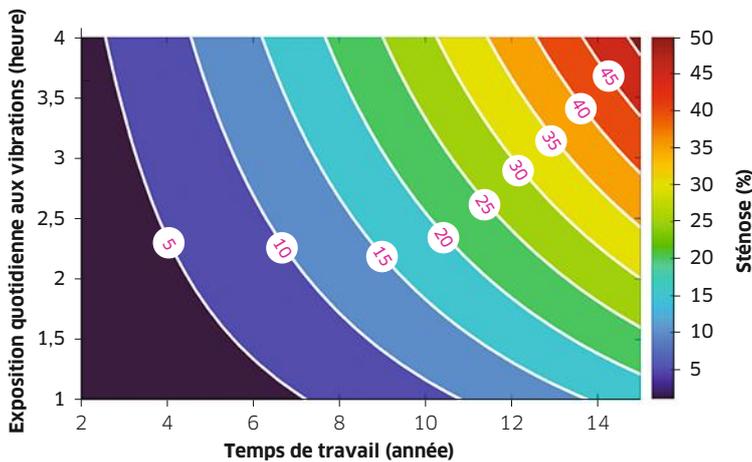


Lumière



↑ FIGURE 4

Simulation de l'évolution de la surface normalisée de la lumière artérielle au cours de la vie professionnelle lors d'une exposition aux vibrations pendant 4 heures par jour. La zone jaune correspond aux cellules de l'artère qui ont migré vers la partie interne de l'artère.



↑ FIGURE 5

Degré de sténose (%) calculé en fonction des années de vie professionnelle et de la durée d'exposition quotidienne à une vibration d'amplitude 40 m.s<sup>-2</sup> (valeur efficace non pondérée) à 125 Hz.

Discussion

Le stade de développement du syndrome de Raynaud d'origine vibratoire peut être classé en fonction du degré de sténose artérielle : type 0 : artère saine, type I : sténose < 50 %, type II : sténose > 50 %, type III : obstruction de l'artère, et type IV : obstruction d'artères en amont du doigt. Le modèle développé dans cette étude prévoit une sténose d'environ 30 % après 10 ans d'exposition à une vibration d'amplitude 40 m.s<sup>-2</sup> (non pondérée) pendant 4 heures par jour, conduisant ainsi à une sténose de type I.

Par ailleurs, la baisse de WSS est liée à l'amplitude de la vibration qui est prise en compte dans le modèle. Ainsi, en mesurant sur le terrain l'accélération émise par une machine vibrante, la chute de WSS générée par cette machine peut être calculée. Si, de plus, le cycle d'exposition quotidien aux vibrations est connu, notre modèle mécano-biolo-

gique permettra d'estimer le degré de sténose et, donc, le stade du syndrome de Raynaud lié à une exposition chronique aux vibrations.

Ce modèle prend en compte uniquement une partie des mécanismes physiopathologiques conduisant au syndrome de Raynaud d'origine vibratoire et devra être conforté par des tests complémentaires, sur artères *exo vivo* par exemple.

Conclusion

Il a été possible d'établir une relation entre l'amplitude des vibrations et la baisse du WSS. Le modèle mécano-biologique élaboré a ensuite été en mesure de prévoir la sténose artérielle chronique provoquée par ces modifications du débit sanguin. Le degré de sténose associé à l'état pathologique reste à définir. Le lien entre l'amplitude des vibrations, l'exposition quotidienne aux vibrations, la durée de vie professionnelle et la sténose qui en résulte pourra être utilisé pour élaborer une nouvelle définition de la dose vibratoire. ●

1. Il s'agit d'une contrainte liée à la viscosité d'un liquide, qui résulte ici des forces de frottement du sang sur les parois de l'artère.
2. Vingt hommes et quatre femmes ont participé aux essais. Pour les femmes, l'imagerie n'a pas bien fonctionné, car la résolution spatiale de l'échographe n'était pas assez importante au regard de la taille de leurs artères.

BIBLIOGRAPHIE

[1] FASCICULE DE DOCUMENTATION FD ISO/TR 18570 – Vibrations mécaniques. Mesurage et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main. Méthode supplémentaire pour l'évaluation du risque de troubles vasculaires. Afnor, 2018. Accessible sur : <https://m.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/> (document payant).

[2] NORME NF EN ISO 5349-1 – Vibrations mécaniques. Mesurage et évaluation de l'exposition des individus aux vibrations transmises par la main. Partie 1 : Exigences générales. Afnor, 2002. Accessible sur : <https://m.boutique.afnor.org/fr-fr/norme/> (document payant).

[3] NOËL C., SETTEMBRE N., REDA M., JACQUET E. – A multiscale approach for predicting certain effects of hand-transmitted vibration on finger arteries. *Vibration*, 2022, 5, pp. 213-237. Accessible sur : <https://doi.org/10.3390/vibration5020014>

[4] HUMPHREY J.D. – Vascular adaptation and mechanical homeostasis at tissue, cellular, and sub-cellular levels. *Cell Biochem. Biophys.*, 2008, 50, pp. 53-78. Accessible sur : <https://doi.org/10.1007/s12013-007-9002-3>

[5] NOËL C., SETTEMBRE N. – Assessing mechanical vibration-altered wall shear stress in digital arteries. *J. Biomech.*, 2022, 131, p. 110893. Accessible sur : <https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2021.110893>

[6] REDA M., NOËL C., SETTEMBRE N. ET AL. – An agent-based model of the vibration-induced intimal hyperplasia. *Biomech. Model. Mechanobiol.*, 2022, 21, pp. 1457-1481. Accessible sur : <https://doi.org/10.1007/s10237-022-01601-5>