

Effet du cyclage thermique d'aimants pour leur application avec les jauges électromagnétique de vitesse matérielle

Théo Busier^{1,2}, Charles Joubert², Alexandre Lefrançois¹, Damien Gapillout¹, Laurent Morel², Fabien Sixdenier²

¹CEA, DAM, CEA-Gramat, France, ²Université Claude Bernard Lyon 1, Ampère, UMR5005, INSA Lyon, Ecole Centrale de Lyon, CNRS, Villeurbanne, F-69100, France

RESUME - Les jauges électromagnétiques de vitesse sont utilisées avec des aimants permanents pour caractériser l'état sous choc d'un matériau engendré par la mesure de vitesse de choc et de la vitesse matérielle en fonction des conditions d'impact. Les essais sont réalisés à une température donnée, comprise entre -65 °C et 120 °C. Le champ d'induction magnétique est généré par des ferrites sensibles à la température. Les travaux montrent une perte linéaire de -0,2 %.^{°C}⁻¹ du champ d'induction magnétique et une perte permanente du champ de -0,4 % par cycle ce qui dégrade l'exactitude de la mesure de vitesse matérielle. Une dérive magnétique anormale lors du premier cycle thermique est également constatée.

Mots-clés – Champ magnétique – Aimants – Jauges multibrins – Vitesse matérielle – Chocs – Induction de Lorentz – Température

1. INTRODUCTION

Les jauges électromagnétiques de vitesse matérielle, également appelées jauges multibrins sont utilisées pour mesurer la vitesse de choc et la vitesse matérielle dans un matériau lors d'un essai d'impact. Cette étude présente dans un premier temps le principe de fonctionnement des jauges multibrins, puis dans un second temps les défis associés à leur utilisation. Les recherches sont focalisées sur la variation du champ d'induction magnétique dans un environnement thermique contrôlé assurant la fiabilité des mesures de vitesse matérielle.

2. ETAT DE L'ART

Initialement composée d'un seul fil d'aluminium disposé en forme de Π dans le matériau à étudier, la « Dremin Loop » permet aux unités de recherche russes de développer une technique de mesure électromagnétique pour la vitesse matérielle derrière une onde de choc dans les années 1960 [1]. Les Etats-Unis reprennent cette méthode en plaçant plusieurs fils l'un derrière l'autre afin de mesurer une évolution de la vitesse matérielle [2]. Par la suite, les brins ont été photogravés sur une pellicule d'aluminium puis protégés de part et d'autre par une feuille de téflon [3] ; plusieurs géométries ont été testées avant d'aboutir à celle présentée dans ce document (cf. Fig. 2).

Malgré leur efficacité, ces dispositifs restent sujets à plusieurs sources d'incertitudes qui affectent la qualité des données recueillies. Les études actuelles tendent à déterminer et quantifier ces sources d'incertitudes parmi lesquelles nous pouvons retrouver la variation de résistance du brin au passage de l'onde de choc [4], le bruit électromagnétique issu de l'ionisation des produits de détonation [5] et l'écoulement non unidimensionnel du flux lié au positionnement de la jauge [6], qui a conduit à la proposition d'une nouvelle géométrie de l'élément sensible [7].

La connaissance des paramètres d'essai initiaux joue un rôle primordial dans la détermination de la vitesse matérielle. Leur variation dans un contexte thermique comme évoqué en introduction est essentiel à la fiabilité des résultats. L'influence de la température sur le champ magnétique généré par des aimants en ferrite est donc un des points clés de cette application.

3. JAUGES ELECTROMAGNETIQUE DE VITESSE MATERIELLE

3.1. Principe de fonctionnement

Les jauges multibrins permettent la détermination de la vitesse matérielle u induite par un front d'onde de choc dans un milieu non conducteur, cette méthode est une application directe de la loi de Maxwell – Faraday (cf. Fig. 1)

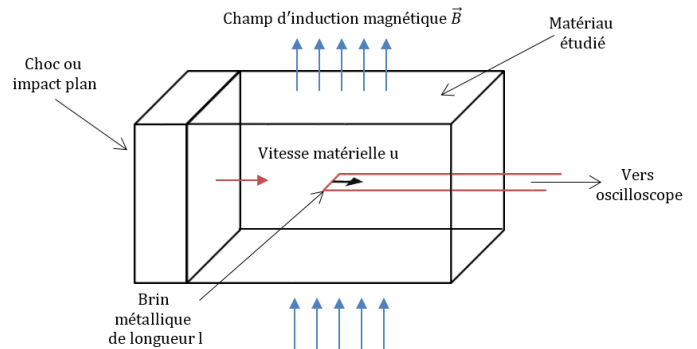


Fig. 1. Principe de fonctionnement d'une jauge multibrins.

Le capteur est composé d'un ou plusieurs fils métalliques, appelé brin(s) placés dans un champ d'induction magnétique uniforme et stationnaire $\vec{B}$. Le brin, de longueur l , constitue sa partie active où les deux extrémités sont reliées à des électrodes de connexion permettant de mesurer le signal par un conditionnement différentiel. La mise en mouvement de l'élément actif génère au passage du choc une différence de potentiel e entre les deux électrodes de connexion. La formule physique associée au phénomène est présentée avec l'équation (1). [8]

$$u = \frac{e}{Bl} \quad (1)$$

3.2. Géométrie de la jauge

Les jauges multibrins utilisées au CEA, Fig. 2, sont constituées de neuf brins destinés à la mesure de vitesse matérielle (en noir sur la figure) et de trois « shock trackers » dédiés à la détermination de la position de l'onde de choc au cours du temps (en rouge sur la figure).

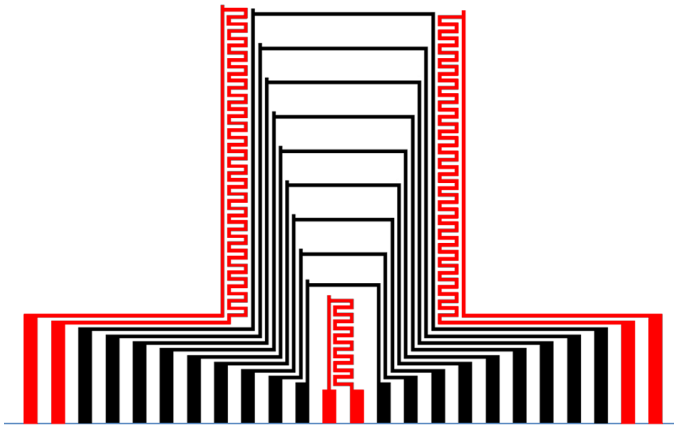


Fig. 2. Jauge électromagnétique de vitesse matérielle

3.3. Configuration expérimentale

Les expérimentations menées au CEA sont réalisées avec la configuration présentée sur la Fig. 3. Le champ d'induction magnétique est généré par deux triplets d'aimants positionnés de part et d'autre de la cible.

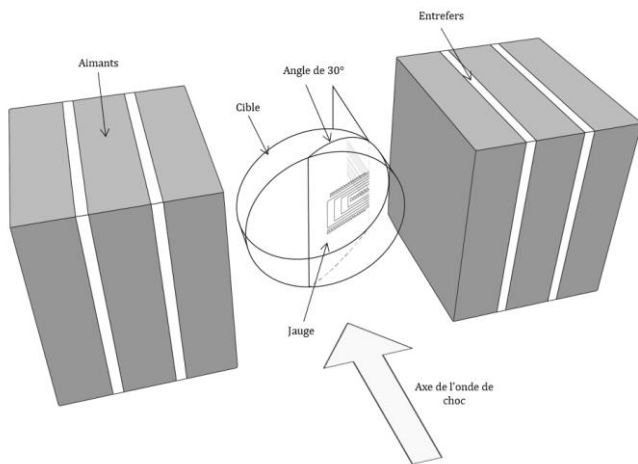


Fig. 3. Configuration expérimentale.

La jauge est insérée avec un angle de 30° dans la cible permettant de placer les brins à différentes profondeurs sans qu'ils puissent se perturber mutuellement lors de la propagation du choc.

4. ETALONNAGE DES CAPTEURS EN TEMPERATURE

4.1. Montage expérimental

L'objectif de cet étalonnage est d'évaluer la dérive des capteurs de champ d'induction magnétique en fonction de la température. Pour déterminer cette dérive, le montage présenté sur la Fig. 4 et la Fig. 5 est positionné dans une enceinte climatique permettant d'exposer les deux capteurs de champ d'induction magnétique à 10 paliers de température de -20 °C à 70 °C conformément aux spécifications des capteurs. Une fois stabilisée sur un palier de température, la bobine est alimentée par 3 créneaux de courant d'une durée de 3 secondes de respectivement 10 A, 20 A et 30 A. Les éléments du montage sont listés ci-dessous :

- Une bobine avec les caractéristiques suivantes :
 - o Longueur $L = 33.1$ cm
 - o Diamètre $D = 11.1$ cm
 - o Nombre de spires $N = 746$

- Un gaussmètre Magnet-Physik FH 55, avec une sonde à effet Hall compensé en température.
- Un gaussmètre FW BELL Model 7010, avec une sonde à effet Hall non compensé en température modèle HTF71-0608-15.
- Un thermocouple de type T, placé à l'extrémité des deux gaussmètres au milieu de la bobine, et connecté à un enregistreur de température TENMA 72-7712.



Fig. 4. Photo de la configuration expérimentale

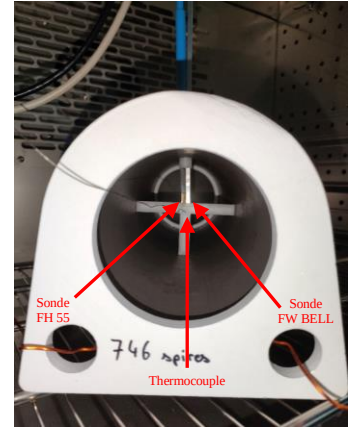


Fig. 5. Photo du positionnement des instruments

Le courant est mesuré par le transducteur de courant de la marque LEM modèle IT 150-S couplé à un multimètre Keithley 2100. Cette mesure de courant permet d'obtenir une valeur théorique du champ d'induction magnétique auquel les capteurs sont exposés selon l'équation (2). [8]

$$B = \frac{\mu_0 NI}{\sqrt{D^2 + L^2}} \quad (2)$$

4.2. Resultats de l'étalonnage

La méthode des moindres carrés est utilisée pour la régression linéaire des résultats de l'étalonnage et permet de définir les paramètres de correction à appliquer aux mesures effectuées avec les capteurs.

- a est la variation absolue de champ d'induction magnétique en fonction de la température.
- $a\%$ est la variation relative de champ d'induction magnétique par rapport à la mesure à 20 °C en fonction de la température.
- r^2 est le coefficient de détermination de la régression linéaire, exprimée sans unité.

4.2.1. Gaussmètre Magnet-Physik FH 55

La sonde du gaussmètre FH 55 possède un capteur de température intégré. La mesure du champ d'induction magnétique est compensée en température sur ce genre de capteur uniquement sur la plage de température [0 ; 70] °C. Les résultats de l'étalonnage sont présentés dans le Tableau 1 séparément pour la plage de température [-20 ; 0] °C et la plage [0 ; 70] °C.

Tableau 1 : Régression linéaire de la dérive en température du capteur de champ magnétique FH 55

I (A)	0	10		20		30	
T (°C)	[-20 ; 70]	[-20 ; 0]	[0 ; 70]	[-20 ; 0]	[0 ; 70]	[-20 ; 0]	[0 ; 70]
a (mT.°C ⁻¹)	-0,033	-0,040	-0,033	-0,059	-0,033	-0,074	-0,032
a% (%.°C ⁻¹)	#N/A	-0,135	-0,120	-0,102	-0,059	-0,086	-0,038
r ²	0,994	0,999	0,999	1,000	0,997	1,000	0,998

4.2.2. Gaussmètre FW BELL Model 7010

La sonde du gaussmètre FW BELL 7010 ne possède pas de capteur de température intégré. La mesure du champ d'induction magnétique n'est pas compensée en température sur ce genre de capteur, donc aucune séparation n'est faite sur la plage de température. Les résultats de l'étalonnage sont présentés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Régression linéaire de la dérive en température du capteur de champ magnétique FW BELL 7010

I (A)	0	10	20	30
A (mT.°C ⁻¹)	-7,18.10 ⁻⁴	-0,009	-0,017	-0,026
a% (%.°C ⁻¹)	#N/A	-0,032	-0,030	-0,031
r ²	0,796	0,992	0,989	0,994

5. VARIATION DU CHAMP D'INDUCTION MAGNETIQUE GENERE PAR DES AIMANTS EN FONCTION DE LA TEMPERATURE

5.1. Evolution du champ d'induction magnétique en fonction de la température

La variation du champ d'induction magnétique généré par des aimants en fonction de la température a été obtenue en plaçant le montage présenté sur la Fig. 6 dans une étuve, c'est une simplification avec seulement deux aimants et deux entrefers du montage présenté sur la Fig. 3 pour limiter les temps de chauffage et assurer l'homogénéité de la température dans les aimants.

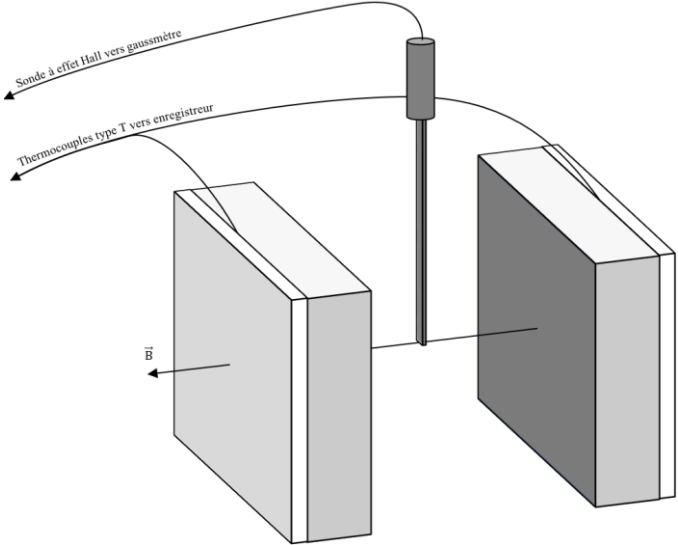


Fig. 6. Configuration expérimentale des aimants

Les aimants fournis par l'entreprise BLS Magnet sont des aimants en ferrite de rémanence type Br de 0,37 T et avec un coefficient de température réversible de Br de -0,2 %/°C pour une température maximale d'utilisation de 250 °C. Ces aimants sont soumis à une variation de température lente, définie à 0,02 °C.min⁻¹, pour garder une température homogène entre l'intérieur et l'extérieur des aimants.

Les résultats présentés sont à diviser en deux parties. Pendant les 30 premières heures de l'expérimentation, correspondant à une diminution de la température de 20 °C à -20 °C, le champ d'induction magnétique évolue de manière parabolique avec un maximum à la température de 2 °C (cf. Fig. 8). Ce phénomène semble être lié à l'état neuf des aimants utilisés car ce phénomène ne se retrouve pas avec des aimants ayant déjà subi un cycle thermique. Sur la seconde partie des résultats, après la 30^{ème} heure, le champ d'induction magnétique évolue de manière opposée à la température. Les mesures de champ magnétique et de température présentées sur la Fig. 7 permettent de déduire une variation relative du champ d'induction magnétique de 0,194 %/°C par rapport au champ d'induction magnétique mesuré à 20 °C. Cette valeur est conforme à celle annoncée par le constructeur des aimants : -0,2 %/°C.

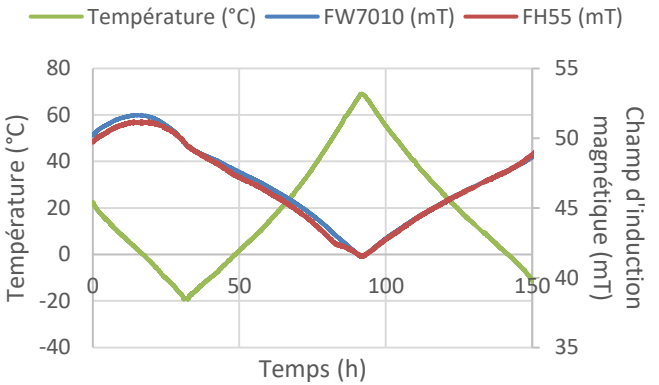


Fig. 7. Evolution de la température et du champ d'induction magnétique

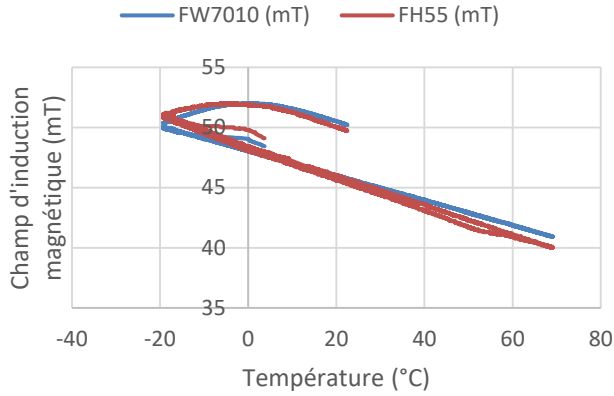


Fig. 8. Evolution du champ d'induction magnétique en fonction de la température

5.2. Perte permanente de champ magnétique en fonction de cycles thermique rapide

La perte permanente de champ d'induction magnétique générée par des aimants en fonction de cycles thermiques a été obtenue (cf. Fig. 9) en plaçant un nouveau montage, identique à celui présenté sur la Fig. 6, dans une étuve. Les aimants neufs sont soumis à une variation de température rapide avec créneaux de -20 °C à 70 °C d'une durée de 5 heures.

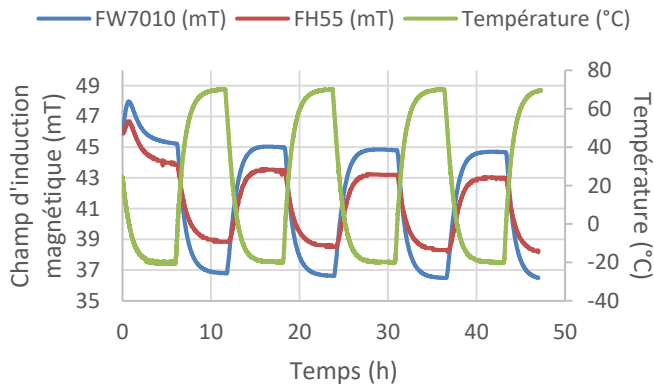


Fig. 9. Evolution du champ d'induction magnétique et de la température en fonction du temps

Cette expérimentation met en évidence une décroissance linéaire du champ d'induction magnétique en fonction des cycles de température présentée sur la Fig. 10 et Fig. 11 pour chaque gaussmètre : respectivement FW BELL et FH55. Cet essai permet d'en déduire une variation relative du champ d'induction magnétique de -0,4 %/cycle pour le gaussmètre FW BELL 7010 et de -0,75 %/cycle pour le gaussmètre FH55.

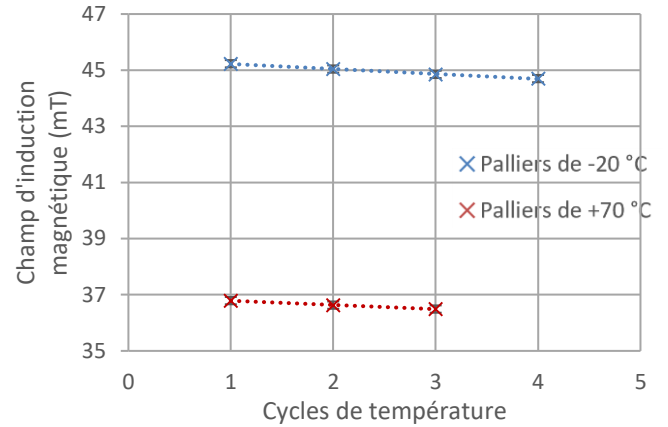


Fig. 10. Evolution du champ d'induction magnétique mesuré par le gaussmètre FW BELL 7010 en fonction des cycles de température

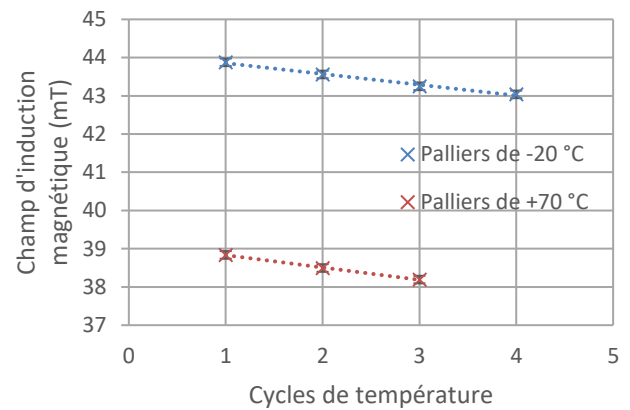


Fig. 11. Evolution du champ d'induction magnétique mesuré par le gaussmètre FH55 en fonction des cycles de température

6. INCERTITUDES DE MESURE

Les mesures de champs d'induction magnétique présentées dans ce document ont été corrigées en appliquant les coefficients $a\%$ calculés lors de l'étalonnage des capteurs. De plus, les incertitudes des mesures de température et du champ d'induction magnétique ont été calculées à partir des données constructeurs de chaque instrument.

6.1. Enregistreur de température TENMA 72-7712

L'étalonnage en température des capteurs de champ magnétique s'est fait avec un thermocouple de type T connecté à l'enregistreur de température TENMA 72-7712. L'incertitude élargie sur la mesure de température est définie selon l'équation (3).

$$u_T = 2 \times \sqrt{\left(\frac{0,5}{\sqrt{3}}\right)^2 + \left(\frac{5 \cdot 10^{-3}T + 0,8}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (3)$$

Avec

T = la mesure de température

6.2. Gaussmètre Magnet-Physik FH55

Une mesure de champ magnétique a été réalisée avec le gaussmètre Magnet-Physik FH55. L'incertitude élargie des mesures effectuées et compensées en température avec cet appareil est définie selon l'équation (4).

$$u_{FH55} = 2 \times \sqrt{\left(\frac{5 \cdot 10^{-4} B + 5 \cdot 10^{-5} range}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (4)$$

Avec

{ B = la mesure du champ d'induction magnétique
range = le calibre de l'appareil

6.3. Gaussmètre FW Bell modèle 7010

Une mesure de champ magnétique a été réalisée avec le gaussmètre FW BELL modèle 7010. L'incertitude élargie des mesures effectuées et compensées en température avec cet appareil est définie selon l'équation (5).

$$u_{FH55} = 2 \times \sqrt{\left(\frac{5 \cdot 10^{-4} B + 1 \cdot 10^{-4} range}{\sqrt{3}}\right)^2} \quad (5)$$

7. CONCLUSIONS

L'étude du cyclage thermique lent a permis de caractériser la variation de champ d'induction magnétique de $-0,194 \text{ } \%.^{\circ}\text{C}^{-1}$. Les essais de cycle rapide de température ont permis de quantifier la perte permanente de champ d'induction magnétique à $-0,4 \text{ } \%/cycle$.

Pour s'affranchir du phénomène de dérive magnétique lors du premier cycle thermique, il est conseillé d'effectuer un premier cycle en température sur les aimants neufs. Cependant, il serait pertinent d'approfondir l'étude pour mieux comprendre ce qu'il se passe lors de cette dérive initiale et les mécanismes en jeu. Une répétabilité des essais sera intéressante pour borner cette dérive magnétique.

L'utilisation des aimants en ferrite en température conduit ainsi à une difficulté opérationnelle pour connaître le champ d'induction magnétique lors de l'essai, une évolution vers une génération de champ par bobine de Helmholtz est envisagée.

8. REFERENCES

- [1] V. M. Zaitzev, P. F. Pokhil, and K. K. Shvedov, "An electromagnetic method for measuring the speed of explosion products," Dokl. Akad. Nauk SSSR, vol. 132, no. 6, 1960.
- [2] L. M. Erickson, C. B. Johnson, N. L. Parker, H. C. Vantine, R. C. Weingart, and R. S. Lee, "The electromagnetic velocity gauge: use of multiple gauges, time response, and flow perturbations," in Seventh International Detonation Symposium, Annapolis, Maryland, 1981.
- [3] J. Vorthman, G. Andrews, and J. Wackerle, "Reaction Rates from Electromagnetic Gauge Data," in Proceedings of the Eighth Symposium (International) on Detonation, Office of Naval Research, Report NSWC MP-86-194, p. 99, 1986.
- [4] S. G. Finnegan, G. J. Appleby-Thomas, R. Hazael, J. W. Ferguson, and M. J. Goff, "Uncertainty analysis of data collected using embedded magnetic particle velocity gauges," AIP Conf. Proc., vol. 2844, p. 260004, 2023.
- [5] M. J. Burns and B. A. Chidester, "An exploration of anomalous electrical noise in shocked cyclotrimethylenetrinitramine (RDX)-based explosives," J. Appl. Phys., vol. 135, p. 165903, 2024.
- [6] R. Menikoff, "xRage simulations of magnetic velocity gauges used in gas gun shock initiation experiments," LA-UR-21-21769, 2021.
- [7] A. P. Ershov, "On Electromagnetic Measurements of Particle Velocity," Fizika Goreniya i Vzryva, vol. 59, no. 5, pp. 53–62, 2023.
- [8] H. Gié et J.P. Sarmant, *Electromagnétisme, volume 1 et 2*, Collection des sciences physiques, Technique et documentation, Lavoisier, 1985.