

Mise en place d'un dispositif de thermographie rapide pour la caractérisation thermique d'électrodes en coupure sous vide

Implementation of a high-speed thermography system for the thermal characterization of electrodes in vacuum interruptions

Deniz LIBERT^{1,2,3*}, Coline BOURGES¹, Stephen CADIOU¹, Muriel CARIN¹, Mickaël COURTOIS¹, Flavien VALENSI², Philippe TEULET², Jérôme DOUCHIN³, Anthony PAPILLON³

¹IRDL, UMR CNRS 6027, Univ. Bretagne Sud, Bretagne INP, ENSTA, Institut Polytechnique de Paris, Univ. Brest, Lorient, France

²Laplace, UMR 5213, Université de Toulouse, Toulouse, France

³Schneider Electric, Grenoble, France

*(auteur correspondant : deniz.libert@univ-ubs.fr)

Résumé - Une maquette expérimentale instrumentée avec deux voies optiques, visible et infrarouge, a été développée pour mesurer la température des contacts CuCr lors d'interruptions sous vide. Une loi thermographique dérivée de l'équation de Planck, appliquée après étalonnage ex situ sur corps noir et correction des pertes optiques et de l'émissivité, assure la conversion des niveaux numériques en température. Validée par des essais sur métaux purs, cette méthode permet désormais d'analyser la thermique des contacts en coupure réelle et d'établir des critères de coupure liés à la température pour optimiser les disjoncteurs moyenne tension.

Abstract - An instrumented mock-up with two optical paths, visible and infrared, was developed to measure the temperature of CuCr contacts during vacuum interruptions. Temperature determination relies on a thermographic law derived from Planck's equation, applied after ex-situ calibration on a blackbody cavity and correction for optical losses and emissivity. Validated through tests on pure metals, this method now enables analysis of contact thermal behavior during real interruptions and the establishment of temperature-based interruption criteria to optimize medium-voltage circuit breakers.

Nomenclature

T	température, °C	<i>Indices et exposants</i>	
DL	niveau de gris, -	s	surface
IT	temps d'intégration, μ s	mes	mesure
<i>Symboles grecs</i>		env	environnement
λ	longueur d'onde, nm	app	apparent
ε	émissivité normale spectrale, -	$corr$	corrigé
τ	transmittance, -	bg	fond effectif
		fus	fusion/solidification

1. Introduction

Nos sociétés sont fondées sur l'énergie, dont le fonctionnement, la croissance et la stabilité reposent sur la capacité à produire, transporter et convertir l'énergie utile [1]. Parmi toutes les

formes d'énergie, l'électricité (hautement exergetique) occupe une place centrale : elle se transporte aisément et se convertit efficacement. L'électrification croissante des usages est identifiée comme un levier majeur de décarbonation. Les scénarios prospectifs prévoient ainsi une forte augmentation de la consommation électrique à l'horizon 2050, en France comme à l'international [2, 3]. Cette électrification s'appuie sur un réseau structuré où les disjoncteurs assurent la protection et la continuité de service. Historiquement, de nombreux disjoncteurs moyenne tension utilisaient l'hexafluorure de soufre (SF_6), un gaz au pouvoir de réchauffement global extrêmement élevé ($1 \text{ kg de SF}_6 \approx 25 \text{ t de CO}_2$) et à une durée de vie atmosphérique de l'ordre de 3200 ans, dont la substitution est aujourd'hui devenue indispensable dans le cadre des politiques climatiques.

La coupure sous vide met en effet en jeu des interactions complexes entre les contacts et un plasma métallique transitoire. Plusieurs travaux montrent que les performances des disjoncteurs sous vide sont étroitement liées à la température des électrodes [4-7]. Or, cette température est difficile à mesurer en conditions réelles : l'arc ne dure que quelques millisecondes, les températures excèdent 2000°C en surface des contacts et l'environnement optique est fortement perturbé par le plasma métallique. Les approches conventionnelles de mesure sont donc insuffisantes pour caractériser précisément l'évolution thermique des contacts pendant et après la coupure de l'arc électrique. Plusieurs travaux expérimentaux utilisant l'imagerie infrarouge, la pyrométrie multispectrale ou des systèmes camera ont rapporté des températures de contact comprises entre 1200°C et plus de 2000°C à proximité du passage par zéro du courant, selon la composition des contacts en cuivre chrome (CuCr), la géométrie des contacts et le courant de défaut [6-9].

Pour répondre à ces besoins, nous avons développé un banc d'essais basé sur une maquette expérimentale qui permet, contrairement à une chambre de coupure hermétique, d'observer directement la zone d'interruption entre deux contacts en CuCr. Le dispositif intègre deux voies optiques distinctes : une caméra haute-vitesse monochromatique dans le visible, et une caméra infrarouge, permettant d'accéder à la température des surfaces à deux longueurs d'onde adaptées. L'ensemble a été étalonné ex-situ à l'aide d'un corps noir de type cavité couvrant 1400 à 2400°C , et une loi radiométrique basée sur l'équation de Planck, incluant le temps d'obturation, a permis d'établir la correspondance entre les niveaux de gris et la température [10]. L'utilisation conjointe de l'émissivité mesurée des contacts et des transmittances des éléments optiques permet ensuite d'obtenir la température réelle lors d'essais in-situ. Les premiers résultats obtenus lors de coupures réelles ($< 10 \text{ ms}$, $> 2000^\circ\text{C}$) confirment ainsi la faisabilité d'une thermographie rapide en environnement fortement perturbé, ouvrant la voie à une meilleure compréhension des phénomènes thermiques associés à l'interruption sous vide.

2. Dispositif expérimental et instrumentation

Les essais de coupure ont été réalisés sur les bancs d'essais dit synthétiques du Laboratoire d'Essais Moyenne Tension de Schneider Electric à Grenoble. Dans ce type de banc, la tension et le courant sont générés séparément, ce qui permet d'atteindre les niveaux de puissance requis pour des essais extrêmes tout en maîtrisant précisément les grandeurs électriques imposées à l'échantillon. La tension appliquée peut atteindre 175 kV crête, tandis que le courant à 50 Hz peut monter jusqu'à 120 kA crête. Cette architecture « synthétique », couramment utilisée pour réaliser des essais sévères en configuration monophasée, offre une alternative aux essais de puissance triphasés qui représentent les défauts survenant sur le réseau.

Une maquette expérimentale dite « en croix » (Figure 1) a été utilisée pour rendre possible l'observation directe de la zone d'interruption entre les contacts en CuCr. Cette configuration est particulièrement utile car, dans les disjoncteurs industriels, la zone d'arc est enfermée dans

une chambre hermétique en céramique, ce qui rend toute observation impossible. La maquette en croix offre donc un accès visuel indispensable pour la mise en place et la validation de la chaîne de mesure. Elle intègre différents instruments nécessaires au suivi des essais : capteurs de vitesse pour le mouvement du contact, jauges de pression pour le contrôle du vide, et hublots optiques pour la visée des caméras.

La chaîne optique repose sur deux voies distinctes : une caméra haute-vitesse monochromatique Photron Fastcam SA5 opérant dans le visible et le très proche infrarouge (plage utilisée 700–900 nm), et une caméra FLIR X6580sc opérant dans le proche infrarouge (1000–3000 nm). Dans chaque voie, des filtres passe-bande étroits ont été sélectionnés afin de travailler à des longueurs d'onde précises, choisies en tenant compte à la fois des contraintes instrumentales (sensibilité des caméras, transmission du système optique) et de l'émission propre du plasma d'arc. Les bandes retenues évitent les principales raies d'émission du Cu, du Cr et de leurs ions ; de plus, la composante continue du plasma décroît fortement dans les dernières millisecondes précédant le passage par zéro du courant, ce qui limite sa contribution parasite dans l'exploitation thermographique. Les valeurs exactes de ces longueurs d'onde ne peuvent cependant pas être précisées ici pour des raisons de confidentialité. Dans la suite de l'article, ces deux longueurs d'onde seront simplement désignées comme « voie visible » et « voie infrarouge ».

Le système optique, illustré en Figure 2, est constitué d'un ensemble de miroirs, d'un hublot et d'une vitre de protection placée devant le hublot lors des essais. Cette configuration garantit une transmission stable et sécurisée des rayonnements vers les capteurs tout en limitant les risques liés aux projections ou dépôts métalliques de la zone d'arc sur le hublot.

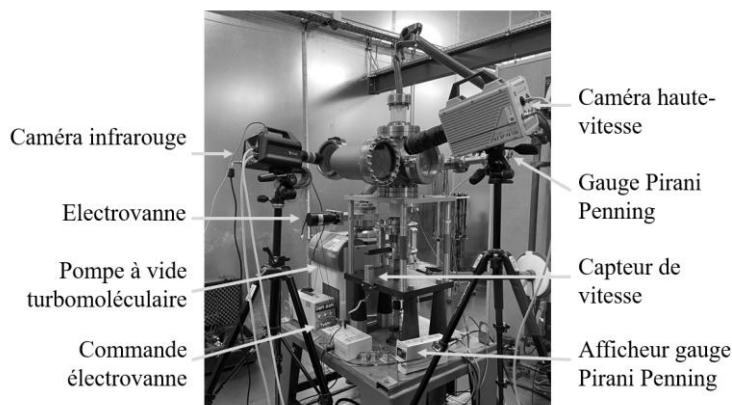


Figure 1 : Maquette expérimentale dite « en croix » instrumentée et raccordée au banc d'essais synthétique

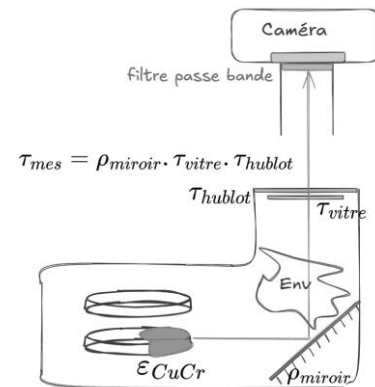


Figure 2 : Système optique des contacts jusqu'aux caméras

3. Méthode d'étalonnage et traitement des données

3.1. Lois thermographiques et d'étalonnage

La caméra, qu'il s'agisse de la voie visible ou de la voie infrarouge, ne mesure pas directement une température mais un flux spectral intégré, converti par le capteur en une valeur numérique (Digital Level, *DL*). L'accès à la température réelle nécessite donc d'établir une relation radiométrique entre ce niveau de gris et la radiance émise par l'objet. Cette radiance dépend de la température de surface T_s , de l'émissivité spectrale du matériau ε et des pertes optiques dans la chaîne d'observation τ_{mes} . Pour une surface opaque de type corps gris, le signal mesuré résulte de la somme de deux contributions : le rayonnement propre émis par la

surface, et une contribution environnementale réfléchiée par cette surface en raison de son émissivité. L'ensemble conduit à l'expression opérationnelle donnée en équation (1).

$$DL_{mes} = \tau_{mes} \cdot [\varepsilon \cdot DL(T_s) + (1 - \varepsilon) \cdot DL(T_{env})] \quad (1)$$

Cette relation montre que la conversion du DL en température requiert une loi d'étalonnage $DL(T)$ établie précisément. En outre, une correction doit être appliquée lorsque l'étalonnage est effectué dans des conditions optiques différentes de celles des essais. En effet, l'étalonnage ne pouvant être réalisé dans la maquette en croix, il est mené ex-situ au laboratoire IRDL dans une enceinte sous atmosphère contrôlée, équipée des mêmes éléments optiques (objectif, doubleur, filtres passe-bande visibles et IR) que ceux utilisés en maquette. Les deux caméras, visible et infrarouge, sont chacune étalonnées dans leur bande spectrale respective.

Au centre de l'enceinte d'étalonnage est placé un corps noir de type cavité, usiné en graphite. Sa géométrie cylindrique et l'émissivité spectrale élevée du graphite conduisent à une émissivité apparente ε_{app} proche de l'unité, donnée par l'équation (2) [11], valable dans le cas idéal d'un cylindre infiniment long. Afin de s'approcher de cette configuration théorique, la cavité doit présenter un rapport profondeur sur diamètre suffisamment élevé pour que les réflexions internes dominent. Le choix du diamètre et de la profondeur a donc été guidé par ce critère : l'ouverture devait rester assez large pour fournir un nombre suffisant de pixels utiles à la caméra, tout en assurant une profondeur compatible avec un comportement radiatif proche de celui d'un cylindre long. La cavité retenue, d'un diamètre de 4 mm et d'une profondeur de 16 mm, satisfait ce compromis en garantissant une émissivité apparente élevée tout en maintenant une bonne résolution spatiale au niveau du plan image.

$$\varepsilon_{app} = \frac{2\sqrt{\varepsilon}}{1 + \sqrt{\varepsilon}} \quad (2)$$

Avec $\varepsilon \approx 0,95$ dans le visible, on obtient $\varepsilon_{app} \approx 0,99$ [11]. Dans l'IR, l'émissivité spectrale du graphite étant légèrement plus faible ($\varepsilon \approx 0,9$), l'émissivité apparente vaut $\varepsilon_{app} \approx 0,97$. Ces valeurs élevées garantissent que, pour les deux caméras, la cavité se comporte comme une source quasi-noire, permettant un étalonnage fiable dans les deux bandes spectrales. Après chauffage au laser, la cavité se comporte comme un corps mince dès l'arrêt du faisceau, ce qui assure une température uniforme à chaque instant, et rend possible l'utilisation de la phase de refroidissement pour associer un niveau de gris unique à chaque température mesurée.

La caméra et un pyromètre bichromatique étalonné observent simultanément le corps noir ; la base de temps est synchronisée en repérant l'instant d'extinction du laser, visible sur les deux signaux. Pour chaque ouverture diaphragmatique et pour chaque temps d'intégration IT , le niveau de gris maximal est associé à la température correspondante fournie par le pyromètre, les pixels saturés étant exclus. L'ensemble de ces couples (DL, T) est ajusté par une loi de type Planck (équation 3) [10]. Cette loi inclut explicitement la dépendance au temps d'intégration IT .

$$DL(T, IT) = \left(\frac{A}{\exp\left(\frac{B}{T}\right) - 1} + C \right) IT + Offset \quad (3)$$

Une fois les paramètres radiométriques A, B, C et Offset identifiées à l'aide d'un algorithme de Levenberg-Marquardt, l'inversion de la loi permet d'obtenir la température pour tout temps d'intégration (équation 4).

$$T = \frac{B}{\ln \left(\frac{A}{\frac{DL - Offset}{IT} - C} + 1 \right)} \quad (4)$$

Cette loi d'étalonnage est ensuite utilisée pour interpréter les images acquises en maquette. Comme les conditions optiques diffèrent entre le banc d'étalonnage de l'IRDL et la maquette en croix lors des mesures, il est nécessaire de corriger le niveau de gris mesuré avant d'appliquer la loi. En pratique, la contribution environnementale n'est pas calculée à partir d'une température imposée, mais estimée directement sur chaque image à partir de zones froides. On définit ainsi un fond effectif mesuré tel que $DL_{bg} = \tau_{mes} \cdot DL(T_{env})$, ce qui conduit, dans l'exploitation des images, à soustraire directement un terme de fond déjà exprimé au niveau détecteur. Le niveau de gris corrigé, ramené aux conditions de l'étalonnage, s'écrit alors selon l'équation (5).

$$DL_{corr} = \frac{\tau_{IRDL}}{\tau_{mes} \cdot \varepsilon} \cdot [DL_{mes} - (1 - \varepsilon) DL_{bg}] \quad (5)$$

Cette expression inclut la correction des pertes optiques entre la maquette et le banc d'étalonnage, la prise en compte de l'émissivité des contacts ainsi que la soustraction de la contribution environnementale réfléchie. Elle permet ensuite d'appliquer directement la loi d'étalonnage pour déterminer la température réelle dans les conditions des essais.

3.2. Validation des lois d'étalonnage

Pour valider expérimentalement la loi d'étalonnage, des corps purs, dont les températures de fusion sont bien établies, ont été utilisés. Le choix s'est porté sur le fer (Fe) et le nickel (Ni) à 99,99 % de pureté (fournisseur Neyco). Une difficulté majeure de cette démarche réside dans le manque de données fiables d'émissivité spectrale aux longueurs d'onde d'intérêt, en particulier dans l'infrarouge, aux températures visées et pour l'état liquide des métaux. Les valeurs retenues d'émissivité au point de fusion issues de la littérature sont récapitulées dans le Tableau 1 pour les longueurs d'onde utilisées dans cet article.

	T_{fus}	$\varepsilon_{visible}^{T=T_{fus}}$	$\varepsilon_{IR}^{T=T_{fus}}$
	°C	-	-
Fer	1538	0,39	0,28
Nickel	1455	0,37	0,20

Tableau 1 : Propriétés thermophysiques retenues pour la vérification

La température est reconstruite en appliquant la loi thermographique de l'équation 5 en intégrant les valeurs d'émissivité du Tableau 1 et les transmittances mesurées des éléments optiques du banc d'étalonnage, avant conversion des niveaux numériques corrigés en température. Les courbes de validation sont obtenues à partir d'expériences de liquéfaction de petites billes métalliques d'environ 30 mg chauffées par laser dans une enceinte de lévitation aérodynamique sous atmosphère inerte [12, 13]. Ce dispositif permet d'observer la phase de fusion puis le refroidissement libre du métal, donnant accès à une courbe typique comportant une surfusion suivie d'une recalescence. Le plateau de solidification apparaît nettement après cette phase de recalescence, ce qui permet de l'identifier sans ambiguïté pour comparer la température reconstruite au plateau de référence.

Les écarts observés entre les températures reconstruites et les plateaux de solidification de référence restent modérés dans les deux bandes spectrales. Pour la caméra visible, la différence est inférieure à 10 °C pour le Ni et de l'ordre de 20 °C pour le Fe, ce qui demeure compatible avec une calibration correcte compte tenu des incertitudes sur l'émissivité spectrale aux températures et longueurs d'onde considérées. Pour la caméra infrarouge (Figure 3), les écarts sont légèrement plus marqués, avec une tendance positive pour le fer (+10°C) et négative pour le nickel, de l'ordre de quelques dizaines de degrés (- 30 °C).

Une analyse de sensibilité a été réalisée en faisant varier l'émissivité d'environ $\pm 10\%$, ce qui correspond aux dispersions typiquement rapportées dans la littérature pour des métaux liquides. Cette variation induit une modification d'environ $\pm 50\text{ °C}$ autour de la température reconstruite pour l'émissivité nominale, ce qui est cohérent avec les écarts mesurés expérimentalement. Ces différences s'expliquent par la sensibilité de la reconstruction aux paramètres radiométriques d'entrée, notamment l'émissivité des surfaces liquides et la transmittance des éléments optiques, ainsi que par les évolutions d'état de surface au cours du cycle thermique, telles que l'oxydation ou la rugosité. Malgré ces incertitudes, la proximité des températures reconstruites avec les plateaux de référence confirme la robustesse de la loi d'étalonnage pour l'usage visé.

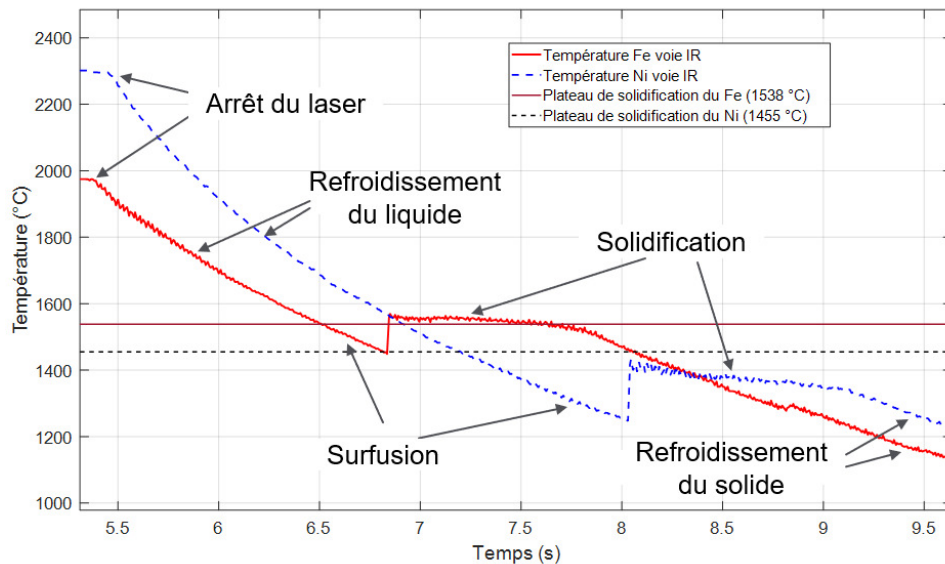


Figure 3 : Thermogrammes IR de la solidification du Fe et du Ni

4. Résultats et analyses

L'application de la procédure d'étalonnage aux séquences acquises sur la maquette en croix a permis de reconstruire la température des contacts en CuCr 75/25 pour des courants compris entre 35 et 38 kA crête et des temps d'arc de 8,5 à 10 ms. Les températures obtenues au voisinage du passage par zéro du courant (CZ) sont comprises entre 1650 et 1850°C en infrarouge, et entre 1700 et 1900°C sur la voie visible. Un écart d'environ 50°C entre les deux voies sur une même séquence constitue un niveau de cohérence satisfaisant au regard des corrections successives imposées par la transmittance de la chaîne optique, l'émissivité spectrale du matériau et les incertitudes temporelles propres à chaque caméra.

La Figure 4 présente un exemple de thermogrammes issus des deux voies optiques pour un même essai. Les deux voies conduisent à des niveaux de température compatibles au voisinage de CZ. Les valeurs obtenues dans ces conditions expérimentales se situent dans la plage généralement rapportée pour des contacts CuCr sans champ magnétique d'aide, où les

températures proches du CZ varient typiquement entre 1200 °C et un peu plus de 2000 °C selon la géométrie des contacts, les conditions d'arc et la présence éventuelle de rotation magnétique. Les valeurs mesurées ici, comprises entre 1650 et 1900°C, sont compatibles avec les études réalisées à des courants de même ordre de grandeur et sans rotation d'arc.

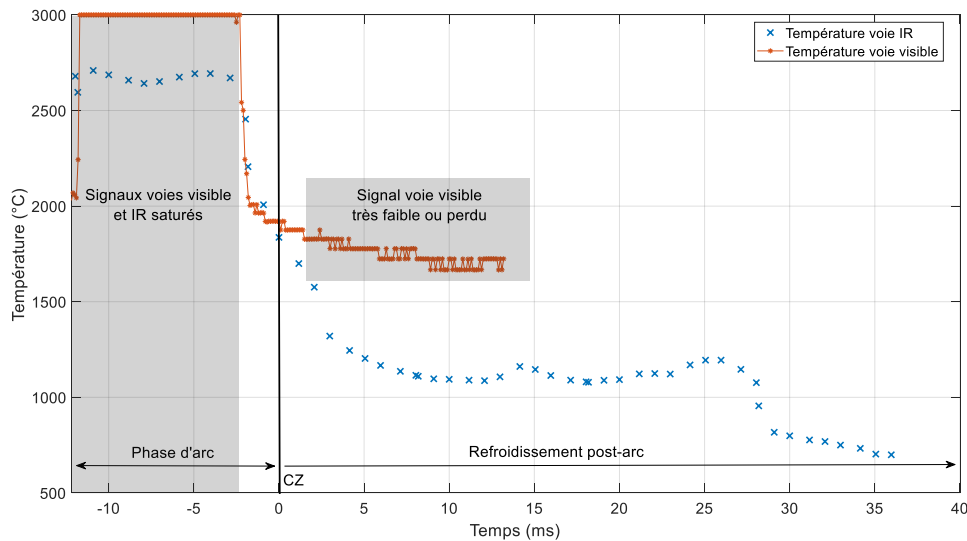


Figure 4 : *Thermogrammes IR et visible d'un même essai*

Les comportements des deux voies restent différents. La caméra visible, enregistrant à 10 kHz, permet de suivre précisément l'évolution thermique dans une fenêtre temporelle restreinte, d'environ ± 2 ms autour du passage par zéro. Dès que la température décroît, le flux dans le visible devient insuffisant et la mesure n'est plus exploitable. La caméra infrarouge, enregistrant à 1,1 kHz, fournit en général une seule image environ 1 ms avant le CZ, ce qui introduit une incertitude sur l'instant exact auquel la température est associée, mais permet de décrire le refroidissement thermique post-arc jusqu'à environ 40 ms après l'interruption.

Ces limitations respectives expliquent les légers écarts entre les températures mesurées par les deux voies et suggèrent plusieurs améliorations possibles concernant le repérage temporel en infrarouge et, inversement, la sensibilité à basse température dans la voie visible. Dans leur état actuel, les deux voies fournissent des informations complémentaires : la caméra visible décrit la dynamique précédente immédiate du CZ, tandis que la voie infrarouge permet d'appréhender la décroissance thermique sur des temps plus longs. L'ensemble constitue une base cohérente pour caractériser l'évolution thermique des contacts au voisinage du passage par zéro.

5. Conclusion

La mise en place d'une chaîne de mesure combinant imagerie visible et infrarouge, associée à une loi thermographique prenant en compte les pertes optiques dans les conditions d'étalonnage et de mesure, permet désormais d'accéder de manière fiable à la température des contacts en interruption sous vide. La loi choisie, dérivée de l'équation de Planck et ajustée par un étalonnage ex situ sur corps noir, a été retenue pour sa capacité à intégrer explicitement le temps d'intégration, et à fournir une relation robuste entre niveau numérique et température. Cette approche, associée à une correction radiométrique tenant compte des transmittances et de l'émissivité des contacts, garantit la cohérence des mesures dans des conditions expérimentales complexes. La validation réalisée à l'aide de métaux purs, malgré des incertitudes liées à l'émissivité spectrale et aux évolutions d'état de surface, confirme la fiabilité de la méthode pour l'usage visé.

Au-delà de la validation, cette chaîne de mesure ouvre des perspectives pour l'établissement de critères de coupure directement liés à la thermique des contacts. La possibilité de caractériser la température au voisinage du passage par zéro et le refroidissement thermique après l'interruption constitue un levier pour mieux comprendre les mécanismes physiques de la coupure sous vide. Ces avancées permettront d'orienter le développement des disjoncteurs moyenne tension vers des conceptions optimisées, améliorant la fiabilité des réseaux électriques dans un contexte de transition énergétique et de réduction des gaz à effet de serre.

Références

- [1] C. Ronneau, *Énergie, pollution de l'air et développement durable*. in Lectures universitaires. Louvain-la-Neuve: Presses universitaires de Louvain, 2004. Consulté le: 9 mai 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://books.openedition.org/pucl/607>
- [2] RTE, « Futurs énergétiques 2050 », RTE, Paris, févr. 2022. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.rte-france.com/analyses-tendances-et-prospectives/bilan-previsionnel-2050-futurs-energetiques#Lesresultatsdeletude>
- [3] IEA, « Net Zero by 2050 - A Roadmap for the Global Energy Sector », IEA, Paris, 2021. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050>
- [4] P. Sarrailh, « Modélisation et simulation de la phase post-arc d'un disjoncteur sous vide », These de doctorat, Toulouse 3, 2008. Consulté le: 17 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.fr/2008TOU30305>
- [5] Y. Langlois, « Modélisation de l'arc électrique dans un disjoncteur à vide », These de doctorat, Université de Lorraine, 2010. Consulté le: 17 décembre 2024. [En ligne]. Disponible sur: <https://theses.fr/2010INPL062N>
- [6] K. Watanabe *et al.*, « The anode surface temperature of CuCr contacts at the limit of current interruption », *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 25, n° 4, p. 637-641, août 1997, doi: 10.1109/27.640677.
- [7] T. Donen, J. Abe, M. Tsukima, Y. Takai, S. Miki, et S. Ochi, « Temperature measurement and arc rotation observation of spiral-type contact », in *2016 27th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV)*, sept. 2016, p. 1-4. doi: 10.1109/DEIV.2016.7748725.
- [8] H. Schellekens et M. B. Schulman, « Contact temperature and erosion in high-current diffuse vacuum arcs on axial magnetic field contacts », *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 29, n° 3, p. 452-461, juin 2001, doi: 10.1109/27.928943.
- [9] T. Pieniak, M. Kurrat, et D. Gentsch, « Surface Temperature Analysis of Transversal Magnetic Field Contacts Using a Thermography Camera », *IEEE Transactions on Plasma Science*, vol. 45, n° 8, p. 2157-2163, août 2017, doi: 10.1109/TPS.2017.2707667.
- [10] T. Lafargue, « Comportement de matériaux illuminés par des sources laser multi-kW », phdthesis, HESAM Université, 2023. Consulté le: 3 octobre 2025. [En ligne]. Disponible sur: <https://pastel.hal.science/tel-04496284>
- [11] S. G. Yousef, P. Sperfeld, et J. Metzdorf, « Measurement and calculation of the emissivity of a high-temperature black body », *Metrologia*, vol. 37, n° 5, p. 365, oct. 2000, doi: 10.1088/0026-1394/37/5/4.
- [12] D. Le Maux, M. Courtois, T. Pierre, B. Lamien, et P. Le Masson, « Density measurement of liquid 22MnB5 by aerodynamic levitation », *Rev. Sci. Instrum.*, vol. 90, n° 7, p. 074904, juill. 2019, doi: 10.1063/1.5089620.
- [13] M. Le Mener, C. Bourges, E. Courtois, T. Pierre, et M. Courtois, « A New Approach to Determining the Specific Heat of Liquid Metals at High Temperatures by Aerodynamic Levitation », *Int J Thermophys*, vol. 47, n° 1, p. 8, janv. 2026, doi: 10.1007/s10765-025-03681-8.