



HAL
open science

Relais de signalisation N.S1: essai d'endurance pour construire une politique de maintenance préventive

Dinh Tuan Nguyen, Wilhelm Pascal, Joël Piaget, Alexandre Yapo

► **To cite this version:**

Dinh Tuan Nguyen, Wilhelm Pascal, Joël Piaget, Alexandre Yapo. Relais de signalisation N.S1: essai d'endurance pour construire une politique de maintenance préventive. Congrès Lambda Mu 24 " Les métiers du risque : clés de la réindustrialisation et de la transition écologique ", Institut pour la Maîtrise des Risques (IMdR), Oct 2024, Bourges, France. <hal-04895954>

HAL Id: hal-04895954

<https://hal.science/hal-04895954v1>

Submitted on 19 Jan 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire HAL, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



HAL Authorization



Relais de signalisation N.S1: essai d'endurance pour construire une politique de maintenance préventive

N.S1 signalling relay : to establish preventive maintenance policy by endurance testing

NGUYEN Dinh Tuan
RATP Infrastructures
Fontenay-sous-bois dinh-
tuan.nguyen@ratp.fr
YAPO Alexandre

WILHELM Pascal
RATP Infrastructures
Fontenay-sous-bois
pascal.wilhelm@ratp.fr

PIAGET Joël
RATP Infrastructures
Fontenay-sous-bois
joel.piaget@ratp.fr

RATP Infrastructures
Fontenay-sous-bois alexandre.yapo@ratp.fr

I. RÉSUMÉS

Résumé — S'inscrivant dans le chantier du renouvellement patrimonial et de la modernisation de l'infrastructure au sein de la Business Unit RATP Infrastructures, l'étude du comportement des relais N.S1, organes élémentaires et fondamentaux de la signalisation du système de transport urbain, est confiée au groupe Homologation et Suivi des Produits (HSP). La construction et la fabrication des relais N.S1 sont strictement encadrées par la série de normes NF F 70-030/31/32. Ainsi les caractéristiques des relais à l'état neuf sont parfaitement maîtrisées. C'est à l'intégration des relais dans un système de signalisation disposés de plusieurs interfaces techniques, communément appelés *organes de commande* et de *charges*, que leur comportement serait amené à évoluer. C'est la raison pour laquelle l'étude des relais en situation représentative des conditions d'exploitation est privilégiée. Pour cela, un banc d'essai constitué de 10 relais N.S1 monostables, de 3 types de charges représentatifs du réseau est construit pour réaliser l'essai d'endurance des relais N.S1. L'essai en cours, lancé début 2023, a franchi la première étape à 4,5 millions de manœuvres sans que les relais présentent des signes de vieillissement. L'expérience se poursuit jusqu'à ce que ce seuil soit atteint. Les données obtenues seraient utilisées pour comprendre l'usure des contacts et des relais en faisant appel à une modélisation statistique par la loi de Weibull. Le résultat est attendu par le Comité technique de signalisation de la RATP pour décision concernant une potentielle adaptation de sa politique de maintenance.

Mots-clefs — *relais N.S1 monostable, fiabilité, durée de vie, essai d'endurance, Weibull*

Abstract — As part of the renewal and modernization process of railway infrastructures engaged by the RATP Infrastructures Business Unit, the study of the N.S1 relays, elementary and fundamental blocks of signaling systems of the urban transport network, is entrusted to group HSP. Construction and manufacturing requirements of N.S1 relays are strictly regulated by the NF F 70-030/31/32 standards. Thus characteristics of new relays are perfectly mastered. It is through the integration process of these relays into a signaling system with several technical interfaces, commonly called control and load devices, that their behavior would evolve. This is the reason why the study of relays in a situation representative of operating conditions is preferred. In order to do this, a testbench made up of 10 monostable N.S1 relays, of 3 types of load representative of the network is built to carry out the endurance test of the N.S1 relays. The test, launched at the beginning of 2023, has reach its first milestone at 4.5 millions commutations without the relays showing signs of aging. The experience carries on until the threshold is achieved. The data would be used to understand contact and relay wear-out by using statistical modeling as Weibull's law. The result is awaited the Signaling Technical Committee of RATP Infrastructures regarding the potential evolution of its maintenance policy.

Keywords — *N.S1 monostable relays, reliability, lifetime, endurance test, Weibull*

II. INTRODUCTION

Les relais électromagnétiques sont des organes élémentaires et fondamentaux de la signalisation ferroviaire française. Ils participent au remplacement des systèmes d'enclenchement mécanique qui étaient encombrants et peu flexibles. La technologie d'enclenchement électrique à base de relais électromagnétiques était alors largement adoptée au sein de grandes compagnies d'exploitation ferroviaire française à partir des années 60 et reste toujours d'actualité aujourd'hui.

Au cœur des systèmes d'enclenchement électrique se trouvent les relais électromagnétiques N.S1. Historiquement, la conception des relais apparaissait dans la série des conditions techniques CT 308 de la SNCF. D'un point de vue normatif au niveau national, la conception des relais est encadrée par la norme NF F 70-030 « Relais électromagnétiques de sécurité – Règles de conception et de construction », ainsi que les normes NF F 70-031 et NF F 70-032 pour les essais de qualification et de production en série. Les deux référentiels (CT 308 et NF F 70-03x) sont mutuellement utilisés par les exploitants ferroviaires et les constructeurs de relais.

Le catalogue des relais N.S1 existant aujourd'hui est constitué de plusieurs type de relais utiles à la réalisation des circuits de signalisation :

- Relais neutre Monostable Poste et Ligne,
- Relais Monostable temporisé,
- Relais Basculeur, □ Relais Rupteur, □ Relais Clignoteur.

Le catalogue des relais est complété par les boîtiers de fonction spécifiques, comme Temporisateur, Transformateur, Contrôle de feux et Commande perdue d'aiguille afin de réaliser les fonctions de signalisation complexes. Les relais neutres Monostables (version Poste et Ligne) restent de loin les plus utilisés dans les postes de signalisation et sont pour la plupart du temps en interface avec d'autres systèmes techniques. **Ils feront l'objet principal de notre étude.**

Un relais neutre monostable, quel que soit en version Poste ou Ligne, présente toutes les caractéristiques fonctionnelles usuelles d'un relais électromagnétique : une bobine alimentée en continu à 24V nominal, des contacts Travail (contact Normalement Ouvert), des contacts Repos (contact Normalement Fermé). Quand la bobine est correctement alimentée, les contacts Repos s'ouvrent et les contacts Travail s'établissent au bout du Temps d'Attraction total. Ce temps désigne l'intervalle entre le moment où la commande est appliquée et le moment où tous les contacts Travail s'établissent. Quand la commande est supprimée, les contacts Travail s'ouvrent au bout du Temps d'Ouverture et les contacts Repos se ferment. Par construction, le relais présente un isolement entre la bobine et les contacts d'un niveau conforme au besoin de sécurité ferroviaire et électrique. De plus, le relais monostable N.S1 dispose de *guidages* qui lient ensemble les contacts Travail et Repos d'une même rangée : il appartient aussi à la catégorie des relais à *contacts guidés liés non chevauchant*. Le dernier aspect « non chevauchant » se caractérise par le fait que si les contacts Travail sont fermés alors le relais garantit l'ouverture de tous les contacts Repos de la même rangée.

L'atout principal de la technologie des relais N.S1 est la conception dite de « sécurité intrinsèque », où toute panne de relais l'entraîne dans l'état de repli (ou de sécurité) défini et maîtrisé. Plus précisément, le relais monostable garantit :

- L'absence de chevauchement de contacts Travail et Repos,
- L'absence de collage de contacts Travail,
- L'ouverture de contacts Travail en l'absence de commande par effet de gravité.

Par construction, l'effet de gravité implique obligatoirement l'ouverture du relais en l'absence de commande : c'est pourquoi les relais monostable N.S1 sont aussi appelés relais à gravité.

Depuis leur création, les relais N.S1 sont considérés comme des organes autonomes : une fois installés, ceux-ci ne nécessitent que peu ou pas de surveillance ni d'inspection régulière. A la RATP, les installations de relais (les fameux « postes de signalisation ») se trouvent majoritairement dans les locaux techniques de signalisation souterrains, dont la particularité est la faible variation de température ambiante, un taux d'humidité important et la présence d'hydrogène sulfuré (H₂S). Ces deux dernières conditions environnementales peuvent être délétères pour les matériels électroniques et électrotechniques. Depuis l'introduction des relais N.S1 dans les systèmes d'enclenchements, l'interface technique a énormément évolué avec de nouveaux matériels en campagne (appareils de voie, circuits de voie, feux de signalisation) et surtout avec l'arrivée des Pilotes automatiques et systèmes d'aide à la conduite à la RATP (PA135, SACEM, KCVP/KCVB, SAET ou OCTYS). Chaque technologie d'aide à la conduite apporte sa complexité et sa particularité, avec lesquelles les relais N.S1 doivent être en capacité de fonctionner. La conception des relais N.S1 n'avait pas à l'époque imaginé une telle complexité, mais la réalité du terrain les oblige à cohabiter en toute sécurité avec des systèmes plus récents. Naturellement en tant que gestionnaire d'infrastructures ferroviaires, nous nous sommes posés la question « est-il pertinent de conserver la posture considérant les relais N.S1 comme « infaillibles » et de sécurité intrinsèque absolue ? » Le bilan des incidents ferroviaires français jusqu'à maintenant est favorable à la technologie N.S1 où peu d'incident est directement dû à une panne de relais, mais existe-il des signaux faibles qui nous permettraient d'éviter le pire avant que cela ne soit trop tard ?

Pour consolider le plan d'entretien des matériels de sécurité de notre réseau, le groupe HSP a été missionné par l'Ingénierie de Maintenance RATP afin d'étudier le comportement des relais N.S1 intégrés dans ces nouveaux systèmes techniques. L'étude a comporté deux aspects : (i) étude de la conception du relais et ses mécanismes ou physiques de défaillance et (ii) réalisation d'un essai d'endurance en conditions représentatives pour observer le comportement d'usure des relais. Les résultats obtenus étaient utilisés pour alimenter une loi de Weibull afin de modéliser la fiabilité du relais. Nous sommes aussi accompagnés par les vérificateurs de relais de sécurité (groupe VAS) qui effectue la maintenance des relais N.S1 pour l'ensemble du réseau

RATP dans la réalisation des mesures de contrôle conformément à la norme NF F 70-030. Les mesures étaient réalisées sur un banc automatique dénommé « PMR18 » : il s'agit du même protocole utilisé en production par le groupe VAS afin de qualifier un relais N.S1 avant de le renvoyer sur le terrain.

Cette communication présente le travail effectué par le groupe HSP pour étudier l'usure des relais N.S1. Dans la section III, nous présentons une revue de littérature qui est constitué de la présentation en détail du relais N.S1 monostable objet de l'étude et des phénomènes physiques pendant le fonctionnement du relais. La section IV présente la réalisation du banc d'essai d'endurance, ainsi que le modèle de loi de Weibull retenue comme candidat pour l'étude statistique. Dans les sections V et VI, nous présentons les résultats obtenus, ainsi que les leçons tirées.

III. REVUE DE LITTERATURE

A. Présentation du relais N.S1 Monostable P-24-4.0.4

Le relais objet de notre étude est le N.S1-P-24-4.0.4. Cette référence est de loin la plus utilisée dans les circuits de signalisation ferroviaire à la RATP.

Il s'agit d'un relais Poste, alimenté par une tension continue 24 V nominale. Il dispose de 4 contacts Travail, 0 contact translateur et 4 contacts Repos. Dans cette communication, un contact Travail est un contact Normalement Ouvert tandis qu'un contact Repos est un contact Normalement Fermé. Au-delà de ses 3 critères de sécurité, le relais offre un isolement de 2kV entre la partie commande (bobine) et les contacts, ainsi qu'entre contacts. Toutes les caractéristiques fonctionnelles du relais sont définies dans la feuille C.1 de la norme NF F 70-030.

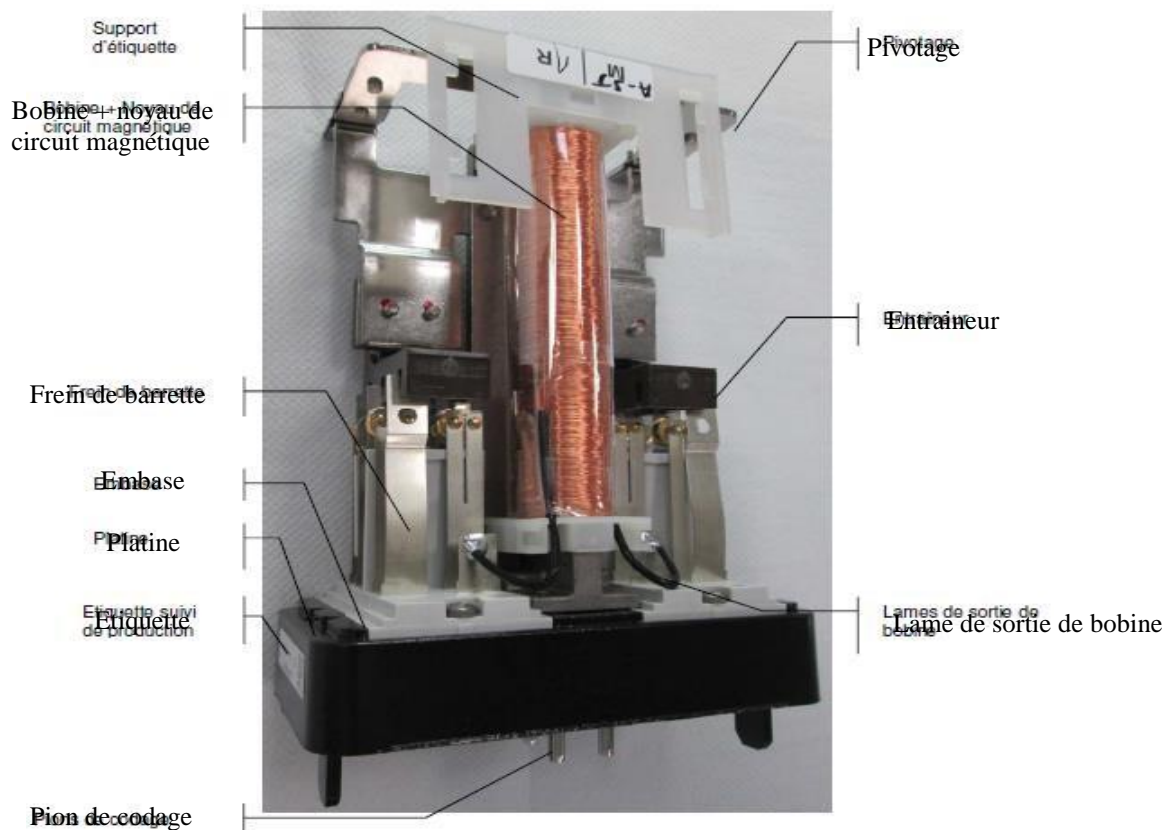


Fig. 1: Vue d'un relais N.S1-P-24-4.0.4 capot ôté

Le relais comporte :

- Une embase moulée possédant 2 ou 4 pattes d'accrochage ainsi qu'une came de verrouillage assurant la pression de contact du connecteur par abaissement du relais et la stabilisation de celui-ci.
- Un mécanisme intérieur qui se décompose en sous-ensemble simples et indépendants :
 - Un circuit magnétique fixe avec bobine et dispositif fixe d'articulation de l'équipage mobile
 - Un équipage mobile comprenant l'armature équipée du dispositif d'articulation et des barrettes d'entraînement des lames conduites
- Un ensemble de lames de contact dont l'extrémité fait saillie à l'arrière de l'embase pour constituer la partie mobile du connecteur.

- Un capot transparent qui protège le mécanisme contre la poussière tout en permettant son aération ; il est fixé par un dispositif plombable rendant impossible toute intervention incontrôlée à l'intérieur du relais.

Enfin, chaque relais comporte une étiquette d'étalonnage précisant ses caractéristiques principales propres mesurées lors de sa réception (matériel neuf) ou sa requalification (matériel réformé).

Le fonctionnement « à gravité » du peut être illustré figure suivante.

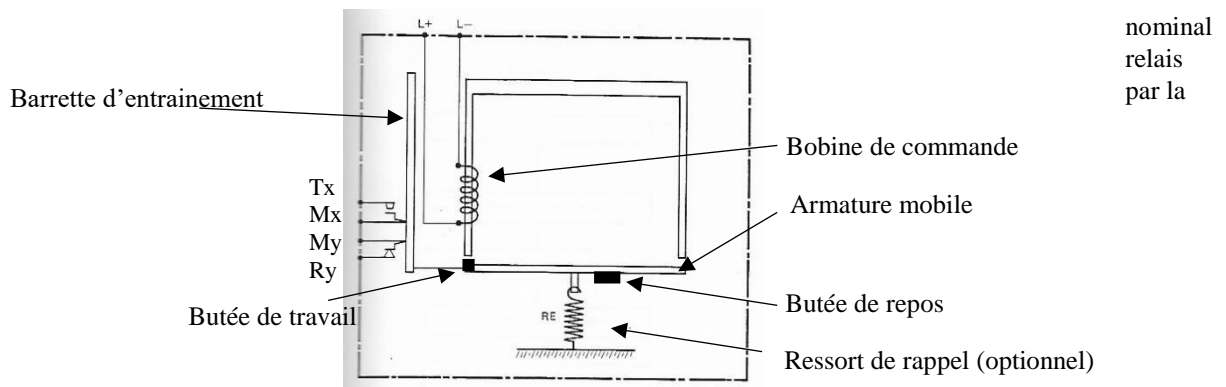


Fig. 2: Schéma fonctionnel du relais N.S1 neutre monostable

La commande est appliquée aux bornes L+/L- de la bobine. Cette dernière est excitée et devient un aimant électromagnétique. L'armature en métal se déplace verticalement ainsi que les barrettes d'entraînement (ou entraîneur) des contacts. Cette action permet :

- d'établir les contacts Travail : les pastilles Mobiles Mx se collent aux pastilles Travail Tx,
- en même temps d'ouvrir les contacts Repos : les pastilles Mobiles My se décollent des pastilles Repos Ry.

Lorsque la commande aux bornes L+/L- disparaît, la bobine entre dans la phase désexcitation. A l'aide du ressort de rappel (optionnel) et surtout de l'effet de gravité, l'armature métallique en **retombant** à sa position de repos entraîne l'ouverture des contacts Travail et la fermeture des contacts Repos. La structure est judicieusement dimensionnée pour vaincre l'effort accidentel de retenue tel que l'encochage mécanique, le gommage de la butée de travail ou éventuellement le **collage** des contacts Travail ainsi que pour rester stable face aux conditions mécaniques vibratoires liées à la circulation de trains.

Un contact (Travail ou Repos) du relais N.S1-P-24-4.0.4 est constitué de deux pastilles et des lames de contacts :

- une pastille Mobile (M) en seul bloc,
- une pastille Travail (T) ou Repos (R) fixe en double-plot,
- les pastilles sont « rivetées » sur des lames de contacts qui sont fixées sur l'embase inférieure.

La figure suivante montre le cliché des contacts Travail et Repos d'un relais N.S1-P-24-4.0.4 utilisé à la RATP.

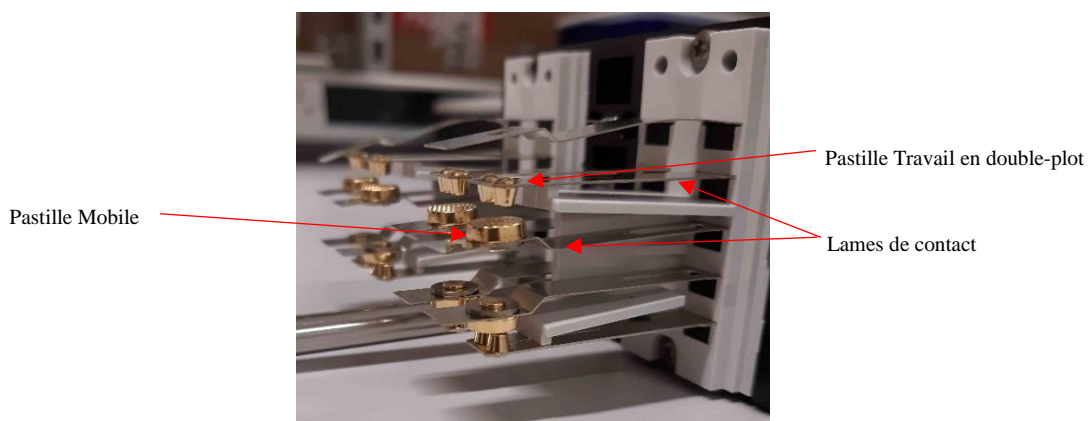


Fig. 3: Photo des contacts d'un relais N.S1-P-24-4.0.4 utilisé à la RATP

Le contact

électrique est établi lorsque les deux pastilles se touchent : ces parties se trouvent à l'intérieur de l'enceinte du relais et enveloppée par le capot transparent. Le relais est installé sur un châssis de type N.S1 dont la continuité électrique est reportée sur l'embase à l'arrière comme illustré dans la figure suivante. Le montage du relais sur un châssis est réalisé à l'aide des connecteurs intermédiaires, par exemple N.S1-PFC-12.

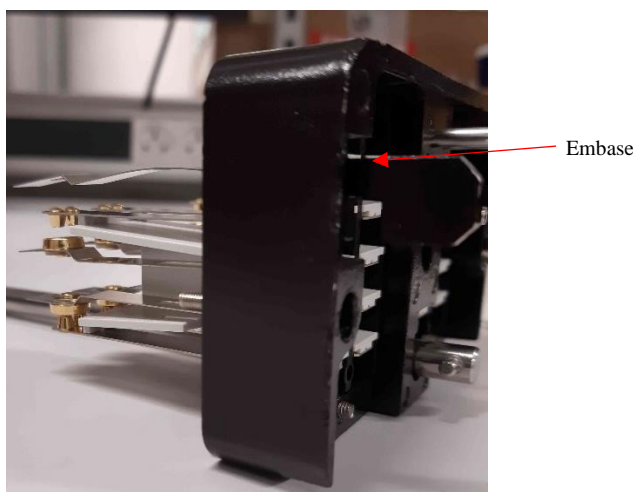


Fig. 4: Photo des contacts et l'embase d'un relais N.S1-P-24-4.0.4 utilisé à la RATP

Le matériau des deux pastilles est choisi de façon à garantir l'insoudabilité lors des fusions des métaux provoquées par des arcs

électriques, même avec de forts courants qui peuvent aller jusqu'à 1000A. Dans l'exemple du relais N.S1-P-24-4.0.4, la pastille 159 Mobile est composée principalement d'Argent (Ag) tandis que la pastille Travail fixe est composée d'un alliage AgCdO, chacune est recouverte par une mince couche d'or (Au) pour améliorer la conductivité électrique.

La résistance totale du contact à l'état neuf ne doit pas dépasser 40mΩ. Pour un contact usé, le seuil passe à 200mΩ.

B. Description du fonctionnement réel du relais

Dans la majorité des circuits de signalisation, le relais N.S1-P-24-4.0.4 fonctionne comme un interrupteur commandé. A l'arrivée de la commande par l'intermédiaire d'un **organe de commande** aux bornes L+/L- de sa bobine, le relais commute ses contacts qui établissent ensuite l'alimentation d'une **charge** en fermant la boucle d'alimentation de cette dernière. En fonction de sa conception électrique et de son alimentation, une charge peut être classée en plusieurs catégories. Le tableau suivant liste les trois types de charge retenus pour notre étude.

Tableau 1: Catégorie de charges électriques selon la norme NF EN 60947-1

Nature du courant	Catégorie	Description	Matériel concerné
Courant alternatif	AC-15	Commande de charges électromagnétiques d'électro-aimants	Transformateur de feux (de signalisation)
Courant continu	DC-13	Commande d'électro-aimants	Bobine(s) d'un relais (ou des relais)
	-	Commande des batteries de condensateur	Interface d'un système technique complexe (par ex. système de pilote automatique de train)

Le Tableau 1 est le résultat d'un travail effectué en amont avec l'ingénierie de maintenance RATP pour déterminer les situations les plus répandues sur notre réseau. On distingue alors les trois types de charge suivants :

- 1) Charge **inductive** en courant alternatif : c'est le cas des transformateurs de feux en courant alternatif VAC.
- 2) Charge **inductive** en courant continu : des bobines de relais N.S1 en courant continu 24V DC.
- 3) Charge **capacitive** (en courant continu) : c'est le cas d'une interface technique d'un système d'aide à la conduite (PA135), où un contact Travail d'un relais N.S1-P-24-4.0.4 commute sur un équivalent de charge capacitive en 24V DC.

Il est primordial de distinguer le type de charge dans l'étude puisque les phénomènes physiques sous-jacents lors de la commutation du contact conduisent à des effets différents sur l'usure des contacts du relais.

L'usure des contacts, vis-à-vis des critères qui sont décrits dans le Tableau 2 ci-dessous, commence dès les premières commutations du relais. Lorsque les deux pastilles du contact s'établissent (ou se touchent), l'effort mécanique de fermeture et d'ouverture résultant abrase et arrache déjà le revêtement de surface des pastilles. Cette dégradation est accélérée et accentuée dans le cas où un courant circule dans le contact. Le vecteur de dégradation principal est l'apparition d'un arc électrique entre deux pastilles de contact lors de la commutation d'un courant, quelle que soit la nature de ce dernier. Néanmoins, la naissance

de l'arc électrique diffère en fonction du type de charge (inductive ou capacitive) et ce avec une vitesse de dégradation différente.

Quand un contact électrique commute sur une charge inductive, on observe un arc électrique à l'**ouverture** de contact. Lorsque le contact est établi, au niveau microscopique les deux pastilles se touchent par quelques aspérités ou d'irrégularité de surface et la totalité de courant y passe. Quand le contact commence à s'ouvrir, la surface de contact se réduit tandis que le courant est encore maintenu à cause de l'effet inductif de la charge inductive. Cette dernière s'oppose la diminution de courant en créant une différence de potentiel élevée selon la formule $U = -L \frac{di}{dt}$. Pendant cet intervalle de temps infiniment petit, la résistance

de contact est fortement augmentée, ce qui provoque une dissipation de chaleur par effet Joule RI^2 jusqu'à atteindre la température de fusion des métaux composant les pastilles. Les pastilles continuent à se séparer et créent un pont de métal fondu qui s'étire jusqu'à l'instabilité et la rupture, ce qui crée un arc électrique. En parallèle, la différence de potentiel créée par l'effet inductif génère un champ électrique et accélère les particules d'air et de métaux qui se trouvent entre deux pastilles. On observe à la fois alors un plasma de métaux en fusion et de particules d'air accéléré par le champ électrique, qui finissent par la création d'un arc électrique. La rupture du pont fondu peut conduire à une érosion importante de pastilles de contact, par vaporisation et fusion avec éjection de matière.

Tous ces phénomènes se produisent dans un intervalle de temps très faible, de l'ordre de la *nanoseconde*.

Quand un contact électrique commute sur une charge capacitive, l'arc électrique est créé lors de la **fermeture** de contact. Toujours au niveau microscopique, les surfaces irrégulières de deux pastilles entrent en contact en premier et un courant d'appel circule. Son intensité est donnée par la formule $I = C \frac{dU}{dt}$. La différence de potentiel tend vers zéro, mais pendant un intervalle

infiniment petit on observe une intensité très élevée (à l'infini en théorie mais en pratique elle est plafonnée par la capacité de l'alimentation et par la résistance totale du circuit). Lors du premier contact, l'impact est plutôt de nature mécanique car le courant ne s'est pas établi. On observe ensuite des séries de *rebonds* de contact où les pastilles s'ouvrent et se ferment à une fréquence élevée. C'est alors dans cette phase que l'arc électrique est créé lorsque la tension minimale d'arc et le courant minimal d'arc sont atteints. Ce phénomène plasmique soumet les matériaux entre lesquels il s'établit à de fortes contraintes thermomécaniques, à des changements d'état violents et des décompositions. Notamment l'arc provoque le changement d'état localisé du matériau des deux pastilles de solide à liquide (fusion dans la zone des pieds de la colonne d'arc), suivi de l'impact des deux pastilles établissant le contact, réunissant alors des conditions de chaleur et de pression potentiellement suffisantes pour établir et/ou contribuer à la survenue d'un point de soudure solide.

Tous ces phénomènes se produisent dans un intervalle de temps très faible, de l'ordre de la *microseconde*.

Au premier abord, la commutation sur une charge capacitive favorise l'occurrence d'une *soudure franche* de contact : en plus des métaux en fusion, les pastilles sont maintenues collées par l'action du relais. Le phénomène *charbonnage* de contact apparaît avec tout type de charge : il relève de l'usure normale du relais tandis que la soudure ou le collage de contact est classé comme une panne franche. La figure suivante illustre l'occurrence d'un arc électrique et son effet sur les pastilles de contact.

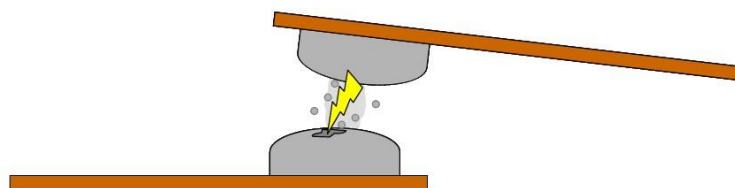


Fig. 5 : Illustration de l'occurrence d'un arc électrique lors de la commutation de contact en charge

L'ouvrage de (Slade, 2014) décrit en détail les phénomènes physiques sous-jacents des opérations de commutation de contact.

Chaque référence de relais N.S1 dispose d'une liste de critères fonctionnels et sécuritaires qui sont clairement définis dans les Fiches Annexes de la norme NF F 70-030. Ces critères sont initialement prévus pour la qualification d'un relais neuf en sortie de production, mais à la RATP ils sont également applicables pour la réforme des relais usés. Dans le tableau suivant, les critères de sanction sont résumés en catégories pour servir à la construction de notre banc d'essai.

Tableau 2: Liste de modes de défaillance retenus

Mode de défaillance ou Critère de contrôle	Description	Moyen de mesure
--	-------------	-----------------

Dérive d'une mesure de temps fonctionnel	Une des mesures de temps fonctionnel (Temps d'Attraction, Temps de Chute, Temps de transfert à l'Attraction, etc.) est hors tolérance de la norme NF F 70-030	Banc de production PMR18
Echec à l'ouverture	Courant restant dans un ou plusieurs pôles après l'opération d'ouverture normale. Assimilable à un <i>collage</i> de contact.	Banc de production PMR18

Echec à la fermeture	Absence de courant dans un ou plusieurs pôles après la durée normale de fermeture. Assimilable à un <i>charbonnage</i> de contact.	Banc de production PMR18
Défaut d'isolement	Défaut d'isolement entre deux pôles ou entre l'un des pôles et l'une des parties conductrices adjacentes, donnant lieu à la perte d'une fonction de sécurité	Banc de production PMR18
Résistance de contact	Valeur de résistance de contact. Critère non dimensionnant.	Banc de production PMR18 Banc d'endurance
Contrôle visuel	L'aspect global ne présentant aucune anomalie. Critère non dimensionnant.	Appréciation visuelle

La violation d'un de ces critères peut rendre le relais K.O. lors de la qualification : nous parlerons de panne de relais indifféremment. En cas de besoin, il sera précisé le mode de défaillance constaté.

C. Modèle statistique de durée de vie

D'un point de vue normatif et du point de vue d'un gestionnaire d'infrastructure, les relais sont censés préserver l'ensemble de leurs caractéristiques sécuritaires et fonctionnelles tout au long de leur cycle de vie. Cette posture est généralement admise et partagée pour les composants électroniques simples, comme résistance, condensateur, transistor etc. C'est la raison principale pour laquelle la fiabilité ou le taux de défaillance de ces derniers sont souvent modélisés par une loi exponentielle de taux λ constant. En pratique, cette approche est prise par les recueils de fiabilité (MIL-HDBK-217, RDF 2000, FIDES) et a donné des résultats satisfaisants dans les études de fiabilité système.

Quant aux relais électromagnétiques, y compris les N.S1, ils sont au contraire considérés comme des organes à **durée de vie limitée**. Dans le domaine des relais, cette quantité est généralement exprimée en termes de **nombre de commutations en sécurité** (qui peut être traduit en intervalle de temps si leur nombre de commutations journalier est connu). Le terme *en sécurité* doit être compris comme la garantie du fabricant de relais que les relais ne présentent pas de défauts de manière prématurée avant cette échéance, dans la mesure où le système utilisateur est correctement dimensionné.

Dans la littérature normative, par exemple la NF EN 60947-5-1 et la NF EN 61810-3 dédiées aux organes de commande à base de relais électromagnétique, la notion de durée de vie limitée est clairement indiquée. On y distingue deux catégories de durée de vie :

- Durée de vie mécanique : notion qui indique la limite absolue du relais dans sa globalité quel que soit l'usage (commutation à vide ou en charge),
- Durée de vie électrique : notion spécifiquement dédiée aux **contacts** qui commutent des charges et qui varie en fonction de conditions d'utilisation. Généralement, la durée de vie électrique est inférieure à la durée de vie mécanique. L'une des conditions d'utilisation dimensionnante de la durée de vie électrique est le type de charge commutée (résistive, inductive ou capacitive). Comme présenté au §B, chaque type de charge provoque la dégradation de contact à une vitesse et une intensité différente. Il est donc primordial, lors de la conception et de l'intégration du relais dans un système complexe, de bien identifier les charges des contacts et en déduire la durée de vie limitée en conséquence. En pratique, les fabricants de relais industriels l'ont adopté et la mentionnent systématiquement dans la fiche technique de leurs produits comme montré dans l'exemple suivant :

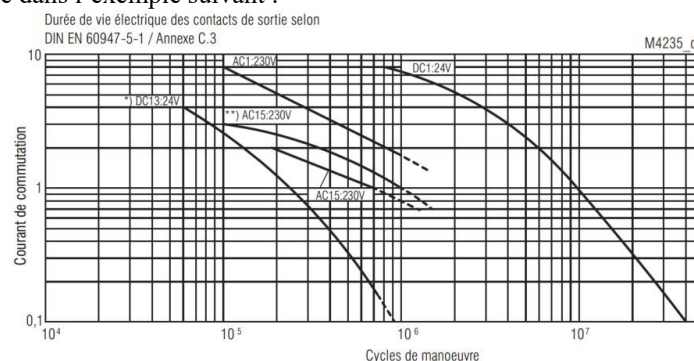


Fig. 6: Extrait de l'abaque Durée de vie des relais OA5612 (DOLD, 2024)

Dans la Fig. 6, en fonction de type de charge (par exemple AC-15, DC-13) et de conditions d'utilisation (24V, 230V, courant de commutation), la durée de vie des contacts varie. Dans cet exemple et pour les charges citées, on voit que la durée de vie

des contacts est de l'ordre du million de manœuvres. La durée de vie mécanique de l'ensemble (relais et contacts) est de l'ordre de la cinquantaine de millions de manœuvres (DOLD, 2024).

Contrairement à la littérature des relais industriels, la conception historique des relais N.S1 n'exprime pas de durée de vie électrique des contacts qui sont exploitables pour les mainteneurs de circuit de signalisation. Lors des essais de qualification (NF F 70-031), les fabricants de relais sont tenus d'effectuer des essais d'endurance dans les conditions d'essai dont la représentativité est très limitée par rapport aux conditions d'utilisation réelles. Par exemple, l'essai sur une charge inductive dont la constante de temps (L/R) est de 60ms est limitée à 200 000 manœuvres et jusqu'à 2 000 000 manœuvres pour une constante de temps de 25ms. Ces limites ne sont pas applicables ni extrapolables pour nos besoins de maintenance.

Au vu de la construction à dominante mécanique du relais, il n'est pas aisé de concevoir une loi physique pour modéliser son comportement nominal et son usure au-delà de la limite. Pour pallier cette difficulté, il est souvent fait appel à une modélisation statistique. Dans la littérature de recherche et de corps normatif (par exemple NF EN 60947-5-1), la loi de Weibull à deux paramètres est le meilleur candidat pour modéliser la fiabilité d'un relais électromagnétique. Concrètement, la loi de Weibull appliquée à la fonction de survie (fiabilité) se présente comme suit :

$$R(t) = \exp \left(- \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \right) \quad (1)$$

Nous appliquons ce modèle à l'étude du relais N.S1. Si les données d'essai le permettent, un test d'adéquation au modèle sera effectué pour confirmer le choix du modèle.

Etant un grand classique dans la littérature, nous renvoyons la présentation de la loi de Weibull appliquée aux relais électromagnétiques à des articles de norme dédiées : NF EN 61810-2 et NF EN 61649.

Dans le cas de notre relais N.S1-P-24-4.0.4, les paramètres β et η ne sont pas connus. Par ailleurs, il faut aussi calculer la fin de la période de vie utile (ou le début du remontant de la courbe en baignoire). Cette dernière est fortement intéressante puisqu'elle permet de planifier tout remplacement préventif avant que la durée de vie limitée ne soit dépassée. Ce sont ces aspects que nous avons entrepris d'étudier.

Pour résumer, l'étude de la littérature a soulevé que la loi de Weibull serait un bon candidat pour modéliser la fiabilité du relais N.S1-P-24-4.0.4. Les paramètres du modèle associé à ce relais ne sont en revanche pas connus. La loi de Weibull permet de modéliser la durée de vie limitée des contacts mais cette quantité n'est pas connue. De plus, les contacts s'usent à des vitesses différentes en fonction des charges commutées, il est indispensable de reproduire les conditions d'utilisation réelles pour obtenir une estimation cohérente.

IV. METHODOLOGIE

A. Modèle de Calculs

Nous utilisons la technique « range médian » en Annexe A de la norme NF EN 61810-2 pour estimer les paramètres du modèle Weibull. L'avantage de cette méthode est qu'elle est simple à mettre en œuvre et à transmettre à l'ingénierie de maintenance, sans dégrader la qualité des estimations pour autant. Les grandes étapes de la méthode sont rappelées de manière succincte comme suit.

Etape 1 :

Les données (i) sont classées du plus petit au plus grand nombre de cycles de fonctionnement avant défaillance (t_i). Les ranges associés sont calculés par la formule suivante :

$$y_i = F(t_i) = \frac{i - 0,3}{n + 0,4} (\%)$$

Où n est le nombre de relais soumis à l'essai Etape 2 :

Effectuer une régression linéaire pour déterminer le paramètre β pour l'équation suivante :

$$\ln(-\ln(1 - y)) = \ln(t) \beta + b$$

Etape 3 :

Calculer

$$\hat{\eta} = \exp \left(- \frac{b}{\beta} \right)$$

$$\beta$$

L'étape suivante consiste à estimer la vie utile correspondante à notre modèle Weibull. Dans la littérature, par exemple NF EN

61649 pour le calcul de Weibull et la norme NF EN 61810-2 pour l'application Weibull aux relais électromagnétiques, cet instant est considéré comme la limite inférieure de confiance du nombre de cycles auquel 10% de la population de relais aura subi une défaillance. Cette dernière est appelée B_{10} . Cette mesure fait consensus auprès des utilisateurs et fabricants des rela industriels. 321 Etape 4 :

L'estimateur du B_{10} est donné comme suit :

$$B_{10} = \frac{1}{0,9} \hat{\eta} [\ln ()]^\beta$$

Etape 5

Calculer la limite inférieure de l'intervalle de confiance $(1 - \gamma)\%$ de B_{10} avec les quantités intermédiaires suivantes.

$$h_1 = \ln(-\ln(0,9))$$

$$r$$

$$q = \frac{r}{n}$$

Où

$$r = \frac{322r_2}{(\sum_1^n t_i^2 - n(\bar{t})^2)(\sum_1^n y_i^2 - n(\bar{y})^2)} \left(\sum_1^n t_i y_i - \frac{\sum_1 t_i \sum_1 y_i}{n} \right)$$

$$A_4 = 0,49q - 0,134 + 0,622q^{-1}$$

$$A_5 = 0,2445(1,78 - q)(2,25 + q)$$

$$A_6 = 0,029 - 1,083 \ln(1,325q)$$

$$\delta_1 = \frac{-A_6 x^2 - r h_1 + x \sqrt{(A_6^2 - A_4 A_5) x^2 + r A_4 + 2 r h_1 A_6 + r A_5 h_1^2}}{r - x^2 A_5}$$

Où $x = u_\gamma$ est le fractile γ de la distribution normale centrée réduite. La limite inférieure est donnée par la formule suivante :

$$L = B_{10}(\text{limite inférieure}) = B_{10} \exp \left(- \frac{\delta_1}{\beta} + h_1 \right)$$

La grandeur L nous donnera la limite de durée de vie utile des contacts du relais pour une configuration d'utilisation précise. Tout changement dans le circuit impliquant le relais invaliderait la valeur L obtenue dans le cadre de cette étude.

B. Construction d'un banc d'essai endurance

Le banc d'essai endurance se compose de 10 relais N.S1-P-24.4.0.4 provenant d'un même fabricant et issus du même lot de production afin de limiter toute dispersion. La taille d'échantillon était limitée à 10 relais pour que le montage ne devienne trop conséquent sans dégrader fortement la qualité des estimations.

Les trois types de charge sont réalisés comme suit :

□ Charge capacitive à courant continu : la charge est réalisée par un condensateur de 2,2μF et alimentée par la même source 24 VDC. Ce montage représente le cas où un contact Travail du relais N.S1-P-24-4.0.4 est en interface avec un système Pilote automatique. Il est à noter qu'une résistance est ajoutée au condensateur pour décharger ce dernier entre deux commutations. Les charges capacitatives sont branchées sur le contact Travail T1 des relais en test.

□ Charge inductive à courant alternatif : il s'agit des 10 transformateurs de feux (de signalisation), alimentés par une source 127 VAC. Ce montage représente le cas où un contact Travail du relais N.S1-P-24-4.0.4 commande la boucle d'alimentation d'un transformateur de feux. Ces charges sont branchées sur le contact Travail T3 des relais en test.

□ Charge inductive à courant continu : la charge est réalisée par une double-bobine des relais N.S1-P-24-4.0.4 et alimentée par la source 24 VDC représentative de la source utilisée en local technique de signalisation. Ce montage représente le cas où un contact Travail du relais N.S1-P-24-4.0.4 commande deux autres relais N.S1-P-24-4.0.4. Ces charges sont branchées sur le contact Travail T5 des relais en test.

Le contact Travail T7 et les 4 contacts Repos des relais en test ne sont pas branchés et commutent à vide. Les relais en test sont commutés par une alimentation programmable pilotée par le PC. Les contacts Travail en charge (T1, T3 et T5) sont branchés à un multiplexeur dont la sortie est acheminée à un multimètre numérique pour la mesure de résistance de contact.

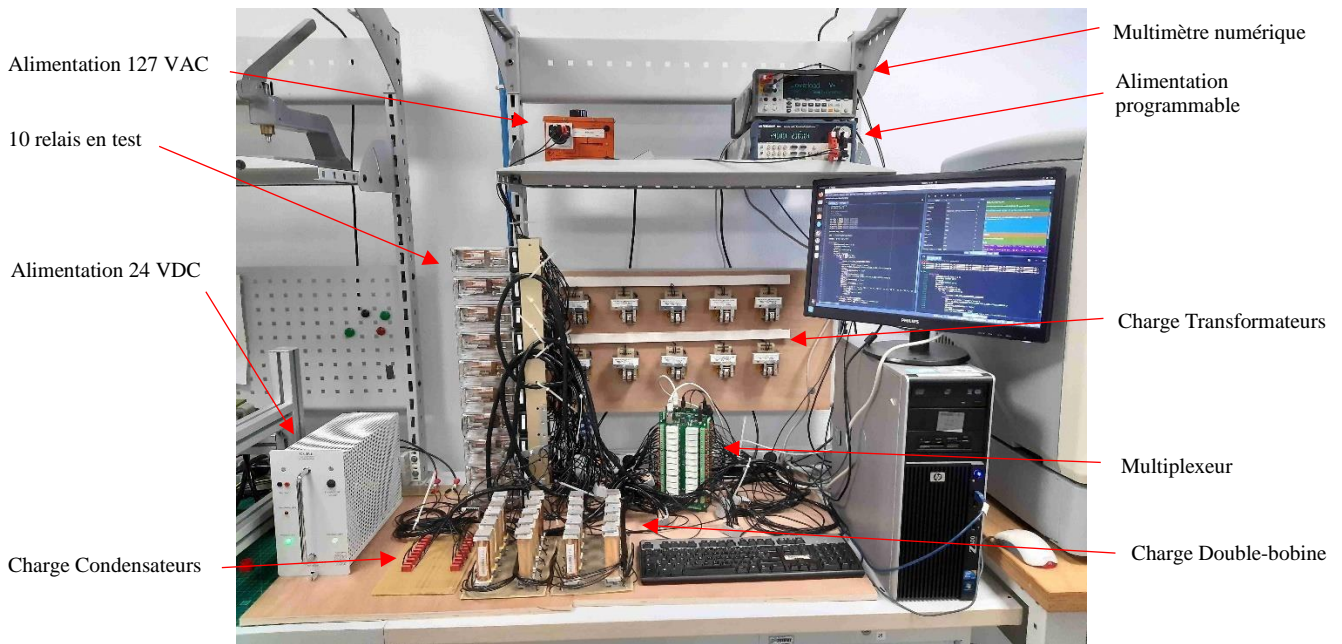


Fig. 7: Banc d'essai endurance RATP

Pour rester conforme à la limite mécanique du relais lors de sa qualification (cf. NF F 70-031), les 10 relais sont commutés à la fréquence de 0,5Hz (ou 1 commutation on/off toutes les 2 secondes). En réalité, les relais dans les postes de signalisation commutent une fois toutes les 90s au maximum : c'est le plus petit intervalle entre deux rames exploitées actuellement par la RATP. Nous considérons cependant que les relais fonctionnent dans leur zone de spécification : il n'y a pas de mécanisme « d'accélération » qui entre en jeu. Les relais sont commutés 21 heures par jour et ne sont pas commandés pendant les 3 heures restantes. Ce rythme reflète aussi le fonctionnement habituel d'un poste de signalisation.

La résistance des contacts est mesurée toutes les 50 000 commutations à l'aide du multiplexeur et du multimètre. Cette mesure a pour l'objectif de surveiller l'évolution de la résistance de contact ; un changement brusque dans la tendance observée présagerait une dégradation avérée du contact. En aucun cas il s'agit de la mesure officielle calibrée permettant de sanctionner un relais.

La vérification officielle de toutes les caractéristiques sécuritaires et fonctionnelles des relais, ainsi que de tous les modes de défaillance du Tableau 2 est réalisée par pas de million de commutations sur le banc PMR18. Aucun défaut entre deux vérifications ne peut être détecté. L'essai était terminé lorsque les relais avaient fait chacun 4,5 millions de commutations. Ce seuil correspond à la durée de vie moyenne de 30 ans d'un poste de signalisation (à raison de 400 commutations par jour), avant d'être renouvelé (hormis les opérations de maintenance corrective sur panne). C'est l'objectif convenu avec notre ingénierie de maintenance.

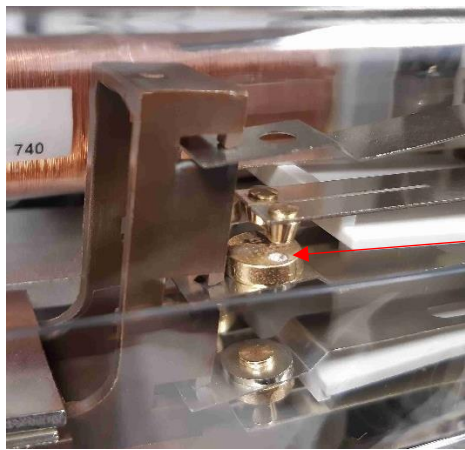
Le programme est écrit en Python à l'aide de la bibliothèque PyVISA permettant de communiquer avec les appareils de laboratoire (alimentation, multimètre, multiplexeur). Il est disponible sur demande aux auteurs.

V. RESULTATS

L'essai endurance a duré 10 mois : de février 2023 au fin novembre 2023. Il y a eu au total 5 séances de vérification sur le banc PMR18 : une vérification avant le début de l'essai, puis 4 vérifications à 1 030 000, 2 400 000, 3 500 000 et à 4 500 000 de manœuvres. Chaque relais a réalisé ainsi 4,5 millions de manœuvres prévus.

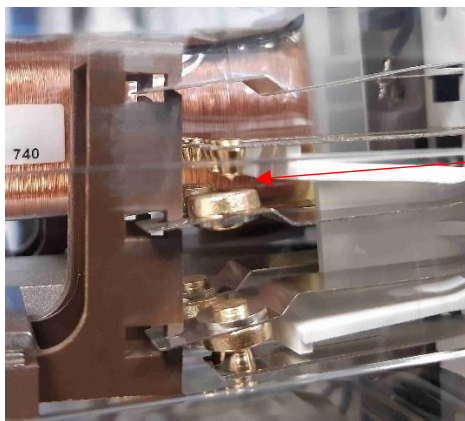
Toutes les mesures lors des vérifications n'ont relevé aucune anomalie sur les indicateurs de performance. Les mesures de résistance de contact sont d'une part dans la tolérance définie (200mΩ max.) et d'autre part ne dégagent pas non plus une tendance permettant de discriminer

Malgré les mesures conformes, on observe dès le 1er million de manœuvres que le dégât à cause de la commutation, surtout sur la charge capacitive (contact T1), est déjà très présent comme le montrent les Fig. 8 et Fig. 9. Dans ces clichés, on constate la création d'un « cratère » et son pendant d'un « cône » à cause du phénomène d'arc électrique et de transfert de matière, prédits par l'étude théorique au §III.B. Les clichés ont été pris à 1 million de manœuvres mais ces artefacts ont certainement apparu bien avant cette date.



« Cratère » causé par le transfert de matière lors de la fermeture

Fig. 8 : Photo du contact T1 en charge capacitive à 1 million de manœuvres (1/2)



« Cône » causé par le transfert de matière lors de la fermeture

Fig. 9 : Photo du contact T1 en charge capacitive à 1 million de manœuvres (2/2)

Au fur et à mesure des commutations, ces « artefacts » sont de plus en plus marqués (cratère plus profond, cône plus volumineux) ; sans pour autant influencer les mesures de performance. Il est important de noter que ce défaut ne serait pas conforme au contrôle visuel.

On constate également l'apparition de ces artefacts sur les contacts commutant la charge inductive, mais à une vitesse moindre et à un degré de dégradation plusieurs fois moins importante.

VI. DISCUSSIONS ET CONCLUSIONS

A. Discussions

A la lumière des résultats d'essai récoltés, tous les relais sont restés conformes jusqu'à la fin de l'expérience à 4,5 millions de manœuvres. Cette limite est fixée en adéquation avec la cadence des relais dans la majorité de postes de signalisation à la RATP, à savoir 400 passages de train (entraînant 400 commutations) par jour pour un objectif de 30 ans de durée de vie. Il faut noter que l'anomalie de la résistance de contact (mesure entre $200\text{m}\Omega$ et 2Ω) n'a absolument aucun impact : c'est pourquoi les relais concernés n'ont pas été sortis de l'expérience. En effet, la majorité de circuits fonctionnent à 24 VDC ou 127 VAC sur une impédance d'une centaine de Ω , le dépassement de la résistance de contact est totalement transparent dans le circuit de signalisation. Les résultats ne nous ont pas permis d'alimenter notre modèle statistique de durée de vie, faute de donnée.

Cette absence de donnée présente cependant beaucoup de renseignement positif. En reproduisant les circuits réels dans lesquels les relais sont utilisés et n'ayant appliqué aucun facteur d'accélération, les relais se montrent conformes jusqu'à la fin de l'expérience, ce qui veut dire que statistiquement parlant les relais sur le terrain depuis moins de 30 ans le seront également. Cela étant dit, lorsque les relais (surtout les contacts commutant des charges capacitatives) sont inspectés par nos vérificateurs, ils seraient déclarés « à réformer » à cause de l'aspect inhabituel et douteux des pastilles. Le risque d'un accrochage mécanique de deux pastilles, qui est assimilé à une soudure électrique, ne peut en effet pas être écarté.

A ce stade, de tels constats sont déjà suffisant pour nous afin d'émettre des préconisations quant à la maintenance des relais N.S1 actuellement en service :

- Les interfaces entre équipements analogiques (transformateurs de feux, relais, moteurs, etc.) et relais N.S1 sont robustes et ne nécessitent pas a priori de maintenance préventive.
- Les interfaces techniques électroniques avec les systèmes d'aide à la conduite (PA135, SAET ou OCTYS) nécessitent une attention particulière : il faut au préalable déterminer précisément le type de matériel est en interface avec des relais N.S1 pour en déduire la stratégie de maintenance à mettre en place. Dans le jargon technique, on parle de l'étude d'interface où l'ingénieur sécurité étudie la compatibilité technique entre deux sous-systèmes techniques.
- Renforcer la traçabilité des relais N.S1 installés sur le réseau, notamment ceux qui sont passés à l'atelier VAS et retournés au terrain : le suivi du nombre de commutations accumulées est encore aujourd'hui difficile.

L'objectif premier de l'expérience étant atteint, nous poursuivons l'essai endurance jusqu'à l'observation des pannes de tous les relais pour constituer nos données. La modalité de mesure évolue. Il n'y a plus de vérification au banc PMR18 tous les millions de commutations ; c'est le suivi par mesure au multimètre qui déclenchera un alerte de défaut de relais. L'expérience se poursuit et le résultat fera l'objet d'une communication future.

B. Conclusion

Dans cette communication, nous présentons brièvement la technologie de relais N.S1 utilisée actuellement dans les systèmes d'enclenchement électrique à la RATP. L'étude est axée sur la référence N.S1-P-24-4.04 qui est de loin la plus utilisée dans les postes de signalisation. Nous discutons des types de charge (résistive, inductive et capacitive) commutés par le relais et les phénomènes physiques d'usure engendrés par chacun. A l'aide des formules de loi de Weibull et d'un banc d'essai endurance spécifiquement conçu, nous cherchons à obtenir les données de panne permettant de caractériser la limite de durée de vie utile de cette référence de relais.

L'expérience n'a malheureusement pas permis d'estimer la limite de durée de vie utile avant que son terme ne fût atteint. Malgré cela, cette expérience nous a conforté sur la robustesse des relais N.S1 vis-à-vis de la configuration d'essai qui est proche des conditions d'exploitation, et a aussi confirmé notre retour d'expérience sur cette technologie. Il nous a été aussi possible de formuler de nouvelles préconisations auprès de nos mainteneurs de signalisation quant à la construction d'une stratégie de maintenance préventive adaptée à chaque situation. L'expérience se poursuit jusqu'à ce que les relais présentent des signes d'usure.

Cette étude est actuellement suivie par le Comité technique de Signalisation de RATP Infrastructures ; sa conclusion constituerait une donnée d'entrée au chantier d'optimisation de la maintenance d'infrastructure signalisation.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier l'équipe VAS (Philippe NEDELEC, Laurent FOSSARD et Frédéric PETIT) pour leur aide lors des vérifications des relais N.S1 sur le banc production PMR18 et d'avoir mis à disposition des équipements nécessaire à la réalisation de l'étude. Nous remercions également Franck LONGO, ancien responsable de CT-IMS, pour avoir financé l'acquisition des matériels.

REFERENCES

- DOLD. *Relais de sécurité OA 5612*. Consulté le 22 février 2024, de <https://www.dold.com/fr/produits/relais-pourcircuits-imprimés/relais-de-securite-avec-contacts-guides/oa-5612?c=40>
- NF F 70-030 (2004). *Relais électromagnétiques de sécurité – Règles de conception et de construction*. Association française de normalisation.
- NF F 70-031 (1995). *Relais électromécaniques de sécurité – Procédure d'homologation et essais de type*. Association française de normalisation.
- NF F 70-032 (1997). *Relais électromécaniques de sécurité – Classification et essais de série*. Association française de normalisation.
- NF EN 60947-1 (2007). *Appareillage à basse tension - Partie 1 : règles générales*. Association française de normalisation.
- NF EN 60947-5-1 (2017). *Appareillage à basse tension - Partie 5-1 : appareils et éléments de commutation pour circuits de commande - Appareils électromécaniques pour circuits de commande*. Association française de normalisation.
- NF EN 61810-3 (2015). *Relais électromécaniques élémentaires - Partie 3 : relais à contacts guidés (liés mécaniquement)*. Association française de normalisation.
- NF EN 61810-2 (2017). *Relais électromécaniques élémentaires - Partie 2 : fiabilité*. Association française de normalisation.

- NF EN 61649 (2008). *Analyse de Weibull*. Association française de normalisation.
- Slade, P.G. (2014). *Electrical contacts – Principles and applications* (Second Edition). Taylor & Francis Group.