



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Swiss Confederation

Schweizerische Sicherheitsuntersuchungsstelle SUST
Service suisse d'enquête de sécurité SESE
Servizio d'inchiesta svizzero sulla sicurezza SISI
Swiss Transportation Safety Investigation Board STSB

Rapport final

du Service suisse d'enquête

de sécurité SESE

sur l'incendie d'un nouveau trolley-
bus électrique et à batteries

du 12 décembre 2021

à Givisiez (FR)

N° reg. 2021121201

Remarques générales sur le présent rapport

Le présent rapport a été exclusivement établi dans le but de prévenir les accidents et les incidents graves survenant lors de l'exploitation de chemins de fer, d'installations de transport à câble et de bateaux. Selon l'article 15 de la loi fédérale sur les chemins de fer du 20 décembre 1957 (LCdF), état le 1^{er} janvier 2022 (RS 742.101), l'appréciation juridique des circonstances et des causes ne fait pas l'objet de la présente enquête.

Ce rapport ne vise donc nullement à établir des responsabilités ni à élucider des questions de responsabilité civile.

Dans ce présent rapport, toutes les désignations de personnes sont faites à la forme masculine et elles se rapportent à la personne exerçant la fonction, sans distinction de sexe.

Table des matières

Résumé.....	5
Aperçu.....	5
Enquête.....	5
Présentation succincte	5
Cause.....	6
Recommandations et avis de sécurité	6
Glossaire	7
1 Faits établis	8
1.1 Lieu de l'événement.....	8
1.2 Situation avant l'événement.....	8
1.3 Déroulement de l'événement.....	8
1.4 Dommages	9
1.4.1 Personne	9
1.4.2 Infrastructure	9
1.4.3 Véhicule.....	9
1.5 Entreprises concernées	9
1.5.1 Propriétaire du bâtiment	9
1.5.2 Entreprise de transport.....	10
1.5.3 Propriétaire du véhicule.....	10
1.5.4 Constructeur du véhicule.....	10
1.6 Infrastructure.....	10
1.6.1 Description.....	10
1.6.2 Constatations.....	10
1.7 Véhicule	10
1.7.1 Description succincte des circuits électriques	10
1.7.2 Partie électrique.....	11
1.8 Evaluation de l'enregistrement des données	12
1.8.1 Données enregistrées par les différents systèmes.....	12
1.8.2 Chargeur des batteries de traction 600 V.....	12
1.8.3 Température à l'intérieur de l'habitacle	12
1.8.4 Routeur.....	12
1.8.5 Chargeur du réseau de bord 24 V.....	12
1.8.6 Relevé kilométrique	12
1.8.7 Vidéosurveillance	12
1.9 Examens particuliers	12
1.9.1 Câbles	12
1.9.2 Système de gestion de la maintenance.....	13

1.9.3	Contrôle comparatif du câblage sur d'autres trolleybus	13
1.9.4	Expertise externe.....	14
1.10	Règlementation - Normes.....	18
1.10.1	Cahier des charges	18
2	Analyse	19
2.1	Aspects techniques.....	19
2.1.1	Étanchéité – infiltration d'eau	19
2.1.2	Protection des arêtes vives	19
2.1.3	Circuits de traction 600 V et alimentation 230 V.....	19
2.1.4	Circuit du réseau des batteries 24 V – Conclusion de l'expertise incendie	19
2.1.5	Isolation du circuit du réseau des batteries 24 V par rapport au châssis	20
2.2	Aspects normatifs	20
3	Conclusions	21
3.1	Faits établis.....	21
3.1.1	Aspects techniques	21
3.1.2	Aspects normatifs.....	21
3.2	Cause	22
4	Recommandations de sécurité, avis concernant la sécurité et mesures prises après l'incendie	23
4.1	Recommandation de sécurité	23
4.2	Avis de sécurité	23
4.2.1	Câblage électrique.....	23
4.3	Mesures prises après l'incendie	24

Résumé

Aperçu

Moyen transport Bus

Entreprises impliquées

Entreprise de transport	Transports publics fribourgeois (tpf) SA, Givisiez
Propriétaire du bâtiment	Transports publics fribourgeois (tpf) SA, Givisiez
Constructeur du véhicule	Hess AG, Bellach

Véhicule impliqué Trolleybus N° 10 Détenteur tpf

Lieu Givisiez (FR)

Date et heure 12 décembre 2021, vers 19h25

Enquête

Le 12 décembre 2021 vers 22 heures, le bureau d'enquête du Service suisse d'enquête de sécurité (SESE) a été averti qu'un incendie s'était déclaré sur un trolleybus à Givisiez. Une enquête a été ouverte.

L'enquête se base sur les éléments et les documents suivants :

- Les constatations faites sur le lieu de l'évènement ;
- Photos ;
- Expertise incendie ;
- Vidéosurveillance ;
- Données enregistrées sur le véhicule ;
- Cahiers des charges ;
- Schémas électriques ;
- Extraits du système de gestion de la maintenance GMAO de l'entreprise.

Présentation succincte

Le dimanche 12 décembre 2021, vers 19h25, un incendie s'est déclaré sur le trolleybus N° 10 stationné dans la halle de garage des véhicules tpf à Givisiez. A ce moment-là, il était raccordé aux réseaux d'alimentation par l'intermédiaire de deux systèmes de charge des batteries 600 V et 24 V. Les dégâts au véhicule sont importants. Le bâtiment a également subi des dommages. Personne n'a été blessé.

Cause

L'incendie du trolleybus N° 10 a été causé par un dysfonctionnement électrique survenu sur le circuit des batteries 24 V, sur l'un des récepteurs ou sur l'une des alimentations sous tension situés au niveau du poste de conduite.

Ont pu contribuer à l'incendie :

- La non-isolation du pôle négatif du réseau des batteries 24 V par rapport au châssis du véhicule.
- La non-protection des arêtes vives de divers éléments métalliques sur lesquels cheminent des câbles électriques.
- La non-aptitude de certains câbles des circuits auxiliaires à limiter la propagation de la flamme.

Recommandations et avis de sécurité

Ce rapport contient un avis de sécurité.

Glossaire

CEE-ONU	Commission économique pour l'Europe des Nations unies
DE-OCF	Dispositions d'exécution de l'ordonnance sur les chemins de fer du 15 décembre 1983, Etat le 1 ^{er} novembre 2020 (RS 742.141.11)
ESC	Ecole sciences criminelles, Lausanne
GMAO	Gestion de la maintenance assistée par ordinateur
OCF	Ordonnance sur la construction et l'exploitation des chemins de fer (Ordonnance sur les chemins de fer) du 23 novembre 1983, Etat le 1 ^{er} novembre 2020 (RS 742.141.1)
tpf	Transports publics fribourgeois

Désignations

230 V AC	Réseau de distribution 230 V / 50 Hz
600 V DC	Réseau des batteries de traction
24 V DC	Réseau de bord

1 Faits établis

1.1 Lieu de l'événement

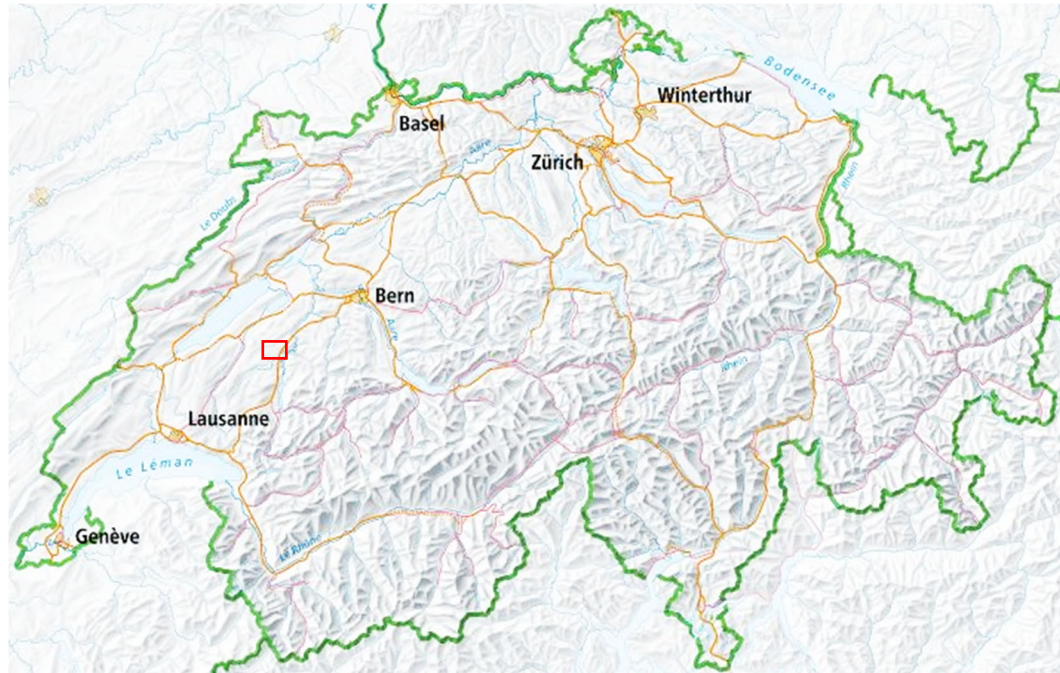


Illustration 1 : Carte synoptique (Source de la carte : Office fédéral de topographie).

1.2 Situation avant l'événement

Le trolleybus N° 10 a été retiré du service le samedi 11 décembre 2021 suite à une avarie du frotteur d'une des perches de la ligne de contact. Il a été stationné à l'extérieur du centre de maintenance tpf de Givisiez.

Le dimanche 12 décembre 2021, dans l'après-midi, un technicien a procédé en atelier à la réparation de la pièce défectueuse. Ensuite, vers 15h30, le trolleybus a été déplacé et garé au dépôt où, après avoir été déclenché, les chargeurs des batteries de traction 600 V ainsi que des batteries du réseau de bord 24 V ont été raccordés.

1.3 Déroulement de l'événement

Vers 19h23, une tierce personne a remarqué un dégagement de fumée qui s'échappait par la porte du garage des bus tpf. Elle s'est rendue à la réception du centre de maintenance tpf pour annoncer l'incident. Deux collaborateurs tpf sont sortis du centre de maintenance et ont vu des lueurs dans le dépôt des bus situé en face. Ils ont demandé l'intervention des secours. Ils se sont rendus au dépôt et ont tenté d'éteindre, à l'aide d'extincteurs, l'incendie qui se propageait sur la partie avant du trolleybus, mais le feu ayant pris de l'ampleur, ils n'ont pas réussi à circonscrire le sinistre. Les pompiers ont ensuite maîtrisé le sinistre. La partie avant du trolleybus a été complètement détruite par l'incendie. Le bâtiment a également subi des dégâts. Personne n'a été blessé.



Illustration 2 : Trolleybus N° 10 en feu dans le dépôt (Source : Police Cantonale Fribourgeoise).



Illustration 3 : Vue de la face frontale du trolleybus N° 10.



Illustration 4 : Vue intérieur du trolleybus N° 10.

1.4 Dommages

1.4.1 Personne

Personne n'a été blessé.

1.4.2 Infrastructure

Dégâts au bâtiment ainsi qu'à la porte du garage.

1.4.3 Véhicule

Le trolleybus a été fortement endommagé.

1.5 Entreprises concernées

1.5.1 Propriétaire du bâtiment

Transports publics fribourgeois (tpf) SA, Givisiez

1.5.2 **Entreprise de transport**

Transports publics fribourgeois (tpf) SA, Givisiez

1.5.3 **Propriétaire du véhicule**

Transports publics fribourgeois (tpf) SA, Givisiez

1.5.4 **Constructeur du véhicule**

Hess AG, Bellach

1.6 **Infrastructure**

1.6.1 **Description**

Lorsque les trolleybus sont stationnés au dépôt, les batteries de traction 600 V et les batteries du réseau de bord 24 V nécessitent une recharge.

Le chargeur 600 V des batteries de traction est installé de manière fixe au niveau du bâtiment. Un câble mobile muni d'un connecteur du type « Harting » relie le chargeur au véhicule. Le connecteur fixe est installé sur le côté droit du véhicule.

Le chargeur 230 V / 24 V des batteries du réseau de bord est installé à l'intérieur du véhicule. Un câble 230 V, sur enrouleur, assure l'alimentation depuis le bâtiment par l'intermédiaire d'une prise d'appareil 230 V montée sur la partie inférieure droite du tableau de bord du véhicule (annexe 1, illustration 13). Le câble d'alimentation passe par la porte d'accès avant, qui reste ouverte, lorsque le chargeur est branché.

1.6.2 **Constatations**

Les deux alimentations provenant du bâtiment ont été contrôlées.

- Le disjoncteur de protection du chargeur des batteries de traction 600 V ne s'est pas déclenché.
- Le disjoncteur d'alimentation 13 A du chargeur 230 V / 24 V, combiné à disjoncteur à courant différentiel de 30 mA, a été déclenché par la protection du courant différentiel.

1.7 **Véhicule**

1.7.1 **Description succincte des circuits électriques**

En 2020, les transports publics fribourgeois ont fait l'acquisition de 10 trolleybus du type Hess LighTram BGT N2D DC (illustration 5). Ces véhicules sont mus uniquement par l'intermédiaire de 2 moteurs électriques alimentés par la ligne de contact 600 V par l'intermédiaire d'un onduleur. En sus, ces trolleybus sont équipés en toiture de batteries de traction 600 V permettant une exploitation sur les secteurs sans lignes de contact, ainsi que rallier l'atelier de maintenance. Lorsque le trolleybus circule sous la ligne de contact, les batteries de traction et les batteries du réseau de bord 24 V se rechargent.

Un système de recharge externe pour les batteries de traction 600 V est également disponible dans les dépôts lorsque le véhicule n'est pas sous la ligne de contact.

Une batterie 24 V alimente le réseau de bord. Lorsque le véhicule est stationné au dépôt, un chargeur 230 V / 24 V installé à bord du véhicule permet de maintenir la

charge des batteries (annexe 1, illustration 13). Un relais déclenche le chargeur 24 V lorsque la charge des batteries du réseau de bord est assurée par le réseau 600 V.

Le pôle négatif (-) du réseau de bord 24 V est relié à la masse du véhicule.



Illustration 5 : Vue d'un trolleybus Hess LighTram BGT N2D DC (Source : tpf).

1.7.2 Partie électrique

1.7.2.1 Constatations

1.7.2.1.1 Circuits traction 600 V

L'onduleur et les batteries de traction sont installés sur le toit du véhicule.

Le câble d'alimentation provenant du chargeur 600 V était en ordre. Le câblage des circuits 600 V entre le connecteur du type « Harting » et les appareils sur le toit était en ordre. Il n'a pas été endommagé par l'incendie.

1.7.2.1.2 Câblage du réseau de bord 24 V

Le fusible F1 (250 A) situé dans la boîte à fusibles installée à côté du chargeur 230 V / 24 V (illustration 6) a fondu. Ce fusible protège le câble 24 V, d'une section 95 mm², qui alimente le tableau électrique situé dans l'armoire au dos du chauffeur (annexe 1, illustration 13).

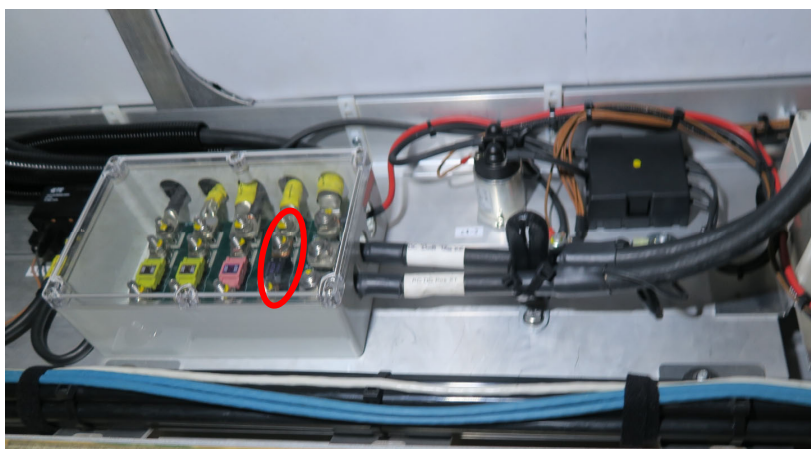


Illustration 6 : Boîte à fusibles 24 V avec le fusible F1 (cercle rouge) fondu. Image prise sur un autre trolleybus.

1.8 Evaluation de l'enregistrement des données

1.8.1 Données enregistrées par les différents systèmes

Certaines informations enregistrées à bord du trolleybus sont transmises de manière régulière par l'intermédiaire d'un routeur et enregistrées chez le fournisseur du véhicule. Les enregistrements ont été remis au SESE par le fournisseur.

1.8.2 Chargeur des batteries de traction 600 V

La charge des batteries de traction 600 V s'est interrompue automatiquement à 16h47, une fois ces dernières complètement chargées. Depuis cet instant, plus aucun courant n'a circulé entre le chargeur et le véhicule.

1.8.3 Température à l'intérieur de l'habitacle

Jusqu'à 19:27:04, la température à l'intérieur de l'habitacle était de 11 °C. A 19:29:04, le dernier enregistrement disponible révèle une température de 45 °C.

1.8.4 Routeur

Le routeur, qui est situé au-dessus de l'armoire électrique et qui sert à la transmission des données informatiques du véhicule vers un serveur, annonce une température interne à l'appareil constante de 28 °C. A partir de 19h21, la température s'élève graduellement pour atteindre, lors du dernier relevé disponible à 19:28:24, 83 °C.

1.8.5 Chargeur du réseau de bord 24 V

Le chargeur du réseau de bord 24 V est équipé d'un diagnostic interne qui enregistre les 200 derniers cycles de charge. Bien que le chargeur a été soumis à la chaleur, les données du diagnostic interne ont pu être extraites.

Seule une petite partie des données des 200 derniers cycles de charge ont pu être récupérées. Les données ne sont pas horodatées et de par cela inexploitable pour l'enquête.

1.8.6 Relevé kilométrique

Depuis sa mise en service en 2020, le trolleybus N° 10 a parcouru 62 000 km.

1.8.7 Vidéosurveillance

Le véhicule est équipé de la vidéosurveillance. Quinze minutes après le stationnement, l'enregistrement se déclenche automatiquement. De ce fait, aucune image du départ de l'incendie n'est disponible.

1.9 Examens particuliers

1.9.1 Câbles

1.9.1.1 Circuits de traction 600 V

Les câbles installés pour l'alimentation des circuits de traction 600 V sont conformes à la norme EN 45545-1, Applications ferroviaires – Protection contre les incendies dans les véhicules.

Les câbles conformes à cette norme sont ignifuges et ont l'aptitude à limiter la propagation de la flamme.

1.9.1.2 Circuits du réseau de bord 24 V et câblage des divers appareils auxiliaires

Par contre, les divers câbles des circuits du réseau 24 V ainsi que des circuits auxiliaires, par exemple ceux de la vidéosurveillance, sont des câbles standard de type industriel dont les exigences de performance de réaction au feu diffèrent des câbles installés pour les circuits de traction 600 V.

1.9.2 Système de gestion de la maintenance

L'analyse des données du système de gestion de la maintenance (GMAO) a démontré les éléments suivants :

- Des infiltrations d'eau par la grille de ventilation située au-dessus du conducteur, soit dans la partie supérieure de l'armoire électrique située au dos du siège conducteur, ont été signalées à 3 reprises.
- La dernière infiltration d'eau a été signalée le 21 octobre 2021.

Pour pallier à ce problème, le pourtour de la grille d'aspiration située sur le toit du véhicule a été ré-étanché avec du silicone.

1.9.3 Contrôle comparatif du câblage sur d'autres trolleybus

Le SESE a procédé, où cela était accessible, à un contrôle comparatif du cheminement du câblage des trolleybus N° 6 et 9.

Le contrôle a démontré qu'à plusieurs endroits, des câbles 24 V frottaient sur des arêtes vives de divers profils métalliques (illustration 7). Aucune protection contre le frottement n'y était installée.



Illustration 7 : Trolleybus N° 6. Un câble 24 V (95 mm²) frottait sur le champ d'une pièce équerre métallique (flèche rouge). Aucune protection contre les arêtes vives n'était installée.

Sur le trolleybus N° 9, près du tableau situé derrière le conducteur, l'enveloppe extérieure des câbles (illustration 8) était abîmée consécutivement au frottement contre un support métallique. Ce véhicule n'était en service que depuis une année.



Illustration 8 : Trolleybus N° 9. Câbles endommagés près du tableau électrique situé derrière le siège conducteur.

1.9.4 Expertise externe

Un mandat a été donné par le SESE à l'ESC afin de déterminer l'origine et la cause de l'incendie.

Ci-dessous ne sont retranscrits que les éléments importants de l'expertise, soit :

1.9.4.1 Intervention humaine

Cette cause a été écartée.

1.9.4.2 Localisation de l'origine de l'incendie

L'examen des traces de calcination et de la répartition des dégâts a permis de localiser l'origine de l'incendie au niveau du poste de conduite (illustration 9) du trolleybus N° 10, dans une zone comprenant la partie avant du tableau électrique, le siège du chauffeur et le caisson latéral situé au-dessus de ce dernier.

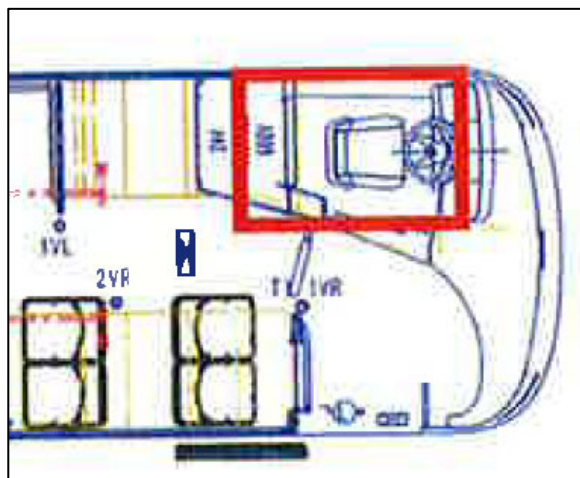


Illustration 9 : Partie avant du trolleybus. Rectangle rouge : zone de l'origine de l'incendie.

1.9.4.3 Dysfonctionnement d'origine électrique

Les circuits électriques 600 V, 230 V et 24 V installés sur le trolleybus sinistré ont été examinés afin de déterminer si un dysfonctionnement d'origine électrique a pu survenir sur l'une des alimentations ou sur l'un des récepteurs de ces circuits.

1.9.4.3.1 Circuit 600 V

Aucun récepteur du circuit 600 V n'est installé dans la zone où l'origine du sinistre a été localisée et aucune alimentation de ce circuit ne chemine dans cette zone. Par conséquent, il est possible d'exclure qu'un dysfonctionnement électrique survenu sur le circuit 600 V du trolleybus constitue la cause du sinistre.

1.9.4.3.2 Circuit 230 V

Le circuit 230 V du trolleybus se compose de l'alimentation électrique du chargeur 230 V / 24 V, qui est constituée :

- du câble d'un enrouleur 230 V fixé sous le plafond de la halle et d'une courte rallonge raccordée au point de recharge de la batterie 24 V situé à l'avant du véhicule ;
- d'une ligne 230 V dans le véhicule située entre ce point de recharge et le relais temporisé sis en amont du chargeur 230 V / 24 V.

Seule une portion de cette ligne 230 V chemine dans la zone d'origine du sinistre.

La sécurité électrique (disjoncteur couplé à un dispositif différentiel à courant résiduel (DDR)), sise en amont de l'enrouleur 230 V de la halle, s'est déclenchée lors de l'incendie en raison d'une fuite de courant à la terre. L'ensemble de l'alimentation 230 V a été contrôlée et une portion a été prélevée afin d'être examinée. Les examens en laboratoire ont permis de mettre en évidence des traces de fusion du cuivre sur les conducteurs de la rallonge raccordée en amont du point de recharge de la batterie 24 V. Ces traces, résultant d'un court-circuit entre les conducteurs de phase et de terre ayant provoqué le déclenchement de la sécurité protégeant l'ensemble de l'alimentation 230 V, indiquent l'endroit où celui-ci est survenu. Cet endroit étant localisé en dehors de la zone d'origine de l'incendie, il est possible de déterminer que le court-circuit n'est pas consécutif à un dysfonctionnement électrique survenu sur la rallonge et constituant la cause de l'incendie, mais qu'il s'est produit dans le cours de l'incendie lorsque les conducteurs de la rallonge ont été mis à nu par la chaleur dégagée par le feu.

Ainsi, l'hypothèse d'un dysfonctionnement électrique survenu sur le circuit 230 V comme cause de l'incendie du trolleybus peut être écartée.

1.9.4.3.3 Circuit 24 V

L'examen des fusibles des circuits 24 V a montré que seul le fusible général de 250 A a fondu ; il protégeait, d'une part, la ligne alimentant le tableau électrique situé derrière le siège du chauffeur et, d'autre part, l'alimentation du boîtier de quatre fusibles de 40 A protégeant les lignes alimentant les ventilateurs du refroidissement de la traction. Les quatre fusibles de 40 A ne se sont pas déclenchés et le câble d'alimentation du boîtier contenant ces fusibles n'a pas été touché par le feu. Ainsi, sur la base des déclenchements des sécurités électriques, il est possible d'exclure qu'un dysfonctionnement électrique soit survenu sur les récepteurs suivants et leurs alimentations : les ventilateurs du refroidissement de la traction, les ventilations des compartiments passagers avant et arrière, ainsi que la pompe de servo-direction.

Par conséquent, une défektivité d'origine électrique a pu se produire uniquement sur la ligne alimentant le tableau électrique (illustration 10) situé derrière le siège

du conducteur, ainsi que sur l'une des alimentations ou sur l'un des récepteurs sous tension situé en aval de ce tableau.



Illustration 10 : Rectangle rouge : tableau électrique situé derrière le siège conducteur. Flèche rouge : arrivée du câble 24 V alimentant le tableau électrique.

Le câble alimentant le tableau électrique sis derrière le siège du chauffeur a été retrouvée partiellement soudée à un raccord métallique du circuit d'air comprimé (illustration 11), situé verticalement à l'arrière du tableau.

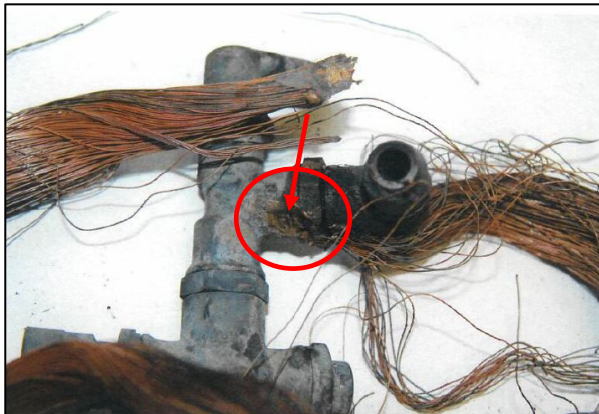


Illustration 11 : Câble 24 V alimentant le tableau électrique soudé sur le raccord pneumatique. Cercle rouge : emplacement où le câble était soudé sur le raccord.

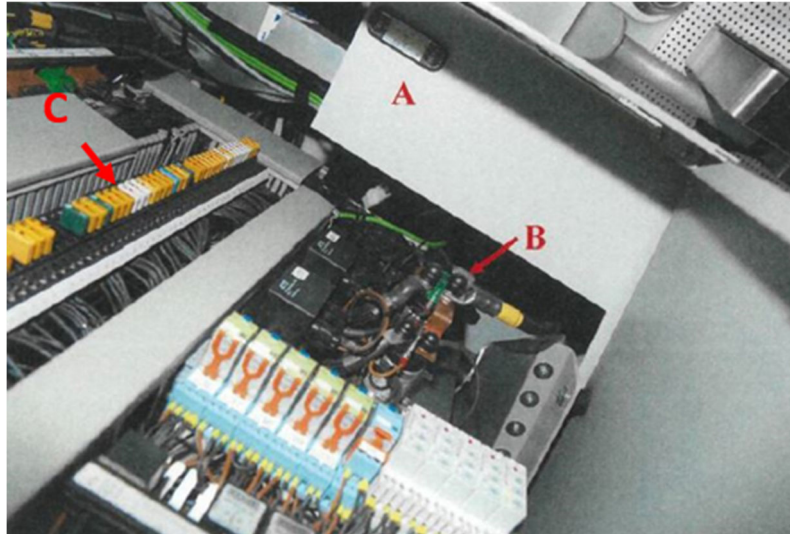


Illustration 12 : Image de comparaison du tableau électrique prise sur le trolleybus N° 6.

A : Emplacement du raccord pneumatique.

B : Arrivée sur le tableau électrique du câble 24 V de section de 95 mm² en provenance du fusible 250 ampères.

C : Divers fusibles de répartition protégeant les lignes 24 V.

De nombreuses perles de fusion de cuivre ont également été observées sur les brins composant la ligne à proximité du raccord. L'ensemble de ces traces résulte d'un court-circuit entre la ligne et le raccord métallique qui a engendré le déclenchement du fusible de 250 A (illustration 6) protégeant cette ligne.

Les éléments suivants permettent d'établir que ce court-circuit ne constitue pas la cause du sinistre, mais qu'il est consécutif au départ de feu survenu à un autre endroit :

- le court-circuit est survenu à un endroit situé en dehors de la zone d'origine de l'incendie ;
- à l'emplacement du raccord métallique, le câble est placé dans une gaine en plastique la protégeant de toute contrainte mécanique pouvant léser son isolation et permettre un court-circuit avec le raccord métallique ;
- le routeur, alimenté par la ligne via le tableau électrique situé derrière le siège du chauffeur, a transmis des informations jusque vers 19h29 alors que les premières manifestations de l'incendie sont visibles vers 19h20. Si l'incendie avait été causé par un court-circuit de cette ligne, le routeur aurait cessé de fonctionner bien plus tôt.

Lorsque le trolleybus est à l'arrêt, contact coupé, plusieurs récepteurs électriques demeurent alimentés par des lignes raccordées au tableau sis derrière le siège du chauffeur. Certaines de ces lignes sont protégées par des fusibles installés dans la partie arrière du tableau (illustration 12). Un examen des déclenchements de ces fusibles a été réalisé afin de tenter de restreindre le nombre de lignes et de récepteurs sur lesquels un dysfonctionnement aurait pu survenir. Tous les fusibles se sont déclenchés, y compris ceux qui protégeaient des lignes qui ne sont pas sous tension lorsque le véhicule est à l'arrêt. Cette situation s'explique par le fait que les fusibles en question sont des dispositifs thermiques réarmables manuellement et qui ont pu réagir à la chaleur dégagée durant le sinistre. Ainsi, il n'est pas possible de déterminer si les déclenchements ont été causés par un court-circuit

survenu sur les lignes ou par la chaleur due à l'incendie. Par conséquent, un éventuel dysfonctionnement doit être envisagé sur tous les récepteurs et leurs alimentations qui se trouvent dans la zone d'origine de l'incendie et qui étaient sous tension lorsque l'incendie a démarré, à savoir :

- la prise de diagnostic, les deux relais de commande des rétroviseurs extérieurs gauche et droite, la commande de suspension d'air avant et la commande de frein sis dans la partie avant du tableau électrique situé derrière le siège du chauffeur ;
- l'unité de commande pour les indicateurs extérieurs de destination, l'enregistreur de données d'accident RAG 2000, l'enregistreur de vidéosurveillance situés dans le caisson latéral sis au-dessus du siège du chauffeur ;
- l'interrupteur principal et l'autoradio 24 V DAB avec CD/MP3.

Vu l'état de destruction du trolleybus, ces récepteurs et leurs alimentations n'ont pas pu être retrouvés et examinés afin de déterminer si un dysfonctionnement électrique a pu se produire sur l'un de ces éléments.

Par contre, il est possible d'évaluer si l'ensemble des paramètres nécessaires à l'allumage d'un incendie consécutivement à un défaut sur une alimentation ou un récepteur était réuni.

Le courant électrique est acheminé aux récepteurs par des lignes reliées au pôle positif de la batterie 24 V par l'intermédiaire du tableau situé derrière le siège du chauffeur.

Le retour de courant est assuré par le châssis du véhicule qui est connecté au pôle négatif de la batterie. Si l'isolation d'une ligne est lésée par une contrainte mécanique, par exemple par un frottement répété sur une pièce métallique anguleuse du châssis, le conducteur est mis à nu. S'il n'entre pas en contact direct avec un élément du châssis, aucun court-circuit franc ne se produit. En présence d'un électrolyte (humidité, graisse, poussières, etc.), une déviation de courant peut s'établir entre le conducteur mis à nu et un élément métallique du châssis. Ce défaut d'isolement permet l'apparition d'un échauffement ponctuel qui peut engendrer la pyrolyse, puis l'inflammation de matériaux combustibles environnants. Sur un récepteur, un défaut de connexion ou le dysfonctionnement interne d'un composant peuvent également générer un dégagement accru de chaleur susceptible d'aboutir à un incendie.

1.10 Règlementation - Normes

1.10.1 Cahier des charges

Le cahier des charges établi par les tpf ne faisait référence à aucune norme spécifique à respecter concernant la tenue au feu des câbles.

2 Analyse

2.1 Aspects techniques

2.1.1 Etanchéité – infiltration d'eau

Des infiltrations d'eau par la grille de ventilation située au-dessus du conducteur, respectivement au-dessus du tableau électrique ont été relevées à 3 reprises. La grille d'aspiration située sur le toit du véhicule avait été ré-étanchée avec du silicone. Divers appareils électriques sont installés dans l'armoire contenant le tableau électrique. Si de l'eau vient à pénétrer dans les appareils, les conditions latentes pour l'apparition d'un court-circuit sont réunies.

2.1.2 Protection des arêtes vives

Le contrôle comparatif du câblage effectué par le SESE sur les trolleybus N° 6 et 9 a démontré qu'à plusieurs endroits des câbles 24 V frottaient sur des arêtes vives de divers profils métalliques (illustration 7). Aucune protection contre le frottement n'y a été installée. Sur le trolleybus N° 9, la gaine isolante des câbles était endommagée (illustration 8). Tous les éléments constitutifs d'un véhicule sont soumis à des vibrations lorsque celui-ci est en mouvement. La gaine des câbles, si elles ne sont pas protégées contre le frottement, s'usent et se détériorent avec le temps lorsqu'elles sont en contact avec des éléments dotés d'arêtes vives. Les conditions latentes pour l'apparition d'un court-circuit sont réunies lorsque le conducteur mis à nu peut provoquer un court-circuit si l'élément sur lequel il frotte est conducteur et qu'il est relié au potentiel négatif du châssis du véhicule.

2.1.3 Circuits de traction 600 V et alimentation 230 V

- Un dysfonctionnement électrique survenu sur le circuit 600 V du trolleybus ne peut constituer la cause du sinistre, car aucun récepteur n'est installé dans la zone de l'origine du sinistre.
- Le disjoncteur d'alimentation du chargeur 230 V / 24 V, installé à demeure au niveau du bâtiment, s'est déclenché par la protection du courant différentiel. Son déclenchement n'est pas consécutif à un dysfonctionnement électrique survenu sur la rallonge 230 V et ne constitue pas la cause de l'incendie. Son déclenchement s'est produit au cours de l'incendie lorsque les conducteurs de la rallonge ont été mis à nu par la chaleur dégagée par le feu.

2.1.4 Circuit du réseau des batteries 24 V – Conclusion de l'expertise incendie

Les examens réalisés sur le trolleybus de comparaison N° 6 ainsi que les informations générales recueillies ont montré que :

- contrairement aux lignes principales, d'ampérages élevés, les lignes alimentant les récepteurs généraux des circuits 24 V n'ont pas de protection contre les lésions mécaniques ;
- la plupart des lignes cheminent dans des torches de câbles qui sont maintenus ensemble par des attaches plastiques. Certaines torches sont fixées ou cheminent à proximité directe de parties métalliques saillantes du châssis pouvant provoquer des lésions mécaniques ;
- des infiltrations d'eau à partir du toit avaient été constatées dans l'environnement du tableau électrique sis derrière le siège du conducteur sur plusieurs véhicules de la série, dont le trolleybus sinistré. Ce dernier ayant été stationné

à l'extérieur et des précipitations neigeuses s'étant produites les jours précédant le sinistre, il n'est pas impossible que des infiltrations se soient notamment produites lors de la fonte de la neige présente sur le toit du véhicule quand il a été stationné dans la halle. Cette eau peut constituer un électrolyte pouvant engendrer ou favoriser l'apparition de dysfonctionnements électriques.

Ainsi, toutes les conditions nécessaires à l'apparition d'un court-circuit sur l'une des alimentations sous tension 24 V cheminant dans la zone d'origine sont réunies.

2.1.5 Isolation du circuit du réseau des batteries 24 V par rapport au châssis

Le principe de base du fonctionnement des consommateurs raccordés aux circuits des batteries 24 V est le suivant :

Le courant circule du pôle positif de la batterie 24 V en direction de l'élément consommateur et retourne ensuite vers le pôle négatif de la batterie.

Lorsque le pôle négatif des batteries 24 V n'est pas isolé par rapport au châssis du véhicule, en cas de contact accidentel du conducteur positif du réseau 24 V, comme par exemple suite à une blessure de l'isolation d'un câble avec le châssis un échange de courant entre ces deux potentiels peut se produire.

Dans ce cas on parle d'un court-circuit franc. Celui-ci provoque un arc électrique qui libère une quantité d'énergie considérable générant une source de chaleur pouvant enflammer les éléments installés à proximité.

Lorsque le pôle négatif est isolé du châssis du véhicule, un contact accidentel du pôle positif d'un circuit 24 V avec le châssis ne provoque aucun court-circuit franc.

2.2 Aspects normatifs

Aucune spécification ne figurait dans le cahier des charges concernant les exigences de la tenue au feu des câbles.

L'accord¹ concernant l'adoption de règlements techniques harmonisés de l'ONU, applicables aux véhicules à roues et aux équipements et pièces susceptibles d'être montés ou utilisés sur les véhicules à roues, réglant les conditions de reconnaissance réciproque lors des homologations type délivrée, est en vigueur en Suisse.

Cet accord précise par l'intermédiaire des différents règlements annexés, les modalités techniques d'homologations des véhicules. En ce qui concerne le comportement au feu des matériaux utilisés, c'est le règlement CEE-ONU N° 118, prescriptions uniformes relatives au comportement au feu des matériaux utilisés dans l'aménagement intérieur de certaines catégories de véhicules à moteur qui fait foi.

L'ordonnance concernant les exigences techniques requises pour les véhicules routiers² mentionne par son annexe 2 que les textes législatifs font également foi en Suisse. Le règlement CEE-ONU N° 118 fait partie intégrante des exigences techniques.

¹ RS 0.741.411, entrée en vigueur en Suisse le 28 août 1973, état au 14 septembre 2017

² RS 741.41, entrée en vigueur le 1^{er} octobre 1995, état au 1^{er} mai 2019 (valable en date de la construction du véhicule)

3 Conclusions

3.1 Faits établis

3.1.1 Aspects techniques

- Le circuit électrique de traction 600 V du trolleybus ne peut constituer la cause du sinistre, car aucun récepteur ni alimentation de ce circuit ne se situent dans la zone où l'incendie s'est déclaré.
- La défectuosité survenue sur le câble 230 V de l'alimentation du chargeur de batteries 24 V du trolleybus ne peut constituer la cause du sinistre. Elle est consécutive à l'incendie.
- L'origine de l'incendie a été localisée au niveau du poste de conduite du trolleybus dans une zone comprenant la partie avant du tableau électrique, le siège du conducteur et le caisson latéral situé au-dessus de ce dernier (illustration 9).
- L'incendie a été causé par un dysfonctionnement électrique survenu au niveau des circuits 24 V du trolleybus, sur l'un des récepteurs ou sur l'une des alimentations sous tension situés au niveau du poste de conduite. Ce dysfonctionnement peut correspondre à un court-circuit sur l'une de ces alimentations, à un défaut de connexion ou au dysfonctionnement interne d'un composant sur l'un de ces récepteurs. Les examens effectués sur le trolleybus et les diverses informations recueillies ne permettent pas de privilégier l'un ou l'autre de ces trois dysfonctionnements.
- Les contrôles comparatifs effectués sur d'autres trolleybus ont démontré que l'isolation de certains câbles était déjà endommagée.
- Sur ces trolleybus, le pôle négatif des batteries 24 V n'est pas isolé par rapport au châssis du véhicule. En cas de contact accidentel d'un conducteur positif du réseau 24 V avec le châssis, un passage de courant entre ces deux potentiels peut se produire.
- Les câbles des circuits de traction sont ignifuges et de par ceci ont l'aptitude à limiter la propagation de la flamme, ce qui n'est pas le cas de ceux des circuits des divers appareils auxiliaires.
- Des infiltrations d'eau par la grille de ventilation située au-dessus du conducteur, respectivement au-dessus du tableau électrique, ont été relevées à 3 reprises sur ce véhicule.

3.1.2 Aspects normatifs

Aucune spécification concernant la résistance au feu des câbles n'a été mentionnée dans le cahier des charges.

Le règlement CEE-ONU N° 118 définit les exigences de comportement au feu des matériaux utilisés dans l'aménagement intérieur.

3.2 Cause

L'incendie du trolleybus N° 10 a été causé par un dysfonctionnement électrique survenu sur le circuit des batteries 24 V, sur l'un des récepteurs ou sur l'une des alimentations sous tension situés au niveau du poste de conduite.

Ont pu contribuer à l'incendie :

- La non-isolation du pôle négatif du réseau des batteries 24 V par rapport au châssis du véhicule.
- La non-protection des arêtes vives de divers éléments métalliques sur lesquels cheminent des câbles électriques.
- La non-aptitude de certains câbles des circuits auxiliaires à limiter la propagation de la flamme.

4 **Recommandations de sécurité, avis concernant la sécurité et mesures prises après l'incendie**

4.1 **Recommandation de sécurité**

Aucune

4.2 **Avis de sécurité**

Le SESE peut publier des avis concernant la sécurité en réaction à des déficits de sécurité constatés lors de l'enquête. Des avis concernant la sécurité sont formulés lorsqu'une recommandation de sécurité au sens du règlement (UE) n° 996/2010 semble inadéquate, n'est formellement pas possible ou lorsque la forme moins contraignante de l'avis concernant la sécurité aura vraisemblablement plus d'impact. Les avis concernant la sécurité du SESE se fondent juridiquement sur l'art. 56 OEIT :

Art. 56 Informations pour la prévention des accidents

Le SESE peut préparer et publier des informations générales utiles pour la prévention des accidents.

4.2.1 **Câblage électrique**

4.2.1.1 **Déficit de sécurité**

Le châssis et la carrosserie des trolleybus sont composés de divers éléments métallique assemblés. Certains de ceux-ci peuvent présenter des arêtes vives, lesquelles peuvent à terme, à cause des vibrations induites lors de la circulation du véhicule, endommager le câblage électrique et conduire à une défectuosité d'origine électrique.

4.2.1.2 **Avis de sécurité n° 34**

Groupe cible : Entreprises faisant l'acquisition de nouveaux véhicules

Lors des contrôles effectués lors de la réception en usine des véhicules, le SESE recommande à l'acquéreur de porter une attention particulière à qualité de la pose du câblage électrique et de s'assurer que toutes les protections nécessaires soient installées afin qu'aucune blessure de l'enveloppe extérieure des câbles ne puisse se produire au contact d'une arête vive d'un élément du châssis ou de la carrosserie.

4.3 Mesures prises après l'incendie

Les mesures prises et dont le SESE a connaissance sont décrites ci-après sans autre commentaire.

Par le constructeur :

Les neufs autres trolleybus ont fait l'objet de contrôles. Des protections autour des torches de câbles ont été ajoutées par le constructeur afin d'éviter qu'elles ne frottent sur des éléments pouvant endommager l'isolation extérieure.

Les grilles de ventilation situées au-dessus du conducteur ont été ré-étanchées sur tous les véhicules.

Par l'OFT :

Lors de la première réception ordinaire des véhicules, l'OFT va intensifier ses contrôles sur les circuits basse-tension.

Modification de la législation :

Une nouvelle version de l'ordonnance concernant les exigences techniques requises pour les véhicules routiers (SR 741.41) entrera en vigueur en 2024. L'application du règlement CEE-ONU N° 118 sera contraignante en Suisse. Ledit règlement a été revu et les exigences concernant le câblage ont été adaptées.

Ce rapport final a été approuvé par la commission du Service suisse d'enquête de sécurité SESE (art. 10 lit. h de l'Ordonnance sur les enquêtes de sécurité en cas d'incident dans le domaine des transports du 17 décembre 2014).

Berne, 4 avril 2023

Service suisse d'enquête de sécurité

Annexe 1

Dessin type du véhicule

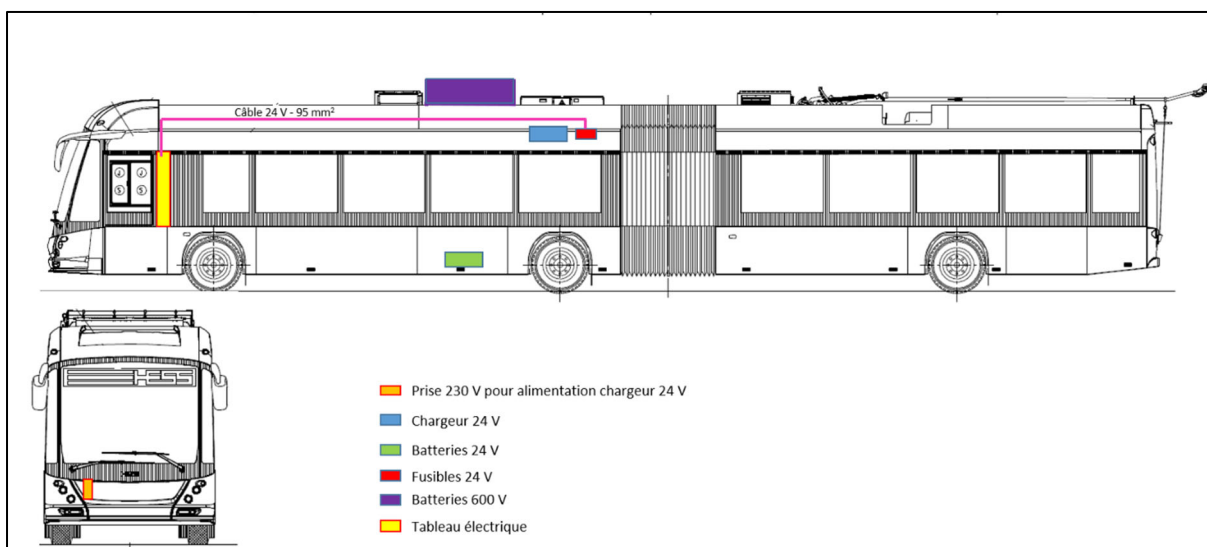


Illustration 13 : Dessin-type d'un trolleybus avec les principaux appareils électriques (Source : tpf, adjonctions : SESE).