

**OBJET DU MARCHE : Réalisation d'essais expérimentaux sur banc
pour l'étude de l'interaction pantographe-caténaire**

NUMERO DE MARCHE : 2026UPHFS12PME

CAHIER DES CLAUSES PARTICULIERES

PREAMBULE :

Le présent appel d'offre s'inscrit dans le cadre du projet CAP-TRACK, dédié au développement de solutions innovantes pour la traction électrique ferroviaire, avec un objectif de réduction de l'empreinte environnementale, d'amélioration de la durabilité des systèmes de captage et de maîtrise des phénomènes d'usure. Dans un contexte d'évolution des matériels roulants, d'augmentation des intensités de courant et de diversification des usages, notamment liés à l'intégration de trains à batteries, le système pantographe-caténaire est soumis à des sollicitations nouvelles qui nécessitent une meilleure compréhension de son comportement et de ses mécanismes de dégradation.

L'interaction pantographe-caténaire met en jeu des phénomènes multiphysiques fortement couplés, incluant des aspects mécaniques (dynamique de contact, vibrations), électriques (transfert de courant, arcs), thermiques (échauffement local), tribologiques (frottement et usure), ainsi que l'influence des matériaux en contact et des conditions environnementales (température, hygrométrie). Les contraintes d'accès au réseau ferroviaire exploité limitant fortement la réalisation d'essais en conditions réelles, le recours à des moyens expérimentaux permettant de reproduire de manière contrôlée ces phénomènes est nécessaire.

Le programme d'essais repose sur une approche paramétrique et fonctionnelle visant à évaluer, dans trois configurations complémentaires, l'influence des principaux facteurs de fonctionnement sur les performances du système pantographe-caténaire, sur la qualité du captage et sur les mécanismes d'usure. Les essais dynamiques avec captage de courant ont pour objectif de reproduire des conditions représentatives de l'exploitation ferroviaire, en intégrant notamment la vitesse de défilement, l'intensité et la nature du courant, les matériaux en contact, ainsi que les conditions environnementales. Les essais dynamiques sans captage de courant visent à caractériser le comportement mécanique du pantographe complet instrumenté, en simulant des phases représentatives d'un trajet ferroviaire, afin d'évaluer l'influence des sollicitations dynamiques sur la stabilité du contact et le comportement vibratoire du système. Les essais de captage à l'arrêt visent à étudier les conditions de transfert d'énergie en contact statique, notamment pour des applications de recharge de trains à batterie, en analysant l'influence des niveaux de courant, des efforts de contact, de la durée d'application et des conditions environnementales sur la résistance de contact, l'échauffement et la stabilité électrique.

ARTICLE 1. DISPOSITIONS GENERALES

1.1 OBJET

La présente consultation a pour objet la sélection d'un prestataire en capacité de concevoir, instrumenter et exploiter des moyens d'essais dédiés à l'étude de l'interaction pantographe-caténaire. La prestation attendue porte sur la réalisation d'une campagne expérimentale visant à caractériser les phénomènes de contact dans des conditions représentatives de l'exploitation ferroviaire, en intégrant les dimensions mécaniques (cinématique, forces de contact, vibrations), électriques (intensité, arcs, résistance de contact), thermiques (échauffement), tribologiques (frottement, usure), ainsi que l'influence des matériaux et des conditions environnementales (température, hygrométrie). Elle comprend la mise à disposition des moyens expérimentaux, l'instrumentation, l'acquisition des données ainsi que leur restitution.

1.2. FORME ET DECOMPOSITION DU MARCHE

Le présent marché est un contrat de services passé sous la forme d'une procédure d'appel d'offres ouvert en application des articles R2124-2 et suivants du Code de la Commande Publique.

Le présent marché ne comporte pas de tranches.

La présente consultation n'est pas allotie au sens de l'article L.2113-10 du Code de la Commande Publique. La dévolution en lots séparés risque de rendre techniquement difficile la cohérence globale des approches expérimentales et des données produites. Une vigilance particulière sera portée sur la cohérence des approches expérimentales et des données produites des lots pour conserver la cohérence globale permettant de garantir :

Le socle scientifique et technique du projet CAP-TRACK ;

- La condition nécessaire à la validation des innovations ;
- Un élément structurant de l'ensemble des livrables.

Les prestations attendues couvrent la réalisation d'une campagne expérimentale relative à l'interaction pantographe-caténaire, structurée selon trois volets fonctionnels distincts :

- Essais d'usure et de performance de captage en régime dynamique
- Essais de comportement dynamique du système pantographe-caténaire
- Essais de captage statique pour applications de recharge

Ces trois volets répondent à des objectifs complémentaires et devront être traités de manière distincte, tout en assurant une cohérence globale des approches expérimentales et des données produites.

Les variantes et les prestations supplémentaires éventuelles ne sont pas autorisées.

1.3. DUREE ET DELAI D'EXECUTION

La durée d'exécution du marché public court à compter de la notification jusqu'à la validation de l'ensemble des essais avant mai 2029.

Une prolongation du délai d'exécution peut être accordée par le pouvoir adjudicateur dans les conditions de l'article 13.3 du CCAG-FCS. Le marché ne peut pas être reconduit.

1.4. SOUS-TRAITANCE

Le titulaire peut sous-traiter l'exécution de certaines parties de son marché, sous réserve de l'acceptation du ou des sous-traitants par le maître de l'ouvrage et de l'agrément par lui des conditions de paiement de chaque sous-traitant. Les conditions de l'exercice de cette sous-traitance sont définies à l'article 12 du Cahier des Clauses Administratives Générales applicables aux marchés de Fournitures Courantes et Services (C.C.A.G-FCS).

1.5. RECOURS AUX MARCHES NEGOCIES

En application de l'article R.2122-2 du Code de la Commande Publique, l'UPHF se réserve le droit de recourir aux marchés publics négociés sans publicité ni mise en concurrence préalable.

1.6. BONS DE COMMANDE

De manière générale, les bons de commande ne peuvent être émis que pendant la durée du contrat. Toutefois, leur exécution pourra, dans certains cas, être poursuivie au-delà de la période de validité du contrat, dans les conditions de l'article R.2162-5 du Code de la Commande Publique.

Ce dépassement devra rester raisonnable afin de ne pas prolonger abusivement le contrat et être conforme aux délais habituels de mise en œuvre par la profession concernée pour la réalisation de la prestation.

Ils sont notifiés au titulaire par courriel.

Le titulaire devra accuser de la bonne réception de la commande par retour de courriel. À défaut de réponse, le bon de commande sera réputé reçu 24 heures après sa date de notification et accepté.

Les bons de commande mentionnent notamment :

- Le service émetteur,
- La référence du marché,
- Le numéro et la date d'émission du bon de commande,
- La date ou le délai et le lieu d'exécution de la ou des réunions envisagées
- Le détail des prix éventuel en HT,
-

Si, en cours d'exécution, il s'avère nécessaire de modifier les termes d'un bon de commande, l'accord des parties sur les modifications à apporter est concrétisé par un simple échange écrit (courriel).

L'acheteur se réserve le droit de décider de l'arrêt de l'exécution d'un bon de commande et en informe le titulaire par courriel. Il n'a pas à justifier de l'arrêt auprès du titulaire. Il s'engage néanmoins à honorer le montant des prestations exécutées ou des frais qui ont été engagés. Le titulaire ne pourra se prévaloir de ce fait, pour obtenir un quelconque dédommagement sous quelque forme que ce soit.

L'arrêt de l'exécution d'un bon de commande ne vaut pas résiliation du contrat.

ARTICLE 2 : PIECES CONSTITUTIVES DU MARCHE

Les pièces constitutives du marché sont les suivantes, par ordre de priorité décroissante :

Pièces particulières :

- L'acte d'engagement (AE) et son annexe financière détaillée établie par le candidat (type devis, ...) comprenant le détail de l'ensemble des prestations ;
- Le présent Cahier des Clauses Particulières (CCP) accepté sans aucune modification par le titulaire et dont l'exemplaire conservé dans les archives de l'administration seul fait foi ;
- L'offre technique du titulaire, dans la mesure où celle-ci n'est pas contradictoire avec les dispositions prévues dans les autres documents contractuels. Le mémoire technique doit comporter notamment les renseignements indiqués dans le Règlement de Consultation.
- Les actes d'exécution et modificatifs contractualisés en phase d'exécution

Pièces générales : Le Cahier des Clauses Administratives Générales applicables aux marchés de Fournitures Courantes et Services (C.C.A.G-FCS) approuvé par l'arrêté du 30 mars 2021.

En cas de contradiction entre les pièces constitutives du marché, les pièces particulières prévalent sur les pièces générales et les pièces prévalent dans l'ordre dans lequel elles sont énumérées ci-avant.

ARTICLE 3 : DISPOSITIONS GENERALES

3.1. GENERALITES

Les prestations doivent être conformes aux stipulations du marché (les normes et spécifications techniques applicables étant celles en vigueur à la date du marché). Le titulaire s'engage à exécuter l'ensemble des prestations conformément aux dispositions du présent CCP.

Le titulaire s'engage également à appliquer la législation et la réglementation applicables au marché qu'il est réputé connaître et s'engage à les mettre en application en cas d'évolution.

Le candidat retenu désigne dès le début du marché les noms et coordonnées d'une ou plusieurs personnes chargées de le représenter pour l'exécution des prestations. En cas d'empêchement ou de remplacement de ces représentants, le titulaire en informe l'UPHF et indique les coordonnées d'un nouveau représentant.

L'entreprise doit informer le pouvoir adjudicateur, par écrit et sans délai, de toute modification importante concernant le fonctionnement de l'entreprise pouvant influencer sur le déroulement de l'exécution du marché. Par conséquent, selon la nature du changement, un avenant sera ou non obligatoire.

Le titulaire s'engage à ce que son personnel dispose d'un niveau de formation et de qualification approprié tel que défini au présent marché.

3.2. REUNIONS

Dès la notification du contrat, le titulaire peut prendre contact avec l'acheteur afin d'organiser, si besoin, dans les locaux de celui-ci, une réunion de démarrage. En cours d'exécution du marché, d'autres réunions peuvent être organisées à la demande des parties notamment lors des lancements d'essais.

3.3. PROTECTION DES DONNEES A CARACTERE PERSONNEL

Si les prestations impliquent le traitement de données à caractère personnel, le titulaire mettra en œuvre toutes les mesures de sécurité appropriées afin que le traitement des données à caractère personnel réponde aux exigences du RGPD et que cela garantisse la protection des droits des personnes concernées. Il pourra être amené à présenter ces mesures, sur simple demande de l'acheteur. Par ailleurs, le cas échéant, le titulaire s'engage à signer un accord de protection des données personnelles de sous-traitance conforme à l'article 28 du Règlement Général sur la Protection des données.

Le titulaire a une obligation de conseil et d'assistance envers l'acheteur pour toute question relative à la protection des données à caractère personnel.

Par ailleurs, il fournit à l'UPHF sans délai et sur simple demande tout élément de preuve de conformité du traitement au RGPD (document nécessaire à la tenue du registre de traitement, contrat de maintenance adapté au RGPD, identification d'un délégué à la protection des données, etc.).

Le titulaire ne traite les données que sur instruction expresse de l'acheteur. Il s'engage également à notifier à l'UPHF sans délai tout incident sur des données à caractère personnel (violation de données, etc.)

Le respect de ces données est valable pendant et après l'exécution du marché.

ARTICLE 4 : DESCRIPTIONS TECHNIQUES

1. PERIMETRE DES PRESTATIONS

Les prestations attendues couvrent la réalisation d'une campagne expérimentale relative à l'interaction pantographe-caténaire, structurée selon trois volets fonctionnels distincts :

- Essais d'usure et de performance de captage en régime dynamique
- Essais de comportement dynamique du système pantographe-caténaire
- Essais de captage statique pour applications de recharge

Ces trois volets répondent à des objectifs complémentaires et devront être traités de manière distincte, tout en assurant une cohérence globale des approches expérimentales et des données produites.

Le prestataire devra proposer une solution expérimentale permettant de couvrir l'ensemble de ces configurations. Cette solution pourra reposer sur un ou plusieurs moyens d'essais.

Les prestations comprennent notamment :

- La conception et la mise en œuvre des moyens d'essais adaptés aux trois configurations
- L'intégration et l'instrumentation des pantographes et des éléments de contact
- La mise en œuvre des systèmes d'alimentation électrique et de contrôle des conditions d'essais
- La réalisation des essais selon un plan d'expérience paramétrique
- L'acquisition, le traitement et l'enregistrement des données
- La restitution des résultats sous forme de données exploitables et de rapports d'essais

Le prestataire devra être en capacité de reproduire, de manière contrôlée, les conditions mécaniques, électriques et environnementales nécessaires à l'étude des phénomènes de contact, de captage et d'usure dans chacune des configurations considérées.

Afin de lever toute ambiguïté dans l'interprétation des besoins, les essais sont structurés selon trois volets distincts répondant à des finalités complémentaires. Les essais d'usure et de performance de captage en régime dynamique visent à caractériser le comportement du système pantographe-caténaire en contact glissant sous courant, dans des conditions représentatives de l'exploitation ferroviaire. Ils permettent d'évaluer simultanément la qualité du captage (continuité électrique, arcs, échauffement) et les mécanismes d'endommagement du fil de contact et des bandes de captage sous sollicitations dynamiques. Les essais de comportement dynamique du système pantographe-caténaire ont pour objectif d'analyser la réponse mécanique du système, indépendamment du captage de courant. Ils visent à reproduire des scénarios dynamiques complexes afin de quantifier les phénomènes vibratoires et les interactions mécaniques, dans une optique de recalage de modèles prédictifs et d'amélioration du comportement dynamique du système dans des conditions représentatives du terrain. Les essais de captage statique pour applications de recharge visent à étudier les conditions de transfert d'énergie à l'arrêt, notamment dans le cadre de la recharge de trains à batterie. Ils ont pour objectif d'optimiser les conditions de contact électrique, en particulier le choix des matériaux, afin d'assurer un transfert de courant stable, maîtriser l'échauffement et garantir la performance et la durabilité du système en conditions statiques.

2. LES ESSAIS

2.1. ESSAIS D'USURE ET DE PERFORMANCE DE CAPTAGE DE COURANT EN REGIME DYNAMIQUE AVEC pantographe complet

Les essais seront réalisés avec un pantographe complet, instrumenté et équipé de bandes de captage.

2.1.1. DESCRIPTION DU MOYEN D'ESSAI

Le dispositif d'essais devra permettre de reproduire l'interaction pantographe-caténaire en conditions de captage de courant avec contact glissant, en intégrant :

- Un fil de contact à vitesse variable

- Un pantographe complet monté sur un support vibratoire (roulis, lacet, tangage)
- La simulation du désaxement de la caténaire
- La simulation du soulèvement du fil de contact

Le banc devra permettre de reproduire des conditions représentatives de l'exploitation ferroviaire.

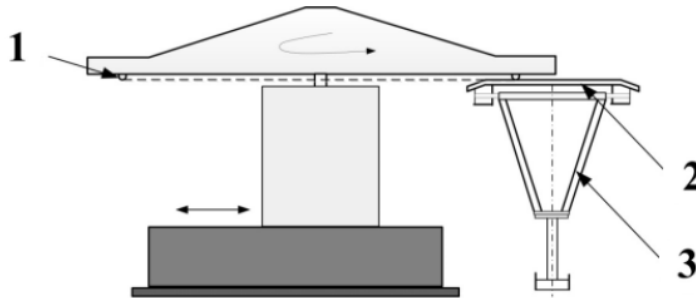


Figure 1 : banc de captage de courant

Légende : 1) Fil de contact 2) Bande(s) de captage 3) Pantographe complet sur support vibratoire (roulis, lacet-tangage)

2.1.2. FONCTIONNALITES ET PERFORMANCES

2.1.2.1. PERFORMANCES MECANIQUES

Le banc d'essais devra permettre :

- La simulation de la vitesse de défilement du train sur une plage de 0 à 500 km/h
- La simulation du désaxement de la caténaire sur une plage comprise entre ± 200 mm et ± 300 mm, avec variation possible pendant les essais
- La reproduction de la rigidité statique et dynamique de la caténaire en différents points des portées et zones de recouvrement

Les typologies de caténaires à considérer incluent notamment :

- V350 STI
- V300
- V200 STI
- V160 STI
- CSRR STI (Caténaire Simple Renforcée Régularisée)
- CLREG (Caténaire Légère Régularisée)
- Urbaine – LAC 25 000 V AC
- Urbaine – LAC 1 500 V DC
- Urbaine – LAC 750 V DC

Le banc devra être piloté par un système de contrôle en boucle fermée de type HIL, assurant la communication entre les rigidités imposées et les forces de contact mesurées par le pantographe.

Le dispositif devra également permettre :

- La simulation du soulèvement du fil de contact avec des amplitudes de ± 10 cm à basse fréquence

2.1.2.2. PERFORMANCES CLIMATIQUES

Le banc devra être intégré dans une enceinte climatique permettant :

- Une plage de température comprise entre -8 °C et $+40$ °C
- La génération d'un flux d'air dans la zone de captage (largeur 1 m, hauteur 40 cm)
- Une vitesse de soufflage variable, avec un maximum de 140 km/h
- le contrôle de l'hygrométrie

2.1.2.3. PERFORMANCES ELECTRIQUES

Le banc devra être équipé d'un générateur permettant :

- Une intensité maximale de 2000 A
- Un fonctionnement en courant continu ou alternatif (50 Hz, 60 Hz ou 16,7 Hz)

- Un fonctionnement en captage ou en ré-injection
- Une variation du sens du courant au cours d'un essai

2.1.2.4. TYPOLOGIE DE FIL DE CONTACT

Le dispositif devra permettre l'utilisation de fils de contact de section :

- 80 mm²
- 100 mm²
- 107 mm²
- 120 mm²
- 150 mm²

2.1.2.5. PANTOGRAPHES ET CONDITIONS D'INTEGRATION

Le banc devra permettre l'accueil de pantographes complets alimentés en air comprimé (6 bars).

Pantographes considérés :

Scope HRV (train régional)

- Pantographe HRV 300.20 0SER 7213310
- Panhead AC 2215094
- Panhead AC 2215378
- Panhead DC 2215502

Scope HST (train grande vitesse)

- Pantographe TGV2020 DC – VE043378-0101
- Panhead single strip AC – FT0076170-101-1P00
- Panhead single strip – FT0072995-102-1P00
- Panhead regio AC – VE042074-0101

Conditions d'utilisation :

- Déploiement compris entre 368 mm et 3200 mm, mesuré entre la base des isolateurs et le point de contact avec la caténaire
- Possibilité d'essais avec un dévers de 7°

2.1.3. INSTRUMENTATION ET MOYENS DE MESURE

Le prestataire devra assurer l'instrumentation complète du pantographe ainsi que la mise en œuvre des moyens d'acquisition et de surveillance des essais.

2.1.3.1. ACQUISITION DES DONNEES

Le prestataire devra disposer de moyens d'acquisition permettant la mesure synchronisée des grandeurs suivantes :

- températures
- forces de contact
- vitesses
- accélérations
- déplacements
- vibrations
- images vidéo (jusqu'à 4K)
- comptage des arcs électriques
- intensité du courant
- résistance de contact
- chutes de tension

Les données acquises devront être transmises sous format électronique exploitable.

2.1.3.2. INSTRUMENTATION DU PANTOGRAPHE

Les pantographes fournis par le client devront être équipés par le prestataire avec les capteurs suivants :

- Capteurs de grands déplacements (débattement général), de type capteur à fil
- Capteurs positionnés sur les tubes plongeurs supports des bandes individuelles ou des cadres d'archet rigide
- Capteurs de vitesse et d'accélération aux points de fixation de chaque bande de captage
- Capteurs de courant à effet Hall, d'une capacité de 1000 A, sur chaque connexion bande de captage / pantographe

2.1.3.3. MESURE DE LA TEMPERATURE

Les pantographes devront être équipés de bandes de captage instrumentées comprenant :

- 17 thermocouples par bande, soit 34 voies de mesure en température

Le dispositif devra également intégrer une caméra thermique calibrée avec les thermocouples afin d'assurer le suivi des températures du fil de contact et des bandes de captage pendant les essais.

2.1.3.4. MESURE DES FORCES DE CONTACT ET DU FROTTEMENT

Chaque bande de captage devra être équipée d'un dispositif de mesure des forces de contact à chaque point de connexion au corps du pantographe, de manière à obtenir la force de contact pour chaque bande avec la même base temporelle que :

- l'intensité du courant
- la résistance de contact

Les capteurs reliant la bande de captage au pantographe devront permettre de fournir en continu la valeur des coefficients de frottement entre la bande de captage et le fil de contact.

2.1.3.5. CARACTERISATION VIBRATOIRE

Une caractérisation vibratoire du pantographe est demandée dans la plage de fréquence 0–100 Hz, avec et sans instrumentation, pour une hauteur de déploiement de 1,5 m.

Cette caractérisation devra être réalisée conformément à la norme EN 50317 – 2018, procédure de mesure 2.1.1.

2.1.4. DEROULEMENT DES ESSAIS :

Lors de la réalisation des essais on donne ci-après les paramètres qui seront fixés par l'utilisateur et les paramètres physiques à mesurer :

2.1.4.1. PARAMETRES D'ESSAIS A FIXER PAR L'UTILISATEUR :

- Force de contact initiale
- Elasticité verticale dynamique de la caténaire
- Vitesse linéaire
- Désaxement (amplitude et fréquence)
- Dévers par rapport à la verticale
- Intensité du courant en fonction du temps, variable pendant de la durée des essais
- Fréquence et sens du courant
- Vitesse de l'air dans la zone de contact (variable pendant les essais)
- Température de l'air dans la zone de contact (variable pendant les essais)
- Hygrométrie de l'air dans la zone de contact (variable pendant les essais)

Paramètres contrôlés mesurés

- Force de contact dynamique
- Coefficient de frottement,
- Comptage et analyse des arcs électriques,
- Chute de tension, résistance de contact
- Températures des bandes de captage aux différents thermocouples
- Vitesse linéaire mesurée aux essais

- Vibrations en mm/sec aux accéléromètres
- Intensité de courant dans le Fil de Contact et le dans le pantographe,
- Température du Fil de contact
- Température ambiante,
- Température de l'air pulsé
- Hygrométrie dans la zone de contact
- Section du fil de contact avant et après essais en 24 points minimum
- Perte de volume du fil de contact avant et après essais
- Masse des bandes de captage avant et après essais
- Perte de masse des bandes de captage avant et après essais

2.1.4.2. PARAMETRES D'ESSAIS

Lors de la réalisation des essais, les paramètres suivants devront pouvoir être définis et contrôlés par l'utilisateur :

- force de contact initiale
- Élasticité verticale dynamique de la caténaire
- Vitesse linéaire
- Désaxement (amplitude et fréquence)
- Dévers par rapport à la verticale
- Intensité du courant, variable au cours de l'essai
- Fréquence et sens du courant
- Vitesse de l'air dans la zone de contact (variable pendant les essais)
- Température de l'air dans la zone de contact (variable pendant les essais)
- Hygrométrie de l'air dans la zone de contact (variable pendant les essais)

2.1.4.3. GRANDEURS MESUREES

Les essais devront permettre de mesurer et d'analyser les grandeurs suivantes :

- Forces de contact dynamiques
- Coefficient de frottement
- Comptage et analyse des arcs électriques
- Chute de tension et résistance de contact
- Températures des bandes de captage (thermocouples)
- Vitesse linéaire mesurée
- Vibrations (mm/s) aux accéléromètres
- Intensité de courant dans le fil de contact et dans le pantographe
- Température du fil de contact
- Température ambiante
- Température de l'air pulsé
- Hygrométrie dans la zone de contact
- Section du fil de contact avant et après essais (minimum 24 points)
- Perte de volume du fil de contact
- Masse des bandes de captage avant essais
- Perte de masse des bandes de captage après essais

2.1.4.4. DOMAINE DES PARAMETRES D'ESSAIS

Les paramètres d'essais définis au paragraphe 4.1.4.2 seront sélectionnés parmi des domaines de valeurs représentatifs des conditions d'exploitation ferroviaire, couvrant à la fois les situations nominales et les cas sollicitants.

Ces paramètres intègrent l'ensemble des dimensions mécaniques, électriques et environnementales, ainsi que la variabilité des matériaux en contact, afin de permettre une analyse complète des performances de captage et des mécanismes d'usure en régime dynamique.

Les plages de variation et les niveaux associés aux principaux paramètres sont définis dans les tableaux ci-après. Ces valeurs constituent le référentiel de définition des conditions d'essais.

Le prestataire devra être en capacité de couvrir l'ensemble des domaines spécifiés, ou à défaut, de préciser explicitement les limitations de son dispositif vis-à-vis des plages demandées.

Tableau 1 : Typologie des fils de contact (EN 50-149)

Type de matériau du fil de contact	Section 107 mm ²	Section 150 mm ²
Cuivre électrolytique Cu-ETP	✓	✓
Cuivre argent CuAg 0,1	✓	✓
Cuivre étain CuSn 0,2	✓	✓
Cuivre magnésium CuMg 0,3	✓	✓
Cuivre magnésium CuMg 0,5	✓	✓
CuCd 0,7	✓	✓
CuCd 1	✓	✓
CuMg 0,2 UHC	✓	✓
CuMg 0,5 UHC Powerfil	✓	✓
CuMg 0,5 HS	✓	✓
CuAg Thermofil	✓	✓
CuSn 0,2 Valcond	✓	✓
CuMg 0,2 Valcond	✓	✓
Cuivre recyclé patrimonial pur	✓	✓
Cuivre recyclé tout venant	✓	✓

Tableau 2 : Niveaux d'intensité de courant (DC et AC)

Intensité (A) – DC 750 V	DC 1500 V	DC 3000 V	AC 15 kV (16,7 Hz)	AC 25 kV (50 Hz)
200	200	200	200	200
200	400	400	300	300
300	600	600	400	400
400	800	800	500	500
500	1000	1000	600	600
600	1200	1200	700	700
700	1400	1400	—	—
1600	1600	1600	—	—
1800	1800	—	—	—
2000	2000	—	—	—

Tableau 3 : Conditions mécaniques et environnementales des essais

Paramètre	Niveaux
Vitesse de défilement (km/h)	100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500
Température ambiante (°C)	-20, -10, 0, 10, 20, 30, 40, 50
Température du fil de contact (°C)	-20, -10, 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60
Hygrométrie (%)	10, 25, 50, 75, 100
Durée minimale d'un essai	2 h

2.1.4.5. PROGRAMME D'ESSAIS

Les prestations comprennent la réalisation d'un plan d'expérience sur banc dynamique, selon un protocole défini dans le cadre du projet CAP-TRACK TEC.

Les paramètres d'essais seront sélectionnés parmi les valeurs suivantes :

- 2 sections de fil de contact (107 mm² et 150 mm²)
- 3 types d'alliage de cuivre
- 4 types de bandes de carbone
- 4 intensités de courant (AC ou DC)
- 4 combinaisons température / hygrométrie

Un exemple de plan d'essais correspond à :

- 384 essais au total

Répartition indicative :

- 2 essais par jour, d'une durée moyenne de 2 heures → 182 journées d'essais
- 1 essai par jour, d'une durée de 4 heures → 20 journées d'essais

Soit un total de 202 journées d'essais.

Le prestataire devra proposer une organisation et une planification compatibles avec ce volume d'essais.

2.1.4.6. 4.8 LIVRABLES

Les livrables attendus comprennent :

- Les données brutes issues des mesures
- Les données traitées et synchronisées
- Les rapports d'essais détaillant les conditions expérimentales et les résultats obtenus
- Les éléments d'analyse permettant l'interprétation des phénomènes observés

2.2. ESSAIS DE COMPORTEMENT DYNAMIQUE DU SYSTEME PANTOGRAPHE–CATENAIRE

2.2.1. DESCRIPTION DU MOYEN D'ESSAI

Les essais dynamiques sans captage de courant ont pour objectif de caractériser le comportement mécanique du système pantographe–caténaire, indépendamment des phénomènes électriques, dans des conditions représentatives de l'exploitation ferroviaire.

Ils visent notamment à simuler le comportement dynamique d'un pantographe au cours d'un trajet type comprenant plusieurs phases caractéristiques :

- le démarrage du train
- La circulation à vitesse commerciale variable, sur un trajet comprenant des tronçons en alignement et en courbe
- Le passage d'ouvrages d'art et de passages à niveau
- Le ralentissement jusqu'à l'arrêt du train

Ces essais ont pour finalité d'analyser la réponse dynamique du pantographe soumis à des sollicitations complexes, et de fournir des données expérimentales permettant le recalage et la validation de modèles prédictifs du comportement pantographe–caténaire.

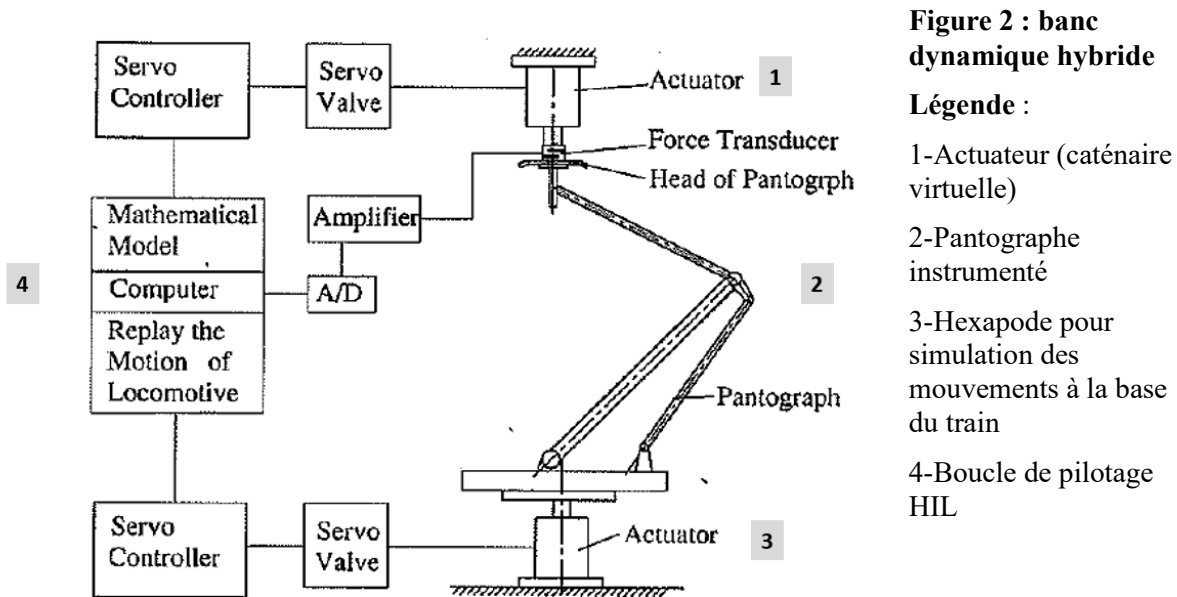
Les essais seront réalisés avec un pantographe complet, instrumenté et équipé de bandes de captage.

Le dispositif d'essais devra être basé sur un banc dynamique hybride permettant de coupler un pantographe réel avec une caténaire virtuelle simulée numériquement en temps réel.

Ce banc reposera sur les éléments suivants :

- Un pantographe instrumenté, représentant le sous-système physique
- Un modèle numérique de caténaire (caténaire virtuelle)
- Un système d'actionneurs permettant de reproduire les efforts et déplacements au point de contact
- Un système de mise en mouvement de la base du pantographe, de type hexapode, permettant de simuler les mouvements du train (translations et rotations)
- Un système de contrôle en boucle fermée de type HIL assurant le couplage en temps réel entre le modèle numérique et le système physique

Les essais sont à réaliser avec un pantographe complet, instrumenté et équipé de bandes de captage. Selon le schéma de principe ci-après :



Le principe de fonctionnement repose sur une interaction en boucle fermée entre les sous-systèmes numérique et physique :

- Le modèle numérique calcule en temps réel la position et les efforts appliqués au fil de contact
- Ces conditions sont reproduites physiquement sur le pantographe par l'intermédiaire des actionneurs
- Le pantographe réagit mécaniquement (déformations, vibrations)
- Les efforts mesurés sont renvoyés au modèle numérique afin d'ajuster la simulation

Ce dispositif doit permettre de reproduire fidèlement les conditions dynamiques rencontrées en exploitation ferroviaire, tout en offrant un environnement expérimental contrôlé et reproductible.

2.2.2. FONCTIONNALITES ET PERFORMANCES

2.2.2.1. PERFORMANCES MECANIQUES

Le banc d'essais devra permettre de reproduire les conditions dynamiques du système pantographe-caténaire dans des scénarios représentatifs de l'exploitation ferroviaire.

À ce titre, il devra permettre :

- La simulation de la vitesse de défilement du train sur une plage de 0 à 500 km/h
- La possibilité de faire varier la vitesse au cours d'un essai afin de reproduire des scénarios de circulation réalistes
- La simulation du désaxement de la caténaire sur une plage comprise entre ± 200 mm et ± 300 mm, avec variation possible pendant les essais
- La possibilité de positionner le fil de contact soit au centre de la bande de captage, soit avec un décalage pouvant atteindre ± 25 cm
- La reproduction de la rigidité statique et dynamique de la caténaire en différents points des portées et des zones de recouvrement

Les typologies de caténaires à considérer incluent notamment :

- V350 STI
- V300
- V200 STI

- V160 STI
- CSRR STI (Caténaire Simple Renforcée Régularisée)
- CLREG (Caténaire Légère Régularisée)
- Urbaine – LAC 25 000 V AC
- Urbaine – LAC 1 500 V DC
- Urbaine – LAC 750 V DC

Le banc devra être piloté par un système de contrôle en boucle fermée de type HIL, assurant la communication entre les rigidités imposées par le modèle numérique et les forces de contact mesurées sur le pantographe.

Le dispositif devra également permettre :

- La simulation du soulèvement du fil de contact avec des amplitudes de ± 10 cm à basse fréquence

La variation de la vitesse au cours d'un essai devra permettre d'atteindre différents régimes de fonctionnement. Toutefois, les mesures devront être réalisées en conditions stabilisées, une fois le régime dynamique établi, afin de garantir la reproductibilité et la comparabilité des résultats.

2.2.2.2. TYPOLOGIE DE FIL DE CONTACT

Le banc d'essais devra permettre de simuler différents types de fils de contact, représentatifs des configurations rencontrées en exploitation ferroviaire.

À ce titre, il devra être compatible avec des fils de contact de différentes sections, notamment :

- 80 mm²
- 100 mm²
- 107 mm²
- 120 mm²
- 150 mm²

Le dispositif devra permettre de reproduire l'influence de ces différentes sections sur le comportement dynamique du système pantographe-caténaire, notamment en termes de rigidité et de réponse vibratoire.

2.2.2.3. PERFORMANCES CLIMATIQUES

Le banc d'essais devra être intégré dans une enceinte climatique permettant de maintenir des conditions environnementales contrôlées.

Les essais seront réalisés dans des conditions nominales fixées à :

- Une température ambiante constante de 20 °C
- Une hygrométrie constante

Le prestataire devra garantir la stabilité de ces conditions pendant toute la durée des essais, afin d'assurer la reproductibilité des mesures et la comparabilité des résultats.

2.2.2.4. PANTOGRAPHES ET CONDITIONS D'INTEGRATION

Le banc d'essais devra permettre l'accueil et la mise en œuvre de pantographes complets, représentatifs des matériels roulants considérés.

Les pantographes seront fournis par le client et devront être compatibles avec le dispositif proposé par le prestataire. Le banc devra assurer leur alimentation en air comprimé à une pression de 6 bars.

Les pantographes prévus dans le cadre du programme d'essais incluent notamment :

Scope HRV (train régional)

- Pantographe HRV 300.20 OSER 7213310
- Panhead AC 2215094
- Panhead AC 2215378
- Panhead DC 2215502

Scope HST (train grande vitesse)

- Pantographe TGV2020 DC – VE043378-0101
- Panhead single strip AC – FT0076170-101-1P00

- Panhead single strip – FT0072995-102-1P00
- Panhead regio AC – VE042074-0101

Le dispositif devra permettre de tester ces pantographes dans des conditions représentatives de leur utilisation, notamment :

- Un déploiement compris entre 368 mm et 3200 mm, mesuré entre la base des isolateurs et le point de contact avec la caténaire
- Des essais avec un dévers pouvant atteindre $\pm 7^\circ$
- La reproduction des mouvements de roulis, lacet et tangage, représentatifs des sollicitations de la base du pantographe en toiture de train

Le banc devra permettre de garantir la compatibilité mécanique et fonctionnelle avec ces différentes configurations de pantographes.

2.2.2.5. CINEMATIQUE ET ACTIONNEURS

Le banc d'essais devra permettre de piloter et de coordonner l'ensemble des mouvements nécessaires à la reproduction des sollicitations dynamiques du système pantographe-caténaire.

À ce titre, il devra intégrer des systèmes d'actionnement permettant de reproduire à la fois :

- Les variations de déploiement du pantographe
- Les mouvements relatifs du fil de contact
- Les sollicitations dynamiques de la base du pantographe

Mouvement vertical de la structure mobile (déploiement du pantographe)

Un mouvement vertical de grande amplitude devra permettre de simuler les variations de déploiement du pantographe en conditions d'exploitation.

Les caractéristiques minimales attendues sont les suivantes :

- Course utile : 2500 mm
- Vitesse maximale : 500 mm/s
- Accélération maximale : $0,4 \text{ m/s}^2$

Actionneur vertical (interaction fil de contact / pantographe)

Un actionneur vertical devra permettre de simuler la position dynamique du fil de contact au niveau de la tête du pantographe.

Cet actionneur devra être équipé :

- d'une cellule de force
- d'un accéléromètre

Ses caractéristiques devront être les suivantes :

- Amplitude de travail : $\pm 100 \text{ mm}$ jusqu'à 2,3 Hz
- Capacité de reproduction de vibrations jusqu'à 30 Hz (iso-accélération)
- Vitesse maximale : 1,5 m/s
- Limite de force : 7,5 kN

Actionneur transversal (désaxement du fil de contact)

Un actionneur transversal devra permettre de simuler le désaxement du fil de contact par rapport à la bande de captage.

Ses caractéristiques devront être les suivantes :

- Amplitude de travail : $\pm 300 \text{ mm}$ jusqu'à 1,15 Hz
- Vitesse maximale : 1,5 m/s
- Limite d'accélération : 2 g lors des changements de mouvement

Simulation des mouvements de la base du pantographe

Les mouvements de la base du pantographe devront être simulés par un système de type hexapode permettant de reproduire les sollicitations réelles en toiture de train.

Ce système devra permettre :

- 3 translations
- 3 rotations

afin de reproduire les mouvements de roulis, lacet et tangage, ainsi que les déplacements longitudinaux et transversaux.

Coordination des mouvements

Le banc devra permettre la coordination en temps réel de l'ensemble des mouvements décrits ci-dessus, en cohérence avec le modèle numérique de caténaire.

Le pilotage devra être assuré par un système de contrôle en boucle fermée de type HIL, garantissant la synchronisation entre :

- les sollicitations imposées
- les réponses mesurées du pantographe

2.2.3. INSTRUMENTATION ET MOYENS DE MESURE

Le programme d'essais prévoit que le client apporte son pantographe sans instrumentation.

Le prestataire devra disposer des capteurs nécessaires pour équiper le pantographe, ainsi que :

- D'un banc d'essais d'étalonnage du pantographe
- Des matériels d'acquisition des données
- Des moyens de surveillance des essais

2.2.3.1. CENTRALE D'ACQUISITION DES DONNEES ET PROCEDURE D'ESSAIS

Le prestataire devra disposer de systèmes d'acquisition des données permettant d'assurer :

- La mesure synchronisée des grandeurs mécaniques
- Le bon déroulement des essais
- La traçabilité et la reproductibilité des conditions expérimentales

Les grandeurs acquises comprendront notamment :

- Forces de contact
- Vitesses
- Accélérations
- Déplacements
- Vibrations
- Images vidéo (jusqu'à 4K)

Les données acquises lors des essais seront transmises sous format électronique exploitable.

2.2.3.2. INSTRUMENTATION DU PANTOGRAPHE

Les pantographes fournis par le client devront être équipés par le prestataire avec les capteurs suivants :

- Capteurs de grands déplacements (débattement général), de type capteur à fil
- Capteurs positionnés sur les tubes plongeurs supports des bandes individuelles ou des cadres d'archet rigide
- Capteurs de vitesse et d'accélération aux points de fixation de chaque bande de captage

2.2.3.3. MESURE DES FORCES DE CONTACT ET DES COEFFICIENTS DE FROTTEMENT

Chaque bande de captage devra être équipée d'un dispositif de mesure des forces de contact à chaque point de connexion au corps du pantographe, de manière à obtenir la force de contact pour chaque bande de captage avec une base temporelle commune.

Les capteurs reliant la bande de captage au pantographe devront permettre de fournir en continu la valeur des coefficients de frottement entre la bande de captage et le fil de contact.

2.2.3.4. CARACTERISATION VIBRATOIRE DU PANTOGRAPHE

Une caractérisation vibratoire du pantographe est demandée avec et sans instrumentation, dans la plage de fréquence de 0 à 100 Hz, pour une hauteur de déploiement de 1,5 m.
Cette caractérisation devra être réalisée conformément à la norme EN 50317:2018, procédure de mesure 2.1.1.

2.2.4. PARAMETRES D'ESSAIS

Lors de la réalisation des essais, les paramètres suivants devront pouvoir être définis et contrôlés par l'utilisateur :

- Force de contact initiale
- Élasticité verticale dynamique de la caténaire
- Vitesse linéaire
- Désaxement du fil de contact (amplitude et fréquence)
- Dévers par rapport à la verticale
- Profils temporels de vitesse, permettant de faire varier la vitesse au cours d'un essai

Les essais devront permettre d'atteindre différents régimes de fonctionnement correspondant aux conditions d'exploitation ferroviaire.

2.2.5. GRANDEURS MESUREES

Les essais devront permettre de mesurer et d'analyser les grandeurs suivantes :

- Forces de contact dynamiques
- Coefficients de frottement entre la bande de captage et le fil de contact
- Vitesses linéaires mesurées au cours des essais
- Accélérations aux différents points instrumentés du pantographe
- Déplacements du pantographe et de ses sous-ensembles
- Vibrations, exprimées notamment en mm/s aux accéléromètres

Les mesures devront être synchronisées afin de permettre une analyse temporelle cohérente du comportement dynamique du système.

2.2.6. TYPOLOGIE DES ESSAIS

Les essais réalisés sur le banc dynamique hybride devront permettre de couvrir deux types principaux d'investigations :

- La caractérisation vibratoire du pantographe
- La réalisation d'essais hybrides couplant un pantographe réel à une caténaire virtuelle

2.2.6.1. CARACTERISATION VIBRATOIRE (VERSION AMELIOREE)

La phase de caractérisation vibratoire a pour objectif d'identifier les propriétés dynamiques globales du pantographe et d'établir un modèle équivalent, notamment sous forme de modèle à masses concentrées.

Cette caractérisation constitue une étape préalable essentielle au recalage et à la validation des modèles dynamiques du système pantographe-caténaire.

Référentiel normatif et méthodologique

Les essais devront être réalisés conformément :

- À la norme EN 50317:2018, procédure de mesure 2.1.1
- À la norme EN 50318:2018 (§6.3)
- Aux recommandations issues du projet européen PantoTrain

Conditions d'essais

Les essais devront être réalisés :

- Avec et sans instrumentation du pantographe

- Pour une hauteur de déploiement fixée à 1,5 m
- Avec une excitation contrôlée permettant d'explorer la réponse dynamique du système

Pour chaque fréquence testée, les mesures devront être répétées au minimum trois fois afin de garantir la robustesse des résultats.

Domaine fréquentiel et résolution

La caractérisation devra couvrir une plage fréquentielle étendue :

- De la basse fréquence jusqu'à 70 Hz, ou la fréquence maximale atteignable par le banc si cette valeur ne peut être atteinte

Les pas fréquentsiels devront être définis comme suit :

- Jusqu'à 20 Hz : conformément aux recommandations normatives
- De 20 Hz à 70 Hz : pas de 2 Hz
- Au voisinage des pics de résonance : pas réduit jusqu'à 0,5 Hz

Conditions d'excitation

L'excitation devra être définie de manière à obtenir une réponse représentative du comportement dynamique du pantographe :

- Excitation harmonique contrôlée
- Amplitude fixée à ± 15 % de la force de contact moyenne

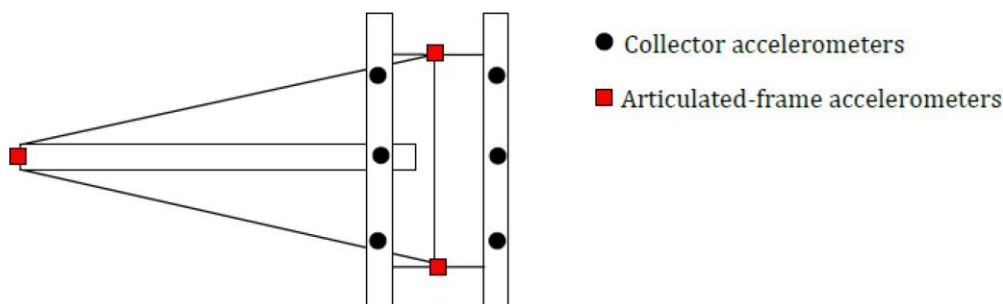
Positionnement des capteurs sur le pantographe

Les accéléromètres devront être positionnés sur le pantographe conformément à la procédure standard définie dans les référentiels normatifs applicables.

Le positionnement des capteurs devra permettre de caractériser de manière représentative le comportement dynamique du pantographe, notamment au niveau des zones critiques de transmission des efforts.

Une figure précisant l'implantation des capteurs sur le pantographe sera fournie par le client et devra être respectée par le prestataire.

Les accéléromètres doivent être placés sur le pantographe conformément à la procédure standard.



Exigences de mesure et d'acquisition

Les exigences suivantes devront être respectées :

- L'ensemble des signaux (entrées et sorties) devra être synchronisé
- Tous les signaux devront être échantillonnés à la même fréquence
- La fréquence d'échantillonnage devra être suffisamment élevée pour garantir au moins 10 points par période à la fréquence maximale

À titre indicatif, pour une fréquence maximale de 100 Hz, la fréquence d'échantillonnage devra être d'au moins 1 kHz.

Résultats attendus

Pour chaque pantographe testé, les résultats suivants devront être fournis :

- La fonction de transfert entre l'accélération au point de contact et la force appliquée (sous forme de tableaux et de figures)
- Un modèle dynamique équivalent à masses concentrées du pantographe
- Les mesures brutes de l'ensemble des capteurs, sous format MATLAB ou CSV (format MATLAB privilégié)

2.2.6.2. ESSAIS HYBRIDES

Les essais hybrides appliqués au système pantographe-caténaire consistent à coupler un sous-système physique testé en laboratoire avec un modèle numérique temps réel représentant la caténaire.

L'objectif est de reproduire fidèlement les conditions d'exploitation ferroviaire sans nécessiter la mise en œuvre d'une infrastructure réelle complète.

Principe technique

Le dispositif repose sur une architecture en boucle fermée de type HIL (Hardware-In-the-Loop), permettant le couplage en temps réel entre :

- Un pantographe réel instrumenté (sous-système physique)
- Un modèle numérique de caténaire (sous-système virtuel)

Le fonctionnement est basé sur les échanges suivants :

- Le modèle numérique calcule en temps réel la position et les efforts du fil de contact
- Ces conditions sont appliquées physiquement au pantographe via des actionneurs rapides
- Le pantographe réagit mécaniquement (déformations, vibrations)
- Les efforts mesurés sont renvoyés au modèle numérique afin d'ajuster la simulation

Ce couplage devra être réalisé en temps réel avec une précision et une stabilité compatibles avec les exigences de simulation dynamique.

Objectifs des essais

Les essais hybrides devront permettre :

- De reproduire fidèlement l'interaction dynamique pantographe-caténaire
- De tester des pantographes dans des conditions représentatives de l'exploitation, notamment à haute vitesse
- De fournir des données expérimentales pour le recalage et la validation de modèles numériques
- D'analyser le comportement du système dans des scénarios complexes ou perturbés

Sous-systèmes constitutifs

i. Sous-système physique : pantographe réel

Le pantographe sera monté sur un banc dynamique équipé :

- D'actionneurs électro-hydrauliques ou équivalents
- De capteurs de force, déplacement et accélération
- D'un système d'acquisition et de contrôle temps réel

ii. Sous-système numérique : caténaire virtuelle

La caténaire devra être modélisée numériquement, par exemple à l'aide de modèles :

- Multi-corps
- Ou éléments finis

Le modèle devra intégrer :

- Le fil de contact
- Les porteurs et pendules
- Les dispositifs de compensation

- Les éventuels défauts ou irrégularités

Couplage en temps réel

Le système devra assurer un couplage dynamique entre les sous-systèmes avec un pas de temps compatible avec les phénomènes étudiés.

À chaque itération :

- Le modèle numérique calcule la position instantanée du fil et les efforts associés
- Le banc applique ces efforts via les actionneurs
- Le pantographe réagit mécaniquement
- Les mesures sont renvoyées au modèle numérique

Le système devra garantir la synchronisation et la stabilité de cette boucle de calcul.

Typologie des configurations étudiées

Les essais devront couvrir deux types de matériels roulants :

- Trains à grande vitesse
- Trains régionaux, avec des vitesses comprises entre 160 et 250 km/h

2.2.7. PROGRAMME DES ESSAIS DYNAMIQUES SANS CAPTAGE DE COURANT

Les prestations comprennent la mise en œuvre d'un programme d'essais sur banc dynamique hybride, visant à caractériser le comportement dynamique des pantographes dans des conditions représentatives de l'exploitation ferroviaire.

Les essais porteront sur deux types de matériels roulants :

- trains à grande vitesse
- trains régionaux

2.2.7.1. ESSAIS SUR TRAINS A GRANDE VITESSE

Le programme d'essais comprendra :

- La caractérisation vibratoire de deux pantographes
- La simulation de trajets représentatifs, incluant des variations de vitesse

Ces essais incluront :

- 40 trajets simulés
- D'une durée maximale de 2 heures par trajet
- Couvrant une plage de vitesse de 0 à 400 km/h

L'ensemble de ces prestations correspondra à :

- 25 journées d'essais sur banc dynamique hybride

2.2.7.2. ESSAIS SUR TRAINS REGIONAUX

Le programme d'essais comprendra :

- La caractérisation vibratoire de deux pantographes
- La simulation de trajets représentatifs

Ces essais incluront :

- 40 trajets simulés
- D'une durée maximale de 2 heures par trajet
- Couvrant une plage de vitesse de 0 à 250 km/h

L'ensemble de ces prestations correspondra à :

- 25 journées d'essais sur banc dynamique hybride

2.2.7.3. SYNTHESE DU PROGRAMME

Le programme global représente :

- 50 journées de mise à disposition du banc d'essais dynamique hybride

Le prestataire devra proposer une organisation des essais permettant de respecter ce volume, en garantissant :

- La qualité des mesures
- La reproductibilité des résultats
- La cohérence des conditions expérimentales

2.2.8. LIVRABLES

Le prestataire devra fournir l'ensemble des éléments permettant l'exploitation, l'analyse et la valorisation des essais réalisés.

2.2.8.1. DONNEES EXPERIMENTALES

Le prestataire devra fournir :

- Les données brutes issues de l'ensemble des capteurs
- les données synchronisées et prétraitées
- Les historiques temporels complets des essais

Les données devront être fournies sous format numérique exploitable, notamment :

- fichiers MATLAB (format privilégié)
- ou fichiers CSV

2.2.8.2. RESULTATS DE CARACTERISATION VIBRATOIRE

Pour chaque pantographe testé, le prestataire devra fournir :

- Les fonctions de transfert entre les grandeurs mesurées, notamment entre l'accélération et la force
- Les courbes associées (amplitude et phase)
- Les tableaux de résultats correspondants

2.2.8.3. MODELISATION

Le prestataire devra fournir :

- Un modèle dynamique équivalent du pantographe, de type modèle à masses concentrées
- Les paramètres identifiés associés à ce modèle

2.2.8.4. RAPPORTS D'ESSAIS

Des rapports d'essais détaillés devront être fournis, incluant :

- La description des configurations testées
- Les conditions expérimentales
- Les paramètres d'essais appliqués
- Les résultats obtenus
- Une première analyse des comportements observés

2.2.8.5. SYNTHESE ET EXPLOITATION DES RESULTATS

Le prestataire devra fournir des éléments de synthèse permettant :

- L'interprétation des phénomènes dynamiques observés
- Le recalage et la validation de modèles numériques
- L'identification des paramètres influents sur le comportement du système

2.3. ESSAIS DE CAPTAGE DE COURANT EN CONDITIONS STATIQUES

2.3.1. DESCRIPTION DU MOYEN D'ESSAI

Les essais de captage de courant en conditions statiques ont pour objectif de simuler le comportement d'un pantographe à l'arrêt sous une section électrifiée d'infrastructure, notamment dans le cadre de la fiabilisation de la norme EN 50367 :2020.

Ces essais visent à reproduire, dans un environnement contrôlé, les conditions de captage de courant à l'arrêt, telles que rencontrées lors des phases de recharge de trains à batteries.

Ils ont pour finalité :

- D'évaluer la qualité du contact électrique en conditions statiques
- D'analyser la stabilité du transfert de courant
- de caractériser les phénomènes d'échauffement
- D'identifier les configurations optimales en termes de matériaux et d'états de surface

En particulier, les essais permettront d'étudier l'influence des textures et des niveaux de rugosité initiaux des surfaces en contact (bandes de captage et fils de contact) sur les performances de transfert électrique, afin d'optimiser :

- la résistance de contact
- la stabilité du courant
- la dissipation thermique
- la durabilité des interfaces

Le dispositif d'essais devra permettre de simuler une section électrifiée comprenant un ou deux conducteurs, sous laquelle sera positionné un pantographe instrumenté.

Le banc devra permettre de reproduire les conditions de captage à l'arrêt en environnement contrôlé, en assurant :

- L'application d'un effort de contact maîtrisé
- La mise en tension mécanique réglable du ou des conducteurs
- La mesure continue de la résistance électrique de contact, dès l'établissement du contact
- La maîtrise et la régulation de la température ambiante

Les essais porteront sur différents composants en interaction :

- Fils de contact
- Bandes de captage

La fourniture des échantillons (fils de contact et bandes de captage) sera à la charge du client.

2.3.2. FONCTIONNALITES ET PERFORMANCES

Le banc d'essais devra permettre de reproduire de manière contrôlée les conditions de captage de courant en régime statique, représentatives des situations de recharge à l'arrêt.

Les performances attendues sont détaillées ci-après.

2.3.2.1. SECTION ELECTRIFIEE

La section électrifiée devra permettre de reproduire différentes configurations de caténaires.

Elle comprendra :

- Un ou deux fils de contact d'un système caténaire flexible, avec :
 - Un écartement variable de 250 mm à 1800 mm
 - Un écart altimétrique compris entre 0 et 20 mm entre les deux fils
 - Une flexibilité statique identique aux caténaires conformes aux spécifications STI
- Un ou deux fils de contact de caténaire rigide, avec :
 - Une orientation variable
 - Un entraxe variable

2.3.2.2. GENERATEUR DE COURANT

Le banc d'essais devra comprendre un générateur de courant permettant d'alimenter chaque fil de contact.

Les caractéristiques attendues sont les suivantes :

- Intensité : 0 à 2704 A DC
- Tension : 0 à 80 V DC
- Puissance : 0 à 72 kW

Le générateur devra permettre :

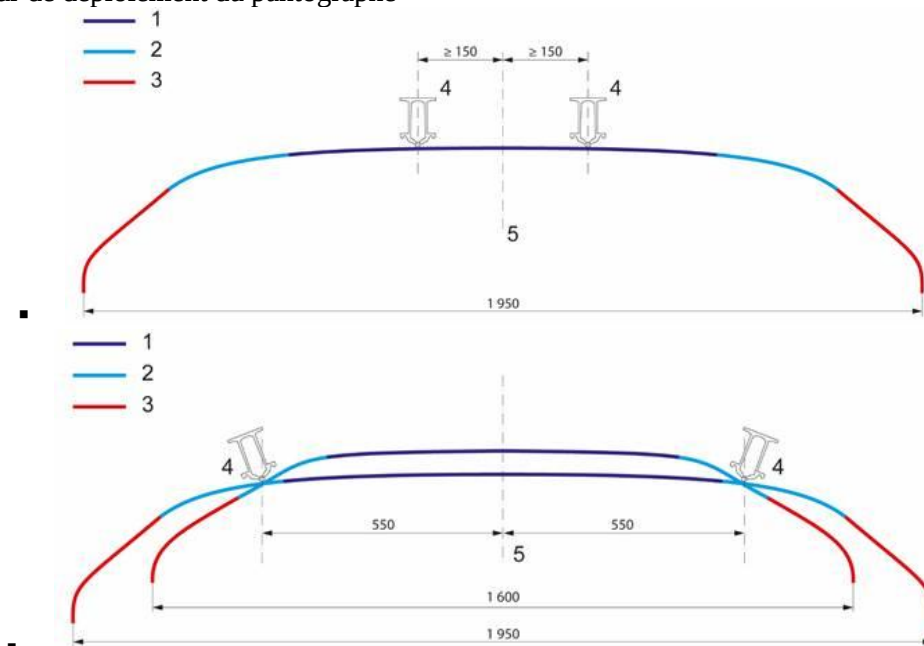
- Un fonctionnement en courant continu
- La variation de l'intensité, de la forme et de la fréquence du courant

2.3.2.3. PANTOGRAPHE INSTRUMENTE

Le banc d'essais devra comprendre un dispositif permettant de maintenir des bandes de captage et de créer une force de contact maîtrisée.

Ce dispositif sera constitué d'un pantographe instrumenté présentant les caractéristiques suivantes :

- 6 thermocouples sous chaque bande de captage
- 4 capteurs d'intensité de courant à effet Hall (1000 A) pour une tête de pantographe
- 2 capteurs d'effort par bande de captage
- Capteurs de déplacement et accéléromètres sur chaque plongeur en extrémité des bandes de captage (4 capteurs)
- Capteur de déploiement du pantographe



2.3.2.4. CENTRALE D'ACQUISITION DES DONNEES

Le banc d'essais devra disposer d'une centrale d'acquisition permettant :

- 48 voies de mesure en température pour le ou les fils de contact

Mesures sur le pantographe :

- 4 efforts
- 4 intensités de courant
- 4 déplacements (enfonceur plongeur)
- 4 accéléromètres
- 8 voies thermocouples

2.3.2.5. CENTRALE DE PILOTAGE DES ESSAIS

Le banc d'essais devra être équipé d'une centrale de pilotage permettant :

- De définir les paramètres d'essais
- De piloter les conditions expérimentales
- De visualiser en temps réel les résultats des essais

2.3.2.6. ÉTATS DE SURFACE ET MATERIAUX

Le banc d'essais devra permettre l'étude de l'influence des matériaux et des états de surface des interfaces de contact.

À ce titre, il devra être possible de tester :

- Différentes typologies de fils de contact
- Différentes bandes de captage
- Des surfaces présentant différents niveaux de rugosité et de texture

Le dispositif devra permettre d'identifier les configurations optimales en termes de :

- Résistance de contact
- Stabilité du transfert de courant
- Echauffement
- Durabilité des surfaces

2.3.3. INSTRUMENTATION ET MOYENS DE MESURE

Le prestataire devra assurer la mise en œuvre des moyens de mesure et d'exploitation des données permettant l'analyse des phénomènes électriques, thermiques et mécaniques au niveau du contact pantographe-caténaire en conditions statiques.

Les mesures devront être synchronisées et permettre une analyse temporelle cohérente des essais.

2.3.3.1. MESURES ELECTRIQUES

Le dispositif devra permettre :

- La mesure continue de la résistance électrique de contact, dès l'établissement du contact
- La mesure des chutes de tension aux interfaces
- La mesure de l'intensité du courant injecté
- L'analyse de la stabilité du transfert de courant au cours du temps

Ces mesures devront être réalisées avec une résolution suffisante pour détecter les variations locales du contact électrique.

2.3.3.2. MESURES THERMIQUES

Les moyens de mesure devront permettre :

- Le suivi de la température des bandes de captage
- Le suivi de la température du ou des fils de contact
- Le suivi de la température ambiante

Les mesures devront permettre d'analyser :

- Les gradients thermiques
- Les phénomènes d'échauffement localisé
- L'évolution thermique en fonction du courant et du temps

2.3.3.3. MESURES MECANIQUES

Le dispositif devra permettre :

- La mesure de la force de contact appliquée
- Le suivi de la stabilité de cette force dans le temps
- La vérification du maintien des conditions de contact

2.3.3.4. ANALYSE DU CONTACT ELECTRIQUE

Les données acquises devront permettre d'analyser :

- la qualité du contact électrique
- Les fluctuations de résistance de contact
- les phénomènes d'instabilité du contact

2.3.3.5. CARACTERISATION DES ETATS DE SURFACE

Le dispositif devra permettre la caractérisation des surfaces avant et après essais afin d'évaluer l'évolution des interfaces de contact.

Les analyses porteront notamment sur :

- Les niveaux de rugosité
- Les textures de surface
- Les éventuelles dégradations (usure, marquage, modification des aspérités)

Ces caractérisations devront permettre de corréler les états de surface aux performances de captage en conditions statiques.

2.3.4. PARAMETRES D'ESSAIS

Lors de la réalisation des essais, les paramètres suivants devront pouvoir être définis et contrôlés par l'utilisateur.

2.3.4.1. PARAMETRES ELECTRIQUES

- Intensité du courant appliqué
- Type de courant (continu ou alternatif)
- Profil de courant (montée, palier, descente)
- Durée d'application du courant

2.3.4.2. PARAMETRES MECANQUES

- Force de contact appliquée entre le pantographe et le ou les fils de contact
- Position du point de contact sur la bande de captage
- Configuration géométrique de la section électrifiée (nombre de fils, écartement, altimétrie)
- Tension mécanique appliquée au(x) fil(s) de contact

2.3.4.3. PARAMETRES THERMIQUES ET ENVIRONNEMENTAUX

- Température ambiante
- Conditions de régulation thermique
- Durée d'exposition aux conditions de courant

2.3.4.4. PARAMETRES LIES AUX MATERIAUX ET AUX ETATS DE SURFACE

- Nature des matériaux des fils de contact
- Nature des matériaux des bandes de captage
- Niveaux de rugosité initiaux des surfaces
- Types de textures de surface

2.3.5. DOMAINE DES PARAMETRES D'ESSAIS

Les essais seront réalisés en faisant varier les paramètres définis à la section 6.4 selon les domaines ci-après.

Deux plans d'expérience complémentaires sont définis :

- Un plan d'expérience principal, représentatif des conditions de fonctionnement du système pantographe-caténaire
- Un plan d'expérience spécifique dédié à l'étude contrôlée des états de surface

2.3.5.1. PLAN D'EXPERIENCE 1 — CONDITIONS REPRESENTATIVES DU SYSTEME

Ce plan d'expérience vise à caractériser le comportement global du système pantographe-caténaire en conditions de captage de courant à l'arrêt.

Les paramètres étudiés sont les suivants :

a) Configuration du fil de contact

- Type de fil en section : 2 configurations
- Matériau :
 - Cuivre pur
 - Cuivre + étain
 - Cuivre + argent
- État :
 - Fil neuf
 - Fil usé intermédiaire
 - Fil usé à la limite de remplacement

b) Bande de captage

Les bandes de captage étudiées seront :

- Carbone pur
- Carbone imprégné 30 %
- Carbone imprégné 60 %
- Bande haute intensité à inserts
- Bande cuivre-acier

c) Paramètres électriques

- Intensité du courant :
 - 100 A
 - 200 A
 - 300 A
 - 400 A
 - 500 A

d) Paramètres mécaniques

- Force de contact :
 - 70 N
 - 90 N
 - 110 N
 - 140 N
- Tension mécanique du fil :
 - 500 daN
 - 750 daN
 - 1000 daN
 - 1250 daN
 - 1500 daN

e) Conditions thermiques

- Température ambiante régulée (valeur fixée pour les essais)

La combinaison exhaustive de ces paramètres représente un nombre très élevé de configurations expérimentales.

Le programme d'essais sera structuré de manière progressive et optimisée, conformément à la section 6.6.

2.3.5.2. PLAN D'EXPERIENCE 2 — ÉTUDE CONTROLEE DES ETATS DE SURFACE

Ce plan d'expérience vise à isoler et quantifier l'influence des états de surface sur les performances de captage en conditions statiques.

a) Configuration expérimentale

Les essais seront réalisés avec :

- Une bande de captage en carbone pur

Les fils de contact (caténaire) seront réalisés en :

- Cuivre pur, avec texturation contrôlée des surfaces

Les fils de contact présenteront trois états d'usure :

- Fil neuf
- Fil présentant un méplat de 3 mm
- Fil présentant un méplat de 8 mm

Chaque configuration sera répétée 3 fois afin d'assurer la reproductibilité des résultats.

b) Texturations étudiées

Les surfaces du fil de contact seront texturées de manière contrôlée selon deux familles morphologiques :

- Surfaces à texture gaussienne aléatoire isotrope
- Surfaces à texture structurée de type créneau

Chaque famille sera déclinée selon les combinaisons suivantes :

- Amplitude de rugosité (S_q) : $x \mu\text{m} / x \mu\text{m} / x \mu\text{m}$
- Longueur d'auto-corrélation (Sal) : $x \mu\text{m} / x \mu\text{m} / x \mu\text{m}$

Ce plan conduit à :

- 9 textures gaussiennes
- 9 textures structurées

Soit un total de :

- **18 texturations distinctes**, complétées par une surface de référence non texturée

Exigences de réalisation des surfaces

Le procédé de texturation devra permettre de produire des surfaces sur cuivre pur conformes aux spécifications définies selon la norme ISO 25178.

i. Surfaces gaussiennes

Les surfaces devront vérifier :

- ($|S_{sk}| < 0,2$)
- ($2\{, \}5 < S_{ku} < 3,5$)
- Isotropie de texture ($Str > 0,7$)
- Fonction d'autocorrélation compatible avec une décroissance gaussienne
- Absence de pics dominants dans la densité spectrale (PSD)

Surfaces structurées de type créneau

Les surfaces devront présenter :

- Une distribution de hauteurs non gaussienne (bimodale)
- Une fonction d'autocorrélation présentant des oscillations marquées
- Une densité spectrale (PSD) présentant des pics caractéristiques
- Une périodicité compatible avec la valeur de (Sal)

Exigences métrologiques

Les surfaces produites devront être caractérisées par des mesures de topographie 3D conformes à la norme ISO 25178.

Les paramètres suivants devront être respectés :

- (Sq) : valeur cible $\pm 10\%$
- (Sal) : valeur cible $\pm 10\%$

Validation des surfaces

Le soumissionnaire devra proposer :

- Une méthode de mesure
- Un protocole de traitement des données
- Des indicateurs permettant de valider la nature gaussienne ou structurée des surfaces

Les résultats devront inclure :

- Cartes 3D de surface
- Histogrammes de hauteur
- Fonctions d'autocorrélation
- Densités spectrales (PSD)

Objectifs du plan d'expérience

Ce plan permettra :

- D'isoler l'effet des paramètres de rugosité et de texture sur la résistance de contact
- D'analyser l'influence des signatures morphologiques sur les phénomènes d'échauffement
- D'étudier le comportement du contact carbone / cuivre pur texturé
- D'identifier des états de surface optimaux pour le captage statique

2.3.6. PROGRAMME DES ESSAIS ET PLANS D'EXPERIENCE

Le programme d'essais est structuré selon deux plans d'expérience complémentaires permettant de caractériser :

- Le comportement global du système pantographe-caténaire
- L'influence des états de surface sur le contact électrique

2.3.6.1. PLAN D'EXPERIENCE 1 — METHODE DE SELECTION DES CONFIGURATIONS

Le plan d'expérience 1 est issu d'un espace factoriel complet théorique de **9000 configurations**. Afin de rendre le programme expérimental compatible avec le volume d'essais imposé (environ 1100 essais), une stratégie de sélection structurée des configurations est mise en œuvre.

Cette stratégie repose sur un **plan hybride combinant** :

a) Noyau factoriel réduit

Un plan factoriel fractionnaire est construit à partir de niveaux représentatifs des paramètres électriques et mécaniques (niveaux bas, intermédiaires et élevés).

Ce noyau permet :

- De conserver l'ensemble des facteurs étudiés
- D'estimer les effets principaux
- D'identifier les interactions dominantes

i. Définition des 9 cas (C1 → C9)

Cas	Courant (A)	Force (N)	Tension (daN)
-----	-------------	-----------	---------------

C1	100	70	500
C2	300	110	1000
C3	500	140	1500
C4	100	140	1000
C5	500	70	1000
C6	300	70	1500
C7	300	140	500
C8	100	110	1500
C9	500	110	500

Pour chaque combinaison (section, matériau, état, bande), trois configurations de paramètres électriques et mécaniques sont associées.

Ces configurations sont sélectionnées parmi un ensemble de neuf cas représentatifs couvrant les niveaux faibles, intermédiaires et élevés de courant, de force et de tension.

L'affectation des cas est réalisée selon une règle systématique de permutation circulaire, permettant :

- Une répartition homogène des conditions expérimentales
- Une couverture équilibrée de l'espace des paramètres
- L'absence de biais dans la sélection des configurations

Cette approche garantit que l'ensemble des combinaisons (courant, force, tension) est représenté de manière équivalente sur l'ensemble des configurations étudiées.

Ce que ça garantit

- ✓ Chaque cas (C1 à C9) est utilisé autant de fois
- ✓ Aucune combinaison n'est biaisée
- ✓ Couverture homogène
- ✓ Très facile à coder / vérifier

Volume du noyau : 270 configurations

Exemple

Chaque ligne = 1 configuration

ID	Section	Matériau	État	Bande	Cas	Courant	Force	Tension
1	S1	Cu pur	Neuf	B1	C1	100	70	500
2	S1	Cu pur	Neuf	B1	C4	100	140	1000
3	S1	Cu pur	Neuf	B1	C7	300	140	500
4	S1	Cu pur	Neuf	B2	C2	300	110	1000
5	S1	Cu pur	Neuf	B2	C5	500	70	1000
6	S1	Cu pur	Neuf	B2	C8	100	110	1500
7	S1	Cu pur	Neuf	B3	C3	500	140	1500
8	S1	Cu pur	Neuf	B3	C6	300	70	1500
9	S1	Cu pur	Neuf	B3	C9	500	110	500

b) Points extrêmes

Des configurations spécifiques sont ajoutées afin d'explorer les conditions les plus contraignantes, notamment :

- Combinaisons de courant maximal et de force élevée
- Conditions mécaniques extrêmes

Ces points permettent de capturer les comportements limites du système.

i. Cas extrêmes — Logique de construction des configurations

En complément du noyau expérimental, des configurations dites « extrêmes » sont introduites afin d'explorer de manière ciblée les limites du domaine des paramètres.

Contrairement au noyau, qui repose sur une couverture homogène de l'espace, les cas extrêmes sont construits à partir de règles de sélection visant à forcer certaines combinaisons critiques.

Principe de construction

Pour chaque configuration extrême :

- Les paramètres électriques et mécaniques sont choisis parmi les combinaisons les plus contraignantes, notamment :
 - Courant élevé
 - Force de contact élevée
 - Tension mécanique élevée ou faible

Les cas retenus correspondent aux configurations suivantes :

- C3 : courant élevé – force élevée – tension élevée
- C5 : courant élevé – force faible – tension intermédiaire
- C7 : courant intermédiaire – force élevée – tension faible

Règle d'affectation

Les cas extrêmes sont affectés de manière systématique selon une logique de balayage des combinaisons physiques :

- On parcourt les combinaisons (section, matériau, état, bande)
- À chaque combinaison est associé un cas extrême, selon une rotation cyclique entre C3, C5 et C7

Cependant, afin de maintenir un volume d'essais compatible avec le programme global, toutes les combinaisons ne sont pas retenues.

Une sélection de combinaisons physiques est réalisée de manière à garantir :

- La présence de toutes les sections
- La représentation des trois matériaux
- La couverture des trois états d'usure
- La présence de l'ensemble des bandes de captage

Justification du nombre de configurations

Le nombre de cas extrêmes est fixé à : 50 configurations

Ce choix correspond à :

- Plus de 50 % des combinaisons physiques possibles (90)
- Une couverture suffisante pour :
 - Tous les matériaux
 - Tous les états d'usure
 - Toutes les bandes

tout en limitant le volume total d'essais.

Ce que ça garantit

- ✓ Exploration des conditions limites du système
- ✓ Répartition homogène des contraintes sévères
- ✓ Absence de biais dans le choix des configurations
- ✓ Détection des comportements critiques

Volume associé : 50 configurations

Exemple

ID	Section	Matériau	État	Bande	Cas	Courant	Force	Tension
...	...	...						
271	S1	Cu pur	Neuf	B1	C3	500	140	1500
272	S1	Cu pur	Neuf	B2	C5	500	70	1000
273	S1	Cu pur	Neuf	B3	C7	300	140	500
274	S1	Cu pur	Neuf	B4	C3	500	140	1500
275	S1	Cu pur	Neuf	B5	C5	500	70	1000
...	...	...						

c) Points centraux

Des configurations centrales sont introduites afin :

- d'évaluer la répétabilité des mesures
- de détecter d'éventuelles non-linéarités
- de fournir des références expérimentales

i. Principe de construction

Les paramètres électriques et mécaniques sont fixés à des valeurs intermédiaires :

- Courant : 300 A
- Force : 110 N
- Tension : 1000 daN

Ces valeurs correspondent au centre du domaine expérimental.

Règle d'affectation

Contrairement au noyau et aux cas extrêmes :

- les points centraux sont appliqués de manière exhaustive à toutes les combinaisons :
☞ (matériau × état × bande)

La section du fil peut être fixée sans perte de représentativité, les effets principaux étant portés par les autres facteurs.

Justification du nombre de configurations

Le nombre de configurations est directement issu du produit des facteurs considérés :

$$3 \text{ matériaux} \times 3 \text{ états} \times 5 \text{ bandes} = 45$$

☞ 45 configurations

Ce choix permet :

- De couvrir l'ensemble des situations matériau × état × bande
- De disposer d'un nombre suffisant de points pour l'analyse statistique
- D'assurer une base de comparaison homogène pour tous les essais

Ce que ça garantit

- ✓ Référence commune pour toutes les configurations
- ✓ Mesure de la répétabilité expérimentale
- ✓ Détection des non-linéarités
- ✓ Comparaison directe entre matériaux et bandes

Volume associé : 45 configurations

Exemple

ID	Section	Matériau	État	Bande	Cas	Courant	Force	Tension
321	S1	Cu pur	Neuf	B1	C2	300	110	1000
322	S1	Cu pur	Neuf	B2	C2	300	110	1000
323	S1	Cu pur	Neuf	B3	C2	300	110	1000
324	S1	CuSn	50%	B1	C2	300	110	1000
325	S1	CuAg	Limite	B5	C2	300	110	1000

Volume total

L'ensemble de ces configurations conduit à :

- environ 350 configurations distinctes

Chaque configuration étant répétée trois fois, le nombre total d'essais est ≈ 1050 à 1100 essais

2.3.6.2. PLAN D'EXPERIENCE 2 — ÉTUDE DES ETATS DE SURFACE

Le plan d'expérience 2 vise à isoler l'influence des paramètres morphologiques des surfaces sur le contact électrique.

a) Tableau — Synthèse des conditions expérimentales (texturation)

Paramètre	Modalités	Nombre de niveaux
Type de texture	Gaussienne isotrope / Structurée type créneau	2
Amplitude S_q (μm)	1 / 5 / 10	3
Longueur d'auto-corrélation S_{al} (μm)	20 / 50 / 100	3
Nombre de texturations	9 gaussiennes + 9 structurées	18
Surface de référence	Surface non texturée	+1
Bande de captage	Carbone pur	1
État du fil de contact	Neuf / Méplat 3 mm / Méplat 8 mm	3
Répétitions	3 essais par configuration	3
Nombre total d'essais	$19 \times 3 \times 3$	171 essais

Lecture du plan d'expérience

Le plan d'expérience comprend :

- 18 texturations contrôlées (9 gaussiennes et 9 structurées)
- Une surface de référence non texturée

Chaque configuration est testée :

- Pour trois états du fil de contact
- Avec trois répétitions

2.3.6.3. CONDITIONS DE REALISATION DES ESSAIS

Afin de garantir la reproductibilité et la comparabilité des résultats, les essais devront respecter les principes suivants :

- À chaque essai, une nouvelle zone de la bande de captage sera mise en contact
- De même, une nouvelle zone du fil de contact (ou de la caténaire texturée) sera utilisée
- Aucune zone déjà sollicitée ne devra être réutilisée

Ces dispositions visent à garantir :

- Des conditions initiales identiques pour chaque essai
- L'absence d'influence de l'usure cumulative
- Une interprétation fiable des résultats

2.3.6.4. 6.6.4 SYNTHÈSE GLOBALE DU PROGRAMME

Le programme d'essais comprend :

- Plan d'expérience 1 : environ 1100 essais
- Plan d'expérience 2 : 171 essais

Nombre total d'essais : $\approx$ 1270 essais.

ARTICLE 5 : PRIX ET REGLEMENT DES COMPTES

Les prestations sont réglées par un prix ferme selon les stipulations de l'acte d'engagement.

Le prix doit être précisé dans l'acte d'engagement en chiffres et en lettres, en HT et TTC ainsi que sur l'annexe financière qui comprend l'ensemble des frais.

En cas d'ajout de prestations engendrant une modification du prix, à la baisse ou à la hausse, les parties actent le/les ajout(s) par avenant. L'acte doit obligatoirement être signé des deux parties.

Au vu de la durée réduite du marché en ce qu'il porte sur la livraison de l'équipement, le prix de règlement est le prix de l'offre.

En application des articles R.2112-11 et suivants du Code de la Commande Publique, une actualisation du prix peut être demandée si le marché est d'un délai supérieur à trois (3) mois entre la date à laquelle le soumissionnaire a fixé son prix dans son offre et la date de début d'exécution des prestations.

L'actualisation se fera aux conditions économiques correspondant à une date antérieure de trois (3) mois à la date de début d'exécution des prestations, en référence à l'indice CPF correspondant publié par l'INSEE.

ARTICLE 6 - MODALITES DE REGLEMENT ET DE FACTURATION

6.1. GARANTIES FINANCIERES

Aucune clause de garantie financière ne sera appliquée.

6.2. AVANCE

Il est fait application des articles R. 2191-16 et -17 du Code de la Commande Publique.

6.3. MODALITES DE REGLEMENT

Le règlement correspond à la réalisation des prestations.

Les paiements sont effectués selon les règles de la comptabilité publique, après vérification du service fait, sur présentation de factures.

Conformément aux articles L2192-1 et suivants du Code de la Commande Publique, la transmission des factures des titulaires de marché doit s'effectuer sous forme électronique.

L'utilisation du portail de facturation Chorus Pro est exclusive de tout autre mode de transmission. L'accès au portail chorus Pro se fait par l'adresse suivante : <https://chorus-pro.gouv.fr>.

Lorsqu'une facture est transmise en dehors de ce portail, le pouvoir adjudicateur peut la rejeter après avoir rappelé cette obligation à l'émetteur et l'avoir invité à s'y conformer.

Information à utiliser pour la facturation électronique : SIRET
UPHF :

130 025 745
00014

La date de réception d'une demande de paiement transmise par voie électronique correspond à la date de notification du message électronique informant le pouvoir adjudicateur de la mise à disposition de la facture sur le portail de facturation (ou le cas échéant, à la date d'horodatage de la facture par le système

d'informatisation budgétaire et comptable de l'Etat pour une facture transmise par échange de données informatisé).

Sans préjudice des mentions obligatoires fixées par les dispositions législatives ou réglementaires, les factures électroniques transmises par les titulaires comportent les mentions suivantes :

- Le nom du service émetteur du bon de commande ;
- Le nom et l'adresse du créancier ;
- Son numéro d'identification SIREN ou SIRET ;
- Le détail des prestations et quantités ;
- La date et le lieu d'exécution ;
- Le montant des prestations exécutées en HT et TTC ;
- Le(s) taux et le(s) montant(s) de TVA ;
- La référence du marché ;
- Les références et la date du bon de commande ;
- La date de délivrance et le numéro de la facture.

En cas de changement de raison sociale ou de RIB, le titulaire est tenu d'en informer expressément le pouvoir adjudicateur par courrier postal ou électronique.

6.4. REGIME DES PAIEMENTS

Conformément à l'article R. 2192-10 du code de la commande publique, le règlement des prestations intervient par virement administratif dans un délai de trente (30) jours à compter de la réception de la facture.

Le défaut de paiement dans ce délai fait courir de plein droit et sans formalité :

- Des intérêts moratoires, dont le taux est égal au taux d'intérêt appliqué par la Banque centrale européenne à ses opérations principales de refinancement les plus récentes, en vigueur au premier jour du semestre de l'année civile au cours duquel les intérêts moratoires ont commencé à courir, majoré de huit (8) points ;
- Une indemnité forfaitaire pour frais de recouvrement d'un montant de quarante (40) euros.

Ce délai peut être suspendu si le pouvoir adjudicateur constate que la demande de paiement ne comporte pas l'ensemble des pièces et des mentions prévues par la loi ou par l'accord-cadre ou que celles-ci sont erronées ou incohérentes.

ARTICLE 7 – PENALITES

Il est fait application de l'article 14.1 du CCAG.FCS.

ARTICLE 8 – CONDITIONS D EXECUTION

Les prestations devront être conformes aux stipulations du marché (les normes et spécifications techniques applicables étant celles en vigueur à la date du contrat).

NOTIFICATION PAR LE BIAIS DU PROFIL D'ACHETEUR

La notification d'une décision, observation ou information faisant courir un délai peut être effectuée par le biais du profil d'acheteur conformément aux dispositions de l'article 3.1 du CCAG-FCS.

GENERALITES

Les prestations doivent être conformes aux stipulations du marché, les normes et spécifications techniques applicables étant celles en vigueur à la date du marché. Le titulaire s'engage à exécuter l'ensemble des prestations conformément aux dispositions du présent CCP.

Il s'engage également à appliquer la législation et la réglementation applicables au marché, qu'il est réputé connaître et s'engage à les mettre en application en cas d'évolution.

Le titulaire désigne dès le début du marché les noms et coordonnées d'une ou plusieurs personnes chargées de le représenter pour l'exécution des prestations. En cas d'empêchement ou de remplacement de ces représentants, le titulaire en informe l'UPHF et indique les coordonnées d'un nouveau représentant.

Le titulaire doit informer le pouvoir adjudicateur, par écrit et sans délai, de toute modification importante concernant le fonctionnement de l'entreprise pouvant influencer sur le déroulement de l'exécution du marché. Par conséquent, selon la nature du changement, un avenant sera ou non obligatoire.

Le titulaire s'engage à ce que son personnel dispose d'un niveau de formation et de qualification approprié tel que défini au présent marché.

OBLIGATION DE DISCRETION- SECRET PROFESSIONNEL

Le titulaire est tenu de maintenir pour confidentielle toute communication de renseignements, documents ou objets quelconques, reçue à titre confidentiel, à l'occasion de l'exécution du marché. Ces renseignements documents ou objets quelconques ne peuvent, sans autorisation de la personne responsable du marché, être communiqués à d'autres personnes étrangères à l'exécution du marché. Il en est de même de tout renseignement de même nature, parvenu à la connaissance du titulaire à l'occasion de la livraison de la fourniture ou de l'exécution du service.

En conséquence, le titulaire s'engage à informer son personnel qu'il est astreint aux mêmes obligations susmentionnées.

Ces obligations de discrétion et de secret professionnel s'appliquent pendant et après l'exécution du marché.

ARTICLE 8 - SERVICE MINIMAL

En cas de grève et d'arrêt de travail de son personnel ou toute autre cause d'interruption des prestations, le titulaire est tenu d'assurer la continuité de l'exécution des prestations définies par le pouvoir adjudicateur.

ARTICLE 9 - LANGUES DES PRESTATIONS ET DES CORRESPONDANCES

Les correspondances relatives au marché seront rédigées en français. Les prestations vocales et écrites sont assurées en français.

En cas de correspondances écrites ou de prestations vocales réalisées dans une langue étrangère, ces dernières sont recevables uniquement si elles sont accompagnées d'une traduction en français certifiée conforme à l'original par un traducteur assermenté.

ARTICLE 10 - ASSURANCES

Dans un délai de quinze (15) jours à compter de la notification du présent marché, et tous les six (6) mois après le début d'exécution du marché, le titulaire devra justifier qu'il est couvert par un contrat d'assurance au titre de la responsabilité civile découlant des articles 1240 à 1242 du Code civil ainsi qu'au titre de sa responsabilité professionnelle, en cas de dommage occasionné par l'exécution du marché.

Il devra justifier d'une police d'assurance couvrant ces risques.

ARTICLE 11 : VERIFICATION ET ADMISSION

Le titulaire est soumis à une obligation générale de résultat. Celle-ci s'impose au titulaire dans l'exécution de ses engagements contractuels et pour l'intégralité des prestations décrites au marché.

Le titulaire s'engage à exécuter les prestations et à remettre les livrables associés avec le niveau de compétence professionnelle requis pour ce type de prestations, à consacrer tous les moyens humains et matériels nécessaires à sa bonne exécution, ainsi qu'à coopérer de bonne foi avec l'ensemble des intervenants amenés à participer.

Les prestations sont soumises à des vérifications quantitatives et qualitatives simples, destinées à constater qu'elles répondent aux stipulations du marché.

Il est fait application des articles 27 à 30 du CCAG FCS.

ARTICLE 12 : RESILIATION DU MARCHE

Il sera fait, le cas échéant, application des articles 38 et suivants du C.C.A.G-FCS.

ARTICLE 13 - DIFFERENDS ET LITIGES

Les stipulations de l'article 46 du CCAG-FCS sont seules applicables.

En cas de différends ou de litiges et à défaut de règlement amiable, le tribunal compétent est le Tribunal Administratif de Lille.

ARTICLE 14 : DEROGATIONS AU CCAG FCS

Néant