Cahier des clauses techniques particulières :

Acquisition d’une machine de fatigue servo hydraulique axiale-torsion de capacité maximale de 250kN/2500N.m

---

Marché n° 20260009

SOMMAIRE

1 NATURE DU PROJET 2

1.1 Objet : 2

1.2 Contexte : 2

2 NORMES APPLICABLES 2

3 RESUME DES PRESTATIONS DEMANDEES 2

4 DESCRIPTION DES SPECIFICATIONS TECHNIQUES 4

4.1 Contrôle commande 5

4.2 Acquisition des données 5

4.3 Essais de faisabilité 6

4.4 Démonstration 7

4.5 Livraison et installation de l'équipement 7

4.6 Formation et documentation 8

4.7 Garantie 8

5 EVALUATION DES OFFRES TECHNIQUES 8

5.1 Exigences techniques minimales 8

1 NATURE DU PROJET

1.1 Objet :

Ce projet a pour objet de permettre la consultation des entreprises susceptibles de fournir une machine de fatigue servohydraulique permettant de réaliser des essais de caractérisation mécaniques des matériaux et structures sous des chargements monotones ou cycliques de traction, compression et de torsion. La machine doit permettre d'appliquer des chargements uniaxiaux ou multiaxiaux combinant une charge axiale (traction ou compression) à une charge de torsion. Les chargements peuvent être purement alternés (rapport de charge R=-1) ou avec une contrainte moyenne (rapport de charge R≠-1).

Cet équipement est destiné à être utilisé dans le cadre des projets de recherche conduits à l'Institut de Recherche Dupuy de Lôme (IRDL UMR CNRS 6027) de l'ENSTA – IP Paris.

Cette consultation concerne une configuration « machine de sol ». L'ensemble des matériels proposé sera neuf.

1.2 Contexte :

1.2.1 L'ENSTA

Parmi les toutes meilleures Ecoles d'ingénieur de France, l'Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées (ENSTA), membre de l'Institut Polytechnique de Paris, est présente sur le campus de Paris-Saclay à Palaiseau ainsi que dans l'écosystème du Grand Ouest par son campus de Brest. Elle combine ainsi leurs forces et expertises, en formation et en recherche, pour relever les défis stratégiques de souveraineté dans un monde en quête de transformation et d'adaptation aux grands défis sociétaux : énergies durables, transports et mobilités, défense et sécurité, numérique, maritime, spatial, santé…

L'ENSTA Campus de Brest forme des ingénieurs civils et militaires capables d'assurer, dans un environnement international, la conception et la réalisation de systèmes industriels complexes à dominante électronique, informatique, mécanique, hydrographique ou pyrotechnique.

1.2.2 Le service « prescripteur »

Masmeca est une plate-forme technologique regroupant les moyens d'essais, d'analyse et de mesure à l'ENSTA - campus de Brest, permettant la caractérisation avancée des matériaux et des structures. Elle est adossée à l'Institut de recherche Dupuy De Lôme, une Unité Mixte de Recherche CNRS. L'IRDL est le laboratoire référent des systèmes mécaniques en Europe liées à l'ingénierie des matériaux et des systèmes utilisés dans les secteurs industriels liés à l'automobile, le génie civil, l'énergie, l'aéronautique, la santé, aux transports et plus particulièrement tous les domaines en interaction dynamique avec le milieu marin, telles que la construction navale et offshore, les énergies marines.

2 NORMES APPLICABLES

Tous les matériels, objets de la consultation, seront conformes aux normes CE applicables en France et relatives à la conception et la sécurité de ce type d'équipement.

3 RESUME DES PRESTATIONS DEMANDEES

Dans sa proposition financière et technique, le candidat devra :

1. Décrire et chiffrer la prestation à réaliser qui comprendra au minimum la fourniture et l'installation des éléments contractuels suivants :
    - Une machine d'essais de fatigue servohydraulique permettant de solliciter des éprouvettes sous un chargement cyclique uniaxial de traction/compression ou multiaxial de traction ou compression combinée à un chargement de torsion. La machine, équipée d'une cellule d'effort et de couple UNIQUE (même cellule mesurant la force et le couple), doit permettre d'appliquer des rampes quasi-statiques superposées aux sollicitations cycliques (dynamiques). La gamme d'effort souhaitée est de +/-250kN en traction/compression et de +/-2500N.m en couple de torsion. Les offres proposant des machines avec des capacités de charge différentes seront évaluées et la note attribuée à la gamme d'effort de la machine sera pondérée par rapport à aux valeurs souhaitées de 250kN et 2500N.m. Toutes les caractéristiques des vérins (axial et de torsion), des systèmes d'alimentation hydraulique et électrique, du système de fixation et de positionnement de la traverse et de l'ensemble des capteurs doivent être précisées ;
    - La machine doit être équipée d'un vérin hydraulique de traction couplé à un vérin de torsion (traction-torsion) et d'un pied de distribution hydraulique. Le pied de distribution hydraulique doit être équipé d'un filtre et doit posséder un mode basse pression dans lequel la pression est réduite et un mode haute pression pour la conduite des essais ;
    - Les deux vérins, de traction et de torsion, doivent être disposés du même côté du bâti. Idéalement sur la partie basse.
    - L'actionnement du vérin axial doit être piloté au minimum via deux servovalves axiales et une servovalve de torsion ;
    - Le vérin doit être équipé de paliers hydrostatiques pour garantir la reprise des efforts tangentiels. L'effort tangentiel maximal repris par le vérin doit être précisé ;
    - Le vérin doit être équipé des amortisseurs hydrauliques de fin de course pour garantir sa sécurité ;
    - L'accouplement des vérins axial et de torsion doit se faire sans jeu même dans le cas des chargements alternés couplés axial-torsion ;
    - Un jeu de mâchoires hydrauliques de capacité minimale qui correspond à la gamme d'effort et de couple de la machine (250kN, 2500N.m) permettant de tester des éprouvettes cylindriques de différents diamètres et des éprouvettes plates de différentes épaisseurs, avec deux jeux de cales interchangeables (un jeu de mors plats et un jeu de mors en Vé) sont demandées. La solution d'une station hydraulique externe avec une compensation de pression pour le serrage des mâchoires sera privilégiée ;
    - Les mors doivent permettre la reprise des charges en force et couple alternés et simultanés, de la capacité maximale de la machine (+/-250kN en effort et +/-2500Nm en couple)
    - Un système de pilotage, d'acquisition et de traitement de données (connectique, ordinateur et logiciel).
    - Le pilotage des deux vérins doit se faire sans compensation d'inertie des mors ou de montage d'essais ;
    - Un manuel d'utilisation du logiciel doit être fourni et l'encodage des données doit être précisé ;
    - Un module d'acquisition de données avec des entrées/sortie analogique 0-10V (minimum 4 sorties et 2 entrée demandées) avec un encodage minimum en 16 bits ; Le nombre de voies doit être précisé. Il est requis au minimum une sortie du signal de force, une sortie du signal de couple, une sortie du signal de déplacement et une sortie du signal d'angle ;
    - Trois voies entrée type extensomètre/ jauges de déformation minimum. Le type de montage (¼, ½ ou pont complet) doit contenir le conditionnement et la compensation de la dérive thermique et sera préciser avec le candidat retenu ;

- Le rapport signal sur bruit doit être indiqué pour toutes les voies entrée/sortie ;
- La livraison et l'installation de la machine ;
- La vérification métrologique COFRAC ou équivalent à l'installation ;
- La formation des utilisateurs (3 personnes) ;
- Une documentation technique de la machine (schémas hydrauliques, schémas électriques, module de commande et d'acquisition) et des capteurs intégrés (force et déplacement) ;

2. Préciser la résolution des capteurs : capteur d'effort (la classe du capteur d'effort le cas échéant), capteur de couple (la classe du capteur d'effort le cas échéant), le capteur de déplacement et le capteur d'angle ;
3. La cellule d'effort et de couple doit être dimensionnée à la fatigue aux capacités axiale et de couple maximales des deux vérins axial et de torsion ;
4. La cellule d'effort et de couple doit pouvoir supporter une surcharge statique en force et en couple. Les valeurs des surcharges (axiale et torsion) doivent être précisées ;
5. Les caractéristiques de la cellule d'effort et de couple doivent être précisées : résolution, hystérésis, compensation thermique, … ;
6. Préciser la gamme de fréquence de sollicitation, le cas échéant fournir la courbe fréquence maximale de sollicitation en fonction de la charge appliquée (force, déplacement, couple angle). La fréquence de résonnance à pleine charge de la machine doit être supérieure à la fréquence maximale de sollicitation ;
7. Préciser le seuil de détection d'une fissure (ou rupture) par la chute de rigidité ou de l'étendue crête-vallée ou toute autre possibilité de détection de perte de rigidité ;
8. Préciser l'amplitude du déplacement maximale à vide pour une fréquence égale à 50% de la fréquence de sollicitation maximale de la machine ;
9. Préciser le temps de montée en charge cyclique pour atteindre la consigne permettant d'éviter une surcharge lors des premiers cycles de sollicitation (voir fig. 1) ;
10. Préciser la plage de vitesses de déplacement du vérin sous un chargement monotone (vitesse maximale et vitesse minimale) ;
11. Préciser la course maximale du vérin axial (course minimale souhaitée 120mm) et la rotation maximale du vérin de torsion (course minimale souhaitée 80 degrés) ;
12. Préciser la rigidité du bâti de la machine ;
13. Préciser les caractéristiques des vérins d'entrainement de la traverse (charge maximale, vitesse minimale, vitesse maximale) ;
14. Préciser les dimensions de l'espace d'essais en termes de hauteur et de largeur hors mâchoires et autres accessoires ;
15. Préciser si la machine dispose d'une galette de réglage d'alignements ;
16. Préciser la fréquence maximale d'acquisition des données (une valeur minimale de 10kHz par voie d'acquisition est demandée) ;
17. Préciser le délai de livraison de la machine ;
18. Préciser la durée de garantie ;
19. Préciser l'alimentation électrique de la machine et la puissance électrique nécessaire pour son bon fonctionnement ;
20. Préciser le niveau du bruit généré par la machine en décibels (dB) et garantir le respect des normes en vigueur ;

4 DESCRIPTION DES SPECIFICATIONS TECHNIQUES

La machine sera installée dans un hall d'essais. La longueur de l'ensemble des câbles doit permettre de placer confortablement la station électronique de pilotage. La machine d'essais doit répondre aux exigences techniques suivantes :

4.1 Contrôle commande

1. Préciser le schéma du contrôle commande et la fréquence d'échantillonnage de la boucle d'asservissement ;
2. Préciser les modes de pilotage de la machine (effort, déplacement, déformation, couple, angle, pilotage via une voie entrée analogique/numérique externe)
3. Décrire les possibilités de programmation des méthodes/ procédures d'essais[1] et préciser les fonctionnalités principales du logiciel de pilotage ;
4. Préciser la procédure de calibration des essais : le fournisseur doit spécifier la méthode de réglage du PID et donner les valeurs recommandées pour quelques familles de matériaux (acier, aluminium, composite, polymères, …) ;
5. Préciser si le réglage automatique du PID est possible et si oui, la procédure de réglage ;
6. Préciser si le pilotage de la phase entre la charge axiale et de torsion est possible ;
7. Préciser le temps de montée en charge jusqu'à atteindre l'amplitude de chargement dynamique cible et garantir l'absence du dépassement de la consigne au début de l'essai (over load) ;
8. Préciser le temps de décharge à partir de l'arrêt de la sollicitation jusqu'au retour à la charge moyenne (voir fig. 1) ;

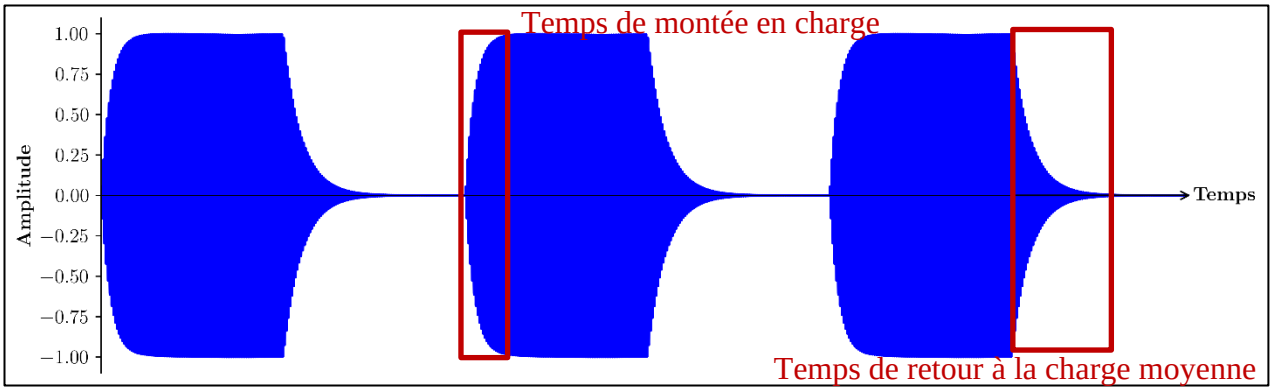


Figure 1 : Illustration du temps de montée en charge et de la phase de décharge

9. Détecter la présence d'une fissure de fatigue et proposer un critère d'arrêt de l'essai.

Le fournisseur doit préciser les caractéristiques du contrôleur et de l'ordinateur. Le logiciel de pilotage doit permettre la programmation d'essais, l'affichage en temps réels des données pertinentes en cours d'essais et l'export sous forme de fichiers texte (ou équivalent) afin d'en réaliser l'analyse. Le logiciel doit permettre de programmer et piloter les essais monotones ou de fatigue.
Toute fonctionnalité supplémentaire sera appréciée et prise en compte dans la notation.

4.2 Acquisition des données

10. Le module d'acquisition des données doit permettre au minimum l'acquisition simultanée de 4 voies de mesure avec une fréquence d'acquisition minimale de 10KHz par voie. Le fournisseur doit préciser le nombre et le type de voies de mesure (entrée/sortie) disponibles et les fréquences d'acquisition associées ;
11. Le module d'acquisition doit permettre au minimum l'acquisition des signaux de force, de déplacement, de couple, d'angle, d'un extensomètre et de deux jauges de déformation
12. Le module d'acquisition doit permettre la possibilité d'enregistrement de données soit en continue soit une acquisition séquentielle sur « m » cycles tous les « n » cycles avec un

[1] Toute option permettant de faciliter la programmation des méthodes d'essais sera appréciée

déclenchement automatique à l'aide d'un trigger ou un autre moyen équivalent (voir le schéma sur la Figure 2) ;

13. Le module d'acquisition doit permettre l'enregistrement des données brutes ou d'appliquer un filtre. Le type du filtre doit pouvoir être sélectionné par l'utilisateur. Le candidat doit préciser le nombre et les types de filtre existant.

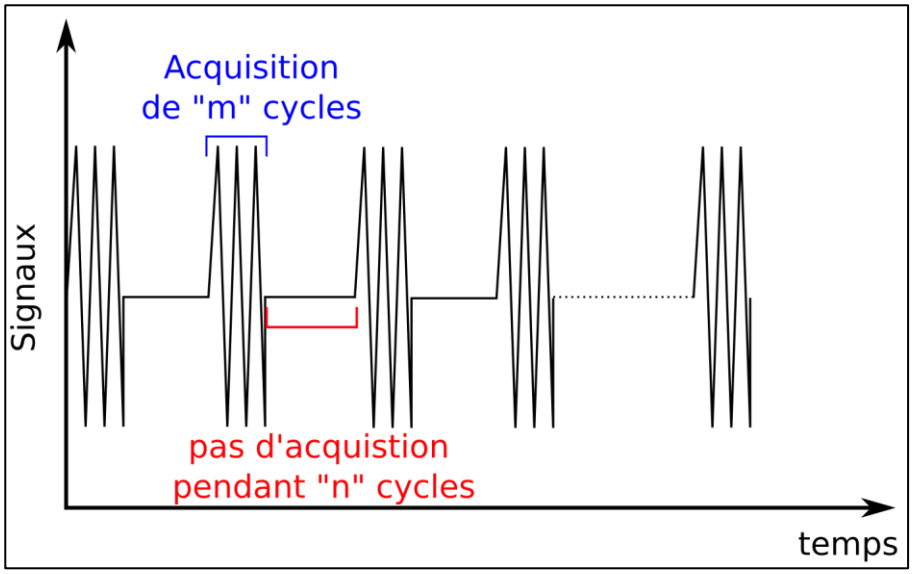


Figure 2 : schéma d'acquisition des données

La machine pourra être utilisée pour réaliser des essais dans un environnement contrôlé (en température, corrosion…). La machine doit permettre l'intégration d'une enceinte thermique ou une enceinte de corrosion et un extensomètre clip-on. Le fournisseur précisera si ces configurations seraient possibles et justifiera le cas échéant la solution technique permettant d'intégrer ce type d'équipements. L'acquisition d'une enceinte thermique ou de corrosion ne fait pas l'objet de cette consultation. Leur chiffrage n'est pas demandé et ne sera pas pris en compte dans la notation.

Toute caractéristique technique significativement meilleure sera appréciée et prise en compte dans la notation.

4.3 Essais de faisabilité

Afin d'illustrer les différentes caractéristiques techniques et les fonctionnalités de la machine, les candidats fourniront des résultats d'essais de fatigue sous sollicitation cyclique de traction-compression avec un rapport de charge R=-1, à air et à température ambiante, réalisés sur une machine identique ou équivalente à la machine proposée dans le cadre de ce marché. L'objectif est de montrer les caractéristiques suivantes de la machine :

a. Réponse de la machine lors d'un essai sur une éprouvette en acier ;
b. Réponse de la machine lors d'un essai sur une éprouvette en aluminium ;
c. Réponse de la machine à faible amplitude de charge (force) cyclique (inférieure ou égale à 1% de la capacité maximale) ;
d. Réponse de la machine à forte amplitude de charge (force) cyclique (supérieure ou égale à 75% de la charge maximale) ;
e. Stabilité de l'amplitude de chargement (force) cyclique pendant un essai de fatigue à 500000 cycles ;
f. Stabilité de la charge statique (force) pendant un essai de fatigue avec un rapport de charge R=0.1, une amplitude de force de 50% de la capacité maximale, une fréquence minimale de 20Hz pendant 500000 cycles ;

g. Réponse de la machine à faible amplitude de charge (couple) cyclique (inférieure ou égale à 1% de la capacité maximale) ;
h. Réponse de la machine à forte amplitude de charge (couple) cyclique (supérieure ou égale à 75% de la capacité maximale) ;
i. Stabilité de l'amplitude de chargement (couple) cyclique pendant un essai de fatigue à 500000 cycles ;
j. Stabilité de la charge statique (couple) pendant un essai de fatigue avec un rapport de charge R=0.1, une amplitude de force de 50% de la capacité maximale, une fréquence minimale de 20Hz pendant 500000 cycles ;
k. Réponse de la machine sous un chargement cyclique biaxial composé d'une traction-compression (R=-1) avec une amplitude en force de 50% de la capacité maximale de la machine, combiné à une amplitude de charge en couple de 50% de la capacité maximale de la machine. Il est important d'appliquer des chargements en phase et des chargements déphasés. Le contrôle du déphasage doit être illustré.
l. Détection de la chute de la rigidité liée à l'amorçage d'une fissure ;
m. Acquisition des signaux d'effort,de déplacement, de couple et d'angle : 3 séquences d'acquisition de 20 cycles à 10kHz tous les 100000 cycles pendant un essai de fatigue à 500000 cycles

Pour réaliser les essais, le candidat pourra utiliser des éprouvettes d'un acier et d'un alliage d'aluminium de son choix. Sur demande du candidat, l'ENSTA pourra fournir les échantillons nécessaires à la réalisation des différents essais. Le candidat doit préciser la géométrie et les matériaux des éprouvettes utilisées pour réaliser les essais.

Pour l'ensemble des essais réalisés, le fournisseur devra livrer un rapport contenant les résultats obtenus. Les données suivantes doivent être fournies :

a) Le temps ;
b) L'effort ;
c) Le déplacement ;
d) Le couple ;
e) L'angle ;
f) Toute autre mesure (extensomètre, jauges, …)

Le rapport d'essai doit contenir au minimum les figures représentant les temporels de chacun des signaux enregistrés.

Les résultats de ces essais seront évalués et compteront pour **5% de la note finale**. L'évaluation portera notamment sur la stabilité de la charge statique et l'amplitude de la charge cyclique, les temps de montée en charge et de retour à la charge moyenne, la présence de la surcharge en début de l'essai, , la détection de l'amorçage de fissure, le contrôle de la phase, la capacité d'enregistrement et d'acquisition des données.

4.4 Démonstration

Sur proposition du fournisseur, une démonstration peut être organisée afin d'illustrer les capacités et les fonctionnalités de la machine. La démonstration ne sera pas prise en compte dans la notation.

4.5 Livraison et installation de l'équipement

Les opérations de livraison et d'installation de l'équipement sont à la charge du titulaire.
Des essais de recette seront réalisés à l'installation pour confirmer les caractéristiques techniques de la machine.

4.6 Formation et documentation

Le titulaire aura à sa charge la formation d'utilisateurs (au maximum 3 personnes) à l'issue de la réception sur le site. Cette formation portera sur :

- La sécurité
- Le principe de fonctionnement
- L'entretien et la maintenance ;
- L'utilisation du logiciel de pilotage ;
- L'étalonnage des capteurs
- Le Réglage du PID

Le titulaire fournira l'ensemble des documents nécessaires à l'installation, à l'exploitation et à la maintenance de l'équipement objet du présent document, en français et/ou en anglais, sur papier et en version numérique.

4.7 Garantie

La garantie du matériel devra être de 1 an minimum, à compter de la date de mise en service de celui-ci. A titre indicatif le fournisseur chiffrera les formules d'extension de la garantie. L'extension de la garantie ne sera pas prise en compte dans la notation.

5 Evaluation des offres techniques

5.1 Exigences techniques minimales

Les exigences minimales listées ci-dessous constituent des sous-critères de la valeur technique.
Toute réponse « NON » pour les exigences minimales listées dans le Tableau 1 rend la proposition **non conforme**.

Exigences techniques minimales, (tableau à remplir)
Bâti d'une capacité minimale de 250kN/2000N.m
Cellule de charge Gamme minimale exigée 250kN/2000N.m
Capteur de déplacement type LVDT/ et un capteur d'angle
Réglage automatique du PID
Mors hydraulique correspondant à la capacité maximale de la machine avec mâchoires pour éprouvette cylindrique et éprouvette plate.
Course de la traverse minimale 1000 mm
Galette d'alignement des mors
Système de commande comprenant un contrôleur et un ordinateur
Une voie d'acquisition entrée pour extensomètre
Deux (2) Voies d'acquisition entrée pour jauges de déformation
Quatre voies sorties analogiques (0/10V) et 2 voies d'entrées analogiques (0/10V)

Une voie d'entrée numérique
Logiciel de pilotage et de programmation des méthodes d'essais
Stockage, visualisation et exportation des résultats d'essais
Accouplement mécanique entre les deux vérins axial et de torsion
Le vérin dispose des amortisseurs hydrauliques de fin de course
Possibilité de pilotage de la phase entre la commande axiale et de torsion
Pied de distribution avec une admission en 210 +/- 10 bar et passage basse pression/ haute pression
Vérins de levage de la traverse

Tableau 1 : les exigences techniques minimales retenues