



ENST2



INSTITUT
POLYTECHNIQUE
DE PARIS





Cahier des clauses techniques particulières :

*Acquisition d'une machine de fatigue à résonance
électromagnétique de type vibrophore*



Marché 20250006



 	CCTP 20250006	PAGE 1/11
	Acquisition d'un vibrophore	

SOMMAIRE

1	NATURE DU PROJET	2
1.1	Objet :	2
1.2	Contexte :	2
2	NORMES APPLICABLES.....	2
3	RESUME DES PRESTATIONS DEMANDEES.....	3
4	DESCRIPTION DES SPECIFICATIONS TECHNIQUES.....	4
4.1	Réalisation des essais	5
4.2	Contrôle commande.....	5
4.3	Acquisition des données.....	6
4.4	Essais de faisabilité	7
4.5	Démonstration	8
4.6	Livraison et installation de l'équipement.....	8
4.7	Formation et documentation.....	8
4.8	Garantie	8
5	EVALUATION DES OFFRES TECHNIQUES	8
5.1	Exigences techniques minimales	8
5.2	Caractéristiques techniques complémentaires	9
6	CONSIDERATIONS ENVIRONNEMENTALES	10
7	EVALUATION DES OFFRES FINANCIERES	11
8	CHOIX	11

 	CCTP 20250006	PAGE 2/11
	Acquisition d'un vibrophore	

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 permettant d'appliquer des chargements cycliques de traction et de compression. La machine objet de ce projet sera de type vibrophore dont le principe de fonctionnement se base sur la mise en résonance de l'échantillon à l'aide d'un électroaimant. La machine doit permettre d'appliquer des chargements purement alternés (rapport de charge $R=-1$) ou des chargements avec une contrainte moyenne (rapport de charge $R \neq -1$).

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.

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.

	CCTP 20250006	PAGE 3/11
	Acquisition d'un vibrophore	

3 RESUME DES PRESTATIONS DEMANDEES

Dans sa proposition financière, le fournisseur 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 type vibrophore permettant de solliciter des éprouvettes sous un chargement cyclique uniaxial de traction/compression à une fréquence de résonance constante dont la valeur dépendra de la ligne de charge (éprouvette) et de la masse attachée à l'électroaimant. La machine, équipée d'une cellule d'effort, doit permettre d'appliquer des rampes quasi-statiques superposées aux sollicitations cycliques (dynamiques). La gamme d'effort statique souhaitée est de 150kN, ce qui doit permettre une charge dynamique maximale de +/-75kN (à un rapport de charge $R=-1$). Les offres proposant des machines avec des capacités de charge statique maximale respectives de 100kN (charge dynamique maximale de +/-50kN, à $R=-1$) ou de 250kN (charge dynamique maximale de +/-125kN, à $R=-1$) seront évaluées et la note attribuée à la gamme d'effort de la machine sera pondérée par rapport à la valeur souhaitée de 150kN. Toutes les caractéristiques de l'électroaimant, du moteur électrique, du système de transmission et de l'ensemble des capteurs doivent être précisées ;
 - Un jeu de mâchoires standard mécaniques de capacité minimale qui correspond à la gamme d'effort de la machine (100kN, 150kN ou 250kN) permettant de tester des éprouvettes cylindriques avec des têtes filetées de différents diamètres. Au minimum, trois jeux de douilles permettant de fixer des éprouvettes avec des diamètres des têtes filetées de M12, M16 et M20 sont demandées.
 - Un jeu de mâchoires hydraulique, de capacité minimale qui correspond à la gamme d'effort de la machine (100kN, 150kN ou 250kN) permettant de tester des éprouvettes plates avec deux jeux de cales interchangeables (un jeu de mors plats et un jeu de mors en V). La solution d'une station hydraulique pour le serrage des mâchoires sera privilégiée ;
 - Un système de pilotage, d'acquisition et de traitement de données (connectique, ordinateur et logiciel).
 - 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 +/- 10V 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 et une sortie du signal de déplacement dynamique ; une entrée type extensomètre et trois voies entrée type jauges de déformation ;
 - Un extensomètre clip-on permettant de suivre la longueur de la fissure sur éprouvette CT ;
 - La livraison et l'installation de la machine ;
 - La vérification métrologique COFRAC à l'installation ;
 - La formation des utilisateurs (3 personnes) ;
 - Une documentation technique de la machine (moteur, bâti et transmission, module de commande et d'acquisition) et des capteurs intégrés (force et déplacement) ;
2. Préciser la résolution du capteur d'effort (la classe du capteur d'effort le cas échéant) et la résolution du capteur de déplacement ;
3. Préciser la gamme de fréquence de résonance sur une éprouvette en acier et une éprouvette en alliage d'aluminium en fonction des masses attachées à l'électroaimant ;

4. Préciser le seuil de détection d'une chute de fréquence de résonance qui correspond à la plus petite fissure détectable. Le cas échéant, préciser la fluctuation du signal de la fréquence de sollicitation ;
5. Préciser l'amplitude du déplacement dynamique maximale dans le domaine de résonance ;
6. Préciser le temps de montée en charge dynamique pour atteindre la consigne (voir fig. 1) ;
7. Préciser la résolution de l'entraînement de la traverse ;
8. Préciser la plage de vitesses de déplacement de la traverse possible (vitesse maximale et vitesse minimale) ;
9. Préciser la puissance du moteur ;
10. Préciser la capacité et la rigidité du bâti de la machine ;
11. Préciser le type de la transmission mécanique pour l'entraînement de la traverse (courroie, transmission directe par un engrenage) ;
12. Préciser la course maximale de la traverse (en mm, la course minimale demandée est 800mm) ;
13. Préciser les dimensions de l'espace d'essais en termes de hauteur et de largeur hors mâchoires et autres accessoires ;
14. Préciser si la machine dispose d'une table rainurée
15. Préciser si la machine dispose d'une galette de réglage d'alignements ;
16. Préciser les caractéristiques des capteurs et des voies d'acquisition ;
17. Préciser le nombre et le type des voies de mesures (entrée/sortie) disponibles ;
18. Préciser la fréquence maximale d'acquisition des données (une valeur minimale de 10kHz par voie d'acquisition est demandée) ;
19. Préciser le délai de livraison de la machine ;
20. Préciser la durée de garantie ;
21. Préciser l'alimentation électrique de la machine et la puissance électrique nécessaire pour son bon fonctionnement ;
22. Préciser le niveau du bruit généré par la machine en décibels (dB) et garantir le respect des normes en vigueur ;
23. Préciser et chiffrer en option les outillages pour essais de flexion et pour essais de propagation de fissure sur éprouvette type CT.

4 DESCRIPTION DES SPECIFICATIONS TECHNIQUES

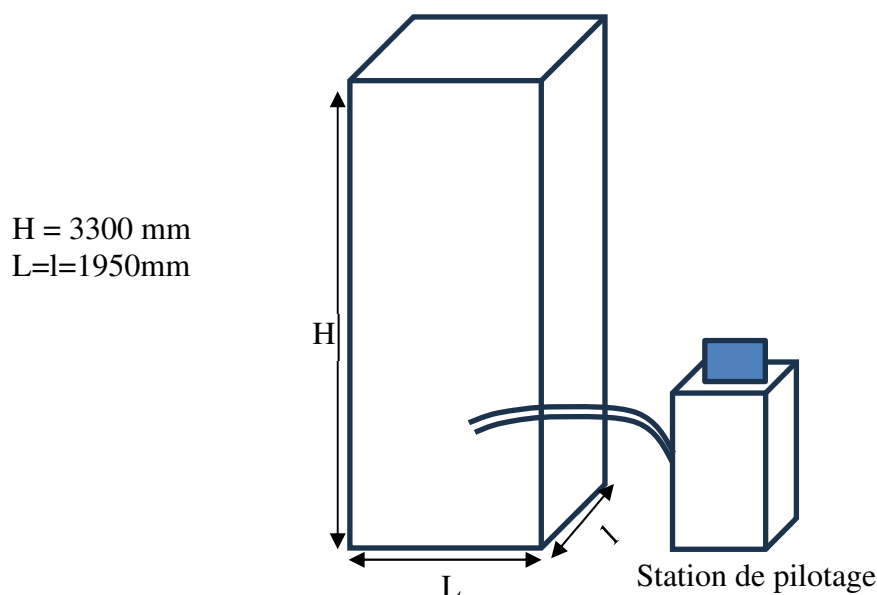


Figure 1: dimensions de la cabine d'isolation acoustique

La machine sera installée dans une cabine d'isolation acoustique dont les dimensions sont données sur la figure 1 (hauteur : 3300mm, largeur=1995mm, profondeur=1995mm). La longueur de l'ensemble des câbles doit permettre de placer la station électronique de pilotage à l'extérieur de cette cabine. La machine d'essais doit répondre aux exigences techniques suivantes :

4.1 Réalisation des essais

1. Appliquer un chargement cyclique de traction/compression jusqu'à rupture des éprouvettes ;
2. Appliquer des rampes et permettre le maintien du chargement en effort pendant toute la durée de la sollicitation cyclique.
3. Appliquer un critère d'arrêt en chute de fréquence de résonance correspondant à un amorçage de fissure dans l'éprouvette ;
4. Permettre l'amorçage d'une fissure d'une taille maîtrisée (précision sur la longueur de fissure à spécifier) dans une éprouvette type CT;
5. Permettre la réalisation des séquences d'essais en plusieurs blocs, avec la possibilité de varier la charge moyenne et l'amplitude dynamique (voir fig. 2) ;

4.2 Contrôle commande

6. Préciser le schéma du contrôle commande et la fréquence d'échantillonnage de la boucle d'asservissement ;
7. Préciser les modes de pilotage de la machine (effort, déplacement, déformation, ...)
8. Décrire les possibilités de programmation des méthodes d'essais¹ : essai de fatigue à l'amorçage et essai de propagation de fissure ;
9. Préciser la procédure de calibration des essais : le fournisseur doit spécifier la méthode de réglage de l'entrefer si besoin, du PID et le choix des masses en fonction des fréquences de résonance ;
10. 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) ;
11. Préciser le temps de décharge à partir de l'arrêt de la sollicitation jusqu'au retour à la charge moyenne (voir fig. 2) ;

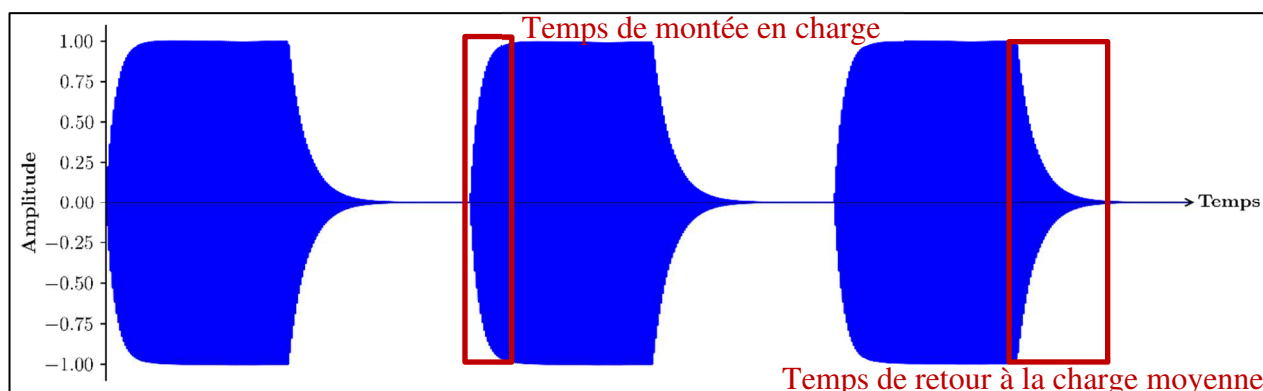


Figure 2 : Illustration du temps de montée en charge et de la phase de décharge

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

12. Détecter la présence d'une fissure de fatigue et proposer un critère d'arrêt de l'essai en fonction de la chute de la fréquence de sollicitation.

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 de fatigue (à l'amorçage) et des essais de propagation de fissure avec le suivi de la longueur de fissure et le calcul du KI.

Toute fonctionnalité supplémentaire sera appréciée et prise en compte dans la notation.

4.3 Acquisition des données

13. Le module d'acquisition des données doit permettre au minimum l'acquisition simultanée de trois 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 ;
14. Le module d'acquisition doit permettre au minimum l'acquisition des signaux de force, de déplacement, de la fréquence de sollicitation, d'un extensomètre et de trois jauges de déformation
15. Mesurer le déplacement appliqué sur l'éprouvette : la machine doit être équipée d'un capteur de déplacement statique et d'un capteur de déplacement dynamique. Le fournisseur précisera les caractéristiques de chaque capteur ;
16. Possibilité d'enregistrement de données sur « m » cycles après tous les « n » cycles avec un déclenchement automatique à l'aide d'un trigger (voir le schéma sur la Figure 3).

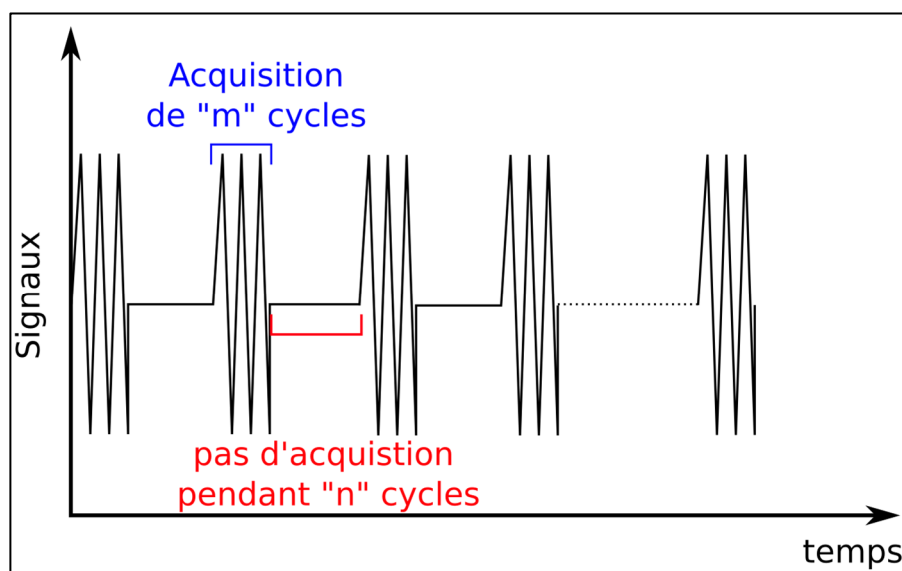



Figure 3 : schéma d'acquisition des données

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

	CCTP 20250006	PAGE 7/11
	Acquisition d'un vibrophore	

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.

4.4 Essais de faisabilité

Afin d'illustrer les différentes caractéristiques techniques et les fonctionnalités de la machine, les candidats doivent fournir et livrer 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 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 dynamique (inférieure ou égale à 1kN) ;
- d. Réponse de la machine à forte amplitude de charge dynamique (supérieure ou égale à 30 kN) ;
- e. Stabilité de l'amplitude de chargement dynamique pendant un essai de fatigue à 500000 cycles ;
- f. Stabilité de la charge statique pendant un essai de fatigue à 500000 cycles ;
- g. Stabilité de la fréquence de sollicitation pendant un essai de fatigue à 500000 cycles ;
- h. Stabilité de la charge dynamique correspondant à l'amplitude du déplacement dynamique maximale (environ 3 mm). Cette caractéristique peut être illustrée avec un essai de flexion ;
- i. Détection de la chute de fréquence liée à l'amorçage d'une fissure : la plus petite longueur de fissure détectable ou le cas échant, la plus petite chute de fréquence détectable doit être confirmée ;
- j. Acquisition des signaux d'effort et des deux déplacements statique et dynamique : 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 statique
- d) Le déplacement dynamique
- e) Le signal de la fréquence de sollicitation
- 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 dynamique, la détection de l'amorçage de fissure, les temps

 	CCTP 20250006	PAGE 8/11
	Acquisition d'un vibrophore	

de montée en charge et de retour à la charge moyenne, la présence de la surcharge en début de l'essai la capacité d'enregistrement et d'acquisition des données.

4.5 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.

4.6 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.

4.7 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 de l'entrefer et/ou 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.

4.8 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)	OUI	NON
Bâti d'une capacité minimale de 100kN		
Cellule d'effort Gamme minimale exigée 100kN		



Capteur de déplacement statique		
Capteur de déplacement dynamique		
Course de la traverse Exigence minimale 800 mm		
Système de commande comprenant un contrôleur et un ordinateur		
Voies d'acquisition entrée pour extensomètre		
Trois (3) Voies d'acquisition entrée pour jauges de déformation		
Logiciel de pilotage et de programmation des méthodes d'essais		
Stockage, visualisation et exportation des résultats d'essais		
Mâchoires de serrage mécanique d'éprouvettes cylindrique à tête fileté de diamètres M12, M16 et M20		
Mâchoires de serrage hydraulique avec la station pour le serrage d'éprouvettes plate et cylindrique avec les mordache correspondant		
Extensomètre clip-on adaptée sur l'éprouvette CT		
Encombrement de la machine compatible avec la cabine d'isolation acoustique		

Tableau 1 : les exigences techniques minimales retenues

5.2 Caractéristiques techniques complémentaires

Les caractéristiques techniques listées dans le Tableau 2 constituent des sous-critères de la note technique. Les réponses en fonction des caractéristiques du/des produit(s) proposé(s) feront l'objet d'une notation dont la pondération est indiquée dans le Tableau 2 :

Caractéristiques complémentaires servant à la notation	Valeur (OUI/NON le cas échéant)	Pondération
Gamme d'effort statique de la machine (cellule+bâti+ressorts à lame)* Valeur souhaitée 150kN		12%
Résolution du capteur d'effort**		8%
Résolution du capteur de déplacement dynamique**		7%
Fréquence d'échantillonnage de la boucle d'asservissement**		7%
Amplitude maximale du déplacement dynamique		4%
Course de la traverse * Valeur minimale 800 mm		8%
Vitesse maximale de la traverse **		2%
Vitesse minimale de la traverse **		2%
Fréquence d'acquisition : * Valeur minimale 10 KHz par voie d'acquisition avec 3 voies simultanées		3%
Voies d'acquisition entrée/sortie analogique +/-10V : * Exigence minimale 2 voies avec encodage minimum 16bits		6%
Nombre de voies d'acquisition entrée type jauge ** Exigence minimale 3 voies		2%

 	CCTP 20250006	PAGE 10/11
	Acquisition d'un vibrophore	

Nombre de voies d'acquisition entrée type extensomètre ** Exigence minimale 1 voies		2%
Puissance du moteur d'entraînement de la traverse (Watt)**		3%
Puissance maximale de l'électroaimant (Watt)**		6%
Rigidité maximale du Bâti **		5%
Dimensions de l'espace d'essai (hauteur x largeur) **		6%
Déviation (fluctuation) de la fréquence de sollicitation**		3%
Longueur minimale de fissure détectable**		4%
Table rainurée		2%
Niveau de bruit maximal en (db)**		4%
Galette d'alignement		2%
Plaque(s) de répartition du poids		2%

Tableau 2 : caractéristiques complémentaires retenues

* La notation des caractéristiques techniques tiendra compte de tout écart significatif à la valeur exigée.

** la notation tiendra compte de tout écart à la meilleure offre.



Toute réponse « non » au tableau 2 n'entraîne pas de non-conformité.

6 Considérations environnementales

Le fournisseur devra détailler son engagement pour l'environnement selon au minimum les critères sous-cités :

- Durée de vie des matériels :
 - Durée de vie estimée de l'appareil et de ses sous-parties ;
 - Actions en faveur du réemploi, de la réutilisation, du reconditionnement, de l'intégration de matières recyclées et du recyclage ;
 - Tout autre sous-critère jugé pertinent par le fournisseur ;
- Eco-responsabilité :
 - Gestion des déchets lors de l'installation ;
 - Consommation électrique de l'équipement ;
 - Recyclabilité de tout ou partie de l'appareil ;
 - Tout autre sous-critère jugé pertinent par le fournisseur ;
- Réduction de l'impact carbone :
 - Localisation du SAV ;
 - Impact du transport à la livraison ;
 - Tout autre sous-critère jugé pertinent par le fournisseur ;
- Labels environnementaux.

Tout autre critère jugé pertinent par le fournisseur devra être détaillé et sera fortement apprécié.

 	CCTP 20250006	PAGE 11/11
	Acquisition d'un vibrophore	

Les considérations environnementales listées ci-dessus constituent des sous-critères de l'évaluation. Les réponses en fonction des caractéristiques du/des produit(s) proposé(s) feront l'objet d'une notation dont la pondération est indiquée dans le Tableau 3.

Considérations environnementales **	Pondération
Durée de vie des matériels	30%
Eco-responsabilité	25%
Réduction de l'impact carbone	30%
Labels environnementaux	15%

Tableau 3 : considérations environnementales retenues

** la notation tiendra compte de tout écart à la meilleure offre.

7 Evaluation des offres financières

La note attribuée à l'offre financière de chaque fournisseur comptera pour **40%** de la note finale et sera calculée de la manière suivante :

Note financière fournisseur= ((prix du candidat le moins-disant/prix de l'offre examinée) *40)

8 Choix

Les tableaux 1 et 2 ci-dessus, à compléter par le candidat, sont joints en annexe au CCTP, en version Word.

Pour choisir le fournisseur, la notation sera définie comme suit :

- Le paragraphe 5.2 permettra d'établir une note technique qui comptera pour **48%** de la note totale ;
- La proposition financière comptera pour **40%** de la note totale ;
- L'évaluation des résultats des essais de faisabilité comptera pour **5%** de la note totale.
- L'évaluation des considérations environnementales comptera pour **7%** de la note totale.

Critère	Exigences techniques	Offre financière	Essais de faisabilité	Considérations environnementales	Total
Note	/48	/40	/5	/7	/100

L'offre du candidat qui aura la meilleure note sur 100 sera proposée à la décision du Pouvoir Adjudicateur.