UNIVERSITÉ MARIE & LOUIS PASTEUR

Ministère de l'Enseignement supérieur et de la recherche
Direction des Affaires Financières (DAF)
Pôle achats

MARCHÉ PUBLIC
MARCHÉ DE FOURNITURES

Appel d'offres - Banc d'essai d'endurance de piles à combustibles à hydrogène (PAC) 5 kW

Cahier des clauses techniques particulières (CCTP)

Consultation n° CCAP n°26.015 du 8/10/2026

Pour plus de précisions, le candidat peut contacter le référent technique, porteur du projet :

Responsables du suivi technique :

M. David BOUQUAIN, Mme. Marie-Cécile PERA, M. Daniel HISSEL (Professeurs des universités)
FEMTO-ST/FC-LAB
13, rue Ernest Thierry-Mieg
90000 BELFORT

✆ 03.84.58.36.59
@ : david.bouquain@umlp.fr ; marie-cecile.pera@umlp.fr
daniel.hissel@umlp.fr ;

Table des matières

1 OBJET DE LA CONSULTATION 3
2 CARACTERISTIQUES TECHNIQUES 3
2.1 INTRODUCTION 3
2.2 REGLES D'EXECUTION ET DOCUMENTS DE REFERENCE 4
2.3 PRINCIPE GENERAL DE FONCTIONNEMENT DU BANC D'ESSAI 4
2.4 CONTROLE DU BANC : MESURE, SUPERVISION, GESTION DES DONNEES 5
2.4.1 Fonctions de base 5
2.4.2 Traitement et enregistrement des signaux issus des capteurs du banc 5
2.4.3 Affichage 6
2.5 ENDURANCE 6
2.5.1 Robustesse 6
2.5.2 Plan de maintenance et étalonnage 6
2.6 NIVEAUX DE SECURITE 6
2.7 EXEMPLES D'ESSAIS QUI POURRONT ETRE REALISES 7
2.7.1 Liste des paramètres modifiables lors des cycles automatiques 7
2.8 EXEMPLES TYPIQUES D'ESSAIS 8
2.8.1 Courbe de polarisation typique avec variation de plusieurs paramètres 8
2.8.2 Exemple de suivi de cycle de conduite WLTP 8
2.8.3 Cycles démarrage / arrêt 9
2.8.4 Pilotage en mode manuel. 9
2.9 SPECIFICATION TECHNIQUE DU BANC D'ESSAI 11
2.9.1 Caractéristiques des fluides disponibles dans les salles d'essai 11
2.9.2 Caractéristiques des fluides pour les Piles à Combustibles 11
3 CONDITIONS GENERALES 11
3.1 PILOTAGE DU PROJET 11
3.2 DELAI DU PROJET 11
3.3 LIVRAISON, INSTALLATION ET MISE EN SERVICE 11
3.4 FORMATION DES UTILISATEURS 12
4 GARANTIE, MAINTENANCE ET CONSOMMABLES ASSOCIES A L'EQUIPEMENT 12
4.1 GARANTIE 12
4.2 MAINTENANCE, CONSOMMABLES 12
4.3 LOGICIELS 12
4.4 INTERVENTION 12
4.5 DOCUMENTATION 13

1 Objet de la consultation

La présente consultation concerne une prestation d'achat d'un banc d'essai permettant le tester la durabilité de fonctionnement d'une pile à combustible de type PEM (Proton Exchange Membrane) d'une puissance maximale de 5 kW électrique. Le banc d'essai devra être en mesure de pouvoir réaliser des essais de très longue durée, typiquement plus de 5000 heures, sans interruptions. Il devra mettre en œuvre des solutions de redondance ou de repli dans le cas d'éventuels défauts ponctuels ou de dérives de sous-systèmes du banc afin de prolonger les essais sans interruption sous réserve que les conditions de sécurité soient bien entendu maintenues.

Le banc intégrera un système de supervision et d'acquisition des données de l'instrumentation.

2 Caractéristiques techniques

2.1 Introduction

La plateforme Hydrogène énergie opérée par l'UAR FCLAB dispose de plusieurs bancs d'essais destinés aux tests de pile à combustibles à hydrogène (PAC). Les technologies testées sont de type PEM.

FCLAB et FEMTO-ST souhaitent se doter d'un banc de test d'endurance pour évaluer la durabilité des piles dans le cadre de programme de recherche ou de prestations pour des entreprises.

Le marché concerne donc :

- La fourniture d'un banc d'essai de Pile à Combustible (PAC) de puissance complet (dont les sous-systèmes seront détaillés dans les prochaines sections), capable de tester des piles à combustible PEM sur une gamme de puissance électrique allant de 0,5 à 5 kW ;
- Un système d'acquisition (traitement des signaux de mesure issus des capteurs) et de contrôle (envoi des consignes bas niveau aux actionneurs du banc) assurant le bon fonctionnement et la sécurité du personnel et des équipements ;
- La fourniture du logiciel paramétrable de pilotage manuel et automatique du banc (incluant plusieurs régulateurs paramétrables), permettant l'exécution d'essais sur divers profils dynamiques et la gestion des sécurités du banc ;
- La fourniture d'un ordinateur et des écrans (a minima deux) destinés à l'interface humain machine (IHM). L'ordinateur et les écrans seront installés dans une cellule de mesure distante de 15 à 20 mètres du banc d'essai et donc du système d'acquisition. La photographie en Figure 1 illustre ce principe de commande à distance ;
- La mise en service du banc et la démonstration de son bon fonctionnement ;
- La formation de 6 personnes sur site à Belfort à l'utilisation du système et du logiciel de supervision ;
- La documentation exhaustive de la prestation ;
- Les éléments documentaires nécessaires aux obligations réglementaires en exploitation et en maintenance.



Figure 1 : pilotage d'un banc d'essai à distance depuis une salle dédiée

2.2 Règles d'exécution et documents de référence

Le fournisseur devra se conformer aux lois, règlements normes en vigueur au moment des travaux. Les équipements fournis devront être marqués CE en conformité aux directives qui leur sont applicables.

Il conviendra notamment de se reporter :

- au code du travail,
- au code de l'environnement,
- aux Règles de l'Art,
- aux spécifications, règles de normalisation et recommandations publiées par l'UTE dans leur édition la plus récente, et notamment à la norme française C 15-100 ou équivalent,
- aux normes CEI en vigueur,
- à la directive Machine, si applicable,
- à la **Directive des équipements sous pression la DESP** (par exemple pour les humidificateurs) avec un souhait de rester dans les seuils les plus bas possibles,
- aux Guides d'Analyse de Risque pour l'identification des risques liés à la sécurité des personnes et des équipements durant leur cycle de vie,
- Toutes autres normes ou guides que le fournisseur pourra identifier durant le projet.

Le lauréat devra être en mesure de fournir tous les documents justificatifs nécessaires afin que FCLAB puissent répondre aux sollicitations des organismes de contrôles qui visitent annuellement les installations.

2.3 Principe général de fonctionnement du banc d'essai

Ls banc d'essai pile à combustible doit être capable d'effectuer des séries d'expérimentations de très longue durée (> 5000 h) sur des piles à combustible de technologie PEM d'une puissance électrique allant de 0,5 kW à 5 kW.

Une PAC fonctionne à partir d'une réaction d'oxydoréduction entre deux gaz réactifs sous pression qui sont du dihydrogène et le dioxygène, le plus souvent de l'air. La fourniture de ces deux gaz sera assurée par les équipements actuellement présents au sein de la plateforme hydrogène énergie. Une ligne de diazote sous pression sera également utilisée pour des fonctions de sécurité, d'arrêt démarrage des PAC (inertage des lignes de gaz réactifs). Les gaz seront disponibles à une pression comprise entre 7 et 11 bar. Nous souhaiterions que le candidat propose dans son offre en option la possibilité de fonctionner en hydrogène pur à la cathode.

Les gaz réactifs en entrée de la PAC sont régulés en débit à l'aide de régulateurs de débits massiques autonomes (régulateur PID intégré). Au besoin il peut être suggéré d'utiliser 2 régulateurs par voie afin d'étendre la plage de réglage de débit en conservant la même précision. Ensuite, les gaz sont régulés en température et hygrométrie par un système d'humidification. Ces deux dernières régulations sont assurées par des humidificateurs autonomes au niveau de leur régulation (technologie la plus adaptée à définir par le fournisseur) pilotés avec une consigne de température de gaz et une consigne de température de rosée ou de taux d'humidité relative (HR) provenant du système de pilotage du banc. Les lignes d'alimentation de gaz réactifs sont ensuite contrôlées en température par des cordons tracés et des flexibles chauffants afin de maintenir la température et l'hygrométrie jusqu'à l'entrée de la pile. Ces systèmes sont régulés par des régulateurs de température dont les consignes sont envoyées par le système de pilotage. On évitera d'utiliser des régulateurs de type thermostat afin de ne pas avoir d'oscillations de température. La pile dispose de 2 circuits de bypass (anode et cathode) qui permettent de ne pas l'alimenter dans les phases par exemple de mise en chauffe de l'humidificateur ou de mise au point des cycles d'essais.

Les gaz en sortie de la PAC sont refroidis et condensés afin d'évacuer l'eau en phase liquide. Vient ensuite la régulation en pression sur les lignes de gaz réalisée grâce à des vannes de contrepression ou déverseur (au choix du fournisseur). La régulation est réalisée par un régulateur autonome. Les gaz secs sont ensuite rejetés par des évents prévus à cet effet.

Une régulation thermique est faite au niveau de la PAC. Cette dernière produisant de la chaleur, il faut évacuer cette puissance thermique via un circuit d'eau de refroidissement primaire (eau déminéralisé ou glycolée type GLYSANTIN FC G20 par exemple ou équivalent) échangeant avec un circuit secondaire disponible au sein de la plateforme. La boucle de refroidissement primaire est également équipée d'un réchauffeur. La régulation de température se fait en agissant sur une vanne trois voies de mélange via un régulateur PID (gains ajustables dans le logiciel de contrôle). On doit pouvoir agir également sur le débit de la pompe et sur la température de consigne du réchauffeur. Enfin le circuit primaire doit être équipé d'une mesure de conductivité et équipé d'une résine de déminéralisation.

L'électricité produite par la PAC sera consommée par une charge électronique à réinjection sur le réseau AC, pilotée en régulation de courant pour la majorité des essais, en tension ou en puissance pour certains essais. La charge électronique sera de la fourniture du prestataire. Elle doit communiquer avec le banc pour les consignes et retours de mesures ainsi que les ordres de marche et arrêt. On privilégiera un bus de communication numérique entre la charge et le système de contrôle.

Le système d'acquisition doit pouvoir mesurer les tensions de chaque cellule de la pile à combustible (max 50 voies, tension max 2 V par voie, tension minimale -1 V par voie, résolution souhaitée +/- 1 mV) ainsi que la tension totale de la pile. Les mesures peuvent se faire par un système déporté à proximité de la pile et communiquant par un bus numérique (CVM avec bus CAN par exemple).

Le synoptique général du banc d'essai est présenté en Figure 2.

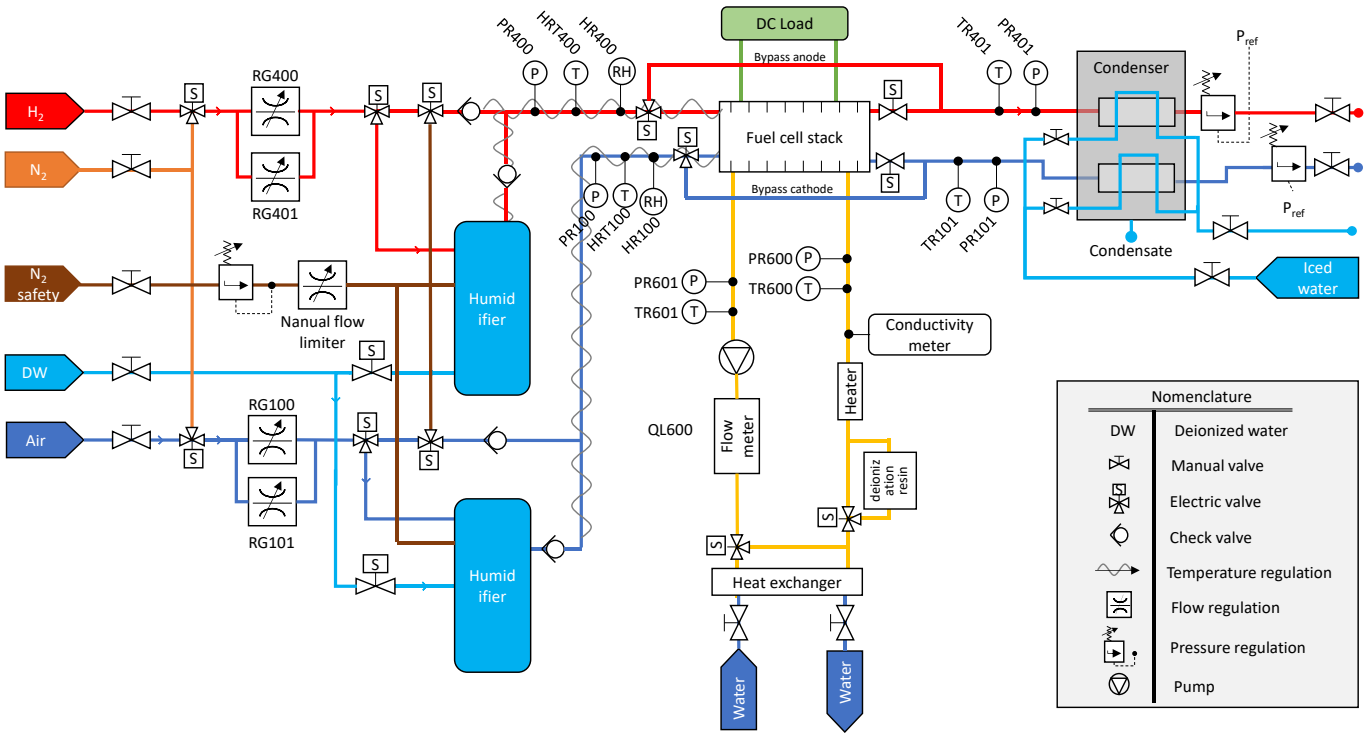


Figure 2 : synoptique général du banc d'essais de pile à combustible

Il est entendu que ce schéma de principe ne limite pas l'instrumentation, les actionneurs et les boucles logicielles que le fournisseur pourra juger nécessaire d'installer ou de contrôler pour le fonctionnement du banc en toute sécurité pour le personnel et le matériel.

2.4 Contrôle du banc : Mesure, Supervision, Gestion des données

2.4.1 Fonctions de base

Les fonctions de base du système de contrôle commande sont :

- Traitement et enregistrement des signaux issus des capteurs du banc
- Affichage des données, consignes …
- Paramétrage de la configuration de l'essai
- Pilotage des actionneurs du banc (vannes, régulateurs de débit massique, pompe …)
- Gestion des sécurités
- Pilotage manuel : définition par l'utilisateur des consignes des actionneurs et à la charge électronique
- Suivi de profils de pilotage tels que des profils temporels de consignes et envoi de ce profil aux actionneurs et à la charge électronique.
- Régulations des sous-systèmes :
    - supervision des régulations déportées (débits gaz, température gaz et rosée, pression des gaz)
    - régulation de la température de la PAC (c'est-à-dire la température de sortie du circuit primaire de refroidissement en sortie de pile) et du débit de la pompe.

2.4.2 Traitement et enregistrement des signaux issus des capteurs du banc

Le superviseur principal permet d'acquérir toutes les grandeurs disponibles et horodatées à une fréquence d'acquisition paramétrable (10 Hz au minimum et plus élevée si possible pour une boucle d'acquisition circulaire stoppée en cas de défaut banc).

Le fichier d'acquisition est paramétrable avec un choix des voies enregistrées et de la fréquence d'acquisition associée par voie. Le fichier d'acquisition doit être exploitable en post traitement par un logiciel de type tableur Excel.

Pour les essais de longue durée, l'enregistrement sera divisé en plusieurs fichiers ; la taille des fichiers d'acquisition ou leur durée d'enregistrement devront être paramétrables.

2.4.3 Affichage

Le superviseur proposera une IHM conviviale permettant l'affichage et le paramétrage sur plusieurs onglets, plusieurs fenêtres des grandeurs mesurées et contrôlées (consignes, seuils…) ainsi que les messages de diagnostic et de sécurité. Un synoptique général (inspiré de la Figure 2 par exemple) devra être visible affichant les grandeurs principales mesurées. L'utilisateur devra pouvoir disposer de plusieurs graphiques dynamiques (tensions de cellules, pression, températures) qu'il pourra configurer à sa guise. On utilisera au minimum 2 écrans. La définition précise de l'IHM sera discutée lors de la réunion de lancement de projet.

2.5 Endurance

2.5.1 Robustesse

Le support du logiciel superviseur doit être suffisamment robuste et performant pour assurer l'exécution fiable du logiciel sur de très longues durées sans interruption (> 5000 h).

Un système d'autocontrôle (watchdog) doit être intégré. Il doit disposer d'une capacité de stockage adaptée aux besoins d'acquisition, les essais pouvant durer plusieurs milliers d'heures.

Afin de garantir des essais de très longue durée, il faut que le système puisse fonctionner malgré l'apparition de défauts mineurs ou de dérives de mesure tant que l'intégrité du banc et de la pile en test ne sont pas impactés. Des mesures d'atténuation pourront être programmées et déclenchées automatiquement pour éviter le franchissement d'un seuil de défaut, avec l'affichage d'un message pour alerter l'utilisateur. A titre d'exemple, on peut penser à une réduction de la consigne de courant si une tension de cellule se rapproche du seuil d'arrêt. Le but est d'éviter une interruption brutale d'un essai et de donner à l'utilisateur l'opportunité d'analyser la solution et de modifier les conditions opératoires de la suite de l'essai, sans perturber l'expérience par un arrêt d'urgence intempestif. En option, un système d'alerte par envoi d'une notification sur un numéro de portable pourra être proposé.

2.5.2 Plan de maintenance et étalonnage

Le logiciel doit être en mesure de renseigner l'utilisateur sur les maintenances ou étalonnages à prévoir en fonction de la durée des essais réalisés afin de pouvoir les anticiper si nécessaire avant le début de l'essai. Cela concerne tous les sous-systèmes du banc hormis bien entendu la pile en test. Une page dédiée devra donc être prévue permettant de renseigner les paramètres de maintenance et les opérations effectuées, et de planifier les opérations à venir.

2.6 Niveaux de sécurité

Plusieurs niveaux de sécurité et d'alerte logiciel seront programmés en fonction des défauts constatés. Cette sécurité restera à définir. Des sécurités matérielles seront également à prendre en considération (à valider lors de la réunion de lancement de projet).

Les seuils de sécurité et les paramètres opérationnels du banc et de l'essai prévu devront pouvoir être sauvegardés afin de les réappliquer, avec la possibilité de les modifier pour adapter l'essai, lors de la remise en service du banc et de la reprise d'un essai sans avoir à tout ressaisir.

Le superviseur gère un niveau de « sécurité globale » :

- Paramétrage possible « réglables » des seuils de sécurités et d'alarmes.
- Grandeurs physiques principales à « surveiller » :
    - Températures
    - Courant
    - Tension totale PAC
    - Pressions gaz et différentiel de pression
    - Humidités gaz
    - Débits gaz et fluide de refroidissement
    - Conductivité du circuit de refroidissement
- Tensions individuelles de cellules
- Gestion des différents types d'actions en fonction du niveau de sécurité
- Inhibition possible des sécurités ou modification des seuils de défaut

- Enregistrement d'un fichier journal de défauts
- Gestion d'un fichier d'enregistrement circulaire rapide pré/post défaut de toutes les grandeurs disponibles

En cas de coupure d'alimentation électrique du banc d'essais il doit être possible d'imposer une circulation d'azote avec un débit limité à basse pression dans les lignes de gaz d'alimentation de la pile à combustible (Cf. Figure 2).

Au niveau de la directive des équipements sous pression (DESP 2014/68/UE), le candidat fera son possible pour que les équipements mis en œuvre pour ce banc d'essai restent dans la catégorie 1 ou 2. Les lignes de gaz après les régulateurs de débit massique devront être équipées de soupapes de sécurité mécanique (valeur de tarage à définir lors de la réunion de lancement du projet).

2.7 Exemples d'essais qui pourront être réalisés

En plus des essais standards sur des stacks, le banc doit pourvoir reproduire des conditions d'essais systèmes et donc permettre de faire évoluer plusieurs paramètres sur des essais. Ces essais devront pouvoir être programmés pour exécuter des cycles d'essais automatisés et répétitifs.

2.7.1 Liste des paramètres modifiables lors des cycles automatiques

Les données ou états logiques (choix type de régulation débit gaz par exemple) seront fournis sous forme d'un fichier tableau structuré en lignes en fonction du pas de temps (qui peut être variable) avec une colonne par paramètre. Le logiciel doit permettre aussi le changement de pas par un changement d'état d'une variable (par exemple consigne température PAC atteinte) et pas uniquement par la condition temporelle.

Les cycles pourront être joués un certain nombre de fois. Un cycle doit pouvoir être mis en pause durant un essai permettant par exemple la modification manuelle de certains paramètres, puis redémarré au point de pause ou stoppé. On doit pouvoir être en mesure d'enchainer plusieurs cycles programmés différents à la suite.

Ci-dessous sont présentés une première liste paramètres qui devront être présents dans le fichier. Ils sont issus d'essais que nous réalisons actuellement à FCLAB sur d'autres bancs.

- Pas de temps (pas forcément constant) ou temps absolu ET/OU condition logique de changement d'état d'une variable
- Consignes pressions anode et cathode :
    - Choisir P_{in} (pression à l'entrée de la pile) ou P_{out} (pression à la sortie de la pile) de la pile indépendamment et séparément sur les circuits anodiques et cathodiques
- Activation de la régulation de pression anode et cathode simultanément (gestion de l'écart de différence de pressions gaz à minimiser suivant une valeur maximale à ne pas dépasser)
- Consignes des débits gaz cathode et anode
    - Anode
        - H2 ou N2 ou mélange de gaz réducteurs
    - Cathode
        - Air ou N2 ou O2 ou mélange de gaz oxydants
    - Détermination des consignes :
        - Soit issue de la consigne de courant en fonction de la surface d'une cellule (depuis l'onglet paramètres) et stœchiométrie (paramètre onglet paramètres ou variable dans le cycle)
        - Soit indépendante : nécessaire souvent d'anticiper ou retarder l'arrivée des gaz → durée paramétrable ;
- Stœchiométrie anode et cathode (ratio de débits de gaz entrant par rapport au débit stœchiométrique)
- Consigne température de rosée anode et cathode (humidificateur)
- Consigne température gaz (humidificateur)
- Pilotage bypass humidificateur (gaz sec ou humidifié)
- Activation régulations de la température des fluides de refroidissement au circuit primaire de la pile
- Consigne température du fluide caloporteur du circuit primaire (circulant dans la pile)
    - Choisir Tin ou Tout
- Consigne débit du circuit primaire de refroidissement (souvent imposé lors des essais)
    - Soit imposée en manuel
    - Soit imposée par la régulation de température

En option nous souhaitons pouvoir imposer le maintien d'un différentiel de température Tout-Tin par ajustement automatique du débit de la pompe

- Activation charge électronique
- Choix consigne charge : courant, puissance ou tension si on souhaite faire de la voltamètrie cyclique. Dans ce dernier cas de figure le candidat pourra chiffrer en option le cout d'une charge électronique réversible.
- Consigne courant charge ou consigne puissance charge
- Changement de fichier enregistrement automatique intégrant date et heure (1 fichier par jour pour les essais continus par exemple)
- Suivi de cycles (programmation d'un nombre de cycles à jouer)
- Possibilité de mettre en pause le cycle automatique (puis reprise cycle où l'on s'est arrêté)
- Modification de la tension de seuil minimal cellule PAC générant un arrêt d'urgence

2.8 Exemples typiques d'essais

2.8.1 Courbe de polarisation typique avec variation de plusieurs paramètres

	Step time	Current	Coolant stack inlet flow	Coolant temp. Stack Inlet	Coolant Stack Outlet	dT over stack	Nitrogen flow Inlet		Hydrogen flow inlet		Pressure anode outlet	Temperature inlet	RH inlet based on stack coolant inlet temperature	Dew point inlet	Stoich Anode	Hydrogen concentration Anode	Air flow inlet		Pressure outlet	Temperature inlet	RH inlet based on stack coolant inlet temperature	Dew point inlet	Stoich Cathode
Step	**Step time**	**I_S**	**FR_Si_CL**	**T_Si_CL**	**T_So_CL**	**dT_CL**	**FN_Si_N2**	**Fm_Si_N2**	**FN_Si_H2**	**Fm_Si_H2**	**p_So_A**	**T_Si_A**	**RH_Si_A**	**DPT_A**	**STC_A**	**CMP_A**	**FN_Si_C**	**Fm_Si_C**	**p_So_C**	**T_Si_C**	**RH_Si_C**	**DPT_C**	**STC_C**
	s	*A*	*l/min*	*°C*	*°C*	*K*	*Nl/min*	*g/s*	*Nl/min*	*g/s*	*bar a*	*°C*	*%*	*°C*	-	*%*	*Nl/min*	*g/s*	*bar a*	*°C*	*%*	*°C*	-
1	600	300	-	65	70,87	5,87	26,88	0,560	62,72	0,094	2,22	70	40,0	45,8	1,5	70	180,1	3,862	2	70	51,2	50,8	1,8
2	30	0	12	65	65	0	16,13	0,336	37,63	0,056	1,43	70	79,5	59,9	-	70	106,5	2,285	1,2	70	72,2	57,9	-
3	120	15	-	65	65,29	0,29	16,13	0,336	37,63	0,056	1,43	70	79,5	59,9	18	70	106,5	2,285	1,2	70	72,2	57,9	21,3
4	120	30	-	65	65,59	0,59	16,13	0,336	37,63	0,056	1,43	70	76,8	59,2	9	70	106,5	2,285	1,2	70	71,0	57,6	10,65
5	120	45	-	65	65,88	0,88	16,13	0,336	37,63	0,060	1,43	70	74,2	58,5	6	70	106,5	2,285	1,2	70	70,0	57,2	7,1
6	360	60	-	65	66,17	1,17	16,13	0,336	37,63	0,056	1,50	70	71,5	57,7	4,5	70	106,5	2,285	1,26	70	68,8	56,9	5,325
7	360	90	-	65	66,76	1,76	16,13	0,336	37,63	0,056	1,59	70	66,2	56,1	3	70	106,5	2,285	1,36	70	66,6	56,2	3,55
8	360	150	-	65	67,93	2,93	16,13	0,336	37,63	0,056	1,79	70	55,6	52,4	1,8	70	106,5	2,285	1,54	70	62,2	54,8	2,13
9	360	210	-	65	69,11	4,11	18,82	0,392	43,91	0,066	1,97	70	45,0	48,2	1,5	70	126,0	2,704	1,73	70	57,8	53,2	1,8
10	360	300	-	65	70,87	5,87	26,88	0,560	62,72	0,094	2,22	70	40,0	45,8	1,5	70	180,1	3,862	2,0	70	51,2	50,8	1,8
11	360	360	-	65	72,04	7,04	32,26	0,672	75,27	0,113	2,24	70	40,0	45,8	1,5	70	216,1	4,635	2,0	70	46,8	49,0	1,8
12	360	450	-	65	73,80	8,80	40,32	0,840	94,08	0,141	2,28	70	40,0	45,8	1,5	70	270,1	5,793	2,0	70	40,2	46,0	1,8
13	360	360	-	65	72,04	7,04	32,26	0,672	75,27	0,113	2,24	70	40,0	45,8	1,5	70	216,1	4,635	2,0	70	46,8	49,0	1,8
14	360	300	-	65	70,87	5,87	26,88	0,560	62,72	0,094	2,22	70	40,0	45,8	1,5	70	180,1	3,862	2	70	51,2	50,8	1,8
15	360	210	-	65	69,11	4,11	18,82	0,392	43,91	0,066	1,97	70	45,0	48,2	1,5	70	126,0	2,704	1,73	70	57,8	53,2	1,8
16	360	150	-	65	67,93	2,93	16,13	0,336	37,63	0,056	1,79	70	55,6	52,4	1,8	70	106,5	2,285	1,54	70	62,2	54,8	2,13
17	360	90	-	65	66,76	1,76	16,13	0,336	37,63	0,056	1,59	70	66,2	56,1	3	70	106,5	2,285	1,36	70	66,6	56,2	3,55
18	360	60	-	65	66,17	1,17	16,13	0,336	37,63	0,056	1,50	70	71,5	57,7	4,5	70	106,5	2,285	1,26	70	68,8	56,9	5,325
19	120	45	-	65	65,88	0,88	16,13	0,336	37,63	0,060	1,43	70	74,2	58,5	6	70	106,5	2,285	1,2	70	70,0	57,2	7,1
20	120	30	-	65	65,59	0,59	16,13	0,336	37,63	0,056	1,43	70	76,8	59,2	9	70	106,5	2,285	1,2	70	71,0	57,6	10,65
21	120	15	-	65	65,29	0,29	16,13	0,336	37,63	0,056	1,43	70	79,5	59,9	18	70	106,5	2,285	1,2	70	72,2	57,9	21,3
22	30	0	12	65	65	0	16,13	0,336	37,63	0,056	1,43	70	79,5	59,9	-	70	106,5	2,285	1,2	70	72,2	57,9	-

Figure 3 : exemple de cycle de courbe de polarisation

Cet essai peut être réalisé en mode manuel ou automatique.

2.8.2 Exemple de suivi de cycle de conduite WLTP

Cycles génériques : le superviseur propose la possibilité de générer des cycles programmés directement sur l'interface ou en relecture (import) de fichiers. Il doit être possible d'accéder à toutes les consignes des différents actionneurs.

Les cycles seront habituellement cadencés en fonction du temps mais une possibilité de changement d'étape sur des seuils d'état de mesures pas exemple sera un plus.

Exemple : Variation des pressions de gaz, débits gaz, températures et HR gaz, température du fluide de refroidissement, débit du fluide de refroidissement, courant (ou puissance) stack.

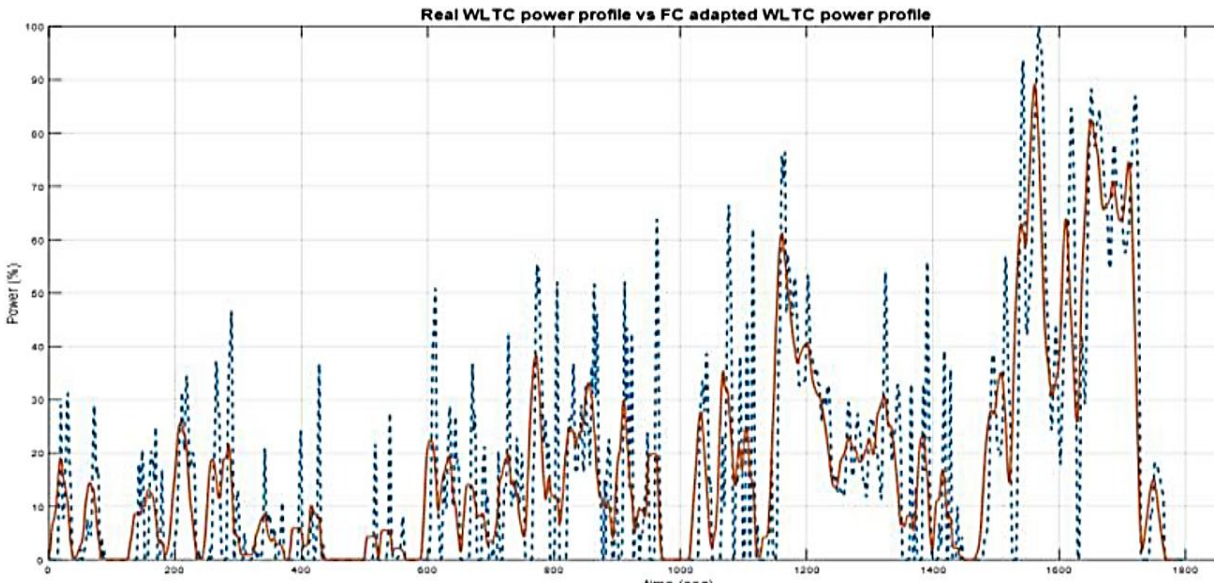


Figure 4 : exemple de cycle dynamique

2.8.3 Cycles démarrage / arrêt

FCLAB réalise régulièrement des essais de ce type visant à démarrer une pile à combustible, maintenir pendant quelques minutes un niveau de courant puis l'arrêter, tout cela suivant un protocole bien particulier. On doit pouvoir être en mesure de répéter plusieurs milliers de fois ce cycle afin d'identifier une dégradation de la pile.

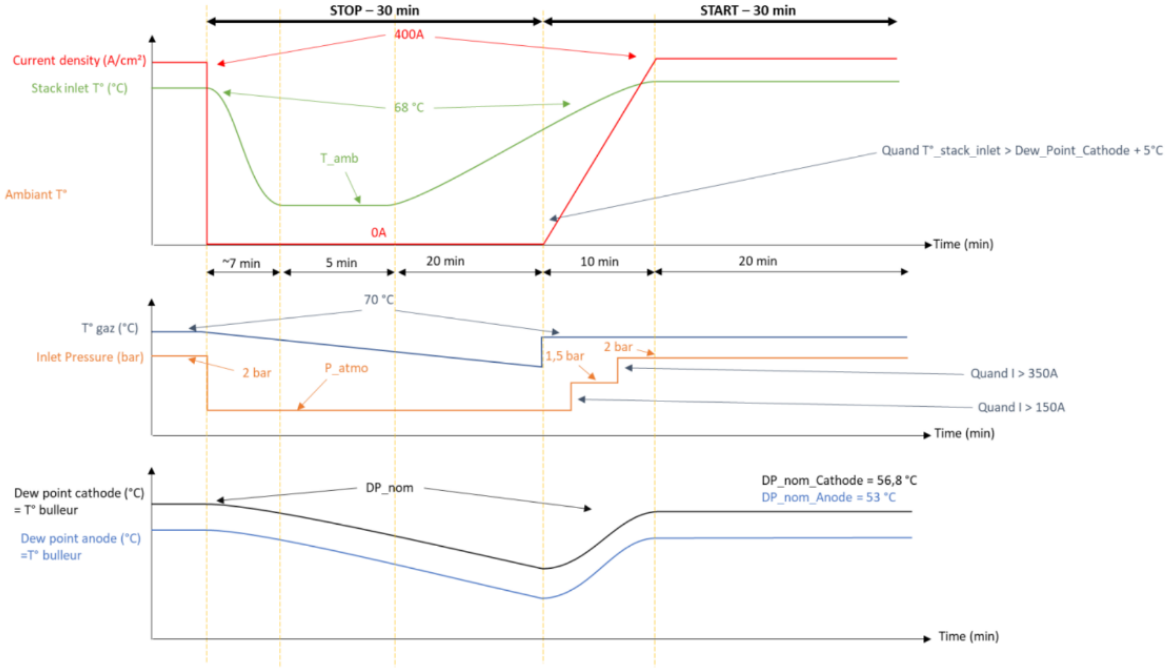


Figure 5 : exemple de cycle démarrage / arrêt répétitifs

2.8.4 Pilotage en mode manuel.

Il s'agit d'une procédure de conduite manuelle que nous faisons lors des tous premiers tests sur une nouvelle pile à combustible. Comme l'indique le logigramme présenté en Figure 6, l'idée est de laisser la main à l'opérateur sur les consignes et les changements d'étapes afin de pouvoir réagir à tout moment avant de déclencher les sécurités. Durant ce fonctionnement particulier les fonctions de régulation et de sécurité doivent être fonctionnelles.

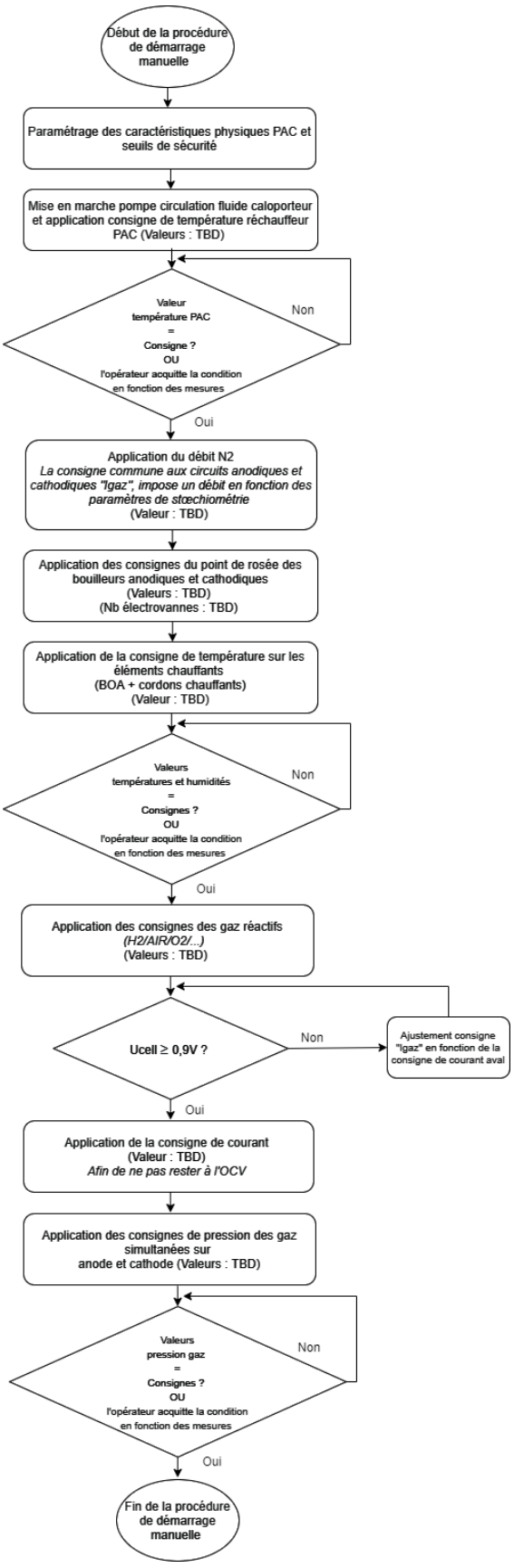


Figure 6 : exemple de procédure de fonctionnement en mode manuel

2.9 Spécification technique du banc d'essai

2.9.1 Caractéristiques des fluides disponibles dans les salles d'essai

- Eau brute pour refroidissement stack : 20 – 60°C / 4 bar
- Eau glacée pour condenseurs bancs : 7 – 12 °C / 2,5 bar. Il faudra prévoir l'ajout d'un système de surpression en fonction du système d'humidification choisi par le candidat.
- Pression air : 7 – 11 bar
- Pression H2 : 7 – 11 bar

2.9.2 Caractéristiques des fluides pour les Piles à Combustibles

- température fluide caloporteur du circuit de refroidissement primaire : 20 à 85°C,
- température des gaz : 20 à 85°C +/- 1 °C
- hygrométrie des gaz → point de rosée : 10 à 85 °C +/- 2°C, temps de réponse 20 à 60 % RH < 10 min.
- débit de fluide caloporteur : 1 à 15 l/min
- débits d'air (peut être piloté avec 1 ou 2 RDM) : gamme de puissance 0,5 à 5 kW : 10 à 420 Nl/min
- débit H2 (peut être piloté avec 1 ou 2 RDM) : gamme de puissance 0,5 à 5 kW : 3 à 120 Nl/min
- pressions des gaz : 0 à 3 bar relatif
- courant pile : 0 à 1000 A
- tension pile : 0 à 200 V

3 Conditions Générales

3.1 Pilotage du projet

- Dès réception de l'ordre de service, une réunion de lancement aura lieu pour déterminer les dates clés, confirmer les données d'entrée et clarifier les, éventuels, derniers points techniques.
- Une réunion de validation de conception aura lieu avant les lancements en fabrication des équipements. Durant cette revue, les documents de concept et de détail et les spécifications de programmation seront revus et agréés par les intervenants.
- Si nécessaire, à l'initiative de n'importe quel intervenant, et à n'importe quelle étape du projet, des réunions de clarification pourront avoir lieu pour clarifier/ amender prendre position sur des hypothèse de dimensionnement, de fonctionnement.
- Une réception en usine sera organisée pour confirmer les modes de fonctionnement, les interconnexions entre les bancs. La méthodologie de cette réception sera agréée lors de la réunion de validation et pourra être amendée par les intervenants après accord de toutes les parties.

3.2 Délai du projet

La livraison de l'équipement devra avoir lieu avant le **30 novembre 2027.**

Le fournisseur proposera un planning de réalisation qui présentera les différentes périodes d'étude, d'approvisionnement des éléments principaux, de la fabrication et des essais en usine. Il intégrera également les étapes clés et les jalons de validation.

Le fournisseur devra informer au plus tôt l'UMLP de tout retard ou de tout décalage du planning. L'installation et la mise en route se fera dans le mois qui suit la livraison. En cas de période fermeture des bâtiments, la période sera étendue de la même durée.

3.3 Livraison, installation et mise en service

Les prestations de livraison, d'installation, et de mise en service sur le site sont comprises dans le prix global de l'équipement. Elles devront être détaillées dans la proposition et seront assurées en totalité par le fournisseur. Ce dernier est réputé connaître les contraintes liées à la livraison.

3.4 Formation des utilisateurs

Le fournisseur proposera une formation destinée aux utilisateurs sur site à l'utilisation et l'entretien des bancs et des systèmes de supervision. Le fournisseur précisera dans son offre le coût de la formation pour 6 personnes et les frais de déplacements s'il y a lieu.

4 Garantie, maintenance et consommables associes à l'équipement

4.1 Garantie

La garantie initiale sera de 24 mois minimum.

Le fournisseur chiffrera en option des extensions de garantie pour aller jusqu'à 36 ou 48 mois de garantie au total :

PSE - Prestations supplémentaires éventuelles - n° 1 et 2 : *En cas d'absence de chiffrage l'offre ne sera pas analysée. L'Université Marie & Louis Pasteur se réserve le droit de retenir ou non ces PSE. Le candidat en sera informé lors de l'attribution du marché.*
PSE n°1 : Le candidat devra chiffrer une année de garantie supplémentaire, portant la durée totale de la garantie à 3 ans. Les conditions de cette garantie seront identiques à la garantie de base du matériel
PSE n°2 : Le candidat devra chiffrer deux années de garantie supplémentaires portant la durée totale de la garantie à 4 ans. Les conditions de cette garantie seront identiques à la garantie de base du matériel.

4.2 Maintenance, consommables

Le fournisseur précisera et chiffrera le coût, la nature et la fréquence de remplacement des consommables. Le manuel devra intégrer un plan de maintenance indiquant la planification, le niveau de maintenance, les compétences et les habilitations requises.

4.3 Logiciels

Dans la mesure où des logiciels sont fournis par le fournisseur, ce dernier s'engage à informer l'UMLP des éventuelles modifications, mises à jour ou extensions du ou des logiciels et à en faire bénéficier gratuitement l'UMLP pendant une durée minimale de 2 ans.

Le fournisseur devra prévoir les mises à jour des logiciels ou proposer des solutions alternatives permettant d'assurer le fonctionnement de l'équipement pour toute sa durée de vie.

4.4 Intervention

L'offre devra explicitement comprendre les conditions d'intervention en cas de panne avec délais et estimation des coûts afférents.

En cas de panne, le délai d'intervention ne devra pas excéder un mois.

Le Titulaire devra s'engager sur un temps d'intervention et de rétablissement selon la gravité de l'évènement par exemple :

- Prise en compte de la demande d'intervention **sous 48 h**.
- Pour un problème ne générant pas de blocage pour l'utilisateur : diagnostic et intervention sous 15 jours ouvrés avec garantie de rétablissement **sous 20 jours ouvrés**.
- Pour un problème bloquant : diagnostic et intervention d'un technicien sous 5 jours ouvrés avec une garantie de rétablissement **sous 10 jours ouvrés**,
- Dans le cas de la nécessité d'approvisionnement d'un matériel spécifique pour le dépannage, nous demandons que la remise en service soit possible dans un délai **d'un mois calendaire**

4.5 Documentation

Selon la réglementation, l'équipement sera livré avec une notice d'instructions complète rédigée en langue française ou anglaise comprenant en particulier, conformément à la norme NF EN 292-2, les indications relatives à l'équipement de travail, à sa mise en service, à son environnement et à son utilisation ainsi que les indications nécessaires pour la maintenance (plan de la machine, enceinte, moyen de chauffage, accessoires, schémas d'installation électrique, etc.).

La documentation ci-dessous devra notamment être fournis en cours d'études et à la fin du projet en tant que « Tel que Construit » :

- Plan mécanique ;
- Schémas électriques développés ;
- P&ID des circuits ;
- Note de réglage des protections ;
- Liste d'instrumentation et réglages ;
- Certificat de calibration ou de réglage (pour les équipements de sécurité) ;
- Back-up des logiciels ;
- Liste des risques résiduels ;
- Liste des contraintes d'installation ;
- Manuel d'exploitation et de maintenance ;
- Dossier technique nécessaire aux exigences réglementaires applicables aux équipements (par exemple : Equipement sous pression, Conformité électrique…).

Signature du candidat (Responsable de la Société) précédée de la mention manuscrite « lu et approuvé »

Date :