



HAL
open science

Contrôle tolérant aux défauts appliqué aux systèmes pile à combustible à membrane échangeuse de protons (pemfc)

Étienne Dijoux

► **To cite this version:**

Étienne Dijoux. Contrôle tolérant aux défauts appliqué aux systèmes pile à combustible à membrane échangeuse de protons (pemfc). Energie électrique. Université de la Réunion, 2019. Français. NNT : 2019LARE0008 . tel-02307308

HAL Id: tel-02307308

<https://theses.hal.science/tel-02307308>

Submitted on 7 Oct 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE DE DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LA REUNION

Ecole doctorale n°542 : Sciences, Technologies et Santé
Spécialité : Physique énergétique

Présentée et soutenue par : Etienne DIJOUX
Soutenue le : 12 avril 2019

CONTROLE TOLERANT AUX DEFAUTS APPLIQUE AUX SYSTEMES
PILE A COMBUSTIBLE A MEMBRANE ECHANGEUSE DE PROTONS
(PEMFC)

Directrice de thèse : Pr. Brigitte Grondin Pérez
Co-directrice de thèse : Pr. Marie-Cécile Péra

Encadré par : Dr. Nadia Yousfi Steiner
Co-encadré par : Pr. Michel Benne

Pr. Loïc Boulon	Université du Québec à Trois-Rivières	Rapporteur
Pr. Yann Bultel	Université Grenoble Alpes	Rapporteur
Pr. Jean Pierre Chabriat	Université de La Réunion	Président
Pr. Brigitte Grondin-Perez	Université de La Réunion	Directrice
Pr. Marie-Cécile Péra	Université Bourgogne Franche-Comté	co-Directrice
Pr. Michel Benne	Université de La Réunion	co-Encadrant
HdR. Nadia Yousfi-Steiner	Université Bourgogne Franche-Comté	Encadrant
HdR. Cédric Damour	Université de La Réunion	Examineur

Table des matières

Introduction générale.....	12
I. Etat de l’art des défauts, du diagnostic et du contrôle de PEMFC	17
A. Contexte.....	17
B. Diagnostic de PEMFC	19
a. Les défauts.....	19
b. Outils de diagnostic pour les PEMFC	26
C. Les schémas de contrôle	30
II. Analyse structurelle des défauts (ASD)	32
A. Définition et objectifs	32
B. Gestion des systèmes dynamiques.....	32
a. Les graphes bipartis	33
b. Différenciation.....	34
c. Représentation des défauts	34
d. Variables connues et variables inconnues	35
C. Application de l’ASD au noyage d’une PEMFC :	37
a. Lecture du graphe de structure pour le défaut de noyage.....	43
b. Interprétation du graphe de structure.....	43
D. Application à la gestion du défaut d’assèchement d’une PEMFC :	44
a. Extraction de la matrice d’incidence	48
b. Lecture du graphe de structure pour le défaut d’assèchement.....	49
III. Contrôle tolérant aux défauts (Fault Tolerant Control (FTC)).....	54
A. Stratégies de FTC	54
a. Stratégies passive : PFTC	54
b. Stratégies active : AFTC.....	54
B. Outils de contrôle pour des stratégies AFTC.....	57
C. Outils de décisions pour des stratégies d’AFTC	59
D. Etat de l’art de la commande tolérante aux défauts active (AFTC)	62
E. Stratégies AFTC appliquée aux systèmes PEMFC	64
IV. Algorithme de décision et protocole expérimental.....	66
A. Construction d’un algorithme de décision adapté aux défauts de piles à combustible de type PEMFC	66
a. Définition des entrées-sorties de l’algorithme de décision.....	66
b. Format des données à traiter	67
c. Traitement des données	68
d. Décisions à effet rapide	71
e. Simulation / validation numérique	72
f. Décisions à effet différé.....	75
B. Mise en place d’un protocole expérimental.....	80
a. Protocole expérimental	80

b.	Notion de métriques.....	82
V.	Validation expérimentale	84
A.	Dispositif expérimental.....	84
a.	Caractéristiques des assemblages membrane électrolyte (AME).....	85
b.	Banc d’essai FCT.....	86
c.	Interface graphique Labview™ et communication avec Matlab™	88
d.	Outil de diagnostic implanté sur le banc FCT	90
e.	Génération de la base de données (Bdd)	91
f.	Modèles de réseaux de neurones en vue de diagnostic de défaut de PEMFC.....	92
B.	Test temps-réel et validation de la stratégie AFTC sur le défaut de noyage cathodique	95
a.	Génération d’un défaut de noyage à faible sévérité à courant constant	97
b.	Génération d’un défaut de noyage atténué par des décisions de faibles amplitudes .	97
c.	Récapitulatif des essais de noyage atténué par des décisions de faibles amplitudes	110
d.	Génération d’un défaut de noyage atténué par des décisions de moyennes amplitudes	117
C.	Validation de la stratégie AFTC sur le défaut d’assèchement de membrane.....	123
a.	Génération d’un défaut d’assèchement à courant constant atténué par des décisions de faibles amplitudes	123
b.	Analyse des essais d’assèchement à faibles sévérités.....	126
D.	Analyse et discussion.....	129
VI.	Conclusion générale	131
VII.	Perspectives	134
A.	Hypothèses sur les outils de diagnostic	134
a.	Etat de fraîcheur des AME	134
b.	Détection des défauts.....	135
c.	Niveau de sévérité des défauts.....	136
B.	Conception du module de décision.....	137
C.	Module de contrôle	138

Liste des figures

Figure 0-I : Evolution du niveau moyen des océans par rapport à la période de référence 1900-1905 (GIEC, 1 ^{er} groupe de travail 2013, https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/).....	12
Figure 0-II : Evolution de l’anomalie de température à la surface du globe de 1850 à 2015 (GIEC, 1 ^{er} groupe de travail 2013, https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/).....	13
Figure 0-III : Stratégie de FTC à valider.....	16
Figure I-I : Schéma de principe d’une PàC hydrogène/oxygène (Stevens et al. [5]).....	17
Figure I-II : Représentation de plaques mono polaires pour l’alimentation de cellules PEMFC (Hermann et al. [6]).....	18
Figure I-III : Courbes de polarisations extraites de l’article de Li et al. [8] illustrant les effets d’un noyage sur les performances d’une PEMFC.....	20
Figure I-IV : Classification des défauts par leurs temps d’établissement.....	23
Figure I-V : AdD menant au défaut de noyage.....	24
Figure I-VI : AdD menant au défaut de noyage avec humidification par bouilleur.....	25
Figure I-VII : AdD menant au défaut d’assèchement.....	26
Figure I-VIII : Approches et méthodes pour le diagnostic.....	30
Figure II-I : Représentation des variables connues et inconnues.....	33
Figure II-II : Représentation d’un graphe biparti.....	34
Figure II-III : Représentation énergétique macroscopique d’une pile à combustible de type PEM.....	36
Figure II-IV : graphe de structure pour le défaut de noyage.....	43
Figure II-V : matrice d’incidence complète pour le défaut d’assèchement.....	48
Figure II-VI : matrice d’incidence réduite pour le défaut d’assèchement.....	49
Figure II-VII : graphe de structure pour le défaut d’assèchement de membrane.....	49
Figure III-I : Stratégies de FTC.....	55
Figure III-II : Combinaison d’outils de diagnostic, de décision et de contrôle pour la mise en place d’une stratégie AFTC.....	56
Figure III-III : Architecture des stratégies d’AFTC avec plusieurs outils de contrôle.....	58
Figure III-IV : Processus de décisions basées sur une fenêtre glissante.....	60
Figure III-V : Processus de décisions basées sur des cas de décisions définis hors ligne.....	60
Figure III-VI : Processus de décisions basées sur des outils contrôle définis hors ligne.....	61
Figure III-VII : Processus de décisions basées sur la diminution des incertitudes et avec des actions définies hors ligne.....	61
Figure IV-I : Entrées et sorties du MdD.....	67

Figure IV-II : Matrice des probabilités d'occurrence des défauts.....	68
Figure IV-III : Création de données pour la simulation de l'algorithme AFTC	72
Figure IV-IV : Evolution des probabilités d'occurrence des défauts.....	74
Figure IV-V : Décision à effet rapide sur les débits d'air et d'hydrogène	74
Figure IV-VI : Réseau de Petri permettant la gestion des actions d'atténuation du défaut de noyage.	76
Figure IV-VII : Réseau de Petri permettant la gestion des actions d'atténuation du défaut d'assèchement	77
Figure IV-VIII : Réseau de Petri permettant la gestion des actions d'atténuation des défauts de faible stœchiométrie et de sous-alimentation anodique/cathodique.....	77
Figure IV-IX : Réseau de Petri complet représentant la stratégie d'atténuation à effet différé.....	78
Figure IV-X : Illustration d'entrée en décision à effet différé basée sur la diminution de l'intervalle temporelle (illustration issue de l'article de Dijoux et al.[80])......	79
Figure IV-XI : Cycle 1	80
Figure IV-XII : Cycle 2.....	81
Figure IV-XIII : Cycle 3.....	81
Figure IV-XIV : Cycle 4	81
Figure IV-XV : Cycle 5.....	81
Figure V-I : Schéma du système pile à combustible.....	84
Figure V-II : Banc d'essais Fuel Cell Technologies	85
Figure V-III : Montage de l'AME, des plaques bipolaires et collectrices	86
Figure V-IV : Contrôleur de température : Love Controller Series 16 A	87
Figure V-V : Contrôleur de débit massique : MKS Instrument 1179 A	87
Figure V-VI : Interface Labview™ pour la communication avec le banc de test.....	88
Figure V-VII : Processus de communication entre le script Matlab™, l'interface de communication et l'IHM.....	89
Figure V-VIII : Interface Labview™ permettant la communication entre Matlab™ et Labview™.....	90
Figure V-IX : Schéma des réseaux de neurones utilisés pour le diagnostic.....	91
Figure V-X : Profils de courant, débit et de température choisis pour la Bdd.....	92
Figure V-XI : Validation RN : erreur relative sur V	93
Figure V-XII : Diagramme de dispersion pour le modèle de tension	93
Figure V-XIII : Validation RN : signal V	93
Figure V-XIV : Validation RN : signal ΔP	94

Figure V-XV : Validation RN : erreur relative pour ΔP	94
Figure V-XVI : Diagramme de dispersion pour le modèle de pression.....	94
Le calcul d'erreur relative sur le signal de tension n'excède pas 1 % comme le montre la Figure V-XI et présente une très faible dispersion. La Figure V-XVII présente l'erreur relative sur le signal de chute de pression cathodique (précision du capteur de pression $> \pm 1 \%$) et indique des écarts allant jusqu'à 50 %. Ceci s'explique par un mauvais suivi des dynamiques par le modèle RN. Dans les phases où un régime permanent est installé, l'erreur relative est inférieure à 10 %. Le diagramme de dispersion de la Figure V-XVI montre en effet les écarts pouvant être assez élevés entre les valeurs estimées et mesurées. Les méthodes de calcul d'erreurs globales (RMSE et MRE) indiquent tout de même des valeurs proches de 0 ce qui indique que la majorité des valeurs estimées sont proches de celles mesurées. Ces résultats sont considérés comme étant satisfaisants pour l'utilisation des RN identifiés dans le module de diagnostic.....	
Figure V-XVIII : Processus d'atténuation d'un défaut	96
Figure V-XIX : Mesure de V_{fc} pour AFTC1	98
Figure V-XX : Mesure de ΔP_{cath} pour AFTC1	99
Figure V-XXI : Superposition de V_{fc} à ΔP_{cath} pour AFTC1.....	99
Figure V-XXII : Superposition de V_{fc} à Q_{O_2} pour AFTC1.	100
Figure V-XXIII : Superposition Q_{O_2} à ΔP_{cath} pour AFTC1.....	101
Figure V-XXIV : Superposition de V_{fc} à T_{fc} pour AFTC1	102
Figure V-XXV : Superposition de V_{fc} à ΔP_{cath} pour AFTC2	103
Figure V-XXVI : Superposition de V_{fc} à Q_{O_2} pour AFTC2	104
Figure V-XXVII : Superposition de V_{fc} à T_{fc} pour AFTC2	106
Figure V-XXVIII : Superposition de V_{fc} à ΔP_{cath} pour AFTC3	107
Figure V-XXIX : Evolution de V_{fc} et de Q_{O_2} pour AFTC3	108
Figure V-XXX : Superposition de V_{fc} à T_{fc} pour AFTC3	109
Figure V-XXXI : Superposition de V_{fc} à l'HR% pour AFTC3.....	110
Figure V-XXXII : Superposition des courbes de polarisation pour la première phase d'essais.	112
Figure V-XXXIII : Evolution des distances entre chaque courbe de polarisation pour les essais de noyage à faible niveau de sévérité.....	114
Figure V-XXXIV : Superposition des courbes de polarisation pour la deuxième phase d'essais de noyage.....	119
Figure V-XXXV : Evolution des distances entre chaque courbe de polarisation pour les essais de noyage à niveau de sévérité moyen.	120

Figure V-XXXVI : Superposition de V_{fc} à ΔP_{cath} (AFTC4).....	124
Figure V-XXXVII : Superposition de V_{fc} à Q_{O_2} (AFTC4)	125
Figure V-XXXVIII : Superposition de V_{fc} à T_{fc} (AFTC4).....	126
Figure VII-I : AME déchirée suite à un trop fort débit	134
Figure VII-II : Architecture AFTC incluant un outil d'estimation de la SoH d'une PEMFC	135
Figure VII-III : Architecture AFTC incluant un outil de diagnostic permettant la détermination des niveaux de sévérité.....	137
Figure VII-IV : Architecture AFTC incluant un outil de surveillance.....	138

Liste des tableaux

Tableau I-1 : Défauts dans les PEMFC, effets, temps de réponse, paramètres impliqués et réversibilité.....	22
Tableau I-2 : Table des notations	26
Tableau I-3 : classification des méthodes de diagnostic et de leurs caractéristiques	29
Tableau II-1 : description des contraintes utilisées pour l'analyse structurale du défaut de noyage	41
Tableau II-2 : matrice d'incidence complète pour le défaut de noyage	41
Tableau II-3 : matrice d'incidence réduite pour le défaut de noyage.....	42
Tableau II-4 : description des contraintes utilisées pour l'analyse structurale du défaut d'assèchement	48
Tableau II-5 : table des notations	51
Tableau IV-1 : Classification des règles d'appartenance et des fonctions d'appartenance.....	70
Tableau IV-2 : Conditions de fonctionnements	82
Tableau V-1 : Caractéristiques des AME.....	85
Tableau V-2 : Validation des RN : erreurs de modélisation	94
Tableau V-3 : Comparaison des grandeurs pour l'interprétation des expérimentations	96
Tableau V-4 : Actions correctrices de la métrique 1	110
Tableau V-5 : Actions correctrices de la métrique 2.....	111
Tableau V-6 : Durée des actions correctrices à effet rapide (métrique 3).....	111
Tableau V-7 : Durée avant retour en condition sans défaut (métrique 4)	111
Tableau V-8 : Nombre de capteurs utilisés (métrique 5)	112
Tableau V-9 : Calcul des pentes dans les ZPPO pour chaque courbe de polarisation	114
Tableau V-10 : Récapitulatif des actions menées lors des essais AFTC sur un noyage faible et à courant constant.....	115
Tableau V-11 : Actions correctrices (métrique 1).....	117
Tableau V-12 : Amplitudes des actions correctrices (métrique 2).....	117
Tableau V-13 : Durée des actions correctrices à effet rapides (métrique 3)	118
Tableau V-14 : Durée avant retour en conditions sans défaut (métrique 4).....	118
Tableau V-15 : Nombre de capteurs utilisés	118
Tableau V-16 : Calcul des pentes dans les zones de pertes ohmiques pour chaque courbe de polarisation	121
Tableau V-17 : Récapitulatif des actions menées lors du quatrième essai AFTC sur un noyage a sévérité moyenne	121

Tableau V-18 : Nombre d'actions correctrices (métrique 1)	126
Tableau V-19 : Nombre d'actions correctrices (métrique 2)	127
Tableau V-20 : Durée des actions correctrices à effet rapide (métrique 3).....	127
Tableau V-21 : Durée avant retour en conditions sans défaut (métrique 4).....	127
Tableau V-22 : Nombre de capteurs utilisés	127
Tableau V-23 : Récapitulatif des actions menées lors du premier essai AFTC sur un assèchement à faible sévérité	128
Tableau V-24 : Essais d'atténuation effectués	129

Liste des abréviations

$Q_{in,fc}$	Débit en entrée de la PEMFC	m^3/s
$Q_{out,fc}$	Débit en sortie de la PEMFC	
T_{canal}	température de la canalisation d'entrée de la PEMFC	K
T_{fc}	Température de la PEMFC	K
I_{fc}	Courant de la PEMFC	A
T_{ballon}	Température du ballon d'humidification (dans le cas où le système d'humidification est composé d'un ballon d'humidification)	K
$P_{H2O,fc}$	Pression partielle d'H2O dans la PEMFC	Barg
$P_{H2O,sat,fc}$	pression de vapeur saturante dans la PEMFC	Barg
q_{O2}	débit d'O2 en entrée de pile	m^3/s
q_{hum}	débit de vapeur injecté dans le débit d'oxygène	m^3/s
T_{fc}	température de pile	K
I_{fc}	courant de la pile	A
C_h	capacité hydraulique représentant l'accumulation de gaz dans le circuit	
P_{O2}	pression partielle d'O2 en entrée de pile	Barg
P_{scO2}	pression partielle d'O2 sur le site catalytique	Barg
R_{dO2I}	résistance de distribution	Ω/cm^2
P_{tot}	pression totale des gaz en entrée de pile	Barg
P_{sat}	Pression de vapeur saturante	Barg
P_{H2O}	pression partielle de la vapeur en entrée de pile	Barg
q_{O2hum}	débit d'oxygène humidifié en entrée de pile	m^3/s
q_{H2O}	débit de vapeur d'eau	m^3/s
q_{cO2}	débit de gaz consommé	m^3/s

N	nombre de cellule	
F	constante de faraday	C
R	constante des gaz parfaits	J.mol ⁻¹ .K ⁻¹
qO ₂ out	débit d'O ₂ en sortie de pile	m ³ /s
P _{sO₂}	pression en sortie de pile	Barg
R _{dO₂}	résistance en sortie de pile	Ω/cm ²
K	conductivité hydraulique (ou « coefficient de perméabilité ») du milieu poreux	m/s
A	surface de la couche de diffusion	m ²
Q	débit volumique filtrant	m ³ /s
ΔH	différence des hauteurs piézométriques	m
L	longueur piézométrique de l'échantillon	m
F _{noy}	variable influente sur le défaut de noyage	
F _{ass}	variable influente sur le défaut d'assèchement	
Λ	Contenu moyen en eau de la membrane	
τ ₀	coefficient de traîne de molécule d'eau par le flux protonique	
D _m	coefficient de diffusion effective de l'eau dans la membrane	cm ² /s
ρ _{dry}	densité de la membrane à sec	kg/cm ³
EW	poids en eau de la membrane par mole de groupe de composant sulfoné	kg/mol
V _{fc}	tension cellulaire	
R _m	résistance cellulaire	
WU	absorption de l'eau dans la membrane	mol _{H₂O} /mol _{SO₃}
t _m	épaisseur de membrane	μm
C _{H₂O}	concentration d'eau dans la membrane	mol/cm ²

Introduction générale

Le réchauffement climatique est un phénomène global dont l'impact concerne à la fois la biodiversité et les activités anthropiques. Son effet le plus marquant est l'augmentation durable des températures moyennes à la surface du globe. Plusieurs conséquences sont déjà visibles telle que la « montée des eaux » imputée à la fonte des glaciers. A titre d'exemple, la fonte du glacier du continent Antarctique, représentant un volume de 30 millions de km³, pourrait entraîner une augmentation de plusieurs mètres du niveau des océans. Les bases de données disponibles, datant de 1900 à aujourd'hui, permettent d'estimer une augmentation moyenne de 15 cm du niveau des océans en un peu plus d'un siècle. Certaines terres habitables pourraient donc, à terme, se retrouver submergées par la montée des océans. Le Groupe d'Expert Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC) rend compte, *via* la *Figure 1.1*, de l'évolution du niveau moyen des océans depuis l'année 1900.

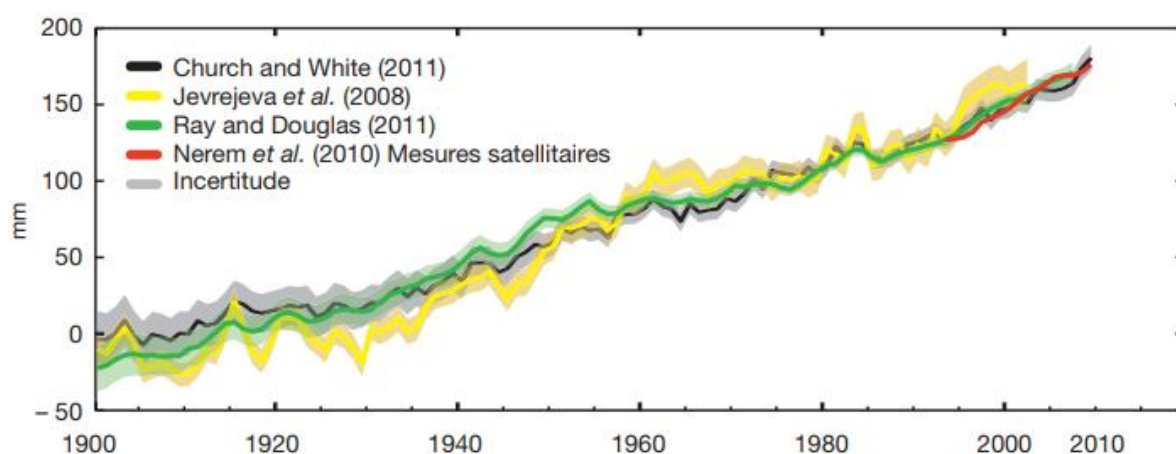


Figure 0-I : Evolution du niveau moyen des océans par rapport à la période de référence 1900-1905 (GIEC, 1^{er} groupe de travail 2013, <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>).

Cette Figure 0-I montre une augmentation d'environ 1,7 mm/an sur la période de 1901 à 2010. L'élévation s'accélère sur les dernières décennies pour atteindre environ 3,2 mm/an (période allant de 1993 à 2010 et s'appuie sur des mesures satellitaires). Même si les causes du réchauffement climatique ne sont pas admises par tous, la communauté scientifique et le GIEC sont parvenus à un consensus sur son origine. Selon eux, l'activité anthropique perturbe l'équilibre climatique naturel par une émission soutenue de gaz à effet de serre (GES). Les émissions de dioxyde de carbone (CO₂), principal GES, ont connu une augmentation de plus de 40% depuis les années 1750. Cette forte augmentation a un impact direct sur la température moyenne à la surface du globe (Cf. Figure 0-II).

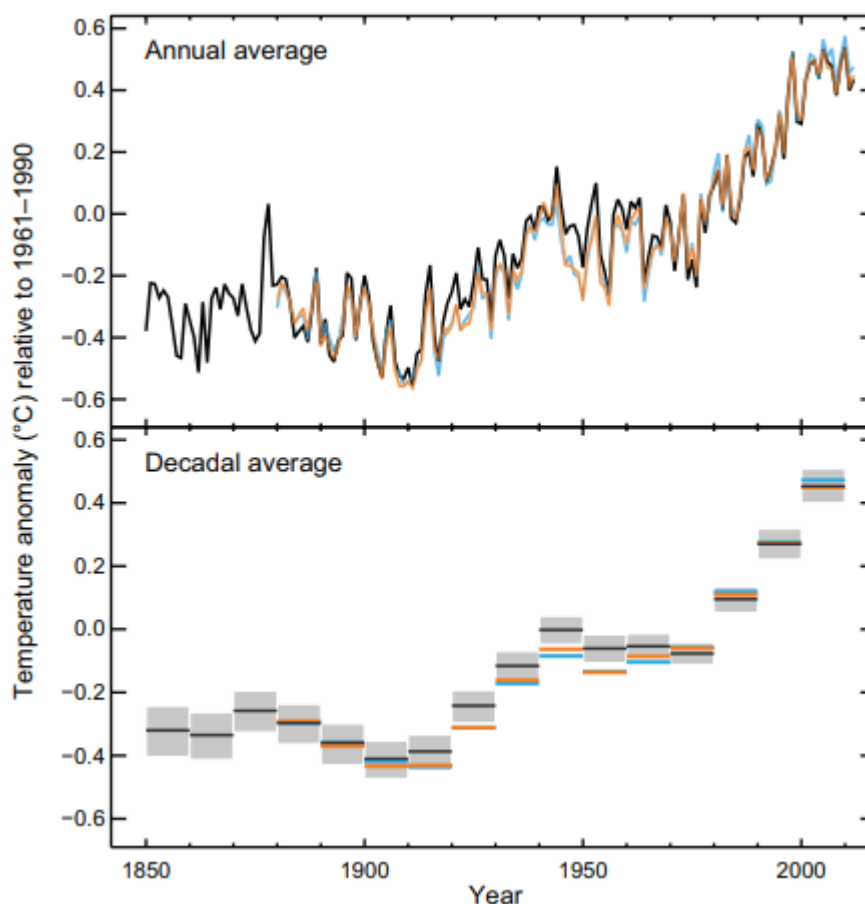


Figure 0-II : Evolution de l'anomalie de température à la surface du globe de 1850 à 2015 (GIEC, 1^{er} groupe de travail 2013, <https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>).

La Figure 0-II montre une nette augmentation de la température à la surface du globe à partir des années 1950. Avec une anomalie moyenne de $+0,74^{\circ}\text{C}$, l'année 2015 est la plus chaude depuis 1850. De cette augmentation résultent plusieurs phénomènes, en particulier une perte massive de la biodiversité qui s'accélère partout dans le Monde. Warren et al. [1] estiment qu'une augmentation de 2°C de la température moyenne de la planète engendrera une perte de l'ordre de 25% des espèces à l'horizon de 2100.

Afin de limiter la hausse des températures et de ces conséquences, plusieurs gouvernements se sont réunis à Paris en 2015 dans le cadre de la COP21¹ (conférence internationale réunissant chaque année les pays signataires de la Convention Cadre des Nations Unies sur le changement Climatique). Un des objectifs de la COP21 était de trouver des solutions pour limiter l'augmentation de la température moyenne à $+2^{\circ}\text{C}$. En France, pour atteindre cet objectif, la diminution de la production électrique d'origine nucléaire et le remplacement des technologies émettrices de GES au profit d'autres, plus propres, sont priorisées. Parmi les technologies matures, les centrales photovoltaïques, éoliennes ou houlomotrices pelamis permettent la conversion en électricité des ressources d'énergie renouvelables (EnR), disponibles et

¹ Source : <https://www.apc-paris.com/cop-21>

abondantes sur Terre. Cependant, l'aspect intermittent de certaines EnR ne permet pas une production continue d'électricité pour une consommation directe et permanente. De plus, plusieurs verrous technologiques demeurent concernant le stockage de ces énergies.

Il existe plusieurs systèmes de stockage, permettant de convertir les flux d'énergie intermittente en stocks, pour les rendre disponibles à tout moment. Des technologies matures permettent de stocker l'énergie sous forme électrochimique/électrostatique (batteries, condensateurs, etc...), mécanique (potentielle gravitaire ou cinétique) ou encore thermique/thermochimique (chaleur sensible ou latente). Cependant, le développement à grande échelle de ces techniques est freiné par des contraintes opérationnelles (flexibilité, capacité de stockage, conditions de fonctionnement), environnementales (cycle de vie) et économiques (investissement, maintenance).

Le stockage d'énergie sous forme chimique issue de la biomasse (bois, bioéthanol, pétrole etc...) nécessite quant à lui de longues périodes de production pour une faible efficacité énergétique. Sous réserve d'être alimenté par des EnR, la production d'hydrogène (H₂) électrolytique permet le développement de stocks diffus à grande échelle, tout en limitant leur impact environnemental et économique. L'hydrogène produit peut ainsi être consommé aux heures où les sources d'énergie renouvelables ne sont pas disponibles, soit par combustion directe [2] soit par conversion électrochimique [3].

La conversion électrochimique est opérée par des piles à combustible, qui réalisent la réaction inverse de l'électrolyse en recombinaison des molécules d'hydrogène et d'oxygène pour former de l'eau et produire de l'électricité et de la chaleur. Il en existe plusieurs types, dont le type à membrane échangeuse de protons (PEMFC). Suivant le mode d'utilisation (en embarqué ou en stationnaire), leurs durées de vie sont variables. Les objectifs à atteindre pour rendre ces technologies intéressantes pour des applications industrielles sont de 5000 et 40 000 heures de fonctionnement pour les modes embarqués (dont le profil d'utilisation n'est pas connu à l'avance) et stationnaires respectivement [4].

En pratique, l'utilisation de PEMFC sur de longues durées entraîne un vieillissement dû aux dégradations de leurs composants. Cependant le phénomène de vieillissement n'est pas l'unique raison de la baisse de performances des PEMFC. L'apparition d'anomalies (défauts) lors de leur fonctionnement peut aussi provoquer la dégradation rapide des composants du système, diminuant ainsi les performances de la PEMFC. Les dégradations des constituants des PEMFC peuvent donc se manifester à des échelles de temps différentes, qu'elles résultent du vieillissement des constituants ou de l'apparition d'anomalies de fonctionnement. Dans tous les cas, il résulte une perte définitive de performance du système PEMFC. Les défauts possédant des effets dégradants rapides, il est nécessaire de les détecter précocement pour en atténuer les effets et éviter une baisse de performance.

Les travaux présentés dans ce manuscrit concernent la mise en œuvre d'une méthodologie de contrôle des PEMFC prenant en compte l'occurrence des défauts de PEMFC. La stratégie développée est une commande tolérante aux défauts qui vise la limitation de leurs apparitions et la diminution de leurs effets. La commande tolérante aux défauts (FTC) permet en effet une

atténuation suffisamment précoce du défaut pour en diminuer les conséquences (baisse de performance et dégradations).

Les travaux menés dans le cadre de cette thèse ont été réalisés en collaboration entre FEMTO-ST, dans le cadre de la fédération de recherche FCLAB et le L2EP à l'Île de la Réunion. Ils s'inscrivent dans la continuité des travaux initiés en 2004 sur le diagnostic des piles à combustible PEMFC à FEMTO-ST et des travaux sur le FTC en 2015 au L2EP (Lebreton [55]). Ils s'inscrivent dans l'enjeu particulier que représente l'objectif d'atteindre l'autonomie énergétique à La Réunion en 2030.

Le premier chapitre fait un état de l'art sur les défauts, le diagnostic et le contrôle des systèmes PEMFC. Cette revue bibliographique a pour objectif de mettre en évidence les défauts pouvant intervenir durant le fonctionnement et comment ils peuvent être diagnostiqués.

Le deuxième chapitre traite de l'analyse structurelle des défauts (ASD). L'ASD permet de faire une synthèse de la connaissance des composants du système pouvant être sujets aux défauts, des variables de commande et des couplages pouvant résulter de la manipulation de ces variables.

Le troisième chapitre présente des stratégies FTC pour le contrôle de système pouvant être soumis à l'apparition de défauts. Ce chapitre permet la mise en place d'une stratégie FTC en trois modules applicables à une PEMFC.

Le quatrième chapitre décrit l'architecture de l'algorithme de décision utilisé dans l'architecture FTC mis en place dans le chapitre précédent.

Le cinquième et dernier chapitre, propose une validation expérimentale de l'architecture FTC développée dans les chapitres précédents. L'analyse des résultats expérimentaux qui y sont exposés ouvre sur les perspectives d'amélioration et de développement de l'architecture FTC.

Ces travaux de thèse ont donc pour objectif la mise en place d'une stratégie de commande tolérante aux défauts active par l'utilisation d'une stratégie en trois modules. La stratégie, construite à partir d'un état de l'art et d'une analyse structurelle de défauts, sera ensuite validée en ligne sur une mono cellule de pile à combustible PEMFC au laboratoire. La stratégie de FTC à valider et représentée sur la *Figure 0-III*, peut être représentée par une structure itérative composée d'outils de diagnostic, de décisions et de contrôles.

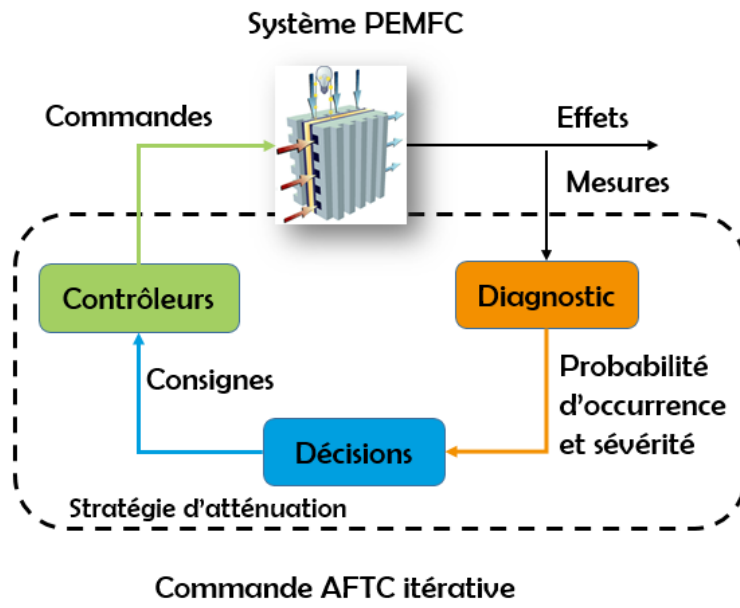


Figure 0-III : Stratégie de FTC à valider

I. Etat de l'art des défauts, du diagnostic et du contrôle de PEMFC

A. Contexte

Dans le contexte de la lutte contre le réchauffement climatique, l'utilisation de systèmes piles à combustible (PàC) PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) pouvant convertir l'hydrogène produit à partir de sources renouvelables en courant électrique représentent une bonne alternative pour la production d'énergie électrique décarbonée. Ces systèmes possèdent cependant une durée de vie limitée et des performances rapidement réduites lors de fonctionnement en conditions de défaut. Pour réduire l'exposition des PEMFC à ce type de fonctionnement et améliorer leur résilience, plusieurs axes scientifiques sont encore à l'étude.

Durant la dernière décennie, plusieurs études ont permis d'améliorer la compréhension du comportement et de l'utilisation de ces systèmes. Le principe de fonctionnement des systèmes PàC de type PEMFC est représenté sur la La Figure I-I :

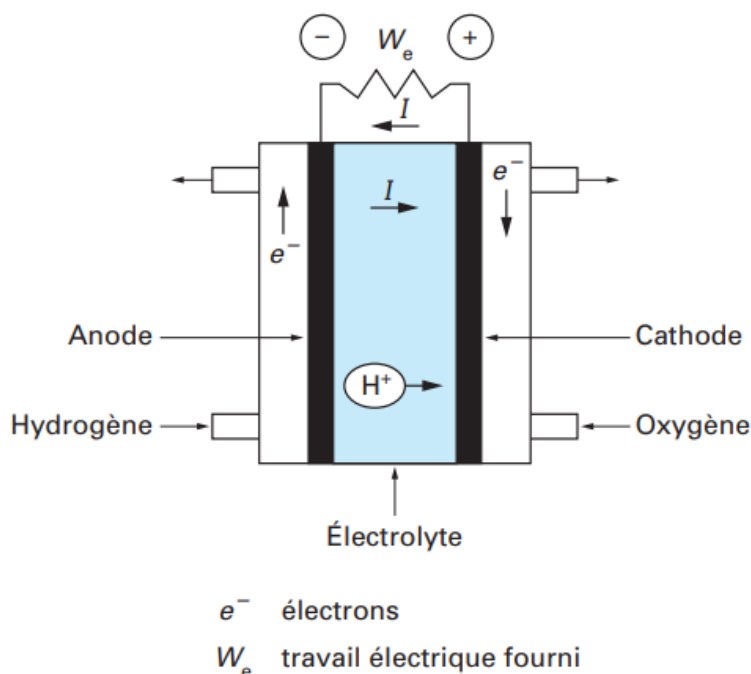
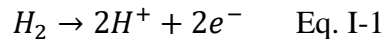


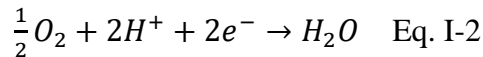
Figure I-I : Schéma de principe d'une PàC hydrogène/oxygène (Stevens et al. [5])

La PàC PEMFC est constitué d'une anode (alimenté par de l'hydrogène (H_2)) et d'une cathode (alimentée par de l'oxygène (O_2)). A l'anode, l' H_2 est oxydée par un catalyseur constitué de

platine (Pt). Cette oxydation permet la formation de deux protons d'hydrogène et de deux électrons comme présenté dans Eq. II-1 :



A la cathode l'O₂ est réduite par l'H⁺ à l'aide d'un catalyseur constitué de Pt. La réduction permet la production de molécules d'eau (H₂O) par la réaction suivante :



Les électrons émis à l'anode sont mis en mouvement par une charge électrique les faisant migrer vers la cathode.

Les compartiments anodique et cathodique sont séparés par une membrane conductrice de protons H⁺. Cette membrane, un électrolyte solide, possède aussi la propriété d'empêcher les réactifs (H₂ et O₂) de se mélanger.

L'arrivée de réactifs dans la PàC est effectuée par l'intermédiaire de canaux d'alimentation directement usinés dans des plaques bipolaires ou mono polaire. Plusieurs topologies de canaux d'alimentation sont possibles, et chacune d'entre elles influence les performances de la PàC.

Une cellule de PàC PEMFC est constituée des éléments présentés sur la Figure I-I, sur laquelle est ajoutée deux plaques bipolaires (dans le cas de plusieurs cellules en parallèle) ou deux plaques mono polaires (pour une seule cellule). La superposition des couches de diffusion, de la couche catalytique et de la membrane PEMFC est nommée : Assemblage Membrane Electrolyte (AME). Un empilement de cellules (AME+plaques bipolaire) est appelé « stack ». La Figure I-II issue de l'article d'Hermann et al. [6] représente la mise en place de deux plaques mono polaire permettant l'alimentation d'une cellule de PàC par de l'H₂ et de l'O₂.

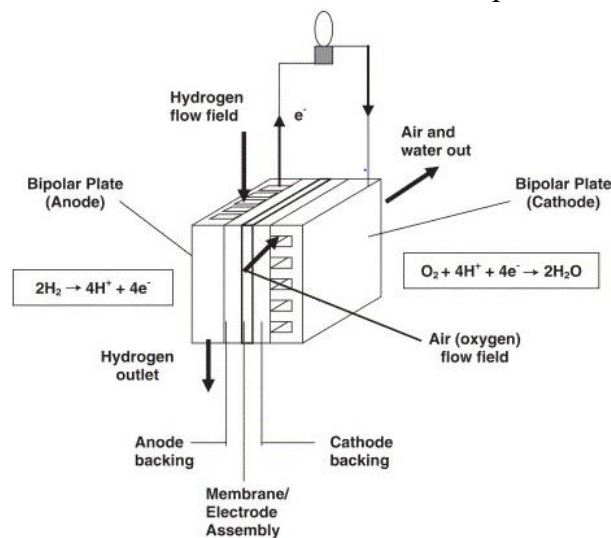


Figure I-II : Représentation de plaques mono polaires pour l'alimentation de cellules PEMFC (Hermann et al. [6])

L'O₂ humidifié (mélange d'O₂ et d'eau sous forme de vapeur) arrivant à la cathode via une plaque mono polaire traverse un milieu poreux, la couche de diffusion, permettant une meilleure

diffusion du réactif à la surface catalytique. La production d'eau, due à la réduction de l'O₂, quitte la couche catalytique par la couche de diffusion pour être évacuée dans les canaux d'alimentation de la plaque mono polaire (ou bipolaire).

Le fonctionnement normal d'une PàC PEMFC est dépendant des conditions opératoires et notamment de l'absence d'anomalies (*i.e.* défauts). Ce maintien en condition sans défaut est possible par l'utilisation d'outils de contrôle permettant l'alimentation en réactif et la régulation en température du système.

Ce premier chapitre vise la mise en évidence des conditions défectueuses auxquelles les PEMFC sont sujettes. Dans cette partie, les caractéristiques des défauts pouvant apparaître durant le fonctionnement du système sont décrites afin de permettre une meilleure compréhension de leurs mécanismes et de leurs effets, ainsi qu'une identification des paramètres influençant leur apparition. Ensuite, un état de l'art des outils de diagnostic est proposé afin d'identifier les approches possibles pour la détection et l'isolation de défauts. La seconde partie traite des stratégies de contrôle permettant des actions d'atténuation de défauts. En effet, chaque défaut ayant une influence différente sur le fonctionnement d'une PEMFC, il est nécessaire d'identifier les outils de contrôle adaptés pour chacun d'eux. Enfin, la dernière partie consiste en une analyse des stratégies d'atténuation de défauts pour l'amélioration des performances de la PEMFC et de sa durée de vie.

Dans la suite de ce document et par soucis de synthèse, le terme PàC PEMFC sera réduit en PEMFC.

B. Diagnostic de PEMFC

a. Les défauts

Les systèmes PEMFC peuvent être sujets à différents modes de fonctionnement défectueux. Piechowiak et al. [7] définissent le défaut comme étant une diminution des performances du système causée par des dégradations majeures ou minimes. D'autres études classifient les défauts selon des critères tels que : les effets, le temps de réponse, le caractère (réversible ou irréversible) ou la localisation. Les défauts les plus fréquents pouvant apparaître lors du fonctionnement de la PEMFC sont les défauts liés à la gestion de l'eau [8], [9]. Le noyage des canaux de distribution ou des électrodes et l'assèchement de la membrane (dans le cas d'une PàC avec une unique cellule) en sont les deux occurrences. Le noyage est défini comme étant une accumulation d'eau liquide dans la canalisation d'alimentation ou dans la couche de diffusion des électrodes, limitant l'accès des réactifs aux zones réactionnelles, et diminuant alors les taux de réactions. L'assèchement de membrane est défini comme étant une hydratation insuffisante de la membrane PEMFC augmentant ainsi sa résistivité protonique. Les défauts les plus impactants du point de vue de leurs faibles temps d'exposition sont : la « sous-alimentation » cathodique ou anodique, l'empoisonnement au monoxyde de carbone (CO) et le court-circuit.

i. Défauts liés à la gestion de l'eau

Afin de garantir un fonctionnement optimal de la pile à combustible, les paramètres de fonctionnement doivent être maintenus autour de valeurs nominales : une bonne gestion de l'état d'hydratation consiste à maintenir une quantité optimale d'eau au sein de la pile à combustible, afin d'éviter une situation de noyage en cas d'excédent ou d'assèchement dans le cas contraire.

Li et al. [8] identifient le noyage comme étant le défaut le plus récurrent dans le cas des PEMFC et soulignent que la cathode --étant le lieu de production d'eau-- est particulièrement atteinte. De plus, la probabilité d'occurrence d'un défaut de noyage augmente pour de forts courants ou lorsque la température des gaz d'alimentation est plus élevée que celle de la PEMFC (stack ou mono-cellule). Enfin, plus le débit de gaz est faible, plus la quantité d'eau évacuée le sera, et plus fort sera le noyage. Les auteurs ont donc défini sur la Figure I-III quatre intensités de noyage dont la plus forte correspond à la plus grande baisse de performances.

Le défaut de noyage possède deux lieux d'occurrence. Le premier est situé dans les canaux d'alimentation de la PEMFC (dans les plaques bipolaires ou mono polaire). En effet, une accumulation d'eau liquide dans ces canaux fait obstruction au passage des réactifs réduisant ainsi les performances globales de la PEMFC. Cette accumulation est provoquée par une évacuation insuffisante de l'eau accumulée *via* le flux d'entrée de réactif.

Il existe plusieurs phénomènes provoquant l'apparition du défaut de noyage. Ces phénomènes résultent sur l'accumulation d'eau liquide dans les canaux d'alimentation de la PEMFC et/ou dans la couche de diffusion. En effet, la coalescence des gouttelettes provoque l'apparition de bouchons d'eau, faisant obstacle à l'arrivée des réactifs à la couche catalytique. Ce phénomène s'intensifie pour un stack à cause d'un gradient de répartition d'eau plus important. Lee et al. [10] montrent dans leur article qu'un serpentin unique permet une meilleure évacuation de l'eau que pour une configuration à plusieurs branches parallèles.

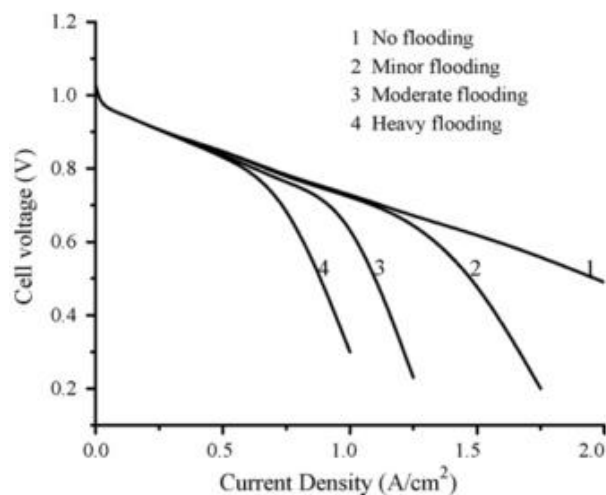


Figure I-III : Courbes de polarisations extraites de l'article de Li et al. [8] illustrant les effets d'un noyage sur les performances d'une PEMFC.

Par opposition au défaut de noyage, le défaut d'assèchement apparaît lorsque la membrane n'est pas suffisamment hydratée, ce qui entraîne une augmentation de sa résistivité protonique.

L'assèchement apparaît notamment lorsque la température des gaz d'alimentation est plus basse que celle de la PEMFC [11] ou lorsque les gaz ne sont pas suffisamment humidifiés en entrée. En effet, les gaz d'alimentation sont humidifiés et participent (tout comme l'eau issue de la réaction d'oxydo-réduction) à hydrater la membrane PEMFC lui permettant d'être perméable aux protons. A l'anode, le flux protonique à-travers la membrane crée un flux électroosmotique contribuant à l'hydratation de la membrane. A la cathode l'eau produite et celle qui est exogène, hydratent la membrane par effet de diffusion.

ii. Défaut de court-circuit

Silva et al. [12] ont étudié le défaut de court-circuit et ses effets sur les performances d'un stack PEMFC de 3.8 kW. Ils notent que durant un court laps de temps (moins d'une seconde), le court-circuit permet la production d'une grande quantité d'eau, ce qui diminue la résistivité membranaire tout en éliminant les espèces oxygénées à la surface catalytique. Ceci permet d'avoir un regain de performance du système. Cependant, durant les conditions de court-circuit un fort gradient de température apparaît et des points chauds se forment sur certaines régions de l'AME. De plus, les réactifs ne peuvent pas être injectés suffisamment rapidement ce qui induit un gradient de concentration de réactif et des phénomènes de « sous-alimentation » locaux, provoquant des dégradations irréversibles de la couche catalytique.

iii. Défaut de sous alimentation

Yousfi-Steiner et al. [13] définissent la sous-alimentation (« starvation » en anglais) comme étant une sous-alimentation locale ou globale en réactifs. Une sous-alimentation locale peut être due à une distribution irrégulière de réactifs alors que d'une manière globale la quantité est suffisante, respectant le débit stœchiométrique défini par la loi de Faraday. La sous-alimentation globale est due à une insuffisance d'alimentation générale c'est-à-dire une quantité de réactif inférieure au débit stœchiométrique. Dans les deux cas, le faible débit et l'humidité relative des gaz amplifient le phénomène et donc mènent à une oxydation du platine ou à la corrosion du support catalytique (carbone).

iv. Défaut d'empoisonnement au monoxyde de carbone (CO)

Un autre défaut peut aussi être lié à l'alimentation des gaz en entrée de pile : l'empoisonnement au CO [3]. En effet, la présence de CO engendre un phénomène d'adsorption du platine ce qui induit une réduction de surface de réaction diminuant les performances du système [14], [15]. L'empoisonnement au CO dépend de plusieurs facteurs : taux de CO dans les gaz d'entrée, temps d'exposition, température de la PEMFC ou encore la nature du catalyseur. Pour ce dernier facteur, certaines PEMFC utilisent un catalyseur formé d'un alliage Pt-Ruthénium. Ce métal ayant pour propriété de formation de complexes avec les molécules de CO est associé au Pt pour limiter les risques d'empoisonnement au CO.

v. Effets des défauts sur une PEMFC

D'une manière générale, les effets d'un défaut sur une PEMFC ne sont pas instantanés. Le temps de réponse d'un noyage ou d'un assèchement est directement corrélé à la dynamique de l'écoulement pouvant aller de la seconde à plusieurs minutes. Dans le cas d'empoisonnement

aux hydrocarbures (exemple à part le CO), le temps de réponse est bien plus grand que pour les défauts précédents. Cela peut durer de quelques secondes à plusieurs jours avant que ces effets ne deviennent non négligeables comme montrés dans l'article de Lee et al [16]. Le défaut de sous-alimentation a un temps de réponse bien plus petit que celui évoqué précédemment. Son temps de réponse peut s'établir dans un intervalle d'une milliseconde à une seconde (préciser la cause). Cependant, ce n'est pas le défaut avec le temps de réponse le plus court. Avec un intervalle temporel variant de la microseconde à la milliseconde, le défaut de court-circuit possède le temps de réponse le plus court. Le Tableau I-1 fait une classification des défauts en mettant en évidence le temps de réponse, les effets, le caractère réversible ou irréversible ainsi que les paramètres impliqués dans leurs apparitions.

Tableau I-1 : Défauts dans les PEMFC, effets, temps de réponse, paramètres impliqués et réversibilité

Défaut	TR (sec)	Effets	Réversibilité	Paramètres impliqués
Court-circuit	10^{-6} à 10^{-2}	Dégradation de la membrane et de la couche catalytique [12]	Irréversible	HR, T, D, PP, I (exemple dans [10])
Starvation	10^{-3} à 10^1	Dégradation de la couche catalytique [9]	Irréversible	HR, T, D, PP, I (exemple dans [10])
Noyage	10^0 à 10^3	Perte de performance, dégradation progressive de la PEMFC. Une longue exposition au noyage peut provoquer une sous-alimentation [17]	Réversible si traité dans les temps	D, I, HR, T (exemple dans [18])
Assèchement	10^0 à 10^3	Perte de performance et dégradation de la membrane due à une potentielle apparition de microtrous (pinholes) [11]	Entièrement réversible si traité dans les temps	T, HR, Cg, Te, I [9]
Empoisonnement au CO	10^1 à 10^5	Perte de performance et apparition potentielle de sous-alimentation [3]	Réversible si faible exposition	HR, T, D, PP (exemple dans [107])

Légende :

TR : Temps de Réponse

HR : Humidité relative

T : Température

I : Courant

Cg : Composition du gaz

Te : Temps d'exposition

Comme évoqué précédemment, chaque défaut possède un temps de réponse et influence différemment le fonctionnement d'une PEMFC. Le temps d'exposition aux défauts est un facteur clef, déterminant la capacité à retrouver les performances initiales. La Figure I-IV est une classification temporelle des temps d'établissement des défauts relevés dans la littérature.

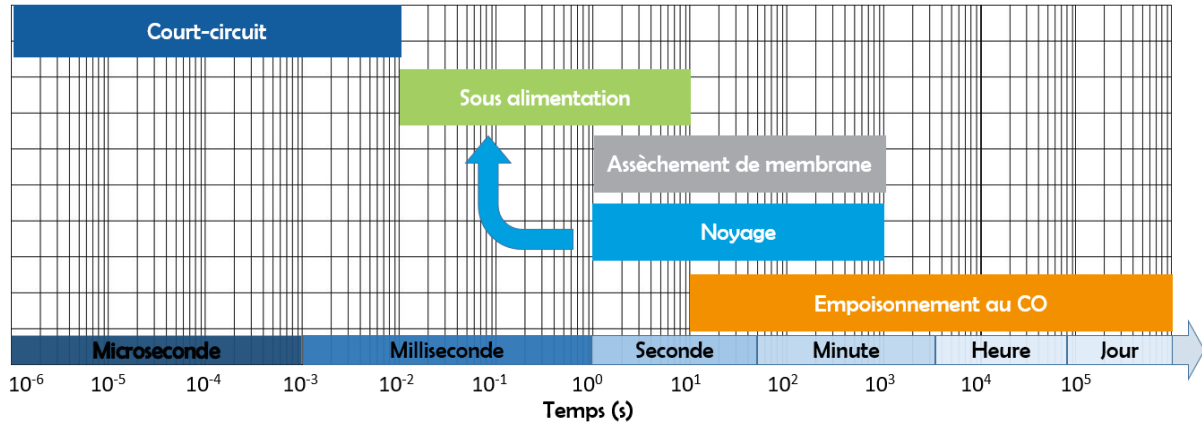


Figure I-IV : Classification des défauts par leurs temps d'établissement.

Dans le cadre de ces travaux, les défauts étudiés concernent le noyage cathodique et d'assèchement de membrane. D'une part, ce sont les défauts les plus couramment rencontrés et d'autre part, ceux qui sont les plus aisés à générer sur les moyens d'essais disponibles. Les expérimentations sont menées sur une mono-cellule, pour des raisons de faciliter de mise en œuvre et de disponibilité du banc.

La génération (*i.e.* l'apparition) de ces défauts, répond à des combinaisons d'évènements présentés à la section suivante sous formes d'arbres de défaillances (AdD).

vi. Apparition du défaut de noyage

L'utilisation d'arbres de défaillance permet de comprendre les mécanismes provoquant l'apparition de défauts suite à des combinaisons d'évènements de base. Ils apportent donc de l'information sur les variables responsables de l'apparition de défauts ou pour leurs atténuations. Dans le cas d'un noyage cathodique, l'engorgement des serpentins d'alimentation peut provenir de deux types de mécanismes :

- Type 1 : condensation et accumulation d'eau dans les canaux d'alimentation ou la couche de diffusion, couplé à un drainage insuffisant. On considère alors qu'il existe une série d'évènements menant à la formation d'eau liquide dans la canalisation d'alimentation de la PEMFC. Yousfi Steiner et al. [19] proposent dans leur article un arbre de défaillance (AdD) montrant les mécanismes possibles d'un défaut de noyage pour un stack. La Figure I-V est un AdD menant au défaut de noyage et issu de l'article [19].

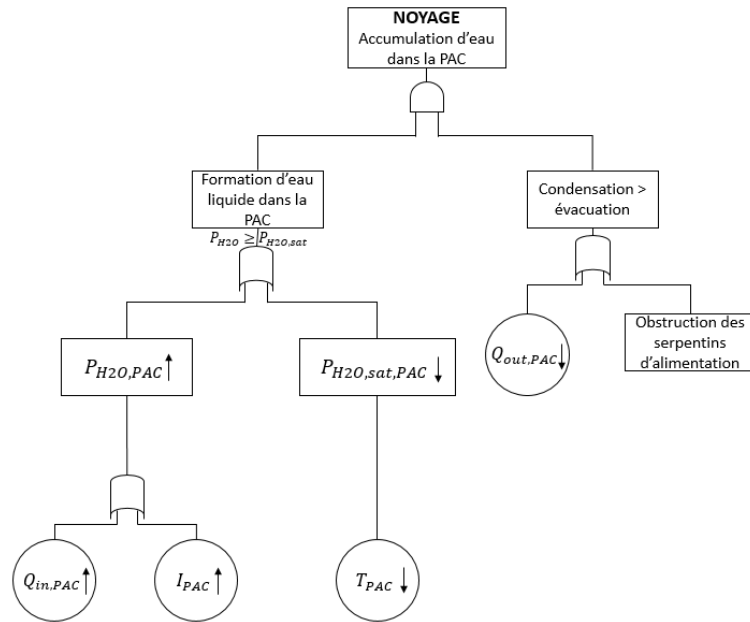


Figure I-V : AdD menant au défaut de noyage

- Type 2 : condensation de l'eau dans les auxiliaires (donc en amont de la PEMFC). Lorsque la température de la canalisation d'entrée de la PEMFC est plus basse que celle des gaz saturés en eau acheminés *via* le système d'humidification, la vapeur d'eau excédentaire contenue dans les gaz en entrée se condense . Le condensat est ensuite acheminé dans les canaux d'alimentation de la PEMFC où il s'accumule jusqu'à provoquer un défaut de noyage. Afin de compléter la démarche des auteurs dans [19] pour la réalisation d'AdD menant au défaut de noyage, la Figure I-VI propose l'ajout d'évènements conduisant à l'évènement redouté.

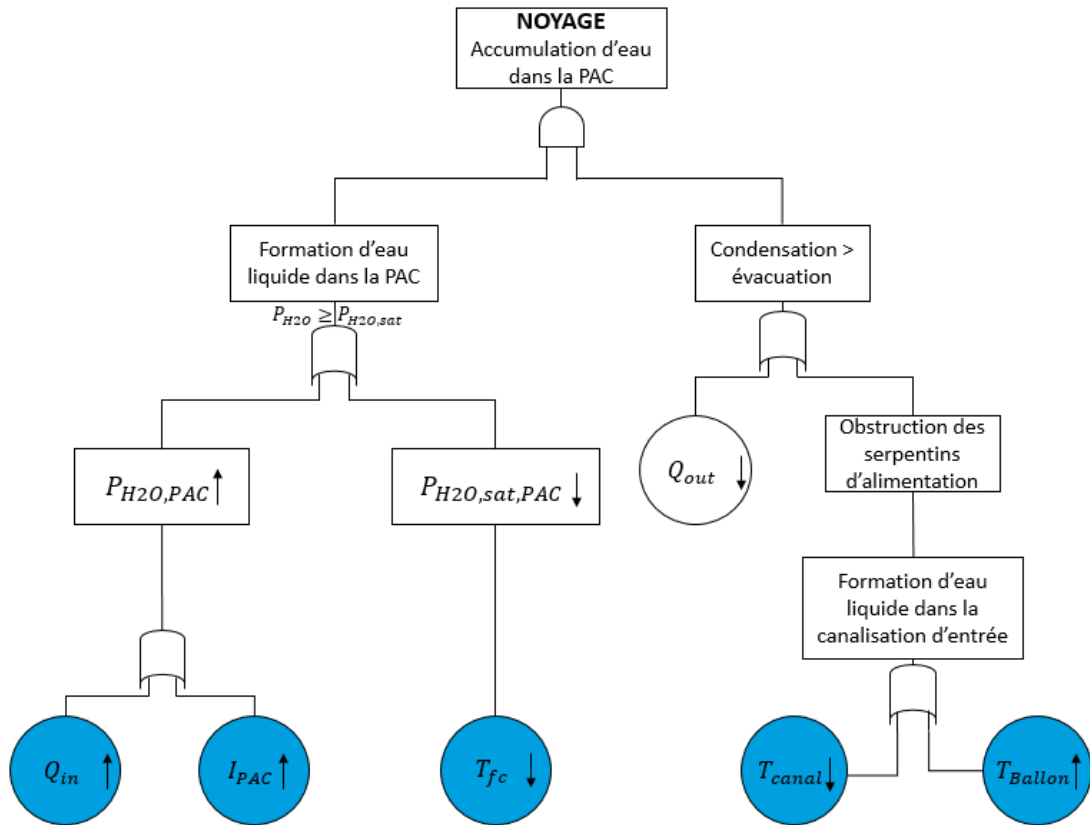


Figure I-VI : AdD menant au défaut de noyage avec humidification par bouilleur

Le cas considéré dans cet AdD est une humidification par bouilleur. Le Tableau I-2 est une table des notations des abréviations utilisées dans la Figure I-VI. Les cercles colorés mettent en évidence les variables utilisées lors de cette thèse.

vii. Génération du défaut d'assèchement de la membrane

L'assèchement apparaît suite à une anomalie de fonctionnement ou à un mauvais paramétrage des conditions opératoires provoquant une diminution du contenu en eau de la membrane. Ce phénomène est décrit par Yousfi Steiner et al. [19] dans leur article *via* un AdD (représenté sur la Figure I-VII) montrant les combinaisons possibles menant au défaut d'assèchement.

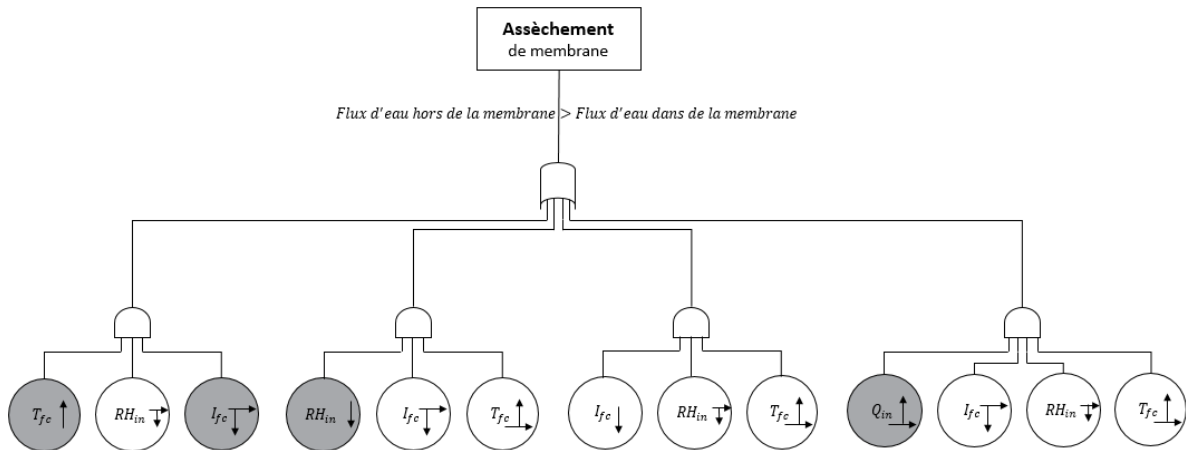


Figure I-VII : AdD menant au défaut d'assèchement

Les cercles colorés mettent en évidence les variables utilisées lors de cette thèse.

Tableau I-2 : Table des notations

Variables	Description	Unités
$Q_{in,fc}$	Débit en entrée de la PEMFC	m^3/s
$Q_{out,fc}$	Débit en sortie de la PEMFC	
T_{canal}	température de la canalisation d'entrée de la PEMFC	K
T_{fc}	Température de la PEMFC	K
I_{fc}	Courant de la PEMFC	A
T_{ballon}	Température du ballon d'humidification (dans le cas où le système d'humidification est composé d'un ballon d'humidification)	K
$P_{H2O,fc}$	Pression partielle d' H_2O dans la PEMFC	Barg
$P_{H2O,sat,fc}$	pression de vapeur saturante dans la PEMFC	Barg

b. Outils de diagnostic pour les PEMFC

Hernandez et al. [20] définissent le diagnostic des systèmes comme étant l'identification précise des défauts affectant un système ou un processus. Des travaux basés sur l'utilisation de réseaux de neurones (NN) [21], [22] ou de réseaux Bayésiens (RB) [23] sont disponibles en littérature.

A titre d'exemple, Yousfi Steiner et al.[22] utilisent un réseau de neurones (RN) pour le diagnostic d'un noyage et/ou d'un assèchement d'une PEMFC. Les entrées du modèle sont : le courant, le débit d'air, la température de saturation, température du stack. Les sorties sont : la tension du stack, la différence de pression anode/cathode. Les résidus sont calculés et une fonction seuil est utilisée pour la prise de décision. Les RN possèdent une faible généralité car leurs paramétrages est issu d'une campagne de mesures. Le changement de PEMFC provoque la mise en place d'une nouvelle campagne de mesures, d'où la faible généralité des modèles basés sur les RN.

Riascos et al.[23] ont développé un réseau Bayésien pour la détection de défauts du ventilateur dans le système de refroidissement ou pour l'augmentation du crossover (diffusion non désirée de l'hydrogène à travers la membrane de l'anode vers la cathode [24]) et de la pression d'hydrogène. Les auteurs ont utilisé le Bayesian-score (K2) et l'algorithme Markov Chain Monte Carlo pour la génération automatique du graphe. Ce type de modèle possède une forte généralité car ils sont construits à partir d'une connaissance *a priori* du système et évolue sur des règles stochastiques. La connaissance du fonctionnement global d'un système étant générale, les outils RB le sont aussi.

Enfin, Ma et al. [25] utilisent le signal de chute de pression pour l'analyse des comportements dynamiques des PEMFC. Leur but est de corréler le signal de chute de pression (entre l'entrée et la sortie d'une électrode) au contenu en eau des électrodes. L'étude montre que cette mesure est bien adaptée à l'estimation du contenu en eau aux électrodes et constitue ainsi un bon outil de diagnostic des défauts liés à la gestion de l'eau.

Les outils développés (RB et RN) sont des outils utilisables en ligne. Autrement dit, le processus de diagnostic à partir de ces outils peut être effectué pendant le fonctionnement de la PEMFC.

D'autres travaux s'intéressent aux méthodes de diagnostic basées sur le traitement de signaux tel que le travail effectué par Pahon et al. [26] : les auteurs proposent d'utiliser une transformée discrète en ondelettes du signal de tension ou de chute de pression cathodique pour le diagnostic d'une stœchiométrie d'air trop élevée.

Une autre méthode utilisée par Damour et al. [27] consiste à utiliser la décomposition en modes empiriques (EMD) pour décomposer un signal de fréquence 1kHz sur une fenêtre glissante de 60s. La technique utilisable en ligne permet la détection et l'identification des défauts de noyage et d'assèchement. Les EMD étant basés sur l'utilisation de données fréquentielles et que le comportement fréquentiel des PEMFC varie peu, ces outils possèdent une bonne généralité.

Dans d'autres travaux Legros et al. [28] explorent le domaine fréquentiel *via* la densité spectrale (Power Spectral Density : PSD) pour la détection et l'isolation du noyage et de l'assèchement. Le PSD est basé sur la mesure en ligne du bruit électrochimique (BE) effectuée directement sur les électrodes. Ils ont mis en évidence que le bruit électrochimique se propage plus lentement lorsque les gaz sont humidifiés. Les phénomènes étudiés possédant les mêmes signatures dans une même bande fréquentielle permettent une bonne généralité des outils d'EMD et de PSD..

Le Ny et al. [29] ont quant à eux utilisés une méthode de diagnostic non invasive basée sur la mesure du « champ électromagnétique proche » d'un stack de PEMFC. La méthode consiste en la mesure des signatures magnétiques générées par une PEMFC en fonctionnement pour en déterminer les densités de courant (loi de Biot et Savart). Les auteurs définissent ensuite les facteurs pouvant altérer la densité de courant afin de pouvoir en interpréter les observations. En

effet la densité de courant étant un paramètre représentatif des conditions opératoires, leurs travaux consistent à effectuer la démarche inverse pour la détermination de l'état d'hydratation de leurs stack à partir la connaissance de la densité de courant. Les mesures de champs électromagnétiques corrélées aux densités de courant, représente une méthode générique de diagnostic de PEMFC. En effet, les facteurs altérant la densité de courant étant les mêmes sur toutes les PEMFC, l'outil est applicable plusieurs d'entre elles.

Les outils de diagnostic basés sur les transformés en ondelettes, les EMD, PSD, BE et la mesure du champ électromagnétique proche sont toutes utilisables en ligne.

Des outils de diagnostic ont aussi été utilisés par Zheng et al. [30]. En effet, ils proposent le diagnostic de la sous-alimentation en oxygène, du noyage et de l'assèchement *via* la combinaison de spectres d'impédance électrochimique (Electrochemical Impedance Spectroscopy (EIS)) et d'outils de reconnaissance des formes par logique floue utilisés en quatre étapes (extraction, sélection, détection de défaut, classification). De cette manière, les auteurs peuvent détecter et identifier/isoler un défaut. D'autres outils de reconnaissance des formes sont utilisés pour le diagnostic de défauts, tels que les machines à vecteurs de support (Support Vector Machine (SVM)) par Li et al. [31] ou la méthode des graphes orientés signés (Signed Directed Graph (SDG)) proposés par Hua et al. [32] et Giurgea et al. [33]. Les outils d'EIS ne sont en général pas utilisables en ligne, mais le deviennent par l'utilisation d'un convertisseur [34]. Les outils SVM et SDG sont bien utilisable en ligne car elles n'interfèrent pas avec le fonctionnement normal de la PEMFC. De plus ces méthodes sont applicables à un grand nombre de PEMFC ce qui leurs donne un aspect générique.

Le choix d'une approche dépend principalement de la connaissance de l'utilisateur et des données disponibles. En général, les outils de diagnostic doivent fournir des résultats proches de la réalité (fiabilité), avec un bon temps de réponse (rapidité) permettant des applications temps-réel (pour la prise en considération du temps de calcul de la boucle de commande et du délai maximal de l'atténuation du défaut). Par ailleurs, l'approche choisie doit être adaptée à des amplitudes différentes de défauts (sensibilité), être applicable sur différentes PEMFC (mono cellule ou stack) (généricité) et permettre des applications en ligne pour la supervision [35]. De plus, la nature de la méthode de diagnostic est un critère clef pour le choix d'un diagnostic passif qui utilise uniquement les signaux d'entrées/sorties du système pour la détection de défaut alors que les méthodes actives excitent le système pour une détection plus rapide [36]. Le Tableau I-3 donne une vue d'ensemble sur les méthodes et les critères de choix des outils de diagnostic.

Tableau I-3 : classification des méthodes de diagnostic et de leurs caractéristiques

Outils de diagnostic et de traitement de données	En ligne	Rapidité	Robustesse	Généricité
SVM	Oui	Fort	Fort	Fort
EMD	Oui	Fort	Fort	Fort
BE	Oui	Bon	Bon	Fort
Analyse d'EIS	Non*	Bon	Fort	Fort
RB	Oui	Fort	Fort	Fort
RN	Oui	Fort	Fort	Faible
SDG	Oui	Fort	Fort	Fort

*Habituellement non, mais possible avec un convertisseur sur un point de fonctionnement

L'état de l'art des outils de diagnostic réalisé dans cette partie est synthétisé sur la Figure I-VIII. Les techniques de diagnostic sont généralement divisées en deux groupes : les méthodes basées sur la génération de résidus à partir de modèle et celles basées sur l'analyse de données. Ces deux groupes sont représentés sur la Figure I-VIII.

Le diagnostic basé sur la génération de résidus consiste à comparer les sorties d'un modèle représentant le comportement sain de PEMFC aux mesures de ces mêmes sorties sur le système réel. Les résidus sont analysés afin de détecter et d'identifier l'occurrence d'un défaut.

Le diagnostic basé sur des données utilise des techniques de traitement de données. Celles-ci sont basées sur l'expertise humaine ou sur des techniques utilisant des jeux d'entrées/sorties afin de statuer sur l'occurrence effective d'un défaut. Des jeux de données sont ainsi analysés pour déterminer l'écart entre les conditions de fonctionnement en défaut et en mode de fonctionnement nominal.

Par ailleurs, il est à noter qu'en littérature il n'existe pas de modèle de défaut complet de PEMFC. En effet, celui-ci permettrait de connaître les conditions opératoires menant au défaut, et quelles sont les variables de commande utilisables pour leur atténuation. L'absence de ce modèle implique alors l'utilisation de méthodes de diagnostic pour la détermination des conditions opératoires défectueuses.

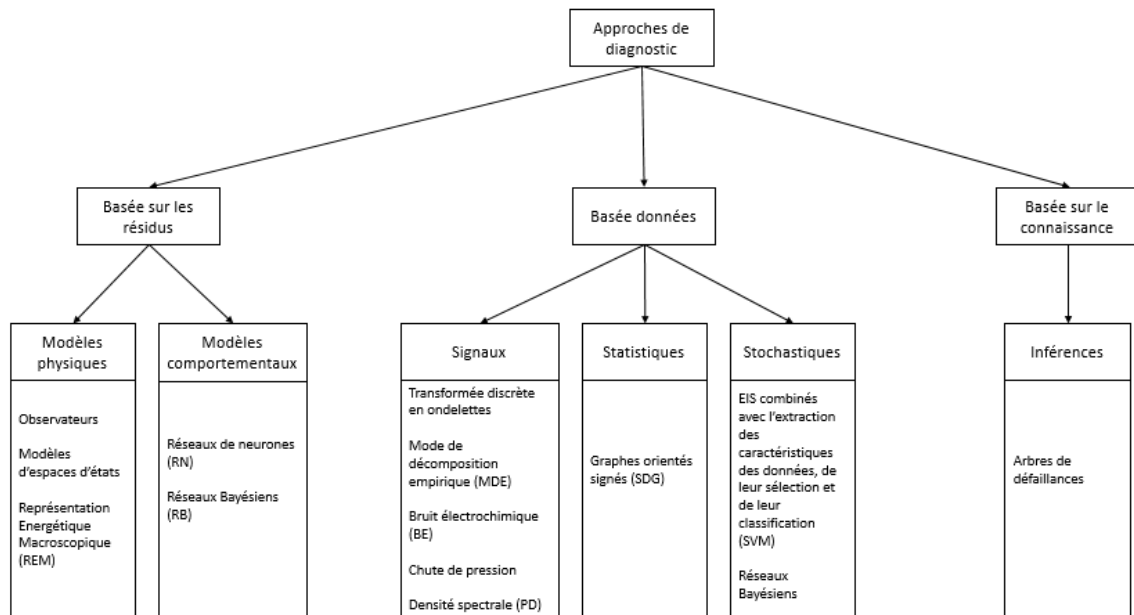


Figure I-VIII : Approches et méthodes pour le diagnostic

C. Les schémas de contrôle

Plusieurs stratégies de contrôle existent et certaines d'entre elles sont présentées dans cette partie. Dans le cadre de l'utilisation d'une PEMFC, une stratégie de contrôle a pour objectif de réguler le débit, la température et l'humidité relative des gaz. Par exemple dans le cas du phénomène de transfert de masse (les débits d' O_2 et d' H_2), Wang et al. [37] ont mis en œuvre un contrôleur robuste pour la régulation du débit d'hydrogène afin d'améliorer les performances de la pile à combustible. Le principe réside dans la définition des caractéristiques d'un plan de fonctionnement nominal et d'un autre perturbé pour ensuite minimiser la distance entre ces plans. Ce type de contrôleur permet la diminution de la consommation d'hydrogène tout en garantissant les performances de la pile. Dans leur article, Garcia-Gabin et al. [38] proposent un contrôleur par modes glissants (SMC) SISO (Single Input Single Output) couplé à une commande par anticipation pour la régulation du débit d'air d'une PEMFC. L'action anticipée permet d'atteindre le régime stationnaire fixé par le courant de pile. Le contrôle par modes glissants est utilisé pour atténuer les effets transitoires induits par les variations de la charge. Kunush et al. [39] ont aussi utilisé un régulateur par modes glissants pour le contrôle du débit d'oxygène pour des applications embarquées. Dans ces travaux, l'algorithme du « super-twisting » permet d'éviter le phénomène d'oscillation (chattering) provoqué par la commutation de commande.

Li et al [40] proposent l'utilisation d'un régulateur « backstepping ». Ce type de contrôleur est utilisé pour réduire la complexité du système non linéaire par la mise en place d'un contrôleur construit de manière récursive. En effet, cette méthode permet la mise en place d'une loi de commande par permettant la stabilisation d'un système non linéaire. Les auteurs ont utilisé ce contrôleur pour le maintien de la stœchiométrie d'oxygène à la valeur désirée et pour la stabilité du système en boucle fermée. Un autre article publié par Liu et al. [41] décrit le contrôle d'une PEMFC de 150 kW embarquée dans un tramway. Les auteurs ont développé un modèle semi-

empirique et semi-mécanique pour la régulation de l'air en entrée de la PàC. Cette régulation est faite par la commande d'un compresseur en lui faisant suivre le cycle d'utilisation du moteur. Le contrôle est basé sur un correcteur PID avec une action anticipative. L'article met en évidence le temps de réponse et la précision de la commande validée en simulation et par des tests expérimentaux. Sanchez et al. [42] proposent le contrôle de l'alimentation d'air par la synthèse d'un réseau de neurone (NN) adaptatif. Leurs essais ont été effectués dans un émulateur Hardware-in-the-loop.

D'autres travaux traitent de la commande pour la gestion de l'énergie. Sid et al. [43] proposent une commande optimale appliquée à un véhicule hybride électrique / PEMFC. La gestion de l'énergie est abordée comme un problème d'optimisation, basé sur le principe du minimum de Pontryagin et sur des fonctions Hamiltoniennes. Le but est de minimiser la consommation de réactifs pour un profil de charge donné.

Enfin des recherches traitent du contrôle pour résoudre des problèmes d'optimisation et de dégradation des PEMFC. En particulier, Barzegari et al. [44] ont appliqué une stratégie MPC (Model Predictive Control) sur des PEMFC montées en cascade dans l'objectif de déterminer la trajectoire optimale de la tension d'un stack. Les auteurs mettent en évidence les bonnes performances de leur stratégie pour le suivi de trajectoire, avec une erreur relative maximum entre la simulation et l'expérimental de moins de 10%.

Les articles précédemment cités présentent deux objectifs principaux. Le premier consiste en l'optimisation de la consommation. Ce type d'objectif est justifié par le coût de l'hydrogène, le réactif principal des PEMFC, demeure élevé. Le second objectif se focalise sur l'état de santé des piles à combustible. La réduction des effets négatifs des transitoires (ex : saut de pression due à un changement brutale de la charge), la régulation de l'humidité relative ainsi que de la température des gaz, permettent de conditionner la durée de vie des PEMFC. Cependant, il est important de noter qu'à l'exception des travaux de Zhang et al. [45], les autres articles construisent des lois de commandes sans prendre en compte l'occurrence de défauts, et donc l'état de santé de la PEMFC.

Un compromis coût/performance/durée de vie est donc à trouver selon les besoins de l'application.

Les variables en jeux dans l'apparition d'un défaut de noyage cathodique et d'assèchement de membrane ont été identifiés à travers des arbres de défaillance. Elles peuvent donc être utilisées dans des stratégies de contrôle à des fins d'atténuation de leurs occurrences. Cependant, il est nécessaire de comprendre comment ces variables interagissent entre elles et avec le système. Pour cela, et afin d'orienter l'utilisation d'outils de diagnostic et de contrôle pour la détection et l'atténuation de défauts, une méthode appelée analyse structurelle de défaut (ASD) est mise en place dans le chapitre suivant.

II. Analyse structurelle des défauts (ASD)

A. Définition et objectifs

L'analyse structurelle des défauts (ASD) est une méthode d'analyse permettant la mise en évidence des composants d'un système, pouvant être sujets à des défauts, et de l'influence de ces derniers sur le fonctionnement du système dans sa globalité. Elle utilise un modèle structurel qui est une abstraction du modèle comportemental valide dans tout l'espace paramétrique.

Le modèle structurel est une représentation qualitative très bas niveau du modèle comportemental, indépendante des valeurs et paramètres du système. Il ne considère que l'existence des liens entre variables et paramètres. Dans le cas de l'ASD, la notion de paramètre correspond à une grandeur caractéristique du système (*i.e.* surface ou épaisseur de la membrane PEMFC). Une variable fait quant à elle référence à une grandeur dont la valeur évolue au fil du temps (*i.e.* température, pression ou débits). Ces liens sont représentés par un graphe biparti indépendant de la nature des variables, des paramètres et des contraintes du système. Le graphe biparti permet d'étudier les relations entre deux ensembles et ne prend pas en compte les relations à l'intérieur de ces deux ensembles. La notion de contrainte fait référence aux limites d'utilisation des composants d'un système. Elle représente donc un ensemble de seuils associé à un composant.

Chaque composant du système est décrit suivant une ou plusieurs contraintes et la violation de l'une d'entre elles indique que le composant est en défaut. Le modèle structurel utilise uniquement le modèle nominal du système, ce qui permet de s'affranchir d'un modèle complet de défauts [46].

L'ASD a pour objectif d'identifier les composants dont les contraintes sont ajustables (sous-ensemble de composants pour lesquels les défauts peuvent être détectés et isolés). Cela permet aussi la mise en évidence des variables pouvant être influencées par l'apparition d'un défaut pour la génération de résidus nécessaire à certains outils de diagnostic. Elle fait par ailleurs ressortir les possibilités de reconfigurations du système pour l'estimation ou le contrôle des variables pertinentes en cas de défaillance de capteurs, d'actionneurs ou de composants. Enfin l'ASD met en évidence les liens entre les variables, paramètres et les composants du système.

B. Gestion des systèmes dynamiques

L'analyse structurelle tient compte uniquement des informations structurelles contenues dans le modèle : elle permet d'explicitier des variables contenues dans les équations. C'est un modèle structurel entièrement qualitatif.

- Les entrées du modèle structurel sont définies par : U_r avec $r \in \{1,2,\dots,n\}$
- Les sorties du modèle structurel sont définies par : Y_i avec $i \in \{1,2,\dots,k\}$
- Les états non connus (états internes, entrées non connues ou perturbations qui n'influencent pas les résidus) sont définis par : x_j avec $j \in \{1,2,\dots,l\}$

La Figure II-I est une représentation du positionnement des variables connues et inconnues dans un système PEMFC.

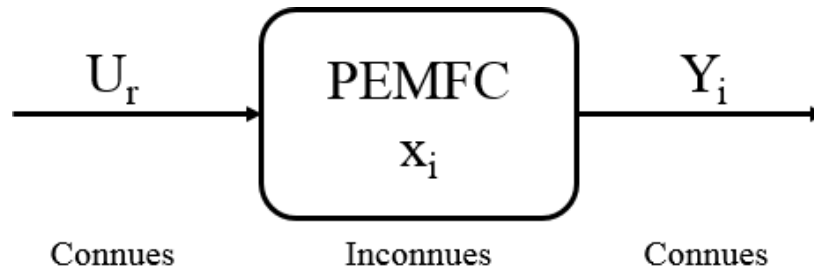


Figure II-I : Représentation des variables connues et inconnues.

a. Les graphes bipartis

Beauguitte [47] définit le graphe biparti comme étant une structure permettant d'étudier et de visualiser les relations entre deux ensembles distincts de sommets. L'ensemble des sommets représente l'ensemble des variables et paramètres du système ainsi que l'ensemble de ses contraintes. Il souligne par ailleurs que les anglophones font la distinction entre les sommets d'appartenance et ceux de participation à des événements. L'auteur prend un exemple dans la littérature sociologique de la présence des femmes à des événements sociaux ou encore la présence de comédiens dans les films. Deux groupes sont mis en évidence : les *acteurs* et les *événements*. Dans le groupe des *acteurs*, peuvent être placés les variables et les paramètres du système. Ceux-ci interagissent avec les *événements* qui sont constitués de contraintes.

Les relations entre les ensembles sont généralement non orientées ce qui signifie que le lien entre chaque sommet est matérialisé par un couple représentant la structure du système noté : $G = (C \cup Z, \Gamma)$.

G représente la structure du graphe biparti et U le symbole de l'opérateur « union ». Z est l'ensemble des n variables et paramètres (par exemple les variables de tension, courant etc... ou des paramètres tels que le nombre de cellule, surface de réaction etc...) tels que : $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$. C est l'ensemble de m contraintes (ex : contenu en eau minimal et maximal de la membrane) telles que : $C = \{c_1, c_2, \dots, c_m\}$. L'ensemble des arcs reliant les couples contrainte/variable se note :

$$\Gamma = \{(c_i, z_j) | z_j \text{ existe dans } c_i, z_j \in Z, i \in [1, m], j \in [1, n]\} \quad \text{Eq. II-1}$$

La Figure II-II est une représentation d'un graphe biparti où y apparaissent les sommets et les arcs.

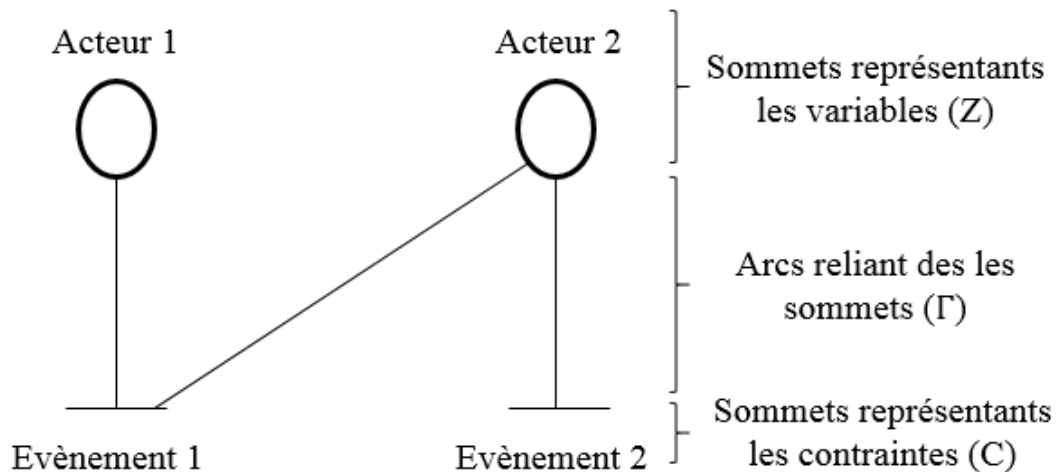


Figure II-II : Représentation d'un graphe biparti.

Dans ce cas les variables correspondent aux sommets d'appartenance et les contraintes aux sommets d'évènements.

Il est ensuite possible d'établir la matrice d'incidence M , représentant le graphe biparti, qui est une matrice booléenne où les lignes correspondent aux contraintes et les colonnes aux variables et paramètres. On note :

$$M = \{m_{i,j} \mid m_{i,j} = 1 \text{ si } (c_i, v_j) \in \Gamma, 0 \text{ sinon}\} \quad \text{Eq. II-2}$$

b. Différenciation

Dans un modèle dynamique, des variables différentielles sont utilisées. Il existe au moins 3 façons différentes de représenter ces variables différentielles dans un modèle structurel :

- Considérer x et $\frac{dx}{dt}$ comme étant la même variable et traiter les équations dynamiques de la même manière que des équations statiques
- Considérer x et $\frac{dx}{dt}$ comme étant structurellement différentes et traiter la relation entre deux variables de deux manières :
 - Etendre le modèle avec l'équation différentielle « explicite » : $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$.
 - Cette forme d'équation différentielle est ajoutée à chaque occurrence d'une variable dérivée dans le modèle original (Blanke et al. [46]),
 - ou effectuer les différenciations structurelles du modèle initial (Dilek Düştegör et al. [48]).

c. Représentation des défauts

Dans le cas où l'on veut utiliser des outils de diagnostic, plusieurs niveaux d'expertise peuvent être envisagés :

- **Niveau basique** : spécifier quel est le composant influencé par le défaut. Pas d'informations sur « comment » le défaut influence le processus.

- **Niveau intermédiaire** : spécifier les équations dans la description du composant qui est soumis au défaut (f_i), i.e. quels modèles d'équations sont (potentiellement) non valides dans le cas d'un défaut. Dans ce cas, les variables décrivant les défauts doivent être ajoutées au modèle.
- **Niveau expert** : spécifier un modèle de défauts. Par exemple, considérer que l'amplitude d'un défaut varie peu et peut être considérée comme constante : ou alors, que l'amplitude du défaut est fortement corrélée avec d'autres signaux du modèle.

Note : un défaut influence le composant auquel il s'applique : si la contrainte d'un composant est valide sur une plage donnée en mode sain, l'apparition du défaut modifie cette plage et invalide la contrainte du composant.

d. Variables connues et variables inconnues

Le système de variables peut être divisé en deux groupes : variables connues ; variables inconnues. Les entrées/sorties du système sont en général des variables connues. De la même manière, les paramètres du modèle doivent être identifiés et sont donc connus.

Les variables connues (débits, pressions etc... et les variables inconnues sont teneur en eau de la membrane, flux diffusif etc...) sont mesurables ou disponibles en temps-réel et peuvent être directement utilisées par des outils de diagnostic ou dans des stratégies de commandes tolérantes aux défauts (FTC). L'ensemble des variables est partitionné de la manière suivante :

$$Z = (K \cup X), \quad \text{Eq. II-3}$$

où K est le sous ensemble des variables connues et X le sous ensemble des variables inconnues. De la même manière, les contraintes sont séparées de la manière suivante :

$$C = (C_K \cup C_X), \quad \text{Eq. II-4}$$

où C_K est le sous ensemble des contraintes liées à des variables connues et C_x le sous ensemble des contraintes où apparaissent au moins une variable inconnue.

Remarque : les relations qui définissent les algorithmes de contrôle appartiennent à l'ensemble des contraintes liées aux variables connues, étant donné que ces relations lient les sorties capteur, les objectifs de contrôle (régime permanent, transitoire, états finaux), et les entrées de commande qui sont toutes des variables connues.

A partir du partitionnement de Z et C , le graphe (C, Z, Γ) peut être décomposé en deux sous graphes qui correspondent aux deux sous-systèmes $(C_K, Q(C_K))$ et (C_X, Z) , où $Q(C_K)$ est une cartographie entre un ensemble de contraintes et un ensemble de variables connues. Le modèle de comportement du sous-système $(C_K, Q(C_K))$ implique donc uniquement des variables connues.

La question fondamentale des processus de diagnostic consiste en la détermination des variables inconnues à partir de variables connues et au moyen des contraintes. Cette détermination dépend donc de la structure du sous-graphe (C_X, Z, Γ_x) .

Dans le cas d'une application de l'ASD sur les défauts de noyage des canaux et d'assèchement de la membrane d'une PEMFC, le niveau d'expertise possible est « intermédiaire ». En effet, aucun modèle de défaut permettant d'aller sur le niveau « expert » n'est disponible, mais il existe suffisamment de travaux de modélisation de PEMFC pour l'utilisation d'un niveau d'expertise intermédiaire. Pour rappel, l'ASD est une démarche entièrement qualitative faisant intervenir un modèle de structure. Il existe dans la littérature des méthodes de modélisation faisant intervenir des structurations adaptées aux outils de commande. Dans ce cadre, Hissel et al. [49] proposent un modèle réalisé par une représentation énergétique macroscopique (REM). L'avantage de cette méthode est qu'elle permet la mise en évidence des interactions des composants d'un système et donc de la causalité intégrale du système (Cf. ANNEXE A2). Les auteurs décrivent dans leur article la modélisation en plusieurs parties et finalement assemblées pour la formation d'un modèle complet de PàC. Ils définissent ainsi les parties électrochimique, fluïdique et électrique. Cette représentation imbriquée, multi-niveaux, représente l'avantage de mettre le focus uniquement sur les composants où les défauts apparaissent. La Figure II-III montre un modèle de pile à combustible PEM sous le formalisme REM [50]. Cette Représentation Energétique Macroscopique (REM) fait l'objet d'une description en ANNEXE A. L'ASD développée au paragraphe C s'appuie sur ce modèle.

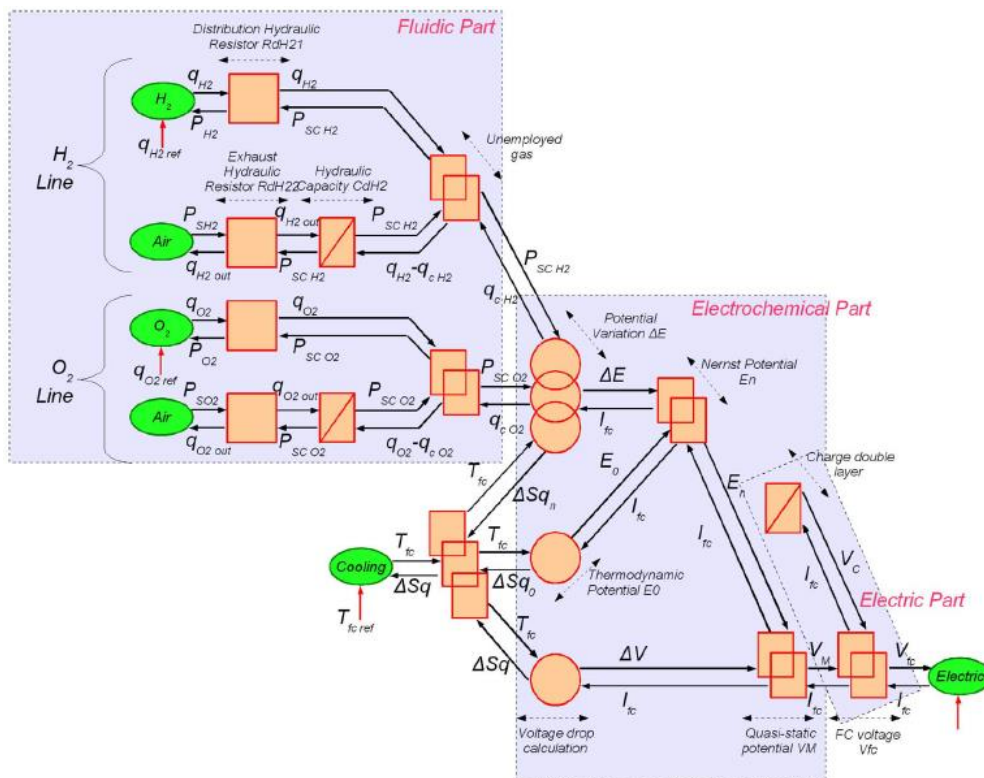


Figure II-III : Représentation énergétique macroscopique d'une pile à combustible de type PEM.

La REM est une association d'objets, reliés entre eux par des composants symbolisés par des vecteurs d'échange. Il divise le système en plusieurs sous-systèmes. Chaque sous-système effectue une action sur l'autre et reçoit en même temps une réaction de l'autre système, il y a donc un échange de puissance entre les deux. La REM possède quatre types d'éléments de base,

avec des formes et des couleurs donnant une meilleure lisibilité de la représentation d'un système.

Les sources d'énergie qui représentent l'environnement du système. Les sources peuvent être définies comme des éléments qui imposent des variables d'état aux systèmes. Il s'agit soit de générateurs d'énergie, soit de récepteurs d'énergie, soit des deux. Ils se représentent par des pictogrammes ovales verts, avec un contour vert foncé.

Les éléments de conversion permettent une conversion d'énergie ajustable par l'intermédiaire d'une entrée de commande. Une telle conversion est définie comme un transfert de puissance, sans perte ni accumulation. L'élément de conversion aura donc deux vecteurs de dimension n (une entrée et une sortie de réaction) en amont et deux autres en aval. Un troisième vecteur, vertical cette fois, définit une variable de contrôle ou de commande, lorsqu'elle existe. Ils sont introduits par un rectangle à fond orange et un contour rouge pour les conversions mono-physiques, ou un cercle pour les conversions multi-physiques.

Les éléments d'accumulation qui sont caractérisés par un stockage d'énergie qui implique au moins une variable d'état, et qui n'a pas de variable de réglage. Il assure le stockage de l'énergie délivrée par une source associée à un élément de conversion. Il est représenté par un pictogramme rectangulaire orange avec une barre oblique.

Les éléments de couplage sont représentés par des rectangles ou des cercles qui se chevauchent. Leur rôle est de distribuer l'énergie sans conversion ni accumulation.

C. Application de l'ASD au noyage d'une PEMFC :

On s'intéresse à la circulation des gaz entre le réservoir d'oxygène et l'interface cathode-électrolyte (notée 'sc') d'une mono-cellule de PàC. Les composants présents sur cette ligne vont permettre la mise en place de l'ensemble des contraintes et l'extraction des variables et des paramètres agissant sur cette partie du système.

L'utilisation de l'AdD de la Figure I-VI permet de comprendre quels sont les évènements qui mènent à l'occurrence d'un défaut de noyage. En effet, ce défaut étant un déséquilibre entre la production et l'évacuation de l'eau présente dans la PEMFC, il provoque une accumulation d'eau liquide dans ces canaux et / ou dans la couche de diffusion. L'AdD montre que plusieurs facteurs peuvent provoquer ce déséquilibre :

- Un faible débit cathodique peut conduire à un défaut de noyage résultant d'une trop faible évacuation de l'eau produite.
- Un régime de fonctionnement à haut niveau de courant, permet une grande production d'eau et peut, à terme, provoquer l'apparition d'un défaut de noyage (zone à prédominance de pertes par concentration visible sur la courbe de polarisation).
- Une diminution de la température de la PEMFC peut mener à une diminution de la pression de vapeur saturante P_{sat} et engendrer une condensation excessive menant au défaut de noyage.
- L'apport d'eau liquide exogène à la PEMFC peut provoquer l'apparition d'un défaut de noyage.

Ce dernier facteur n'est cependant pas pris en considération dans la construction de l'ASD. En effet la stratégie d'atténuation mise en place dans les parties suivantes vise à atténuer les défauts de la PEMFC par des actions sur les variables de la PEMFC plutôt que sur celles liées aux auxiliaires.

Chacun des évènements menant au défaut de noyage apparaît dans un des composants du système. Pour chaque composant il existe des contraintes devant être respectées pour un fonctionnement normal. Il est alors nécessaire d'établir la liste des composants au sein desquels les évènements précédemment évoqués génèrent un défaut. Cela permettra l'identification des contraintes associées. Les composants sont :

- La canalisation d'alimentation cathodique,
- Le bouilleur d'humidification des gaz,
- La couche de diffusion et le support catalytique,
- La membrane polymère (PEM).

L'étape suivante consiste à extraire, à partir des équations du modèle REM, les variables et paramètres influençant les composants et leurs contraintes.

La canalisation d'alimentation cathodique doit supporter une contrainte de pression (C1) permettant un débit suffisant de réactif pour l'alimentation de la PEMFC [51]. En effet, la circulation de réactif est possible par une différence de pression entre l'entrée et la sortie cathode. L'expression de la contrainte C1 peut être exprimée par l'équation suivante, issue du modèle REM (Cf. Figure II-III) :

$$C1 : P_{O_2} = P_{scO_2} + R_{dO_2} q_{O_2} \quad \text{Eq. II-5}$$

Où P_{O_2} correspond à la pression partielle d' O_2 dans le circuit d'alimentation. P_{scO_2} est la pression partielle de l' O_2 à la couche catalytique. R_{dO_2} correspond à la résistance de la canalisation au passage à l' O_2 dans le circuit d'alimentation de la PEMFC. q_{O_2} est le débit d' O_2 dans le circuit d'alimentation de la PEMFC.

Le gaz en entrée de la pile est humidifié pour améliorer les performances du système. Cependant, une quantité limitée de vapeur peut être injectée. Ceci est dû à une contrainte limitant la pression totale dans le circuit (C2) (augmentée par injection de vapeur d'eau) ou bien par une contrainte sur le rapport réactif/vapeur pour une même pression d'alimentation conduisant à une perte de performance par une diminution de réactif (C3).

$$C2 : P_{tot} = P_{O_2} + P_{H_2O} \quad \text{Eq. II-6}$$

$$C3 : q_{O_2_{hum}} = q_{O_2} + q_{H_2O} \quad \text{Eq. II-7}$$

A de fortes intensités, consommation de réactifs s'intensifie. Dans ces conditions, la production d'H₂O par la réduction de l'O₂ s'accélère et le rapport production / évacuation de l'H₂O peut s'inverser à l'avantage de la production. Il se produit alors une perte de performance visible par une baisse de tension de la PEMFC. La notion de contrainte entre la consommation de réactifs et le niveau courant désiré (C4) apparaît. Le débit de réactif nécessaire à la réaction et au fonctionnement de la PEMFC est régi par la loi de Faraday. Celle-ci montre que le débit molaire de réactif nécessaire au fonctionnement normal du système PEMFC dépend du courant I_{fc} :

$$q_{CO_2} = N_{fc} \frac{I_{fc}}{4F} \quad \text{Eq. II-8}$$

Le débit volumique s'exprime sous la forme :

$$C4 : q_{CO_2} = N_{fc} \frac{I_{fc}}{4F} \frac{RT_{fc}}{P_{scO_2}} \quad \text{Eq. II-9}$$

Cette nouvelle équation montre que le débit de réactif nécessaire à la réaction d'oxydo-réduction et pour un fonctionnement normal est contraint par le courant I_{fc}, la température T_{fc}, et la pression partielle du réactif au site catalytique P_{scO₂}.

La couche de diffusion cathodique peut contenir un certain volume de gaz. C'est ce qu'on appelle la capacité hydraulique C_h. Cette capacité hydraulique est contrainte par une capacité maximale de gaz (C5). Cette contrainte sort de la causalité intégrale car le calcul de C_h dépend d'un terme dérivé (Cf. ANNEXE A2). Ceci n'influence cependant pas la démarche de l'ASD :

$$C_h = \frac{1}{P_{scO_2}} (q_{O_2} - q_{CO_2} - q_{O_2_{out}}) \quad \text{Eq. II-10}$$

$$\text{où : } q_{O_2_{out}} = \frac{P_{scO_2} - P_{sO_2}}{R_{dO_2}} \quad \text{Eq. II-11}$$

Donc :

$$C5 : C_h = \frac{1}{P_{scO_2}} (q_{O_2} - q_{CO_2} - \frac{P_{scO_2} - P_{sO_2}}{R_{dO_2}}) \quad \text{Eq. II-12}$$

Contrainte liée au modèle étendu avec l'équation différentielle explicite (Blanke et al. [46]):

$$C6 : P_{scO_2} \dot{=} = \frac{dP_{scO_2}}{dt} \quad \text{Eq. II-13}$$

Le gaz circulant dans la couche de diffusion est similaire à un fluide qui s'écoule en régime stationnaire à travers un milieu poreux de section A et de longueur L sous l'effet d'une différence de charge ΔH (cf. loi de H. Darcy [52])

$$Q = KA \frac{\Delta H}{L} \quad \text{Eq. II-14}$$

avec Q le débit volumique filtrant (m³/s), K le coefficient de perméabilité du milieu poreux, A la surface de la couche de diffusion et ΔH/L un gradient hydraulique.

$$C7 : q_{O2_{hum}} = KA \frac{\Delta H}{L} \quad \text{Eq. II-15}$$

Le défaut de noyage peut intervenir dans les canaux d'alimentation ou dans la couche de diffusion. En considérant un noyage dans la couche de diffusion, on introduit une variable de défaut de noyage (F_{noy}) dans le modèle. Cela a pour but de diminuer le coefficient de perméabilité de la couche de diffusion (C7) :

$$C7 : q_{O2_{hum}} = K \cdot F_{noy} A \frac{\Delta H}{L} \quad \text{Eq. II-16}$$

Où :

$$F_{noy} = \frac{V_{disp_electrode}}{V_{geo_electrode}} \quad \text{avec } F_{noy} \in [0 \ 1] \quad \text{Eq. II-17}$$

Où $V_{disp_electrode}$ représente le volume de l'électrode disponible et $V_{geo_electrode}$ le volume géométrique du compartiment. F_{noy} est à 0 lors d'un noyage total et à 1 lorsqu'il n'y a pas d'eau liquide.

Le fonctionnement sans défaut de noyage de la PEMFC nécessite un apport suffisant en eau dans la membrane. Le flux électro osmotique permet l'apport d'eau dans la membrane *via* le mouvement des charges protoniques qui la traverse [53]. Ce flux est contraint (C8) par la valeur du courant I_{fc} ainsi que de la teneur en eau de la membrane. Il existe aussi un flux diffusif qui apporte l'eau présente aux électrodes dans la membrane. Ce flux est contraint (C9) par la répartition de l'eau dans la membrane :

$$C8 : \phi_{H2O}^{osm} = \lambda \tau_0 \frac{I_{fc}}{F} \quad \text{Eq. II-18}$$

$$C9 : \phi_{H2O}^{diff} = -D_m \frac{\rho_{dry}}{EW} \frac{d\lambda}{dx} \quad \text{Eq. II-19}$$

Où λ est une variable dépendante de la température de la PEMFC.

Le Tableau I-1 résume et décrit les contraintes utilisées pour l'analyse structurelle du défaut de noyage.

Tableau II-1 : description des contraintes utilisées pour l'analyse structurelle du défaut de noyage

<i>Contraintes</i>	<i>Description</i>
C1	Le débit de gaz dans la canalisation cathodique est contraint par une différence de pression entre l'entrée et la sortie de la cathode
C2	La pression partielle de vapeur d'eau en entrée est contrainte par la pression totale tolérée dans la canalisation
C3	La quantité de vapeur d'eau injectée dans la canalisation d'entrée est contrainte par la quantité d'O ₂ nécessaire à l'alimentation de la PEMFC
C4	La consommation de réactif est contrainte par un problème d'évacuation des produits de réaction et / ou par le niveau de courant désiré
C5	La capacité hydraulique est contrainte par le volume de la couche de diffusion mais aussi par les flux d'O ₂ et de vapeur d'eau
C6	Contrainte liée au modèle étendu avec l'équation différentielle explicite (Blanke et al. [46])
C7	La perméabilité de la couche de diffusion est contrainte par l'apparition d'un défaut de noyage qui la rend plus perméable
C8	Le flux électro osmotique est contraint par l'évolution de la teneur en eau de la membrane et du niveau de courant
C9	Le flux diffusif est contraint par l'évolution de la répartition de l'eau dans la membrane

Il est alors possible d'extraire une matrice d'incidence telle que représenté dans le Tableau II-2 :

Tableau II-2 : matrice d'incidence complète pour le défaut de noyage

	q_{O_2}	$q_{e^{-}}$	P_{tot}	P_{SO_2}	P_{ScO_2}	R_{dO_21}	P_{O_2}	P_{H_2O}	q_{H_2O}	q_{cO_2}	P_{ScO_2}	R_{dO_22}	Ch y	Fno	N	f_{fc}	F	R	f_{fc}	K	A	ΔH	L	$\Phi_{H_2O}^{osm}$	$\Phi_{H_2O}^{diff}$	λ	τ_0	Dm	pdry	EW
C1	1				1	1	1																							
C2			1				1	1																						
C3	1	1							1																					
C4					1					1					1	1	1	1	1											
C5		1		1						1	1	1	1	1																
C6					1						1																			
C7		1												1							1	1	1	1						
C8																1	1		1					1		1	1			
C9																			1						1	1	1	1	1	1

Le diagnostic est basé sur la détermination de variables inconnues (évaluation de la quantité d'eau liquide s'accumulant dans la canalisation) à partir des variables connues (mesure des pressions partielles en entrée de PEMFC). Il est donc possible de réduire la matrice d'incidence

en ne gardant que les ensembles où apparaît au moins une variable inconnue (*i.e.* ensemble C_X). En effet, garder les ensembles où toutes les variables sont connues est inutile car elles ne servent pas à la détermination des variables inconnues. A l'inverse, il est pertinent de garder les ensembles contenant au moins une variable inconnue car elles sont potentiellement estimables et détiennent des informations sur les conditions de fonctionnement de la PEMFC. Il faut alors supprimer les ensembles contenant uniquement des variables connues (*i.e.* suppression de l'ensemble C_K). Les entrées et sorties sont quant à elles gardées. L'ensemble de toutes les variables s'exprime comme suit :

$$Z = \{q_{O2_{hum}}, P_{tot}, P_{H2O}, q_{O2}, P_{O2}, P_{scO2}, R_{dO21}, q_{CO2}, q_{H2O}, P_{sO2}, P_{scO2}, R_{dO22}, C_h, F_{noy}, N, I_{fc}, F, R, T_{fc}, K, A, \Delta H, L, \phi_{H2O}^{osm}, \phi_{H2O}^{diff}, \lambda, \tau_0, Dm, \rho_{dry}, EW, P_{sat}\} \quad \text{Eq. II-20}$$

Les variables connues (mesurables ou estimables) sont :

$$K = \{q_{O2}, P_{O2}, P_{sO2}, N, I_{fc}, F, R, T_{fc}, P_{H2O}, q_{CO2}, q_{H2O}, q_{O2_{hum}}, P_{tot}, K, A, \Delta H, L, \tau_0, Dm, \rho_{dry}, EW, P_{sat}\} \quad \text{Eq. II-21}$$

Les variables inconnues sont :

$$X = \{P_{scO2}, R_{dO21}, P_{scO2}, R_{dO22}, C_h, F_{noy}, \phi_{H2O}^{osm}, \phi_{H2O}^{diff}, \lambda\} \quad \text{Eq. II-22}$$

La matrice d'incidence devient :

	qO2	qO2hum	PsO2	PscO2	PO2	qO2	dPscO2/d	Fflood	I _{fc}	T _{fc}	ϕ_{H2O}^{osm}	ϕ_{H2O}^{diff}	λ
C1	1			1	1								
C4				1		1			1	1			
C5		1	1	1		1	1	1					
C6				1			1						
C7		1						1					
C8									1	1	1		1
C9										1		1	1

Tableau II-3 : matrice d'incidence réduite pour le défaut de noyage

On obtient alors le graphe de structure suivant :

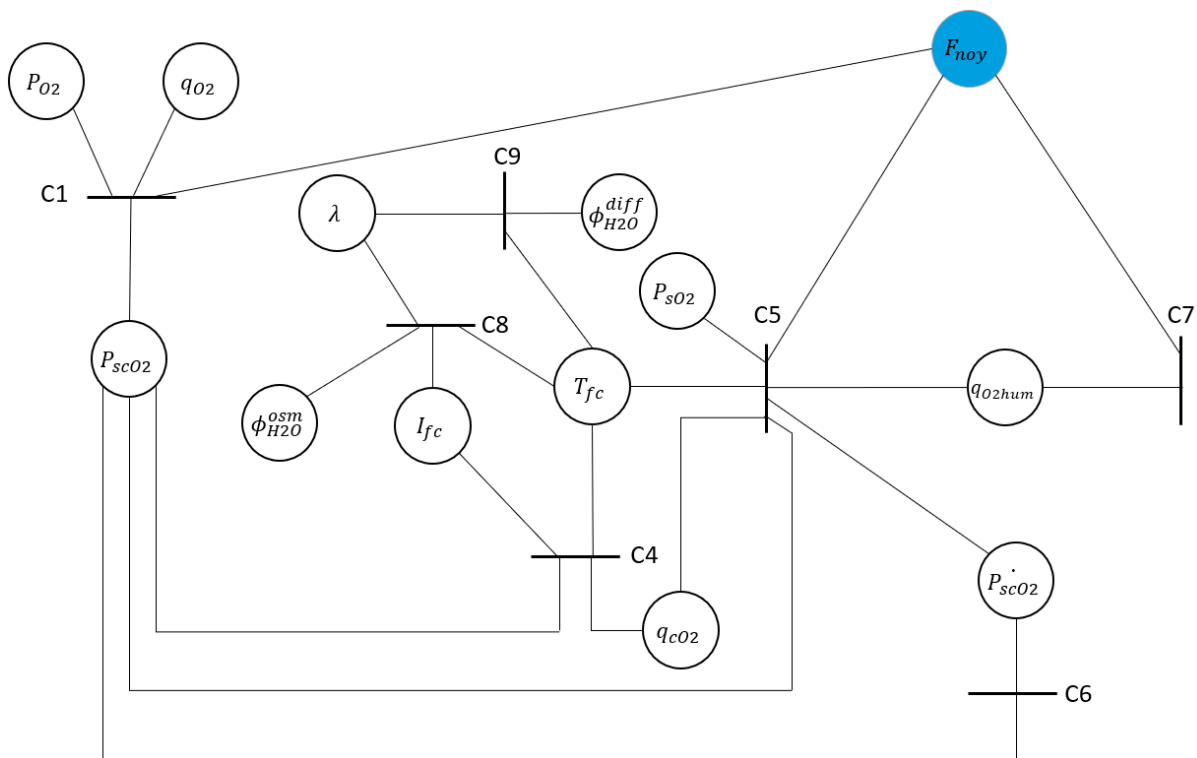


Figure II-IV : graphe de structure pour le défaut de noyage

a. Lecture du graphe de structure pour le défaut de noyage

La question qui se pose est : pour un défaut donné, quelle variable agit sur quelle contrainte ?

- La pression partielle du réactif au site catalytique, la pression d'entrée de pile et le débit d'oxygène influence la chute de pression entrée/sortie (E/S) de la cathode (C1).
- La pression partielle du réactif au site catalytique, le courant, la température et le débit de réactif de consommé influence la consommation de réactif (C4).
- L'apparition d'un défaut de noyage, la température, une modification de consommation de réactif, le débit de réactif et / ou une variation de la pression partielle du réactif au site catalytique influence le volume de gaz présent dans la couche de diffusion (C5).
- L'apparition d'un défaut de noyage et / ou une modification de l'humidification du réactif influence la perméabilité de la couche de diffusion (C7).
- Le courant et / ou la teneur en eau de la membrane influence le flux électro osmotique (C8).
- La teneur en eau de la membrane influence le flux diffusif (C9).

b. Interprétation du graphe de structure

Objectif 1 : mise en évidence de variables permettant de mettre en place un outil de diagnostic.

Le défaut de noyage diminue la capacité de la couche de diffusion à contenir une certaine quantité de gaz. Le graphe de structure montre quatre autres variables agissantes aussi sur la quantité de gaz contenue dans la couche de diffusion :

- La température de la PEMFC est mesurable mais cette grandeur ne peut pas donner d'information sur l'état d'encombrement de la couche de diffusion par de l'eau liquide.
- Le débit de réactif qui est consommé n'est pas mesurable. Il est en revanche possible de l'estimer *via* la loi de Faraday. L'estimation étant basée sur le courant délivré par la PEMFC, une diminution de celui due à un manque de réactif donnerait une indication sur l'occurrence éventuelle d'un défaut de noyage.
- Le débit de réactif humidifié est bien mesurable mais ne donnerait aucune information non plus sur l'apparition d'un défaut de noyage. En effet cette variable étant régulée en amont de l'entrée dans la PEMFC, elle ne contient pas d'information sur l'encombrement de la couche de diffusion par de l'eau liquide.
- Un encombrement de la couche de diffusion par de l'eau ferait diminuer la pression partielle d'oxygène au site catalytique ainsi qu'en sortie de pile (P_{sO_2}).

Ces deux dernières variables sont donc pertinentes pour la détection d'un éventuel noyage. Cependant, l'évolution de la pression partielle au niveau du site catalytique n'est pas mesurable. Le graphe de structure montre que cette pression partielle influence la première contrainte C1 qui est l'équilibre de pression E/S du circuit cathodique. Cet équilibre peut être modifié par une action sur le débit d'entrée de gaz et donc sur la pression de gaz en entrée de pile. Ainsi, un changement de pression partielle au niveau du site catalytique peut résulter, entre autres, d'un changement de débit et de pression d'entrée. Il est donc possible de considérer à la place de la pression partielle au site catalytique uniquement la pression d'entrée de gaz (P_{O_2}), étant donné que le débit d'entrée n'est pas une mesure pertinente pour la visualisation de l'occurrence d'un défaut. Les mesures de (P_{O_2} , P_{sO_2}) peuvent donc être utilisées pour l'estimation de l'occurrence d'un défaut de noyage.

Objectif 2 : identification des variables permettant d'atténuer un défaut

Précédemment, il a été établi que le défaut invalide les contraintes du composant dans lequel il apparaît. Le graphe de structure montre que par des actions sur les débits d'oxygène et/ou de vapeur d'eau et donc sur les pressions, il est possible d'avoir une influence sur la capacité hydraulique de la couche de diffusion. Il est donc pertinent d'agir sur ces variables pour diminuer l'engorgement dans la couche de diffusion.

D. Application à la gestion du défaut d'assèchement d'une PEMFC :

Dans ce paragraphe, on s'intéresse une nouvelle fois à la circulation des gaz entre le réservoir d'oxygène et l'interface cathode-électrolyte de la cellule. L'AdD de la Figure I-VII permet de comprendre quels sont les événements qui mènent à l'occurrence d'un défaut d'assèchement de membrane : déséquilibre sur le rapport teneur en eau de la membrane / évacuation de l'eau de la membrane. Plusieurs facteurs peuvent provoquer ce déséquilibre :

- Une augmentation de T_{fc} sans augmentation de P_{H_2O} et une faible production d'eau à la cathode peut mener au défaut d'assèchement.
- Une diminution de P_{H_2O} et une faible production d'eau suivis d'une diminution de T_{fc} peut engendrer l'occurrence d'un défaut d'assèchement.
- Une diminution de la production d'eau et un faible apport d'eau exogène suivi d'une diminution de T_{fc} peut mener au défaut d'assèchement.
- Un fort débit de gaz et une faible production d'eau suivis d'une diminution de T_{fc} peut provoquer l'apparition du défaut d'assèchement.

Dans le cas d'un défaut d'assèchement de la membrane d'une PEMFC, c'est la teneur en eau (λ) de cette dernière qui est altérée. La variation de λ a un impact direct sur la résistivité ohmique de la membrane. La résistance ohmique de la membrane est donc une image de son contenu en eau [53]. λ est exprimé en fonction d'une grandeur dépendante de la température et constitue la contrainte C0.

L'augmentation de la résistance membranaire influe grandement sur les pertes ohmiques. Ces pertes se manifestent par une dissipation de la chaleur. La résistance membranaire étant dépendante du contenu en eau, cela se manifeste par une chute de tension. L'expression de la résistance membrane est issue de [53]:

$$R_m = \frac{t_m}{(b_1 \exp(b_2(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{fc}})))} \quad \text{Eq. II-23}$$

Et

$$C1 : \Delta V_{ohm} = \frac{t_m}{(b_1 \exp(b_2(\frac{1}{303} - \frac{1}{T_{fc}})))} I_{fc} \quad \text{Eq. II-24}$$

D'où

$$\Delta V_{ohm} = R_m I_{fc} \quad \text{Eq. II-25}$$

avec b_1 et b_2 sont des constantes propres à la pile utilisée par les auteurs ; t_m est un paramètre donnant l'épaisseur des membranes.

Le fonctionnement sans défaut d'assèchement de la PEMFC nécessite un apport suffisant en eau dans la membrane. Le flux électro osmotique [53] permet l'apport d'eau dans la membrane *via* le mouvement des charges protoniques qui la traverse. Ce flux est contraint (C2) par la valeur du courant I_{fc} ainsi que par la teneur en eau de la membrane. Il existe aussi un flux diffusif qui apporte l'eau présente aux électrodes dans la membrane. Ce flux est contraint (C3) la manière dont est répartie l'eau dans la membrane :

$$C2 : \phi_{H2O}^{osm} = \lambda \tau_0 \frac{I_{fc}}{F} \quad \text{Eq. II-26}$$

$$C3 : \phi_{H2O}^{diff} = -D_m \frac{\rho_{dry}}{EW} \frac{d\lambda}{dx} \quad \text{Eq. II-27}$$

Un débit est possible par une différence de pression entre l'entrée et la sortie cathodique. Cette canalisation doit donc supporter une contrainte de pression (C4) pour permettre un débit de gaz suffisant pour alimenter la PAC [51] :

$$C4 : P_{O2} = P_{scO2} + R_{dO21} q_{O2} \quad \text{Eq. II-28}$$

où P_{O2} correspond à la pression partielle d'O₂ dans le circuit d'alimentation. P_{scO2} est la pression partielle de l'O₂ à la couche catalytique. R_{dO21} correspond à la résistance de la canalisation au passage à l'O₂ dans le circuit d'alimentation de la PEMFC. Enfin, q_{O2} représente le débit d'O₂ dans le circuit d'alimentation de la PEMFC.

Le gaz en entrée de pile est humidifié pour améliorer les performances du système. Cependant, une quantité limitée de vapeur peut être injectée. Ceci est dû à une contrainte limitant la pression totale dans le circuit (C5) (augmentée par injection de vapeur d'eau) ou bien par une contrainte sur le rapport réactif/vapeur pour une même pression d'alimentation conduisant à une perte de performance par une diminution de réactif (C6).

$$C5 : P_{tot} = P_{O2} + P_{H2O} \quad \text{Eq. II-29}$$

$$C6 : q_{O2_{hum}} = q_{O2} + q_{H2O} \quad \text{Eq. II-30}$$

A de fortes intensités, la cinétique des réactions augmente et la consommation de réactifs s'intensifie. Dans ces conditions, la production d'H₂O par la réduction de l'O₂ s'accélère et le rapport production / évacuation de l'H₂O peut s'inverser à l'avantage de la production. Il se produit alors une perte de performance visible par une baisse de tension de la PEMFC. La notion de contrainte entre la consommation de réactifs et le niveau courant désiré (C7) apparaît. Le débit de réactif nécessaire à la réaction et au fonctionnement de la PEMFC est régi par la loi de Faraday. Celle-ci montre que le débit de réactif nécessaire au fonctionnement normal du système PEMFC dépend du courant I_{fc} :

$$C7 : q_{cO2} = N_{fc} \frac{I_{fc}}{4F} \frac{RT_{fc}}{P_{scO2}} \quad \text{Eq. II-31}$$

Cette nouvelle équation montre que le débit de réactif nécessaire à la réaction d'oxydo-réduction et pour un fonctionnement normal est contraint par le courant I_{fc} , la température T_{fc} , et la pression partielle du réactif au site catalytique P_{scO2} .

En supposant l'équilibre thermodynamique entre la vapeur d'eau présente dans la couche de diffusion et de l'eau liquide dans la membrane, il est possible d'établir une contrainte supplémentaire sur cet équilibre thermodynamique [54] où U représente le phénomène d'adsorption:

$$C8 : U = a_1 + a_2 \left(\frac{P_{H2O}}{P_{sat}} \right) - a_3 \left(\frac{P_{H2O}}{P_{sat}} \right)^2 + a_4 \left(\frac{P_{H2O}}{P_{sat}} \right)^3 \quad \text{Eq. II-32}$$

La diminution du contenu de la membrane en eau induit une augmentation de sa résistivité électrique. Dans l'expression de les contraintes C0 et C1, une variable modélisant le défaut d'assèchement (F_{ass}) :

$$C1: R_m = \frac{V_{fc}}{I_{fc} \cdot F_{ass}} \quad \text{Eq. II-33}$$

Où :

$$F_{ass} = \frac{V_{abs_membrane}}{V_{abs_tot_membrane}} \quad \text{avec } F_{ass} \in [0 \ 1] \quad \text{Eq. II-34}$$

Où $V_{abs_membrane}$ représente le volume absorbé par la membrane et $V_{abs_tot_membrane}$ le volume total absorbable par la membrane. F_{dry} est à 0 lors d'un assèchement total et à 1 lorsque la membrane est complètement hydratée.

Le Tableau II-4 : description des contraintes utilisées pour l'analyse structurelle du défaut d'assèchement résume et décrit les contraintes utilisées pour l'analyse structurelle du défaut d'assèchement.

Tableau II-4 : description des contraintes utilisées pour l'analyse structurelle du défaut d'assèchement

<i>Contraintes</i>	<i>Description</i>
<i>C0</i>	Contrainte exprimant la capacité minimale et maximale pour la membrane de contenir un volume d'eau
<i>C1</i>	Contrainte permettant de faire intervenir la résistivité ohmique maximale de la membrane
<i>C2</i>	Contrainte sur la quantité maximale d'eau pouvant être transportée dans la membrane par le flux électroosmotique
<i>C3</i>	Contrainte sur la quantité maximale d'eau pouvant être transportée dans la membrane par le flux diffusif
<i>C4</i>	Contrainte sur les pressions minimales des gaz pour leur circulation dans la canalisation
<i>C5</i>	Contrainte exprimant la pression totale limite dans le circuit
<i>C6</i>	Contrainte sur le mélange réactif/vapeur d'eau
<i>C7</i>	Contrainte sur le courant limite pouvant être demandé par la charge
<i>C8</i>	Contrainte sur l'équilibre thermodynamique vapeur/eau entre la couche de diffusion et la membrane

a. Extraction de la matrice d'incidence

	Ptot	PH2O	qO2	qH2O	qO2_hum	PO2	EW	pdry	cH2O	τ0	Dm	PscO2	RdO21	qcO2	Fass	N	Vfc	Ifc	Rm	F	R	Φ _{H2O} ^{osm}	Φ _{H2O} ^{diff}	λ	Tfc	a1	a2	a3	a4	Psat		
C0							1	1	1						1										1	1						
C1															1		1	1	1							1						
C2										1									1		1				1							
C3							1	1			1												1		1							
C4			1			1						1	1																			
C5	1	1				1																										
C6			1	1	1																											
C7												1		1		1				1	1					1						
C8		1																									1	1	1	1	1	1

Figure II-V : matrice d'incidence complète pour le défaut d'assèchement

De la même manière que précédemment, il est possible de réduire la matrice d'incidence en ne gardant que les ensembles où apparaît au moins une variable inconnue (*i.e.* ensemble C_x) : L'ensemble des variables est donné ci-dessous :

$$V = \{ \phi_{H2O}^{osm}, \phi_{H2O}^{diff}, \lambda, EW, \rho_{dry}, \tau_0, D_m, q_{O2_{hum}}, P_{tot}, P_{H2O}, q_{O2}, P_{O2}, P_{scO2}, R_{dO21}, q_{cO2}, q_{H2O}, F_{ass}, N, I_{fc}, R_m, F, R, T_{fc}, V_{fc}, c_{H2O}, a_1, a_2, a_3, a_4, P_{sat} \}$$

Eq. II-35

L'ensemble des variables connues est :

$$K = \{P_{H2O}, EW, \rho_{dry}, \tau_0, I_{fc}, F, D_m, \phi_{H2O}^{osm}, \phi_{H2O}^{diff}, q_{O2}, P_{O2}, N_{fc}, R, T_{fc}, P_{H2O}, q_{cO2}, q_{H2O}, q_{O2hum}, P_{tot}, V_{fc}, a_1, a_2, a_3, a_4, P_{sat}\}$$

Eq. II-36

L'ensemble des variables inconnues est :

$$X = \{\lambda, c_{H2O}, P_{scO2}, R_{dO21}, F_{ass}, \phi_{H2O}^{osm}, \phi_{H2O}^{diff}\}$$

Eq. II-37

La matrice d'incidence devient :

	qO2	PO2	ch2O	PscO2	qcO2	Fdry	Vfc	lfc	Rm	ϕ_{H2O}^{osm}	ϕ_{H2O}^{diff}	λ	Tfc
C0			1			1						1	1
C1						1	1	1	1				1
C2								1		1		1	
C3											1	1	
C4	1	1		1									
C7				1	1			1					1

Figure II-VI : matrice d'incidence réduite pour le défaut d'assèchement

On obtient alors le graphe de structure suivant :

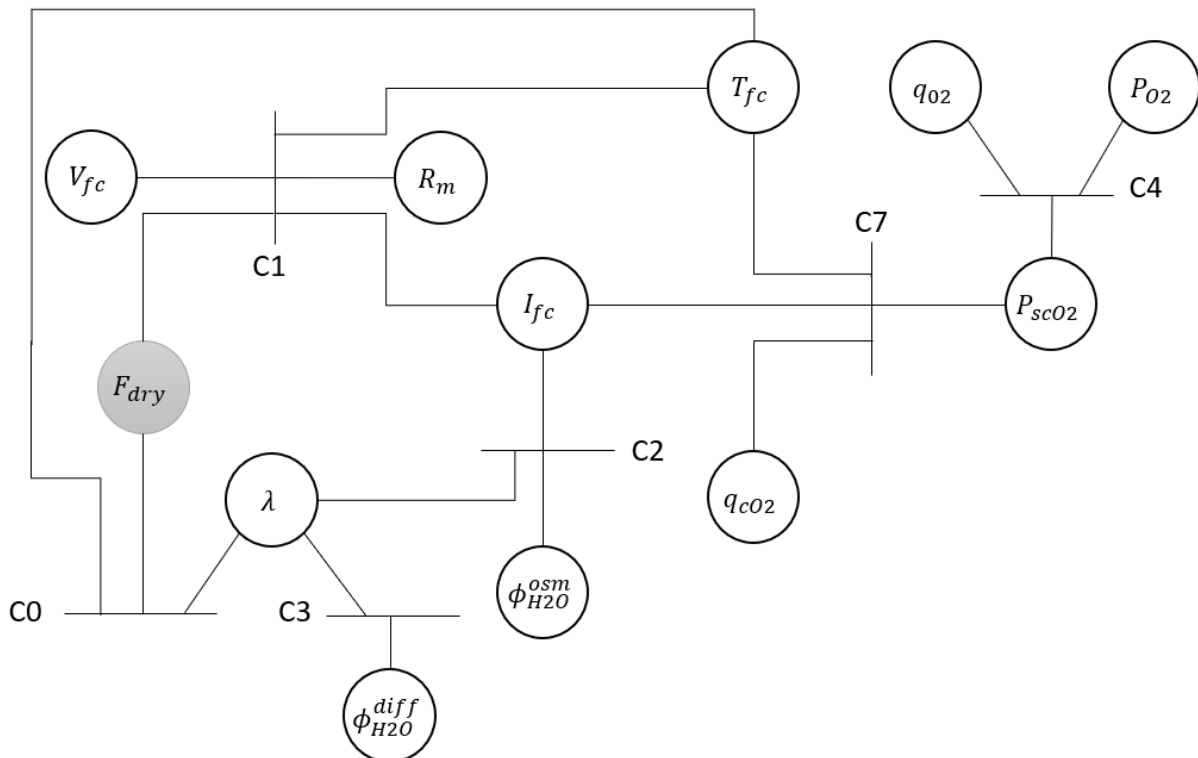


Figure II-VII : graphe de structure pour le défaut d'assèchement de membrane

b. Lecture du graphe de structure pour le défaut d'assèchement

Quelle variable agit sur quelle contrainte ?

- L'occurrence d'un défaut d'assèchement diminue le contenu en eau de la membrane (C0)
- Les pertes ohmiques augmentent si la résistance électrique de la membrane ou si le courant augmente (C1)
- Le flux électro osmotique diminue si le contenu en eau de la membrane ou si le courant diminue (C2)
- Le flux de diffusion diminue si la répartition d'eau dans la membrane diminue (C3)
- La pression au site catalytique, la pression d'entrée de pile et le débit d'oxygène influencent la perte de charge entre l'entrée et la sortie du circuit cathodique (C4)
- Le débit volumique de gaz injecté pour la réaction chimique dépend du courant, de la température du réactif et de sa pression partielle (C7)

Objectif 1 : mise en évidence de variables permettant de mettre en place un outil de FDI.

Le défaut d'assèchement résulte d'une diminution du contenu en eau de la membrane. Cependant, il est impossible de mesurer directement ce contenu. Par contre, il est possible de mesurer la résistance et donc la résistivité de celle-ci via une commande en courant et une mesure de tension ou par une injection de perturbation sinusoïdale du courant à une référence proche de 1kHz [34]. Ainsi, le couple (I_{fc}, V_{fc}) est pertinent pour l'élaboration d'un outil de diagnostic.

Objectif 2 : identification des variables permettant d'atténuer un défaut

Une action sur le courant est possible pour atténuer le défaut d'assèchement. En effet, le flux électro osmotique et le débit de réactif augmentent lorsque le courant est incrémenté, favorisant la création et le transport d'eau dans la membrane. Il apparaît aussi que T_{fc} est une grandeur ayant potentiellement une influence directe sur le défaut d'assèchement de membrane. Ce paramètre est donc une grandeur très pertinente pour l'atténuation de ce type de défaut.

Tableau II-5 : table des notations

Variables	Descriptions	Unités
q_{O_2}	débit d'O ₂ en entrée de pile	m ³ /s
q_{hum}	débit de vapeur injecté dans le débit d'oxygène	m ³ /s
T_{fc}	température de pile	K
I_{fc}	courant de la pile	A
C_h	capacité hydraulique représentant l'accumulation de gaz dans le circuit	
P_{O_2}	pression partielle d'O ₂ en entrée de pile	Barg
P_{scO_2}	pression partielle d'O ₂ sur le site catalytique	Barg
R_{dO_21}	résistance de distribution	Ω/cm^2
P_{tot}	pression totale des gaz en entrée de pile	Barg
P_{sat}	Pression de vapeur saturante	Barg
P_{H_2O}	pression partielle de la vapeur en entrée de pile	Barg
q_{O_2hum}	débit d'oxygène humidifié en entrée de pile	m ³ /s
q_{H_2O}	débit de vapeur d'eau	m ³ /s
q_{cO_2}	débit de gaz consommé	m ³ /s
N	nombre de cellule	
F	constante de faraday	C
R	constante des gaz parfaits	J.mol ⁻¹ .K ⁻¹
q_{O_2out}	débit d'O ₂ en sortie de pile	m ³ /s
P_{sO_2}	pression en sortie de pile	Barg
R_{dO_22}	résistance en sortie de pile	Ω/cm^2
K	conductivité hydraulique (ou « coefficient de perméabilité ») du milieu poreux	m/s
A	surface de la couche de diffusion	m ²
Q	débit volumique filtrant	m ³ /s
ΔH	différence des hauteurs piézométriques	m
L	longueur piézométrique de l'échantillon	m
F_{noy}	variable influente sur le défaut de noyage	
F_{ass}	variable influente sur le défaut d'assèchement	
λ	Contenu moyen en eau de la membrane	
τ_0	coefficient de traîne de molécule d'eau par le flux protonique	
D_m	coefficient de diffusion effective de l'eau dans la membrane	cm ² /s
ρ_{dry}	densité de la membrane à sec	kg/cm ³
EW	poids en eau de la membrane par mole de groupe de composant sulfoné	kg/mol
V_{fc}	tension cellulaire	
R_m	résistance cellulaire	
WU	absorption de l'eau dans la membrane	molH ₂ O/molSO ₃

t_m	épaisseur de membrane	μm
$C_{\text{H}_2\text{O}}$	concentration d'eau dans la membrane	mol/cm^2
$V_{\text{disp_membrane}}$	volume disponible dans le milieu	m^3
$V_{\text{geo_membrane}}$	volume géométrique du milieu	m^3

Les AdD permettent de comprendre les mécanismes et combinaisons de paramètres opératoires favorisant l'apparition d'un noyage et d'un assèchement de membrane. Cependant, bien que cette représentation expose les variables et paramètres influençant l'apparition de ces défauts, elle ne montre pas les multiples interactions de ces variables sur plusieurs contraintes (*i.e.* sur plusieurs composants). En effet, les PEMFC présentant un fort couplage, la modification d'une variable entraîne plusieurs changements dans le fonctionnement global du système. C'est donc afin de visualiser une partie de ces interactions que l'ASD est mise en place. La construction des graphes de structure permet alors de mettre en évidence les composants influencés par les variables du système.

Les ASD ont été construits sur la base d'un modèle énergétique macroscopique. Ce type de modèle étant sur une causalité intégrale, il devient simple d'en extraire les équations décrivant les événements de manière chronologique. De plus, l'ASD étant basée sur l'analyse des composants d'un système, l'abstraction macroscopique du modèle REM y est particulièrement adapté.

Les résultats fournis par l'ASD vont permettre, lors de la mise en place d'outils d'atténuation de défauts, de choisir les variables les plus pertinentes pour atténuer le défaut tout en limitant l'impact de l'atténuation sur le fonctionnement du système. Ainsi en fonction du lieu d'occurrence d'un défaut, un certain nombre de variables sont disponibles pour le processus d'atténuation et certaines d'entre elles seront utilisées pour limiter l'action à l'atténuation du défaut.

Dans ce chapitre, nous avons présenté la démarche de l'ASD qui vise la mise en évidence des variables sensibilisées par l'apparition de défauts (adaptées pour le diagnostic). Elle met aussi en évidence leur appartenance à plusieurs contraintes des composants du système. Les graphes de structure, obtenus à partir de l'ASD, montrent que la manipulation d'une variable pour influencer une contrainte peut entraîner une influence non désirée sur d'autres contraintes. Cette connaissance peut alors être utilisée pour le diagnostic et plus largement pour affiner les stratégies d'atténuation de défauts. Cependant l'ASD reste une démarche qualitative montrant les liens entre les variables du système et ces composants. Sa conception est basée sur une connaissance *a priori* du système et peut donc faire l'objet d'un manque de précision dû à certaines hypothèses lors de la construction de modèles sur lesquels s'appuie l'ASD.

Dans l'objectif de mettre en place une stratégie d'atténuation de défaut à partir des informations disponibles *via* l'ASD, le prochain chapitre propose une architecture de commande tolérante aux défauts active (AFTC) sur les défauts d'assèchement de membrane et de noyage

cathodique. L'AFTC consiste à la mise en place et à l'implantation d'outils d'atténuation de défauts à-travers l'utilisation d'outils de diagnostic, de décision et de contrôle.

III. Contrôle tolérant aux défauts (Fault Tolerant Control (FTC))

Le contrôle tolérant aux défauts (FTC) est la possibilité pour un système, d'absorber tout évènement inattendu tout en continuant à délivrer les performances désirées [55]. L'application de ce type de stratégies à une PàC de type PEMFC consiste en l'atténuation des défauts pouvant apparaître lors de son fonctionnement. L'enjeu de cette partie est donc la recherche d'une stratégie de FTC visant à l'atténuation des défauts de noyage et d'assèchement de membrane d'une PEMFC.

A. Stratégies de FTC

Le développement d'une FTC repose sur la synthèse d'un outil d'identification de défauts rapide, et de contrôle permettant leur atténuation. Zhang et al. [56] ont proposé dans leur étude bibliographique une classification de FTC passive (PFTC) ou active (AFTC). Chacune de ces stratégies est présentée dans la prochaine section.

a. Stratégies passive : PFTC

Lebreton [55] et Oudghiri et al. [57] définissent la stratégie PFTC comme étant une compensation anticipée des défauts. Le contrôleur est construit pour être robuste à un certain nombre de défauts, ce qui permet de s'affranchir d'outils de diagnostic et de reconfiguration des lois de commande. Le PFTC est conçu hors ligne ce qui permet une atténuation rapide des défauts (par de faibles temps de calcul), mais les performances de l'outil PFTC diminuent avec le nombre de défauts considérés. En effet, une commande robuste est un compromis entre la stabilité du système et le maintien de ces performances.

Les travaux de Maharjan et al. [58] est un exemple d'application d'une stratégie de PFTC au stockage d'énergie *via* des batteries NiMH (Nickel Métal Hydrures). Les auteurs utilisent une unité de stockage par batterie en utilisant des convertisseurs en cascade pilotés par des PWM (Pulse Width Modulation). Leur but est de fournir un fonctionnement continu des batteries même si le convertisseur ou une batterie est en condition de défaut. Dans cet exemple, les auteurs ont la connaissance du défaut et comment celui-ci agit sur le système. Les caractéristiques du défaut sont donc connues à l'avance, ce qui rend possible la synthèse d'une commande robuste à ces défauts et notamment par l'intermédiaire d'une stratégie PFTC.

b. Stratégies active : AFTC

Les stratégies AFTC permettent d'avoir une réponse appropriée aux variations non anticipées des grandeurs caractéristiques du système. Dans ce cas, les conditions opératoires ne sont pas ou ne sont plus idéales au regard des performances attendues. Il est alors nécessaire d'appliquer une stratégie AFTC utilisant des outils de diagnostic et de contrôle pour le maintien des performances du système. Ce type de stratégies permet la compensation voire l'atténuation du

défaut par la sélection de lois de commande pré-calculées ou par la synthèse de nouvelles lois en temps-réel. La Figure III-I montre les différentes stratégies utilisables.

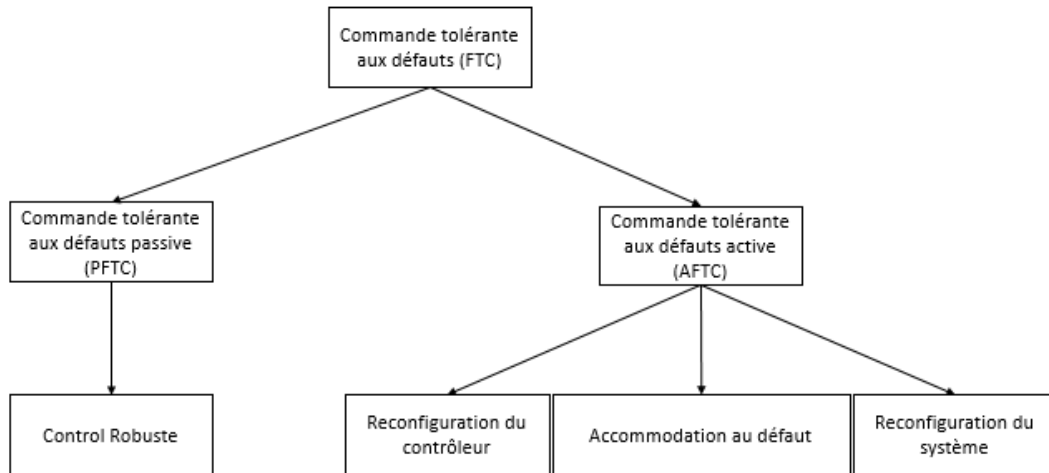


Figure III-I : Stratégies de FTC

Dans le cadre des travaux relatés dans ce manuscrit, une architecture AFTC a été utilisée pour la synthèse en ligne d'une stratégie d'atténuation de défauts. La Figure III-I montre trois actions possibles dans la stratégie AFTC. La première consiste en une reconfiguration du contrôleur qui correspond à un changement de boucle de contrôle dans le cas où l'accommodation au défaut est impossible. Le processus d'accommodation aux défauts est une adaptation des paramètres du contrôleur utilisé aux propriétés dynamiques du défaut. Une reconfiguration du système est une réorganisation de celui-ci pour permettre, par exemple, un fonctionnement en mode dégradé.

Les stratégies AFTC incorporent des outils de diagnostic, de contrôle et de décision pour permettre la compensation ou l'atténuation de défauts. La Figure III-II propose une combinaison possible entre ces outils.

déterminer la durée de vie utile restante à la PEMFC basée sur des méthodes de calculs de distances géodésiques sur les mesures effectuées. Cette démarche a pour objectif le pronostic de la durée de vie utile des PEMFC sachant que celle-ci est fortement corrélée à la SoH de la PEMFC.

Les outils de diagnostic ont déjà fait l'objet d'une description dans la première partie à la section « Outils de diagnostic pour les PEMFC ». Parmi les outils diagnostic présent en littérature, uniquement ceux qui sont utilisable en ligne peuvent être intégrés à une stratégie AFTC. En effet, la détermination de la stratégie d'atténuation étant faite en ligne, les outils de diagnostic doivent nécessairement être utilisables en ligne. Les outils de contrôle adaptés aux stratégies AFTC sont présentés dans la prochaine section alors que les processus de décision sont présentés en dernière section.

B. Outils de contrôle pour des stratégies AFTC

Dans son manuscrit de thèse, Lebreton [55] a mis en évidence quatre familles de correcteurs provenant d'une synthèse bibliographique : contrôles basés sur les régulateurs Proportionnel Intégral Dérivé (PID) ; la commande prédictive (terme anglais : Model Predictive Control (MPC)) ; la commande par modes glissants (en anglais : Sliding Mode Control (SMC)) ; et la commande par passivité.

Les régulateurs tels que les PID sont simples à mettre en œuvre et nécessitent peu de temps de calcul. Certes, ils sont moins adaptés aux fortes exigences telles que la précision (atteignable par un SMC) mais constituent un outil pertinent pour des tests rapides.

La Figure III-III représente l'architecture AFTC adoptée faisant intervenir des outils de contrôle utilisables dans la stratégie. Le critère de sélection d'un ou plusieurs de ces outils dépend des objectifs de contrôle. Par exemple l'utilisation du principe du minimum (ou du maximum) de Pontryagin peut être fait dans le cadre d'une commande optimale. Borne et al. [61] définissent la commande optimale suivant trois critères. Le premier est que celle-ci doit vérifier les conditions initiales et finales données. Le second, est la satisfaction des contraintes imposées. Enfin, le troisième est l'optimisation d'un critère choisi. Le critère à optimiser correspond à un choix du concepteur, lequel peut être lié aux valeurs de l'état et de la commande pris à des instants donnés, lié à une intégrale d'une fonction de ces variables sur un intervalle de temps fixé ou non, ou les deux à la fois. Les contrôleurs auto-adaptatifs peuvent être utilisés dans le cas de systèmes dont les caractéristiques physiques évoluent au fil du temps. Chacun des contrôleurs intégrés dans l'architecture peuvent être utilisés parallèlement ou pour être remplacés par un autre plus pertinent au regard des conditions opératoires du système. Le « switch » présenté sur la *Figure 4.3* modélise la possibilité d'une utilisation en parallèle ou d'un remplacement de contrôleur.

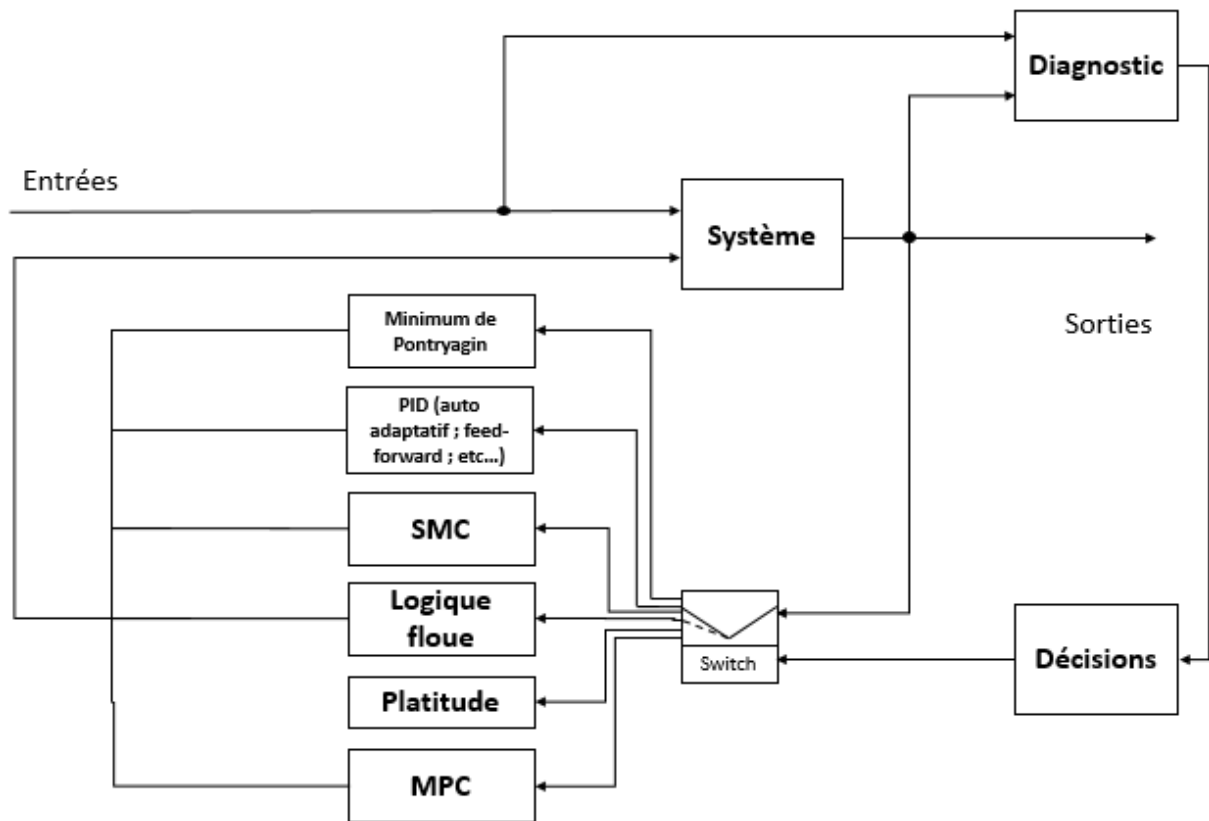


Figure III-III : Architecture des stratégies d'AFTC avec plusieurs outils de contrôle.

Le principe du MPC réside dans la mise œuvre d'un modèle prédictif de la trajectoire du système sur un horizon de temps donné. Cela permet, grâce à une fonction coût, de déterminer une séquence adaptée à la variation future du système. Cette séquence est ensuite transmise au système (via les auxiliaires).

L'utilisation des SMC sur une machine à induction faite par Hicham dans sa thèse [62] est présentée à travers des simulations. Il montre qu'une SMC est plus robuste qu'un PI classique lorsque les exigences en termes de précision et autres caractéristiques dynamiques du système sont strictes. Les performances sont meilleures autour du point de fonctionnement même en présence de variations paramétriques et de perturbations extérieures.

La commande passive est une méthode utilisée par Hilairet et al. [63] sur des convertisseurs de piles à combustible pour rendre le système contrôlé passif. En effet un système passif, au sens de Lyapunov, ne pouvant stocker de l'énergie possède une stabilité naturelle correspondant à l'épuisement sa propre énergie. Cette méthode consiste donc à rendre le système étudié stable en le rendant passif.

D'autres schémas de contrôle utilisant des outils de diagnostic sont donnés dans la littérature : Zhang et al. [64] citent dans leur article quelques contrôleurs reconfigurables tel que le régulateur linéaire quadratique, les structures propres, les modèles multiples, etc... Ils soulignent le fait que l'utilisation de ces contrôleurs nécessite un outil de diagnostic d'une

grande précision et des modèles de défauts parfaitement connus. Cet article fait par ailleurs référence à des contrôleurs accommodables et reconfigurables.

L'accommodation aux défauts est une adaptation des paramètres du contrôleur aux propriétés dynamiques des défauts. Les signaux d'entrées/sorties de la boucle de contrôle sont les mêmes qu'en conditions sans défaut, ce sont les valeurs de consigne ou le paramétrage du contrôleur qui évoluent [46].

Le processus de reconfiguration est le changement de boucle de contrôle dans le cas où l'accommodation est impossible. La reconfiguration est la sélection de nouvelles boucles de commande où des signaux entrées/sorties alternatifs sont utilisés. Les signaux choisis dépendent de la nature du défaut [46].

La prochaine section présente le lien existant entre le processus de diagnostic et le contrôle, à savoir la décision. (*Figure 4.3*). Le module de décision utilise les sorties du module de diagnostic pour la mise en place de directives lesquelles sont appliquées par les outils de contrôle.

C. Outils de décisions pour des stratégies d'AFTC

L'intégration d'un module de décision dans l'architecture AFTC a plusieurs objectifs

- Le premier est d'établir un plan d'action pour permettre le retour du système dans les meilleures conditions opératoires et le maintien de ces performances.
- Le second objectif consiste en la réduction des faux diagnostics par une analyse des données issues du module de diagnostic. L'introduction d'un outil de décision permet de compenser le manque de précision du module de diagnostic par la précision de la décision. En statuant avec précision sur l'occurrence d'un défaut, la décision permet de sélectionner les actions les plus adaptées pour son atténuation ou sa disparition.
- Le troisième, est de permettre de traiter un plus grand nombre de défaut du système par la mise en place d'outils diagnostic permettant leurs détections et isolations. Les outils de contrôle doivent aussi être adaptés aux défauts considérés et la stratégie doit répondre aux contraintes temps-réel imposés par les défauts.

Contrairement au PFTC qui permet une robustesse du système à une petite catégorie de défauts, l'AFTC permet des prises de décisions sur un grand nombre de défauts par l'utilisation d'un ou plusieurs outils de contrôle. La prise en considération d'un plus grand nombre de défaut par la stratégie AFTC dépend surtout de la capacité de l'outil de diagnostic à détecter et isoler leurs occurrences.

Plusieurs types d'outils de décisions peuvent être synthétisés, cela dépend du système ou de la partie du système étudié et des défauts considérés. Par exemple Lebreton et al. [65] ont conçu un outil de décision appliqué aux systèmes PEMFC afin de compenser les incertitudes liées au diagnostic. Les auteurs ont utilisé une fenêtre glissante de 20 secondes qui correspond à la mesure de 5 points consécutifs. Le principe est d'assigner un label à chaque point, lequel est lié à un défaut. Si le nombre de points lié au défaut est supérieur à la moitié du nombre de points en entrée, le défaut associé est considéré comme effectivement détecté et une modification de

consigne est effectuée pour l'atténuation du défaut. La méthode est valide pour des défauts à temps de réponse de l'ordre de la minute tels que le noyage et l'assèchement. Pour des défauts dont le temps de réponse est plus petit, comme la sous-alimentation, la fenêtre de glissement est trop grande. La Figure III-IV illustre ce processus basé sur la fenêtre glissante.

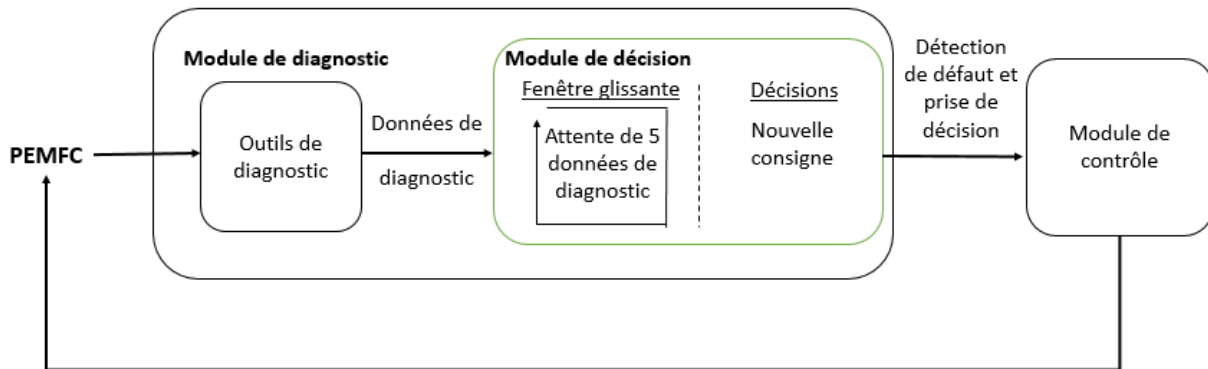


Figure III-IV : Processus de décisions basées sur une fenêtre glissante

Un autre article de Xu et al. [66] fait référence à l'utilisation d'un outil de décision appliqué à la chaîne de traction d'un autobus hybride équipé d'une PEMFC. Dans leurs travaux, une action est prédéfinie pour chaque défaut diagnostiqué. L'outil de diagnostic proposé garantit un faible temps de détection et exécute plus rapidement les procédures d'atténuation de défaut. En revanche, l'efficacité de la stratégie attribue au diagnostic un niveau de confiance élevé. La Figure III-V synthétise la manière dont cette approche peut être appliquée à une PEMFC.

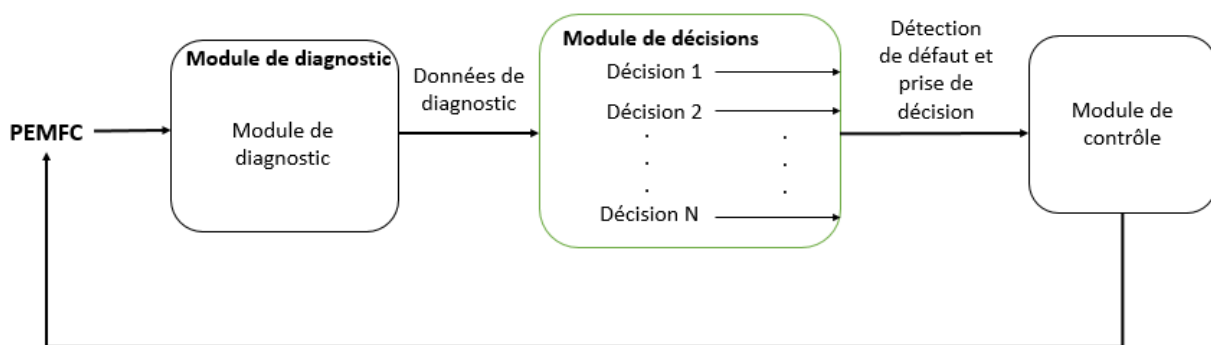


Figure III-V : Processus de décisions basées sur des cas de décisions définis hors ligne

Zidani et al. [67] travaillent sur le contrôle tolérant aux défauts appliqué à un moteur à induction et aux défauts de capteur associés. La décision est basée sur un module de logique floue qui permet de faire le choix entre deux types de contrôle. D'abord un SMC utilise les données des capteurs pour le contrôle du système. Ici, en cas de défaut capteur, la stratégie FTC doit pouvoir basculer sur une régulation sans capteur. Le changement de régulateur suit une règle de décision floue. Cet article utilise aussi un module de diagnostic considéré comme étant parfait (capteur en défaut ou non). La Figure III-VI représente la prise de décision permettant le basculement vers le contrôle sans capteur.

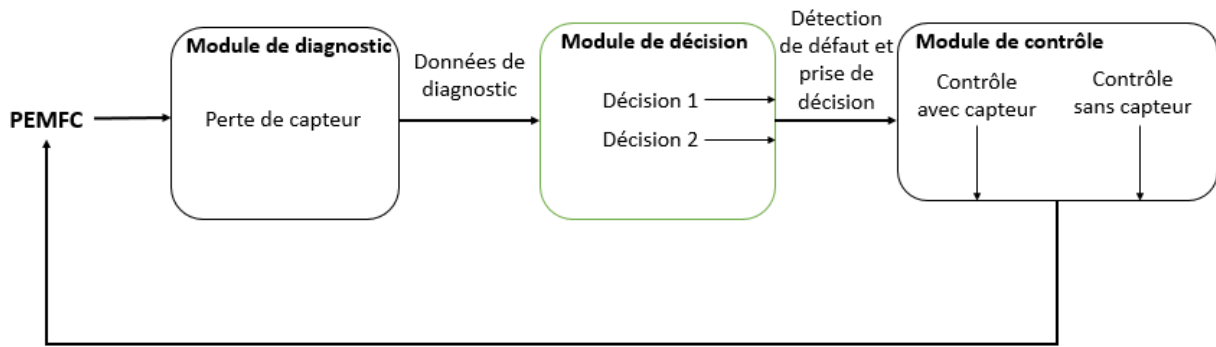


Figure III-VI : Processus de décisions basées sur des outils contrôle définis hors ligne

Dans leur article [68], Zhang et al. utilisent un outil de décision appliqué à un système non linéaire. Dans leurs travaux, l’outil de diagnostic est basé sur le franchissement d’un seuil de détection attribué à chaque composant. L’outil de décision fait alors le choix du déclenchement d’un outil de contrôle à disposition. Il y a deux niveaux de décision considérés : diminuer les incertitudes du diagnostic; et prendre la décision sur l’action visant à atténuer le défaut. La Figure III-VII montre le processus de décision basé à la fois sur la diminution des incertitudes liées au diagnostic et à l’atténuation de défauts.

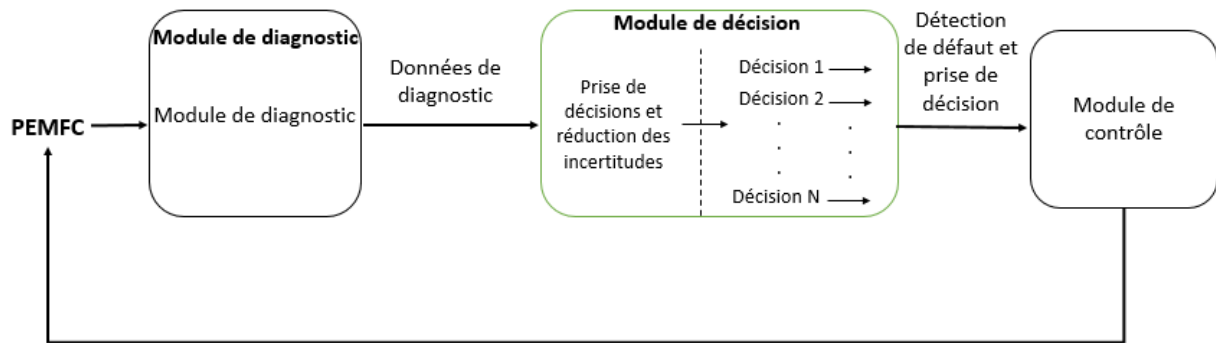


Figure III-VII : Processus de décisions basées sur la diminution des incertitudes et avec des actions définies hors ligne

Les travaux de Miksch et al. [69] utilisent un module de décision dans une stratégie de contrôle tolérant aux défauts basé sur un modèle prédictif (AFTMPC). Lorsqu’un défaut apparaît, un bloc d’accommodation des lois de commande au défaut est utilisé pour l’atténuer. Il en résulte un changement de paramètres de la fonction *objectif* et des contraintes considérées dans le modèle. La fonction *objectif* modifiée (avec les paramètres optimisés) est ensuite testée dans un bloc d’analyse et de décision. Si ce bloc signale que l’accommodation n’est pas implantable pour des problèmes de stabilité par exemple, un nouveau jeu de paramètres est alors calculé pour la définition d’une nouvelle fonction *objectif*. Si aucune loi de commande ne peut être sélectionnée, le système est arrêté et se met en attente de l’intervention d’un utilisateur (la décision dans ce cas correspond à une opération de maintenance). Dans le cas où la recherche de nouveaux paramètres pour l’accommodation est trop longue, le non-respect des contraintes temps-réel inhérentes au système peut mener à sa dégradation. Dans ce cas la décision consiste en l’arrêt du système.

La décision constitue donc le lien entre le diagnostic et le contrôle dans le cas d'une stratégie AFTC. Plusieurs types d'outils de décision peuvent être implantés et dépendent des critères de confiance accordés aux outils de diagnostic, du temps de réponse des défauts, du système étudié ou encore des lois de commandes utilisées. Pour une application sur une PEMFC, tous ces critères sont pris en considération et l'association de plusieurs méthodes de décisions peut optimiser l'atténuation de défauts.

D. Etat de l'art de la commande tolérante aux défauts active (AFTC)

Blanke et al. [46] ont défini deux méthodes d'utilisation de la stratégie d'AFTC. La première consiste en la définition hors ligne des paramètres des contrôleurs et faire un « switch » sur le contrôleur le plus adapté à l'atténuation du défaut apparu. Cette méthode permet de satisfaire les contraintes temps-réel et est appelée : reconfiguration du contrôleur. La seconde méthode consiste en l'actualisation des paramètres du contrôleur suite à l'occurrence d'un défaut pour le maintien de la stabilité du système. Dans ce cas, la méthode est appelée : accommodation au défaut. Les deux méthodes de stratégie d'AFTC sont complémentaires dans la mesure où si l'une de ne parvient pas atténuer le défaut, l'autre le pourra potentiellement. Elles doivent cependant respecter les contraintes suivantes :

- détection et isolation précise du défaut en temps-réel ;
- reconfiguration ou accommodation des lois de commande en temps-réel ;
- atténuation de défaut en temps-réel.

Les architectures AFTC utilisent trois sous-systèmes : des outils de diagnostic ; des outils de décision ; des outils de contrôle reconfigurables et accommodables. Blanke et al. [46] et Zhang et al. [56] ont mis en évidence certaines contraintes pour les applications avec AFTC dues à l'aspect temps-réel. En effet, les paramètres du contrôleur doivent être accommodés en temps-réel tout comme la reconfiguration des boucles de commande en utilisant une méthode essai erreur. Le système doit par ailleurs fournir une solution même si elle n'est pas optimale pour permettre une continuité de service même en mode de fonctionnement dégradé.

Les stratégies AFTC présentent l'avantage de la prise en considération possible d'un grand nombre de défauts et le maintien de la stabilité du système en mode dégradé. Cependant, quelques contraintes sont à noter : les stratégies AFTC sont plus complexes à mettre en œuvre que les stratégies PFTC, parce qu'elles requièrent la conception d'outils de diagnostic en ligne couplé à un processus de décision, lesquels gèrent les outils de contrôle. D'autres critères sont aussi à prendre en compte comme la nécessité de répondre à la fois à des exigences de précision et aux spécifications temps-réel, restreignant ainsi le choix des outils de diagnostic utilisables pour les stratégies AFTC. A cela s'ajoute la contrainte du temps de calcul des paramètres actualisés du contrôleur pour l'accommodation aux défauts, pas nécessairement négligeable au regard de la dynamique des défauts. Enfin, il convient de préciser que le processus de diagnostic peut être chronophage et peut mener à la dégradation du système dans le cas où celui-ci ne respecte pas les contraintes temps-réel imposées par le défaut.

Plusieurs applications de stratégies AFTC ont déjà été développées sur des systèmes autres que les PàC et présentées dans la littérature. En effet le transport, le stockage d'énergie [10], [25], [41] ou l'industrie de l'électronique [44] proposent des applications d'AFTC.

Par exemple, Miksch et al. [69] ont utilisé une stratégie AFTC pour une implantation temps-réel sur un système à trois réservoirs. Les auteurs utilisent un système diagnostic considéré comme parfait (précision suffisante pour ne jamais déclencher une fausse alarme) et sans délai. Aucune information supplémentaire n'est donnée sur la synthèse de l'outil de diagnostic. L'outil de contrôle est basé sur un modèle prédictif (MPC : Model Predictive Control). Le processus de décision est basé sur un processus d'accommodation du contrôleur aux défauts et détermine de nouveaux paramètres pour le MPC en vue d'une atténuation.

Une autre recherche a été effectuée par Li et al. [70] pour un système à distribution non linéaire stochastique de Lipchitz. Dans cet article les auteurs mettent en avant le problème de précision des outils de diagnostic, ce qui les amène à proposer en plus de l'outil de diagnostic, un système d'estimation de défauts. Le processus d'estimation de défaut est effectué pour compléter les informations issues du diagnostic et obtenir d'autres informations telles que l'amplitude du défaut (non disponible *via* l'outil de diagnostic). Les auteurs ont ainsi cherché les approches adaptées pour sa mise en œuvre telles que la technique de l'observateur par modes glissants (SMO), une approche adaptative ou encore par la méthode des observateurs à entrées inconnues. Ces travaux ont mis en évidence une problématique importante en matière de diagnostic, à savoir le risque de perte de précision de l'outil résultant d'un mauvais compromis entre rapidité du diagnostic et généralité.

Un travail proposé par Badihi et al. [71] appliqué aux fermes éoliennes offshore, utilise une architecture incluant un outil de diagnostic et de contrôle. L'intérêt de la mise en place de l'outil AFTC est de limiter la baisse de performance due à l'érosion des turbines et à l'accumulation de débris sur les pales au fil du temps. L'outil de diagnostic est basé sur l'utilisation de modèles pour la génération de résidus. L'outil de décision est basé sur un algorithme qui génère un signal de correction pour l'accommodation des contrôleurs lors de l'apparition de défauts. Les outils de contrôle effectuent des changements uniquement sur le couple entre les turbines et les pales. La modification du couple induit une perte de performance. Cette perte liée au changement du couple est proportionnelle à l'amplitude du défaut.

Shahbazi et al. [72] ont étudiés une application basée sur un convertisseur back-to-back à six branches. Dans leur système, un défaut pouvant apparaître sur l'une des branches est détecté par comparaison entre l'estimation et la mesure de la tension d'un pôle. Dans le cas d'un défaut de branche, le mécanisme de reconfiguration modifie la configuration du convertisseur qui peut évoluer d'une topologie en 6 branches vers une topologie en 5 branches. Il est aussi possible de fonctionner en mode dégradé en conservant la topologie en 6 branches, au risque de réduire les performances du système.

Dans le domaine médical, Su et al. [73] étudient les biopuces micro fluidiques qui permettent le suivi de santé des patients. Pour garantir la fiabilité du système, une stratégie de commande

tolérante aux défauts est mise en place pour maintenir les fonctionnalités des biopuces, même en conditions de défaut. Dans l'article, les auteurs considèrent une probabilité uniforme d'échec afin d'estimer la résilience de la biopuce. Les auteurs mettent en place un algorithme leur permettant le calcul d'un index de résilience qui varie entre 0 et 1 et leur permettant de statuer sur la possibilité de reconfigurer la biopuce : 0 signifie qu'il n'est pas possible d'effectuer la reconfiguration et 1 qu'il est possible. Dans cet article, la détermination d'un facteur de résilience est utilisé pour la prise de décision. Le contrôle est basé sur un algorithme d'agencement des modules composant la biopuce. L'étude considère l'existence de défaut sans évoquer d'outils de diagnostic.

Ces travaux ont pour but de montrer que les outils de commande tolérantes aux défauts ont fait l'objet de diverses applications (batteries, éoliens ou encore convertisseurs). En revanche il existe peu d'études menées sur les systèmes PEMFC.

Comme évoqué plus haut, l'utilisation d'une stratégie de PFTC est possible pour l'atténuation d'une catégorie de défaut. Cependant pour un plus large spectre d'atténuation de défaut, l'utilisation d'une stratégie AFTC est plus pertinent pour les systèmes complexes comme les PEMFC. L'application de cette stratégie aux systèmes PEMFC est décrite dans la section suivante.

E. Stratégies AFTC appliquée aux systèmes PEMFC

Cette section résume les stratégies de commande tolérantes aux défauts et discute des applications possibles sur les PEMFC. Les différentes étapes pour l'élaboration de cette stratégie consistent à mettre en place un outil de diagnostic, de décision et de contrôle. Si plusieurs études traitent de l'application de stratégies FTC sur des auxiliaires, la littérature fournit peu de références concernant l'application sur des stacks.

Un exemple d'application d'une stratégie de FTC sur les auxiliaires de PEMFC effectué par Guilbert et al. [74], [75] qui ont menés des recherches sur les convertisseurs DC/DC utilisés par des PEMFC. Le convertisseur considéré est constitué d'une topologie en 3 branches. Une unité de contrôle électronique est utilisée pour la détection de conditions de défauts. Dans cet article, chaque branche est contrôlée par un signal PWM (Modulation de largeur d'impulsion). Le mécanisme de FTC consiste en l'ajustement du signal de commande appliqué à la branche en défaut du convertisseur.

Lebreton et al. [65], [76] traitent de la gestion de l'eau et de l'alimentation d'air d'un système PEMFC. Les auteurs ont utilisés un réseau de neurones pour l'ajustement en ligne des paramètres du PID implanté dans la boucle de contrôle de l'architecture AFTC. La sortie du contrôleur est une valeur actualisée de stœchiométrie, adaptée au défaut apparu.

Wu et al. [77] ont aussi implanté une stratégie AFTC sur une PEMFC. Ils utilisent une méthode de diagnostic basée sur la génération de résidus avec un modèle à réseaux de neurones, un mécanisme de reconfiguration et trois contrôleurs non linéaires ajustables. La détection du noyage, de l'assèchement et des conditions normales est réalisée par la génération et l'analyse de résidus entre les mesures et les sorties du modèle. Le module de contrôle est basé sur un jeu de trois contrôleurs entre lesquels un « switch » est réalisé en fonction des conditions opératoires.

En effet, un contrôleur est mis en place pour l'atténuation du noyage, un autre pour l'assèchement et un dernier pour des conditions normales de fonctionnement. Les outils de contrôle sont conçus hors ligne et permettent d'actualiser les différences de tension et de pression en fonction des conditions opératoires. Les lois de commande sont basées sur la technique de placement de pôle, permettant d'imposer la dynamique du système asservi en boucle fermée.

Fukuhara et al. [78] ont menés une étude sur une PEMFC à cathode ouverte. Ils considèrent que le noyage anodique, est un des défauts les plus récurrents pour ce type de pile. L'étude réalisée vise à optimiser la gestion de la purge d'eau anodique pour améliorer le SoH et augmenter la durée de vie de la pile, tout en diminuant les effets de l'engorgement. Les auteurs montrent que lors d'un processus de purge de 10 ms, environ 5×10^{-3} g d'eau est évacuée. Ils considèrent aussi que la diminution du débit massique d'entrée à l'anode pendant la purge est un indicateur de l'accumulation d'eau. Le modèle estimant la quantité d'eau accumulée à l'anode et l'estimation de la quantité d'eau permettent la génération de résidu. Ces résidus sont ensuite analysés et si leurs valeurs atteignent un seuil limite représentant une évacuation insuffisante, une purge plus longue est effectuée. Les résultats montrent que la stratégie AFTC utilisée permet l'atténuation du défaut de noyage anodique.

Cette partie a permis la mise en place des bases de la FTC en vue du développement d'une architecture de commande tolérante aux défauts active. La stratégie choisie dans la suite de l'étude s'appuie sur l'AFTC en trois modules : diagnostic, décision et contrôle. La littérature montre que les informations issues des outils de diagnostic peuvent parfois être insuffisantes. Pour cette raison, certains articles proposent la mise en place de modules complémentaires pour l'estimation de grandeurs supplémentaires comme l'amplitude du défaut. D'autres font l'hypothèse de défauts parfaitement connus (amplitudes y compris), et nécessitent donc uniquement un outil de diagnostic donnant l'information de leurs apparitions. Il y a donc plusieurs besoins en termes de diagnostic : apparitions, amplitudes ou formes (du signal). Leurs mises en place dépendent des grandeurs mesurables (ou estimables), de la connaissance du système et du défaut.

Les outils de diagnostic peuvent émettre des faux diagnostics, ce qui peut fortement perturber le fonctionnement normal du système s'ils sont intégrés dans une stratégie d'AFTC. La mise en place d'un module de décision permet la synthèse en ligne d'une stratégie d'atténuation de défaut. L'outil de décision, suivant sa conception, peut aussi être résilient aux fausses alarmes issues du diagnostic. Les outils de contrôle servent à l'application de la stratégie établie par la décision. Plusieurs types d'outils de contrôle existent et plusieurs d'entre eux sont intégrés à une stratégie AFTC selon leurs sur l'occurrence d'un défaut.

Dans le cadre de cette thèse, l'outil de diagnostic est déjà développé et est basé sur une génération de résidus. Les décisions sont effectuées à la fois en accommodation de défaut et en reconfiguration des outils de contrôle. L'analyse structurelle de défauts développée dans le chapitre précédent met en évidence plusieurs variables de commande permettant le réajustement des contraintes influencées par l'apparition de défauts. Chacune de ces variables étant régulée, il est possible d'établir un ensemble d'outils de contrôle permettant des

mécanismes d'accommodation et de reconfiguration. L'outil de décision prend comme entrée le diagnostic et sélectionne les meilleures options pour l'atténuation du défaut.

Etant données les recherches effectuées sur les problématiques de gestion de l'eau dans les PEMFC, un outil de diagnostic donnant l'information sur l'occurrence du défaut et sur son amplitude sont nécessaires. En effet, la figure 1.1 (chapitre 2) permet de constater que le défaut de noyage de PEMFC possède plusieurs amplitudes et provoque différentes baisses de performances. Ce type de défaut possède un temps d'établissement assez long (1 minute à 1 heure) ce qui laisse le temps d'effectuer les calculs et mesures nécessaires pour l'obtention du maximum d'information.

L'outil de décision est quant à lui conçu hors ligne et prend des décisions pour l'atténuation des défauts de noyage et d'assèchement de membrane. Au regard de la dynamique des défauts, il est possible de mettre en place une échelle décisionnelle. La première marche de cette échelle permettra une atténuation ponctuelle sans changement permanent de point de fonctionnement par des actions rapides et peu coûteuses. La seconde marche permet un changement permanent de point de fonctionnement dans le cas où la première marche décisionnelle est peu efficace.

Les outils de contrôle utilisés dans la stratégie AFTC doivent être en accord avec les dynamiques des défauts. En effet, un défaut à temps d'établissement inférieur à la seconde et une loi de commande possédant un temps d'établissement de plusieurs secondes ne pourra pas convenir à la stratégie.

La prochaine partie fait l'objet de la construction de l'outil de décision.

IV. Algorithme de décision et protocole expérimental

Glossaire :

MdD : Module de Décisions

T_{diag} : Période de déclenchement du processus de diagnostic

T_{exp} : Temps d'exposition de la PEMFC au défaut

A : Amplitude de la sévérité du défaut

k_f : Coefficient permettant la pondération des prises de décisions

MLF : Module de Logique Floue

Le chapitre 5 s'attache à détailler le module de décision, élément permettant la communication entre les modules de diagnostic et de contrôle.

A. Construction d'un algorithme de décision adapté aux défauts de piles à combustible de type PEMFC

a. Définition des entrées-sorties de l'algorithme de décision

Comme introduit dans le chapitre précédent, l'architecture AFTC proposée est constituée de trois modules dont le module de décision (MdD). Ce dernier permet la liaison entre le module de diagnostic et le module de contrôle. Les outils de diagnostic fournissent les probabilités d'occurrence de défauts. Les outils de diagnostic plus perfectionnés peuvent déterminer l'amplitude des défauts. Deux sorties de diagnostic sont donc possibles : la probabilité d'être

en condition de défaut et l'amplitude du défaut. Ces deux sorties constituent donc l'entrée du module de.



Figure IV-I : Entrées et sorties du MdD

En fonction de ces entrées, le MdD doit sélectionner la meilleure combinaison possible d'actions pour permettre une atténuation en temps-réel des défauts. Variables en fonction de la dynamique du défaut, les contraintes temps-réel ont tendance à se durcir pour de faibles temps de d'établissement, et à s'assouplir dans le cas contraire. Le MdD est conçu en trois étapes :

- La première est la mise en place d'une méthode basée sur la logique floue pour le traitement des données stochastiques (*i.e.* les probabilités d'occurrence issues du module de diagnostic). La phase de défuzzification permet de statuer sur l'état de la PEMFC, et l'éventuelle occurrence d'un défaut.
- Dans un second temps, la mise en place d'un outil de décision dit « à effet rapide » permet l'atténuation de l'occurrence. Parmi les variables dont les variations permettent d'atténuer le défaut, l'idée est d'agir sur celle qui présente le plus petit temps de réponse.
- Enfin, la troisième étape, consiste à développer une méthode dite « à effet différé » permettant d'atténuer le défaut de manière durable, en cas d'apparition à répétition du défaut.

L'étape suivante est le traitement des données stochastiques, l'outil de décisions à effet rapide.

b. Format des données à traiter

Les sorties du diagnostic, entrées du MdD sont conditionnées sous forme de deux matrices : les matrices donnant les probabilités d'occurrence de défaut et celles donnant leurs amplitudes. Chaque colonne des matrices de probabilités d'occurrence correspond à un processus de diagnostic, et chaque colonne correspond à la période de diagnostic associée. Par exemple la première colonne correspond au premier diagnostic, la seconde à un diagnostic effectué une période plus tard. Plus cette matrice est grande, plus le MdD possède d'informations pour statuer sur l'occurrence d'un défaut. Cependant sa taille influence aussi la rapidité de prise de décision, ce qui pourrait poser le problème du respect des contraintes temps-réel pour l'atténuation de défaut. La *Figure 5.2* est une représentation des matrices de probabilités. Six défauts de natures différentes y sont considérés : le noyage (*i.e.* l'engorgement) cathodique, l'assèchement de la membrane, chutes des stœchiométries cathodique et anodique, et sous-alimentation cathodiques et anodiques.

Période 1	Période 2	Période n
Probabilité noyage (D1)	Probabilité noyage (D1)	Probabilité noyage (D1)
Probabilité assèchement (D2)	Probabilité assèchement (D2)	Probabilité assèchement (D2)
Probabilité StoechioFaible cathode (D3)	Probabilité StoechioFaible cathode (D3)	Probabilité StoechioFaible cathode (D3)
Probabilité StoechioFaible anode (D4)	Probabilité StoechioFaible anode (D4)	Probabilité StoechioFaible anode (D4)
Starvation cathode (D5)	Starvation cathode (D5)	Starvation cathode (D5)
Starvation anode (D6)	Starvation anode (D6)	Starvation anode (D6)
Condition sans défaut (SD)	Condition sans défaut (SD)	Condition sans défaut (SD)

Figure IV-II : Matrice des probabilités d'occurrence des défauts

Cinq niveaux d'amplitudes (A) sont considérés dans la matrice des amplitudes. Le premier correspondant à une faible amplitude et le cinquième à une forte amplitude. Ainsi, à chaque période de diagnostic, une matrice de cinq lignes et de sept colonnes est construite. La Figure 5.3 est une représentation de cette matrice.

Période 1						
Amplitude D1 11	Amplitude D2 12	Amplitude D3 13	Amplitude D4 14	Amplitude D5 15	Amplitude D6 16	Amplitude SD 17
Amplitude D1 12	Amplitude D2 22	Amplitude D3 23	Amplitude D4 24	Amplitude D5 25	Amplitude D6 26	Amplitude SD 27
Amplitude D1 13	Amplitude D2 32	Amplitude D3 33	Amplitude D4 34	Amplitude D5 35	Amplitude D6 36	Amplitude SD 37
Amplitude D1 14	Amplitude D2 42	Amplitude D3 43	Amplitude D4 44	Amplitude D5 45	Amplitude D6 46	Amplitude SD 47
Amplitude D1 15	Amplitude D2 52	Amplitude D3 53	Amplitude D4 54	Amplitude D5 55	Amplitude D6 56	Amplitude SD 57

Figure 5.3 : Matrice des amplitudes des défauts sur une période de diagnostic.

En somme, à chaque déclenchement périodique du diagnostic (avec une période T_{diag}), une matrice des amplitudes de défaut est générée. L'interprétation de cette matrice permet de pondérer par un facteur k_f une partie des décisions effectuées par le MdD (cf. section d). Les données contenues dans chacune des matrices sont traitées dans un but de prendre une décision pour l'atténuation durable des défauts.

c. Traitement des données

Un défaut est détecté lorsque sa probabilité d'occurrence vérifie deux conditions :

- elle est en moyenne la plus élevée,
- et elle est supérieure à la probabilité de la condition sans défaut et d'un seuil. Le seuil est une valeur minimale en dessous de laquelle l'unique condition opératoire considérée et la condition sans défauts. Un seuil est attribué à chaque défaut et leurs valeurs varient selon le potentiel dégradant du défaut pour lequel il est établi.

Ceci peut se traduire par le pseudo code suivant :

$$\text{Si } P(T_{diag}, f) > P(T_{diag}, C_{\{SD\}}) - S_{min} \quad \text{Eq. IV-1}$$

Alors le défaut f est détecté,

Sinon, la condition normale de fonctionnement est considérée.

P : Probabilité d'un évènement.

$C_{\{SD\}}$: Evènement correspondant à la condition sans défaut.

S_{min} : Seuil minimal en dessous duquel l'unique évènement considéré est celui de la condition sans défaut (correspond à 10% de $P(T_{diag}, C_{\{SD\}})$).

Ensuite, une analyse des données d'amplitudes couplée au temps d'exposition du système au défaut (T_{exp}) permet de définir un facteur k_f représentant la sévérité obtenue par l'interprétation de la matrice des amplitudes du défaut. Le temps d'exposition de la PEMFC à un défaut est déterminé en ligne. En effet, le nombre de détections consécutives d'une même occurrence de défaut et la connaissance de la période de déclenchement du diagnostic permet le calcul du temps d'exposition de la PEMFC au défaut :

$$T_{exp} = \sum_{t_0}^{t_n} T_{diag}(t) \quad \text{Eq. IV-2}$$

Où t_0 représente le diagnostic d'un défaut à l'instant t et t_n le dernier diagnostic effectué sur la même occurrence d'un même défaut.

Calcul du facteur k_f :

$$k_f(A, T_{exp}) = constant \quad \text{Eq. IV-3}$$

Une modification de k_f entraîne des accommodations plus ou moins fortes des contrôleurs pour l'atténuation du défaut (*i.g.* forte ou faible modification du débit cathodique pour une forte ou faible valeur de k_f). Le facteur k_f est réajusté à chaque T_{diag} . Cependant, étant donné qu'il est nécessaire d'avoir au moins deux déclenchements du processus de diagnostic pour même défaut (*i.e.* avoir un diagnostic déclenché à t_0 et un second à t_1) pour calculer T_{exp} , cette méthode fonctionne à partir de deux périodes de diagnostic. Cela implique que la première prise de décision repose uniquement sur la donnée *amplitude*, et donc sur une confiance totale en l'outil de diagnostic.

Le calcul de k_f est basé sur une méthode de type logique floue (MLF). La première étape consiste en la définition des entrées disponibles (A et T_{exp}) et des sorties requises (k_f). La seconde phase est dédiée à l'écriture des règles d'inférence. Enfin, pour chaque entrée il est nécessaire de définir des fonctions d'appartenance.

Pour Tekin [79], le principe de la logique floue consiste à utiliser des valeurs linguistiques, comme « grand » ou « petit » à la place de la manipulation de grandeurs numériques. Les domaines des valeurs numériques sont partitionnés en classes. Chacune des classes, identifiées par un terme linguistique, est caractérisée par une « fonction d'appartenance » (FA) définissant le degré des valeurs numériques à cette classe. Une même valeur peut appartenir à plusieurs classes et son appartenance est caractérisée par un degré d'appartenance spécifique. L'auteur montre, par ailleurs que les FA peuvent prendre diverses formes (triangulaires, trapézoïdales, sigmoïdales et simple singleton).

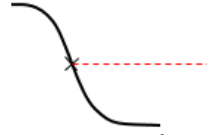
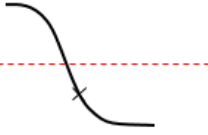

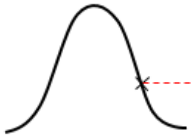
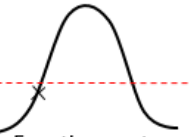
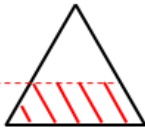

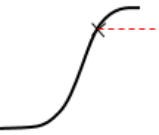

Les règles d'inférence établies en fonction des entrées/sorties du MLF sont construites sur la connaissance experte du système (Cf. *Tableau 5.1*) :

T_{exp} est élevé	Alors k_f est élevé
Si A est moyenne ET T_{exp} est faible	Alors k_f est moyen
Si A est élevée ET T_{exp} est faible	Alors k_f est moyen
Si A est faible ET T_{exp} est faible	Alors k_f est faible
Si A est élevée ET T_{exp} est moyen	Alors k_f est élevée
Si A est moyen ET T_{exp} est moyen	Alors k_f est moyen
Si A est faible ET T_{exp} est moyen	Alors k_f est moyen

Tableau 5.1 : Règles d'inférence pour l'outil d'estimation de l'intensité des prises de décisions

À partir de ces règles, il est possible de définir les fonctions d'appartenance. Une fonction d'appartenance ou fonction indicatrice, est une fonction qui explicite l'appartenance ou non à un ensemble. Deux types de fonctions sont choisis et chacun d'entre eux est classé suivant trois valeurs linguistiques (faible, moyen et fort). Le tableau 5.2 présente cette classification.

Tableau IV-1 : Classification des règles d'appartenance et des fonctions d'appartenance

	Amplitude du défaut	Temps d'exposition	Calcul des trapèzes
Faible	 Fonction sigmoïde	 Fonction sigmoïde	
Moyen	 Fonction porte	 Fonction porte	
Elevé	 Fonction sigmoïde	 Fonction sigmoïde	

Les fonctions d'appartenances de forme sigmoïdales et gaussiennes sont choisies pour l'amplitude et le temps d'exposition aux défauts. Ces formes de fonctions d'appartenance permettent la prise en considération de processus d'atténuation de défaut (*resp.* d'une apparition progressive du défaut) qui serait moins évidentes par des fonctions d'appartenance à évolutions plus brutales (formes triangulaires).

Les sorties du MLF sont calculées à partir de triangles équilatéraux (*Cf. ANNEXE B0*). Cependant, le résultat n'est exploitable qu'après une phase de « défuzzification ». La méthode de défuzzification choisie est le calcul du centre de gravité des trapèzes (barycentres). Le

principe consiste à calculer les barycentres des trois triangles de sortie et d'en faire la moyenne pour obtenir le résultat tel que représenté sur la Figure B0.2 en ANNEXE B0. La Figure B0.1 en ANNEXE B0 présente les manipulations géométriques permettant le calcul des centres de gravités.

Les données essentielles à la prise de décision étant disponibles, le défaut à atténuer est connu tout comme sa sévérité *via* le MLF. L'étape suivante consiste à choisir les meilleures décisions possibles pour une atténuation efficace : deux types de décisions sont considérées dans ce travail : rapides (à à effet rapide) et plus long terme.

d. Décisions à effet rapide

Le module de décision est partitionné en deux parties. La première, est constituée de processus de décisions permettant des atténuations rapides de défauts. Ce type de décisions, appelées « décisions à effet rapide », visent à atténuer le plus rapidement possible un défaut par la manipulation de la variable du système au temps de réponse le plus court. Les graphes de structure effectués précédemment (Cf. Figure II-IV et Figure II-VII), montrent que les variables à faible temps de réponse candidates à une accommodation sont le courant de PEMFC et le débit cathodique. Cependant, modifier le courant délivré par la PEMFC revient à modifier le profil de charge, ce qui n'est pas toujours envisageable. Ensuite, les graphes de structure montrent qu'une action sur le débit lors d'un noyage cathodique a un effet plus direct sur son atténuation alors que pour un assèchement de membrane l'effet semble moins direct. Les décisions à effet rapide se portent donc sur les débits d'entrée des compartiments anodique et cathodique de la PEMFC.

La nature du défaut étant précisée par le module de diagnostic, il est possible de modifier les débits de gaz afin de prévenir son apparition, voire d'adapter le débit modifié en fonction de la sévérité, en appliquant le facteur de pondération k_f . La stratégie à effet rapide d'atténuation peut se formaliser par les règles suivantes :

Si le seuil maximal de l'incrément de la stœchiométrie d'O₂ n'est pas atteint :

$$\lambda_{O2est} + \Delta_{O2} < L_{max}(\varphi_{O2in}, \varphi_{O2cons_max}) \quad \text{Eq. IV-4}$$

Alors incrémenter la stœchiométrie d'O₂ :

$$S_d(f) = \lambda_{O2mes} + \Delta_{O2} \quad \text{Eq. IV-5}$$

Si le seuil maximal stœchiométrique d'O₂ est atteint :

$$\lambda_{O2est} + \Delta_{O2} \geq L_{max}(\varphi_{O2in}, \varphi_{O2cons_max}) \quad \text{Eq. IV-6}$$

Alors mettre la consigne stœchiométrique d'O₂ à sa valeur limite :

$$S_d(f) = L_{max} (\varphi_{O2in}, \varphi_{O2cons_max}) \quad \text{Eq. IV-7}$$

Avec $\Delta_{O2} = L_{max} \cdot k_f$ Eq. IV-8

Et $L_{max} = \frac{\varphi_{O2in}}{\varphi_{O2cons_max}} - \lambda_{O2est}$ Eq. IV-9

Et $\varphi_{O2cons_max} = \frac{N \cdot I_{max}}{4 \cdot F} \cdot V_{mol}$ Eq. IV-10

S_d : stratégie d'atténuation correspondant à la nouvelle consigne de stoechiométrie

Δ_{O2} : pas d'incrément de la stoechiométrie d'oxygène

L_{max} : limite maximale que peut atteindre la stoechiométrie en fonction du point de fonctionnement

φ_{O2in} : débit d'O₂ en entrée de PEMFC (m³/s)

φ_{O2cons_max} : débit d'O₂ maximal pouvant être consommé par la PEMFC (m³/s)

λ_{O2est} : stoechiométrie d'oxygène estimée

I_{max} : courant maximal que peut délivrer la PEMFC (ou pouvant être délivré par)

N : nombre de cellules

F : constante de Faraday

V_{mol} : volume molaire d'un gaz parfait calculé à 65°C

f : type d'évènement correspondant à un défaut

n : nature du correcteur

k_f : facteur de sévérité du défaut, compris entre 0 et 1, permettant la pondération de la décision à effet rapide

e. Simulation / validation numérique

Les Figure IV-IV et Figure IV-V représentent l'évolution des probabilités d'occurrence des défauts ainsi que les décisions à effet rapide associées. Ces graphes sont issus d'une simulation du processus de décisions à effet rapide sur une base de données créée artificiellement. La création des données est réalisée *via* un programme écrit en *Java* dont voici une capture d'écran sur la Figure IV-III:

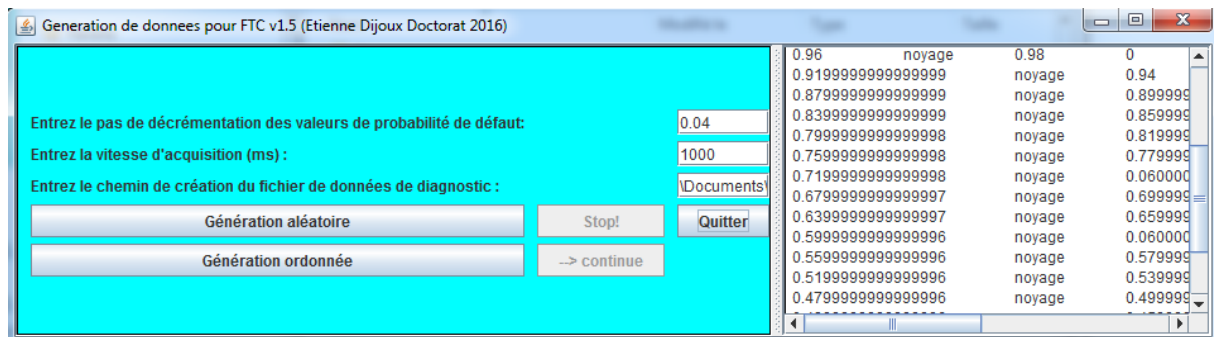


Figure IV-III : Création de données pour la simulation de l'algorithme AFTC

Cet outil permet de simuler les résultats d'un outil de diagnostic ayant les sorties suivantes :

- Les défauts pouvant apparaître
- Leurs amplitudes
- Leurs probabilités d'occurrence

Le simulateur permet deux modes de générations de données : mode aléatoire ou ordonnée. Le mode aléatoire permet la génération aléatoire d'un défaut sur lequel est associé une amplitude et une probabilité d'occurrence. Ceci permet le test de la résilience de l'outil de décision à l'issue d'un faux diagnostic. La génération ordonnée, génère un défaut avec lequel est associé une amplitude et une probabilité d'occurrence. L'amplitude s'accroît à chaque nouvelle génération tout comme la probabilité d'occurrence. Au bout d'un certain temps, la probabilité d'occurrence et l'amplitude sont décrémenteés pour simuler l'effet d'une atténuation d'un défaut. La génération ordonnée est utile pour le test du comportement de l'outil de décision sur un défaut qui apparaît et gagne en amplitude puis qui s'atténue.

Le simulateur permet donc la vérification du calcul des incrémenteations issues de l'outil de décision. Il n'y a pas de modèle de défaut implanté dans le simulateur pouvant réagir à la stratégie de l'outil de décision.

La Figure IV-IV représente l'évolution des probabilités d'occurrence de défauts ainsi que celle de la condition sans défaut. Les défauts considérés dans la simulation sont :

- Noyage anodique/cathodique
- Assèchement de membrane
- Faible stœchiométrie anodique/cathodique

Sur les 30 premières minutes, c'est le défaut de noyage cathodique qui possède la plus forte probabilité et l'amplitude associée au défaut s'accroît. La réponse de la stratégie AFTC est une incrémenteation du débit d'O₂ comme il est montré sur la Figure IV-V.

Lorsqu'à la 13^{ème} minute la probabilité du défaut et son amplitude décroissent (donnée d'amplitude non représentée sur la Figure IV-IV), le débit d'O₂ est décrémenteé. L'amplitude du défaut croît de nouveau à la 21^{ème} minute et la probabilité du noyage cathodique reste la plus élevée. En réponse, l'outil de décision incrémente de nouveau le débit d'O₂ jusqu'à la 31^{ème} minute, où la probabilité de la condition normale devient la plus élevée. A partir de ce moment, la probabilité d'occurrence et l'amplitude associée à ce défaut décroissent jusqu'à disparaître. Le module de décision décrémente alors la consigne en stœchiométrie d'O₂.

Au bout de la 37^{ème} minute, la condition normale possède la plus forte probabilité et la consigne en stœchiométrie d'O₂ continue à être décrémenteée.

À la 40^{ème} minute, un défaut d'assèchement et de faible stœchiométrie anodique sont détectés. Une baisse du débit d'O₂ et une augmentation du débit d'H₂ s'en suivent.

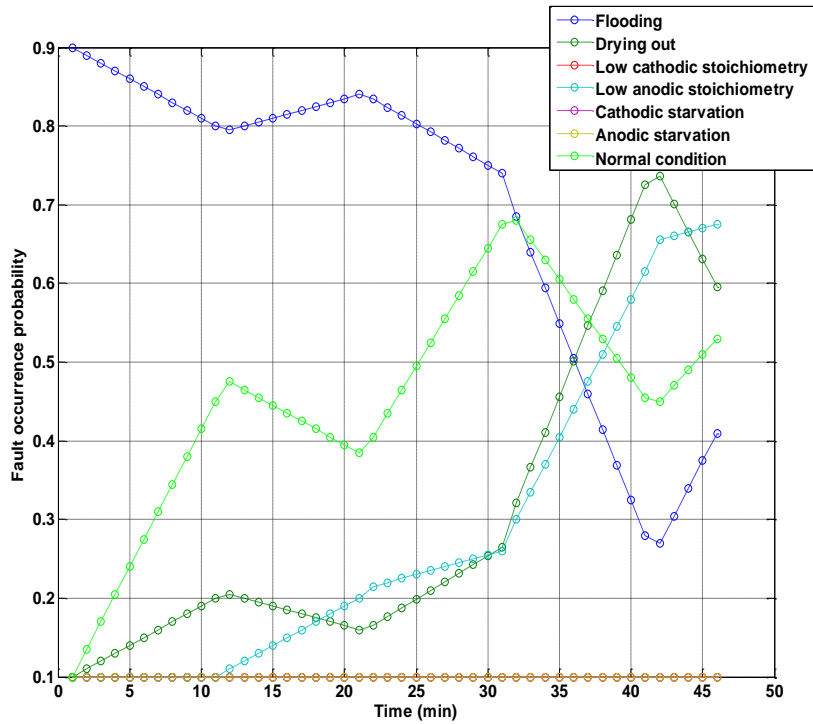


Figure IV-IV : Evolution des probabilités d'occurrence des défauts

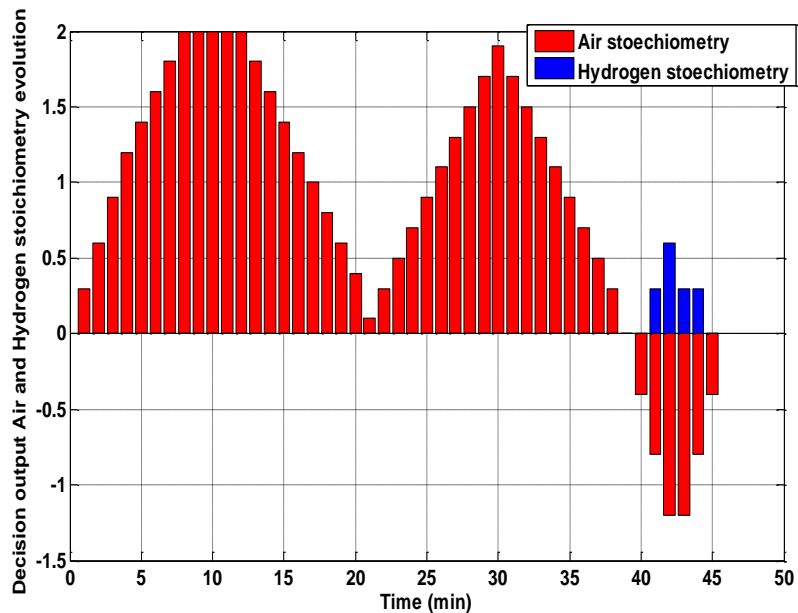


Figure IV-V : Décision à effet rapide sur les débits d'air et d'hydrogène

Il apparaît que, tant que les défauts ne sont pas suffisamment atténués, des incréments/décréments sont additionnés aux valeurs de consigne des régulateurs qui ajustent les débits d'air et d'hydrogène. Les régulateurs interviennent lors de l'application de la

stratégie AFTC sur un système réel. Dans le cas de cette simulation, aucun régulateur n'intervient, uniquement la réponse de l'outil de décision est testée ici. Il existe des décréments dont le but est de réduire les consignes des régulateurs. Lorsque la condition normale de fonctionnement est de nouveau atteinte, les débits sont progressivement réinitialisés, par incréments, jusqu'à leurs valeurs initiales.

Les décisions à effet rapide permettent une atténuation rapide d'un défaut sans modification permanente du point de fonctionnement. Cela peut permettre notamment l'élimination d'un défaut fugitif. Cependant, ce type d'action peut ne pas être suffisant pour une atténuation durable. En effet un défaut peut réapparaître avec un plus fort niveau de sévérité ainsi qu'une rapidité d'occurrence plus importante. De plus, l'action sur les débits est elle-même limitée par le fonctionnement de la PEMFC, car il existe un seuil minimum à ne pas franchir sous peine d'une sous-alimentation. Il est donc nécessaire d'appliquer d'autres types de décisions afin de pallier ces problèmes. Ces décisions sont appelées : décisions à effet différé. La partie suivante présente les différentes stratégies liées aux décisions à effet différé.

f. Décisions à effet différé

Le processus de décision doit permettre une atténuation durable des défauts. Cela signifie qu'un défaut doit être suffisamment atténué pour le retour en condition sans défaut. Une condition de fonctionnement sans défaut n'est pas nécessairement synonyme de fonctionnement nominale. En effet, le processus d'atténuation permet au système de quitter les conditions de défaut en prenant la direction des conditions nominales sans obligatoirement l'atteindre. Le processus d'atténuation doit veiller à ce que le défaut ne réapparaisse pas ou réapparaisse de moins en moins rapidement avec de plus faibles niveaux de sévérités. Ainsi, lorsqu'une décision à effet rapide est insuffisante pour une atténuation durable, d'autres décisions doivent être envisagées. Les décisions à effet différé, qui consistent en des changements de points de fonctionnement de manière permanente. Celles-ci permettent des modifications du point de fonctionnement de sorte que le nouveau ait un effet durablement antagoniste à l'occurrence des défauts.

Les graphes de structure effectués précédemment (Cf. Figure II-IV et Figure II-VII), montrent trois variables candidates pour ce niveau de décision :

- La température de la PEMFC (T_{fc}),
- L'humidité relative (HR%) des gaz d'entrées (pour la modification du contenu en eau de q_{O2hum}),
- La troisième action consiste à modifier les débits d'entrées de la PEMFC de manière permanente, contrairement à la décision à effet rapide qui modifie les débits d'entrées de manière transitoire.

Les trois variables modifiées lors de la décision à effet différé sont manipulées tour à tour jusqu'à atteindre un point de fonctionnement permettant un fonctionnement sans défaut. Aucune réinitialisation de ces variables (comme pour la décision à effet rapide) n'est ici envisagée.

Lorsqu'une décision à effet différé est déclenchée, il existe plusieurs choix de manipulation de ces variables. Il est possible de modifier leurs valeurs tour à tour. Dans ce cas, une seule variable

de commande est modifiée lors du processus de décision. Ou bien, il est possible d'effectuer des modifications sur plusieurs d'entre elles lors du même processus de décision.

Dans ces travaux, le choix a été fait de modifier leurs valeurs tour à tour. Le processus de gestion des changements de valeurs des variables de commande est modélisé par un réseau de Petri (RdP) interprété (Cf. ANNEXE B1).

Modélisation par réseaux de Petri interprété de chaque processus

Plusieurs défauts sont considérés et chacun d'entre eux peut être atténué suivant un processus modélisé par un RdP. Le premier processus d'atténuation modélisé est celui lié à l'occurrence du défaut de noyage. La Figure IV-VI est une représentation de ce processus réalisée sous le logiciel *Tina*². Ce logiciel permet d'une part la construction graphique des RdP et d'autre part d'effectuer leur analyse pour l'extraction des bonnes propriétés.

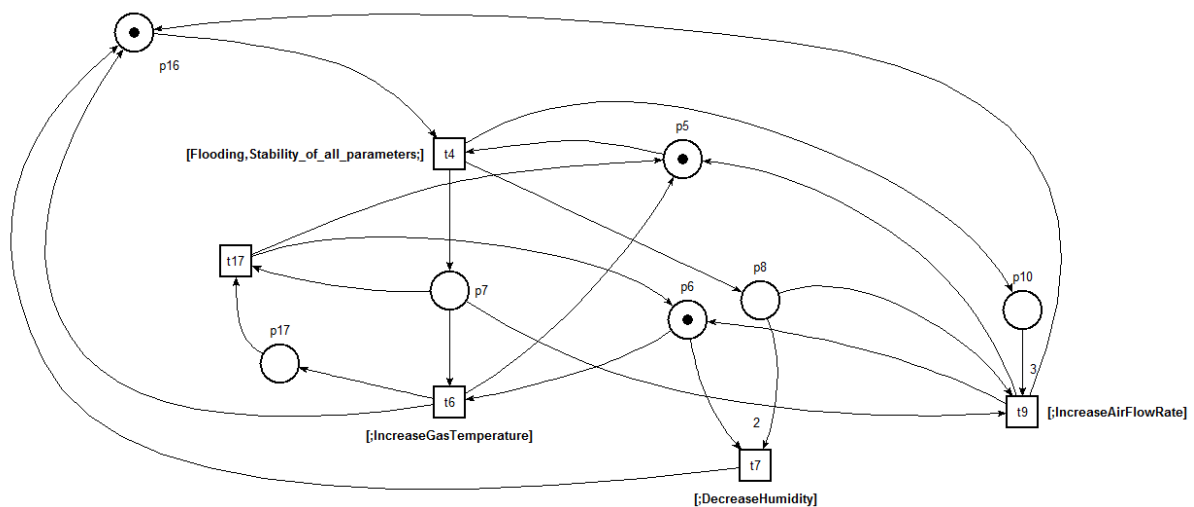


Figure IV-VI : Réseau de Petri permettant la gestion des actions d'atténuation du défaut de noyage.

Le RdP de la Figure IV-VI représentant le processus d'atténuation du défaut de noyage cathodique est borné, vivant et réinitialisable (Cf. ANNEXE B1).

De la même manière, la Figure IV-VII permet la gestion des actions liées au défaut d'assèchement de membrane.

² Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes dédié à Tina, [en ligne] <http://projects.laas.fr/tina/>

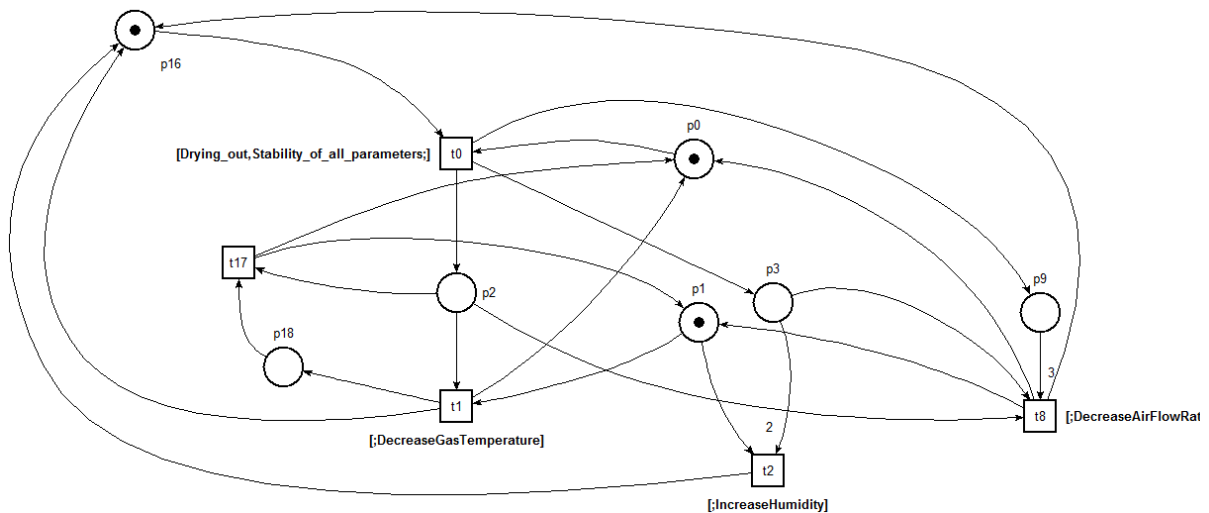


Figure IV-VII : Réseau de Petri permettant la gestion des actions d'atténuation du défaut d'assèchement

Le RdP de la Figure IV-VII représentant le processus d'atténuation du défaut d'assèchement de membrane est borné, vivant et réinitialisable.

Les défauts de faible stœchiométrie et de sous-alimentation anodique/cathodique sont eux aussi gérés par des petits RdP, chacun communiquant avec les autres *via* une place partagée. Ce RdP est représenté sur la Figure IV-VIII.

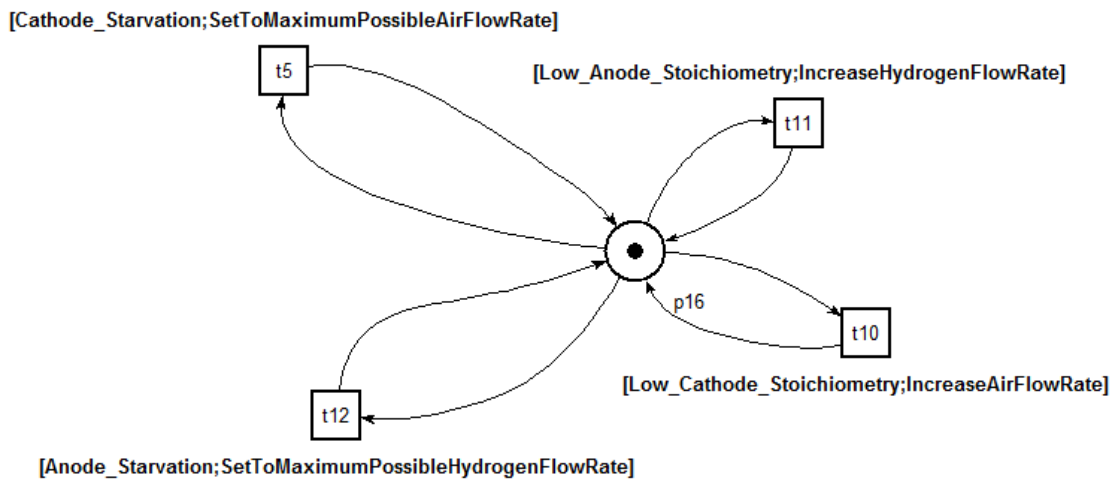


Figure IV-VIII : Réseau de Petri permettant la gestion des actions d'atténuation des défauts de faible stœchiométrie et de sous-alimentation anodique/cathodique.

Le RdP de la Figure IV-VIII représentant les processus d'atténuation des défauts de faible stœchiométrie et de sous-alimentation anodique et cathodique de membrane est borné, vivant et réinitialisable.

La combinaison de chaque RdP donne naissance à un unique RdP modélisant la stratégie à effet différé. La Figure IV-IX en est une représentation.

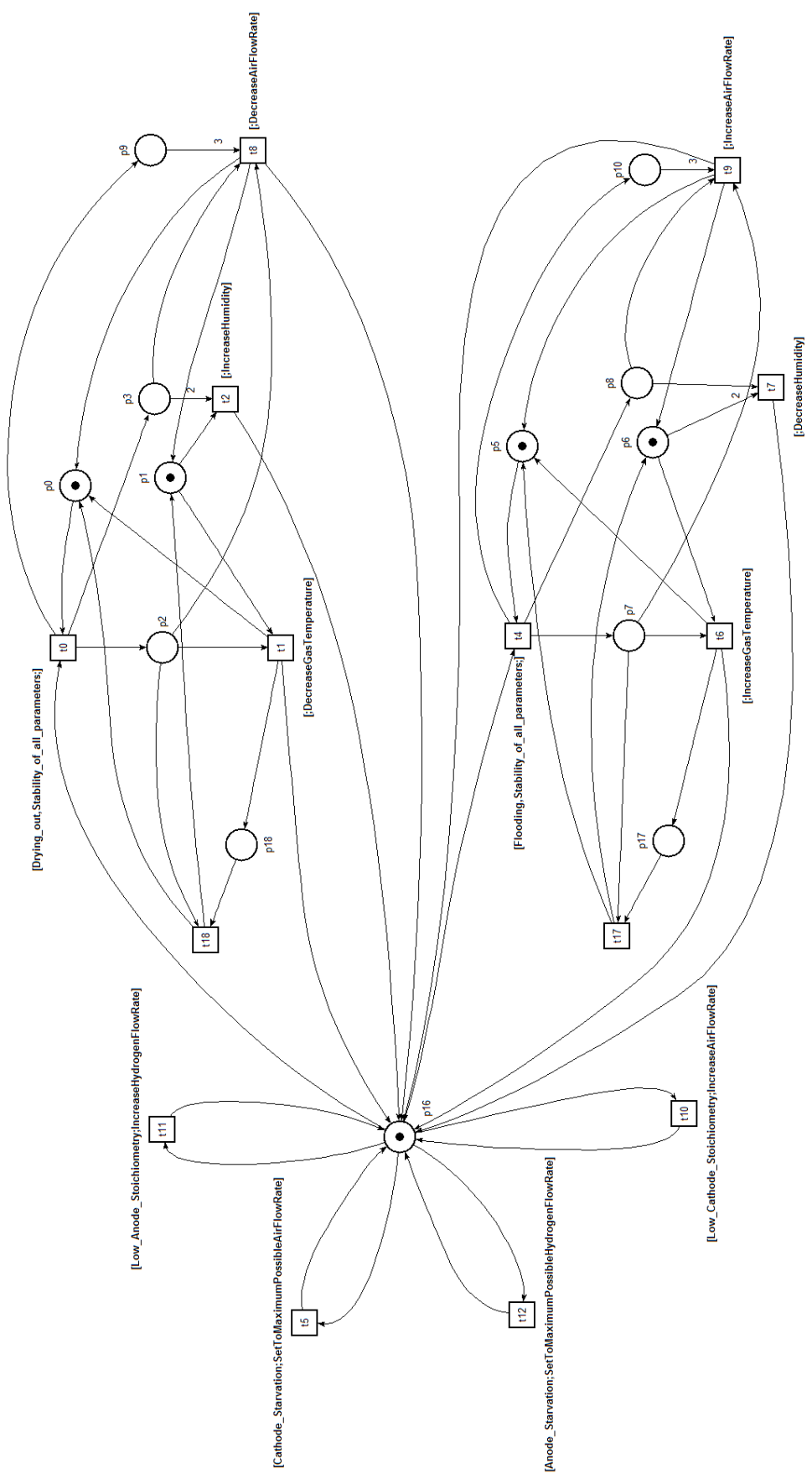


Figure IV-IX : Réseau de Petri complet représentant la stratégie d'atténuation à effet différé

L'analyse structurelle du réseau de Petri de la Figure IV-IX *via* le logiciel *Tina* permet de conclure que celui-ci répond aux bonnes propriétés : borné, vivant et réinitialisable.

Il reste maintenant à définir le critère de déclenchement de l'action à effet différé. Comme évoqué plus haut, un défaut ayant subi les effets de la correction à effet rapide peut disparaître, mais peut réapparaître et faire alors l'objet d'une nouvelle correction à effet rapide. Dans ces conditions, rien n'interdit qu'il ne réapparaisse de nouveau, ce qui fait émerger la notion de fréquence d'occurrence de défaut (Fr_f) :

$$Fr_f = \frac{1}{T_f} \quad \text{Eq. IV-11}$$

$$T_f = F_n - F_{n-x} \quad \text{Eq. IV-12}$$

avec T_f représentant l'intervalle temporel entre la détection du défaut à l'instant $n-x$ et une détection suivante à l'instant n ,
 F_n désignant la détection du défaut à l'instant n
 et F_{n-x} la détection à l'instant $n-x$.

La Figure IV-X est une illustration de la condition d'entrée en décision à effet différé par la diminution de Fr_f .

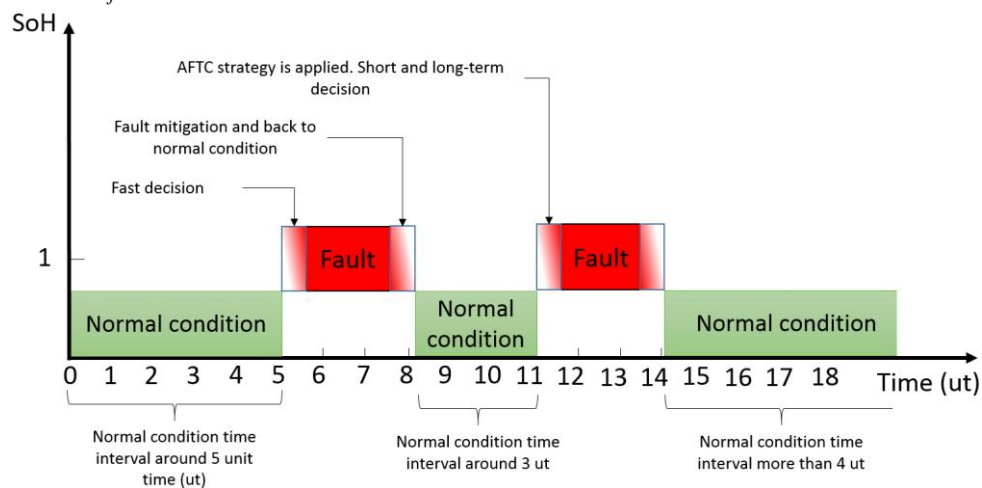


Figure IV-X : Illustration d'entrée en décision à effet différé basée sur la diminution de l'intervalle temporel (illustration issue de l'article de Dijoux et al.[80]).

La Figure IV-X montre que le temps passé en condition normale de fonctionnement diminue sur les onze premières *ut* (*unit time*). Cette diminution, en faveur d'un temps plus long passé en condition de défaut, est le critère de déclenchement de la stratégie à effet différé. Celle-ci permet alors la modification définitive du point de fonctionnement.

Le module de décision est donc construit en deux phases :

- La première consiste à interpréter les données issues de l'outil de diagnostic et à statuer sur l'occurrence d'un défaut et de son niveau de sévérité.
- La seconde phase concerne l'atténuation du défaut. Deux stratégies d'atténuation sont alors possibles. La première, la stratégie à effet rapide, modifie de manière transitoire les débits d'entrée de la PEMFC. La stratégie à effet différé modifie de manière permanente les débits, la température et l'humidité relative des gaz en entrée de PEMFC.

La section suivante précède le chapitre de la validation expérimentale de la stratégie d'atténuation AFTC. Elle met en place le protocole expérimental et donne les points de fonctionnement d'une condition sans défaut et des conditions en défaut.

B. Mise en place d'un protocole expérimental

a. Protocole expérimental

Pour l'algorithme de décision, quatre types d'actions sont prédéfinis (une action à effet rapide et 3 actions à effet différés). Ces actions sont combinées en « cycles ». Chacun de ces cycles débute par l'action à effet rapide sur le débit de gaz. Les Figure IV-XI, Figure IV-XII, Figure IV-XIII, Figure IV-XIV et Figure IV-XV représentent l'ensemble des cycles à tester :

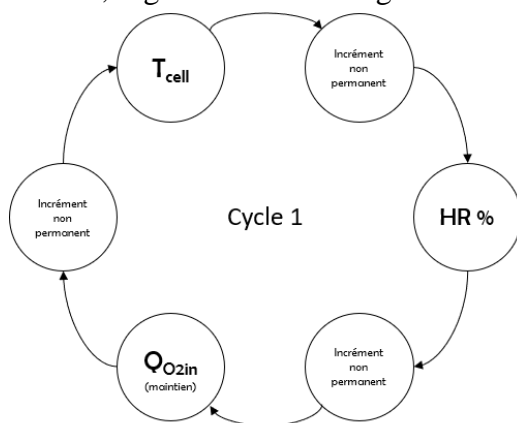


Figure IV-XI : Cycle 1

Ce premier cycle montre l'alternance entre les décisions à effet rapide et les décisions à effet différé. Les décisions à effet rapide sont des changements de débit (de manière réversible) pour une action rapide et pour le traitement de défauts fugaces. La première décision à effet différé consiste à changer la température de la PEMFC et vise à traiter un défaut qui s'installe de manière permanente. Ensuite, si nécessaire, l'humidité relative des gaz en entrée de pile est modifiée. Enfin, un changement de débit d'entrée de gaz est effectué de manière permanente. Le cycle se répète autant de fois que nécessaire et tant que le défaut n'est pas suffisamment

Les cycles 2, 3, 4 et 5 sont aussi basés sur les alternances entre les décisions à effet rapides et à effet différé. La différence se situe sur l'ordre de déclenchement des décisions à effet différé. Ce changement d'ordre permet de tester des atténuations d'un même défaut de plusieurs manières.

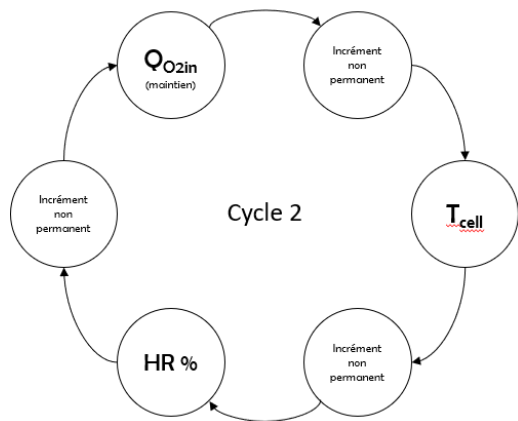


Figure IV-XII : Cycle 2

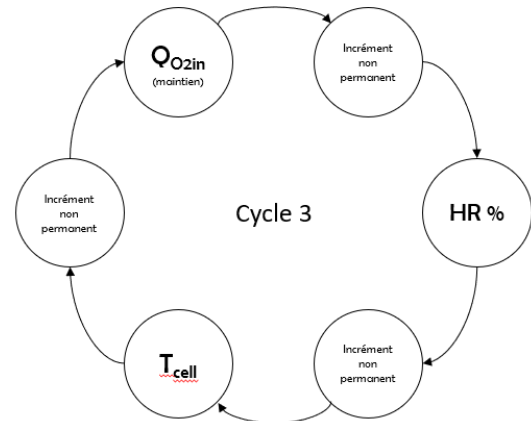


Figure IV-XIII : Cycle 3

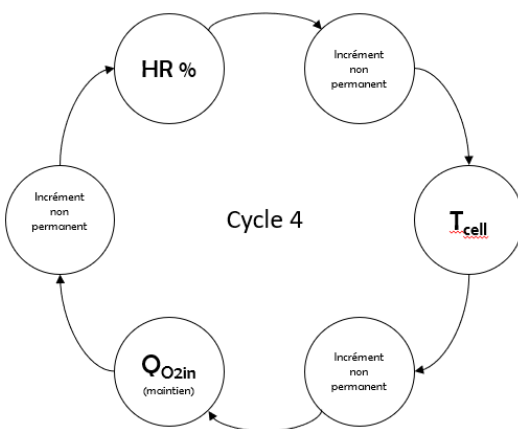


Figure IV-XIV : Cycle 4

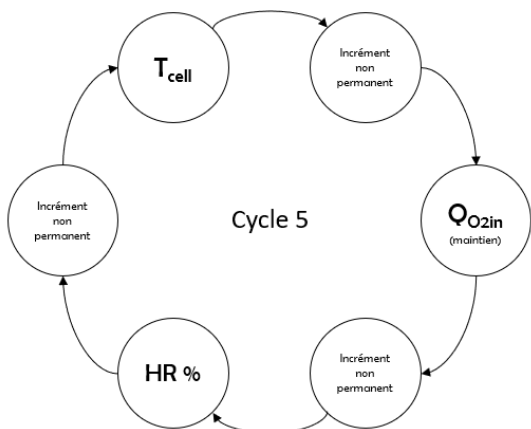


Figure IV-XV : Cycle 5

A cause de la nature des variables manipulées, les différents cycles permettent une atténuation plus ou moins rapide du défaut. Par exemple le changement du débit est un phénomène rapide. Le changement de la température de la PEMFC et de l'humidité relative des gaz sont des phénomènes beaucoup plus lents.

L'occurrence d'un défaut est détectée et isolée par l'outil de diagnostic. Son déclenchement est effectué à une période T_{diag} . Cette période est fixée de sorte que la détection du défaut soit suffisamment précoce pour éviter des dégradations. L'outil de décision réajuste les consignes des correcteurs à chaque T_{diag} . Cette période a donc un effet sur la décision et sur la manière dont le défaut est atténué. De ce fait, il semble pertinent de tester plusieurs valeurs de T_{diag} pour chaque cycle.

Les essais doivent être effectués sur un même point de fonctionnement pour être comparables et reproductibles. Le protocole suivi pour les essais est le suivant :

- Mise en conditions normales de fonctionnement (voir Tableau IV-2). Délai d'attente *10 min* pour la stabilisation de toutes les grandeurs.
- Mise en condition de défaut de noyage cathodique de type 2. (voir Tableau IV-2). Apparition du défaut au bout de *5 à 15 min*.

- Atténuation du défaut par de faibles amplitudes de prises de décisions. En effet, la mise sous conditions de défaut se fait toujours par le même protocole, ce qui permet la génération d'un défaut toujours semblable aux précédentes générations. Les amplitudes de la stratégie d'atténuation peuvent être, quant à elles, plus ou moins fortes.
- Atténuation du défaut par de moyennes amplitudes de prises de décisions. Les fortes amplitudes de décisions ne sont pas testées car les changements de consignes peuvent engendrer une dégradation précoce de la membrane PEMFC par des cycles brutaux de débits et donc de pression.
- Mise en condition de défaut d'assèchement de membrane selon les conditions opératoires dans le Tableau IV-2. De la même manière et pour les mêmes raisons, la stratégie AFTC est appliquée par des prises de décisions sur des niveaux de sévérité faibles et moyens.

L'objectif des essais est donc le test de plusieurs amplitudes de prises de décision pour l'atténuation de défauts générés de la même façon par le même protocole.

Le Tableau IV-2 donne les points de fonctionnement utilisés pour les conditions normales de fonctionnement, la condition de défaut de noyage cathodique et d'assèchement de membrane :

Tableau IV-2 : Conditions de fonctionnements

	Conditions normales de fonctionnement	Mise en conditions de défaut de noyage	Mise en conditions de défaut d'assèchement
I_{fc} (A)	20	20	20
λ_{H2}	2.5	2.5	2.5
λ_{air}	3	3	10
T_{fc} (°C)	70	55	70
T_{canal} (°C)	70	55	70
T_{rosée} (°C)	62	60	55
Humidité Relative (%)	70	100 + condensation	50

La détermination de T_{canal} pour le changement d'HR% est présentée en ANNEXE B2.

b. Notion de métriques

Les métriques sont utilisées pour la comparaison des performances d'un système dans un ou plusieurs environnements (ex : à l'intérieur ou à l'extérieur d'un bâtiment) et suivant plusieurs modes de fonctionnement. Dans le cadre des essais FTC sur une PEMFC, les métriques choisies mesurent la qualité de l'atténuation d'un défaut. Il existe plusieurs métriques permettant d'apprécier l'atténuation d'un défaut :

- Nombre d'actions correctrices
- Amplitudes des actions correctrices
- Durée des actions correctrices
- Délais avant le retour définitif en condition sans défaut

- Nombre de capteurs utilisés pour le processus d'atténuation
- Niveaux de tension

Chacune de ces métriques est utilisée pour estimer la qualité de l'atténuation de défaut.

Ce chapitre a permis la mise en place d'une stratégie d'atténuation AFTC. La stratégie construite en trois modules, prend en considération le temps d'exposition du système aux défauts d'où la mise en place d'une stratégie d'actions rapides dites « à effet rapide ». Pour une atténuation de défauts à occurrences fréquentes, une stratégie à effet différé est mise en place pour des changements permanents de conditions opératoires jusqu'à en trouver un permettant un fonctionnement sans défaut.

Le prochain chapitre est dédié à la validation expérimentale de la stratégie AFTC. Dans le cadre de la validation expérimentale, uniquement les défauts de noyage et d'assèchement de membrane feront l'objet d'atténuations. En effet, les dégradations liées à ces défauts nécessitent un temps d'exposition de l'ordre de quelques minutes. Or, le banc d'essais utilisé possède un temps d'échantillonnage maximal de 3 s. Les autres défauts pouvant dégrader la PEMFC dans un délai inférieur à 3 s, le choix a été fait de valider la stratégie uniquement sur le noyage cathodique et sur l'assèchement de membrane.

V. Validation expérimentale

L'objectif de ce chapitre est de présenter le test en temps-réel et la validation expérimentale de l'architecture AFTC définie dans les chapitres précédents. Les essais effectués ont permis de tester 3 périodes et plusieurs modes de fonctionnement dans le but de mettre en évidence la combinaison la plus pertinente (Cf. *Chapitre 4/Protocole expérimental*). Par souci de synthèse, la validation d'un seul cycle est présentée dans ce chapitre. Les essais réalisés sur les autres cycles sont donnés en ANNEXE C.

A. Dispositif expérimental

Pour cette étude, les tests ont été opérés sur une mono-cellule de pile à combustible de type PEM, équipée d'une membrane de surface 50 cm², constituée de Nafion® 117. La mono cellule (Cf. Figure V-I) est montée sur un banc de test *Fuel Cell Technologies* (FCT, Cf. Figure V-II). Elle est alimentée par de l'hydrogène et de l'oxygène (H₂/O₂) acheminés (jusqu'aux humidificateurs dans le cas d'une régulation hygrométrique) *via* les canalisations anodiques et cathodiques, respectivement. L'humidité relative des gaz est ajustée par la régulation de la température des canalisations en sortie des ballons d'humidification. Les gaz humidifiés entrent ensuite dans la PEMFC dont la température est régulée par des résistances chauffantes. Les pressions des compartiments anodiques et cathodiques sont ajustées par des régulateurs de contre-pression en sortie de PàC.

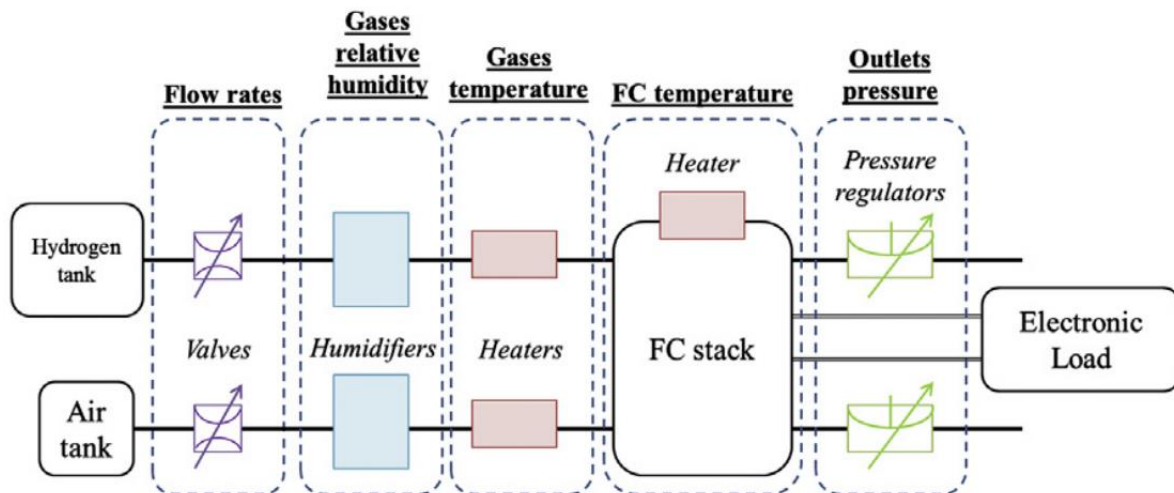


Figure V-I : Schéma du système pile à combustible.



Figure V-II : Banc d'essais Fuel Cell Technologies

a. Caractéristiques des assemblages membrane électrolyte (AME)

Les AME utilisées ont été produites par ION POWER et possèdent une surface active de 50 cm². Elles sont composées de 5 couches comprenant une membrane en Nafion 117 avec, de chaque côté, une couche de catalyseur et une couche de diffusion en tissu de carbone. Le Tableau V-1 résume les caractéristiques de l'AME.

Tableau V-1 : Caractéristiques des AME

Membrane	Nafion® 117
Surface active	7.1 cm x 7.1 cm
Couche catalytique anodique	0,5 mg/cm ² , PtC (60%)
Couche catalytique cathodique	0,5 mg/cm ² , PtC (60%)

Des plaques mono polaires en graphite et des plaques collectrices fournies par FCT sont montées assemblées entre des plaques de serrage qui assurent le maintien de l'AME avec un couple de serrage de 12 N.m et la circulation des gaz en amont et en aval des canaux. Les serpentins possèdent une topologie parallèle et sont gravées dans les plaques mono polaires (Cf. Figure V-III).

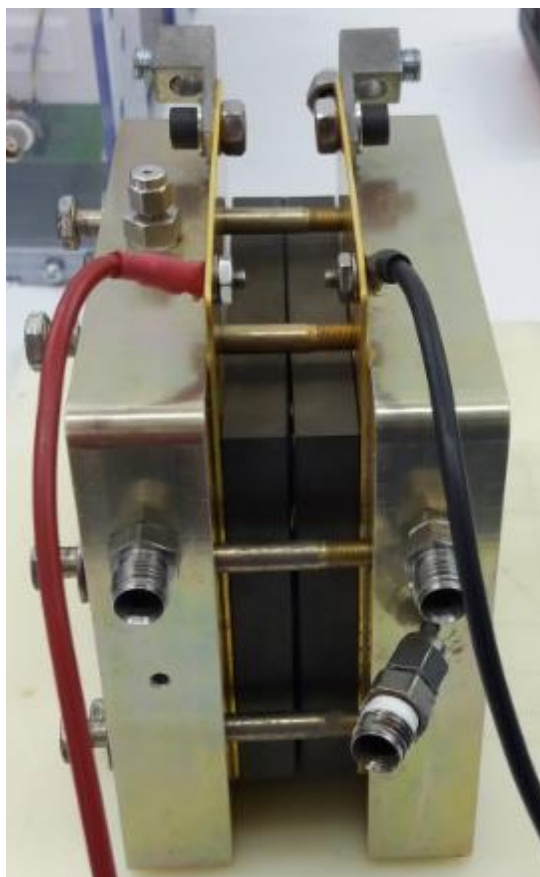


Figure V-III : Montage de l'AME, des plaques bipolaires et collectrices

b. Banc d'essai FCT

Le banc d'essai FCT est conçu pour des campagnes d'essais dédiées à la recherche et au développement des PEMFC. Sa conception permet des tests de PEMFC ou de DMFC (Direct Methanol Fuel Cell) avec une mono-cellule ou un stack. Le banc est constitué des composants suivants :

- deux régulateurs de contre-pression (booster pneumatique 20812BP),
- trois régulateurs de température (Love contrôleur 16A et Love contrôleur 32 DZ),
- deux régulateurs de débit massique (MKS Instrument 1179A),
- un transducteur de contre-pression (MSP 300100P4N1),
- un transducteur de haute pression (TT7800-705),
- et une charge électronique modulaire de 1800 W (N3300A).

L'alimentation du banc en réactifs est faite *via* des bouteilles commerciales pressurisées. Les gaz sont conditionnés par le banc avant l'alimentation de la PEMFC.

Régulateur de la température de la PAC

Le *Love Controller Series 16 A* (Cf. Figure V-IV) permet la régulation de la température de la PEMFC. Un régulateur PID auto-adaptatif y est implanté. Le contrôleur est relié à deux résistances chauffantes, l'une placée côté anode et l'autre à la cathode. Le changement de consigne de ce régulateur permet ainsi l'application de la stratégie AFTC à effet différé pour la régulation de la température de la PEMFC.



Figure V-IV : Contrôleur de température : Love Controller Series 16 A

Régulateur de la température de la canalisation d'alimentation cathodique

Les *Love Controller Series 32 DZ* permettent la régulation de la température des canalisations d'alimentation de gaz de la PEMFC, et donc l'application de la stratégie AFTC en action à effet différé.

La régulation de ces températures est essentielle pour le contrôle de leur humidité relative. En effet, les gaz arrivant dans cette canalisation traversent d'abord une bouteille d'humidification à une température $T_{\text{rosée}}$ correspondant au point de rosée, de laquelle ils ressortent humidifiés à 100%. Le changement de la température en sortie de bouteille d'humidification, permet la régulation de l'humidité relative des gaz.

Régulateur de débit cathodique

L'utilisation du contrôleur de débit massique de *MKS Instrument 1179 A* (Cf. Figure V-V) permet la régulation de débit cathodique et donc l'application de stratégies d'atténuation AFTC pour les actions à effet rapide et à effet différé. Ce type de régulateurs est adapté aux essais sur des défauts à temps de réponses supérieurs à 2 secondes, étant donné qu'il atteint son régime permanent en moins de 2 secondes avec une précision de 1%.



Figure V-V : Contrôleur de débit massique : MKS Instrument 1179 A

Le module de contrôle (Cf. Figure III-II) est donc constitué des régulateurs déjà implantés sur le banc de test pour la validation de la stratégie d'AFTC.

c. Interface graphique Labview™ et communication avec Matlab™

La communication entre l'utilisateur et le système repose sur une Interface Homme –Machine (IHM) développée avec la plateforme Labview™ (Cf. Figure V-VI). Sur cette IHM apparaissent les différentes parties du système. Y apparaissent aussi les mesures de tension, de courant et de puissance de la PEMFC. Il est aussi possible d'y faire apparaître, en ligne, des graphes pour suivre l'évolution des grandeurs supervisées. Les stratégies AFTC sont implémentées dans l'environnement Matlab™, mais la version de Labview™ installée ne permet pas d'importer du m-code. La communication en lecture et en écriture entre les deux plateformes se fait *via* des fichiers texte (Cf. Figure V-VII). L'IHM donne par ailleurs la possibilité de placer un seuil de température (au-dessus duquel le banc s'arrête) ou de tension de PàC (en dessous duquel le banc s'arrête) afin de diminuer les risques de dégradations sur la PEMFC.

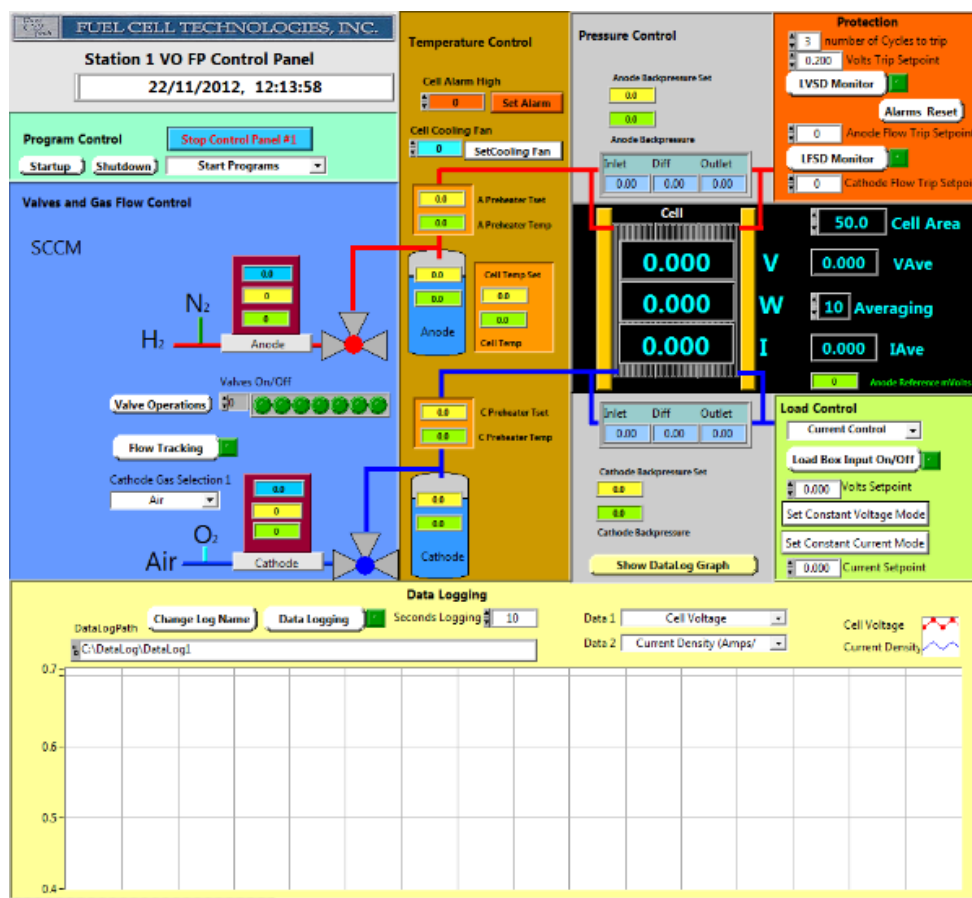


Figure V-VI : Interface Labview™ pour la communication avec le banc de test

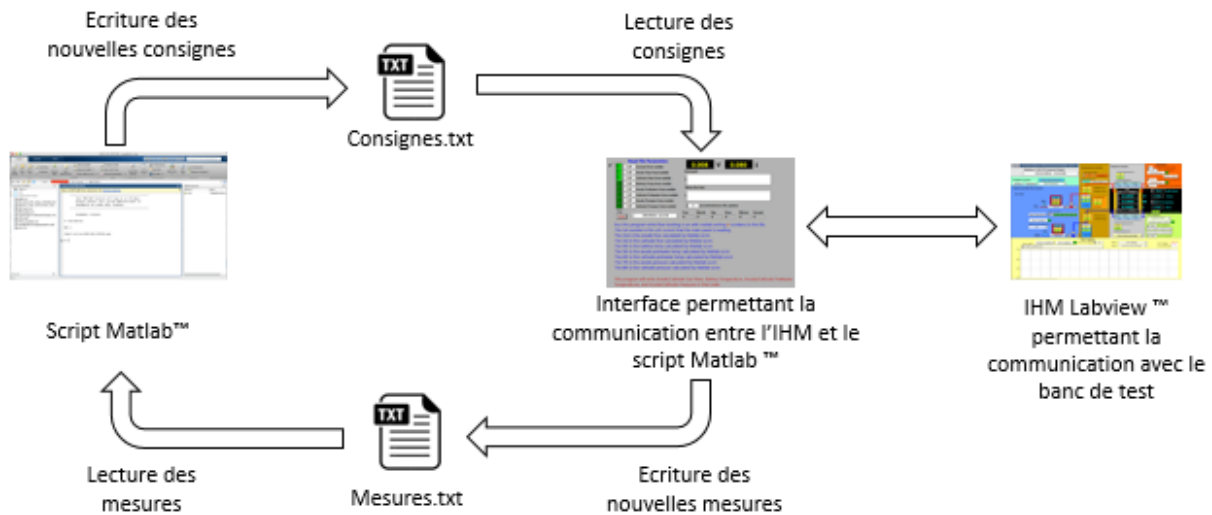


Figure V-VII : Processus de communication entre le script Matlab™, l'interface de communication et l'IHM.

La Figure V-VII représente le processus de communication de l'algorithme AFTC développé sous Matlab™ et le banc de d'essais *via* l'IHM Labview™. Les changements de consigne déterminés par le processus décision sont écrits dans un fichier texte libellé « *Consignes.txt* ». Une interface Labview™ procède ensuite à la lecture de ce fichier et transmet les nouvelles consignes aux régulateurs du banc d'essais. Les mesures effectuées sur le banc d'essais sont quant à elles écrites dans un fichier libellé « *Mesures.txt* », lequel est lu par le script Matlab.

La Figure V-VIII est une capture d'écran de l'interface utilisée pour la communication entre les deux logiciels.

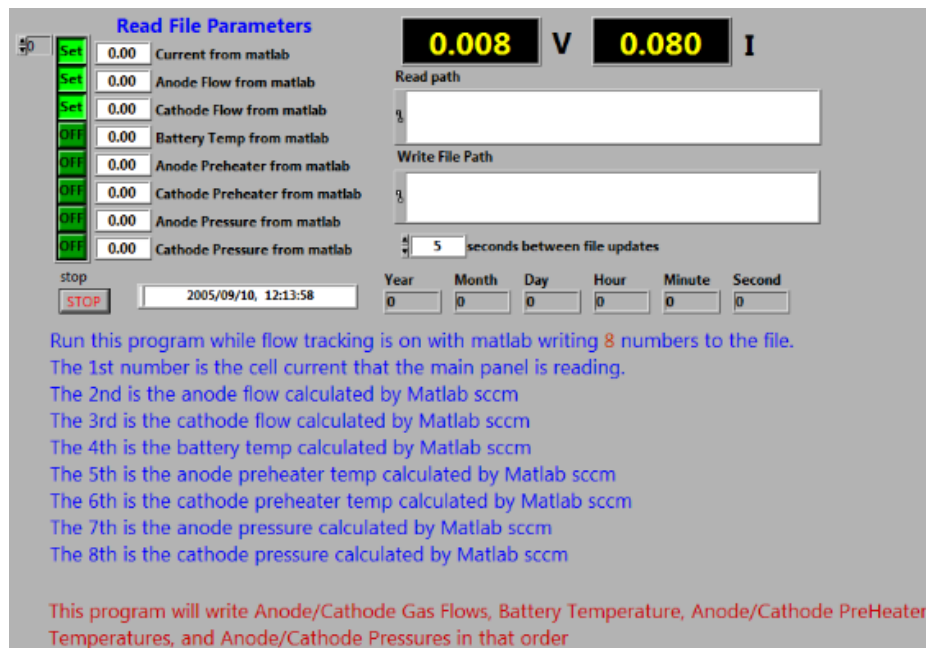


Figure V-VIII : Interface Labview™ permettant la communication entre Matlab™ et Labview™.

La section suivante fait l'objet de la mise en place de protocoles expérimentaux pour la validation de l'algorithme AFTC.

d. Outil de diagnostic implanté sur le banc FCT

L'outil de diagnostic sélectionné est basé sur la génération de résidus *via* la mise en place d'un modèle de PEMFC basé sur deux réseaux de neurones (RN). Les deux RN possèdent deux entrées communes : le courant demandé par la charge et le débit de gaz côté cathode. Ils ont respectivement pour sortie la tension de la PEMFC (V) et de la chute de pression cathodique (ΔP). L'outil de diagnostic est basé sur deux RN, pour la supervision de ΔP_{cath} (chute de pression cathodique) et de V_{fc} (tension de PàC) respectivement car ces deux grandeurs sont des indicateurs de l'apparition des défauts de noyage et d'assèchement de membrane. Cette méthode de diagnostic permet la détection d'une accumulation d'eau liquide dans les serpentins d'alimentation, mais pas dans la couche de diffusion (GdL).

Les RN sont utilisés en prédiction multi-pas c'est-à-dire que les sorties estimées sont rebouclées (*Cf.* Figure V-IX), extrait de Lebreton [65]). Les modèles RN ont été identifiés à partir d'une boîte à outil Matlab® proposée par NØgaard et al. [81]. Le modèle identifié est de type NARX (fonction auto-regressive non linéaire avec entrées exogènes).

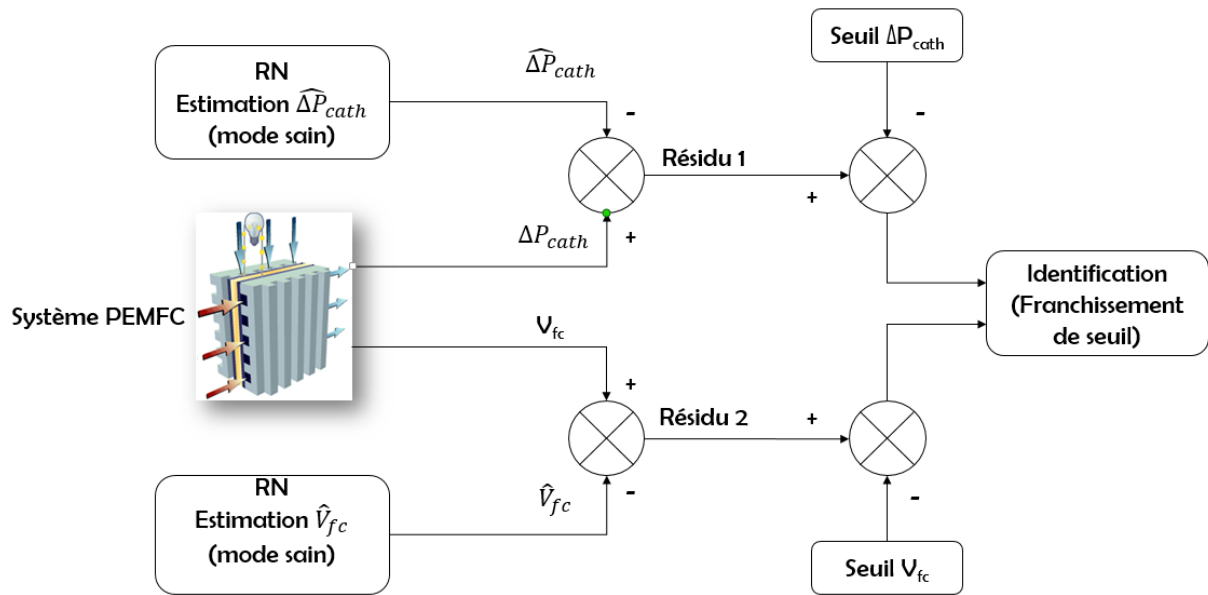


Figure V-IX : Schéma des réseaux de neurones utilisés pour le diagnostic

L'apprentissage des RN se fait sur 80% des données tandis que la validation des modèles est faite à partir des 20% des données restantes (non vues par les RN). Dans ce cas, 292 points répartis sur toute la base de données (sur un total de 1460 points) ont été sélectionnés pour la validation.

e. Génération de la base de données (Bdd)

La Bdd réalisée est constituée de 1460 points sur une durée de 73 min. La Figure V-X représente les profils choisis ainsi que les sorties mesurées pour chaque RN.

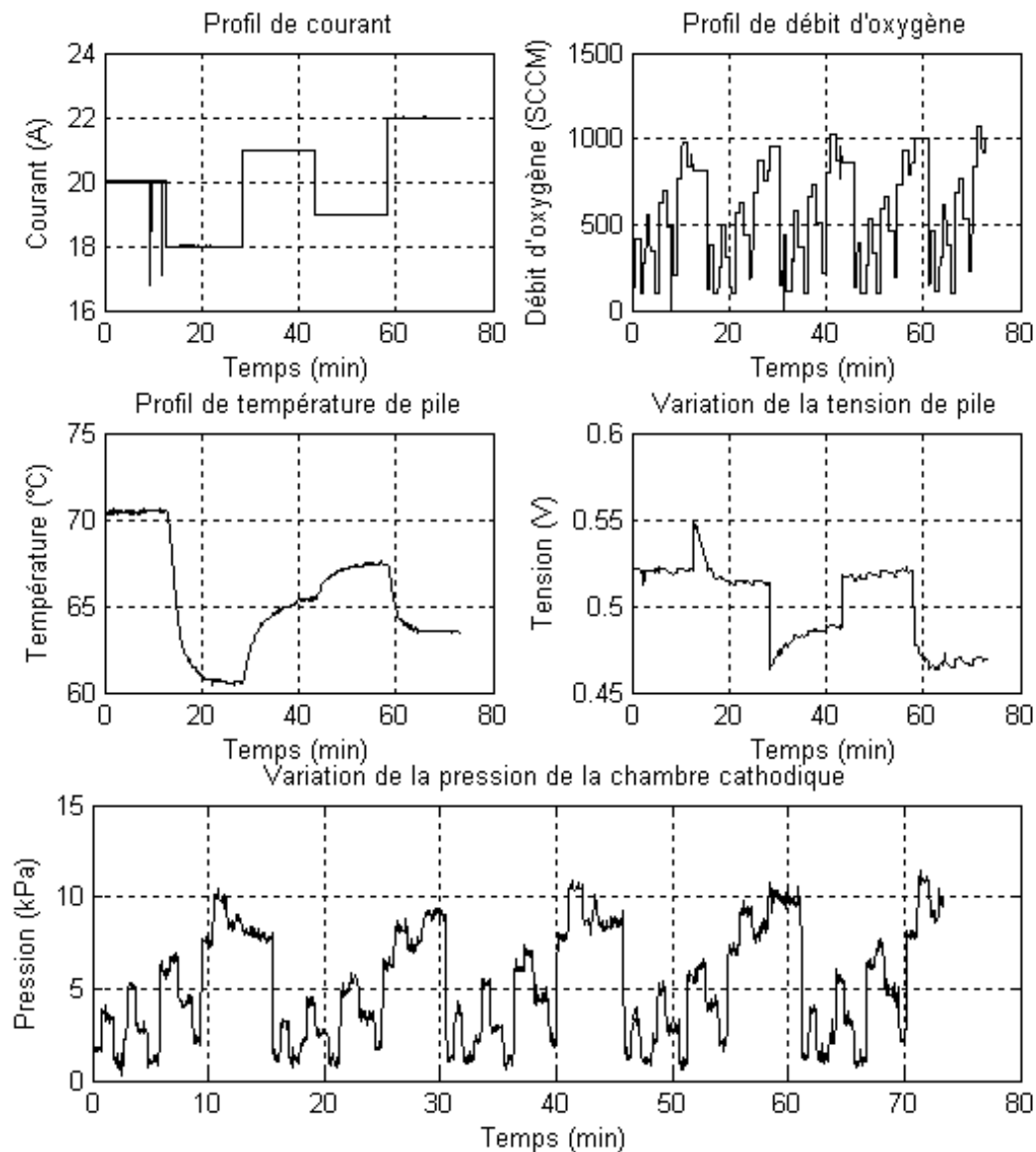


Figure V-X : Profils de courant, débit et de température choisis pour la Bdd

Cinq paliers de courant ont été choisis : 20, 18, 21, 19, et 22 A. Sur chacun de ces paliers, un profil de débit d'oxygène allant de 100 à 1000 SCCM et sa variation définie dans un protocole afin de balayer un large spectre de débit aléatoirement. La température de la PEMFC a elle aussi été modifiée pour permettre aux modèles RN d'effectuer de bonnes estimations de tensions même en cas de changement de température.

f. Modèles de réseaux de neurones en vue de diagnostic de défaut de PEMFC

Les résultats de simulation sur la base de validation sont représentés par les Figure V-XIII, Figure V-XI et le Tableau V-2. L'erreur de performance des RN est exprimée en fonction de l'écart entre les valeurs réelles et les valeurs estimées de V et ΔP , à partir de deux critères (Lebreton [55]) : le RMSE (Root Mean Square Error) et le MRE (Mean Relative Error) :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}(i) - y(i))^2}{n}} \quad \text{Eq. V-1}$$

Avec :

\hat{y} : la valeur de tension estimée par le réseau de neurones

y : la valeur de tension mesurée

n : le nombre de valeur contenues dans l'échantillon

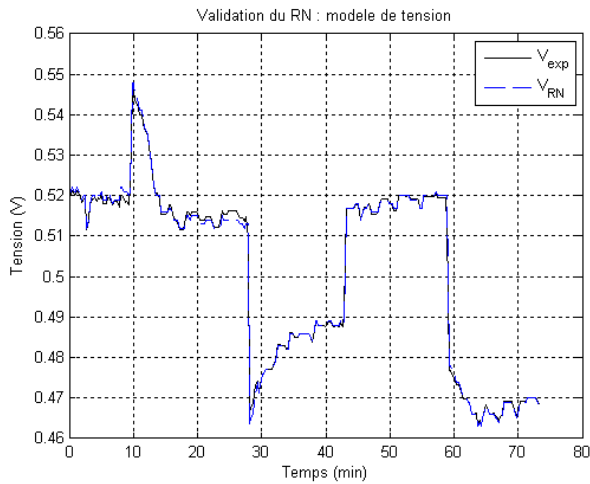


Figure V-XIII : Validation RN : signal V

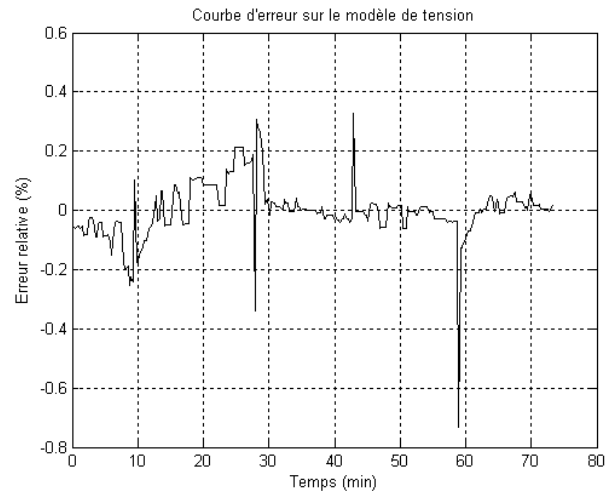


Figure V-XI : Validation RN : erreur relative sur V

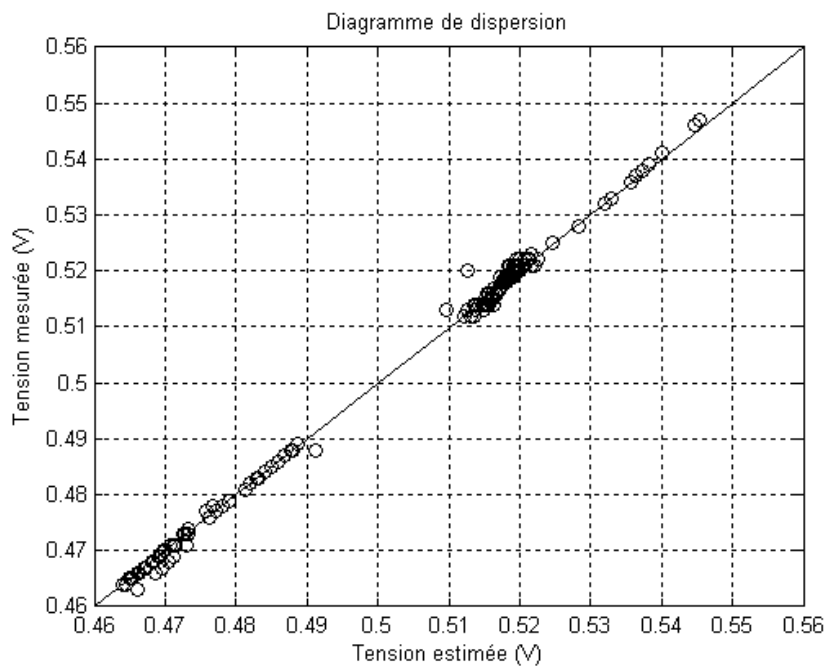


Figure V-XII : Diagramme de dispersion pour le modèle de tension

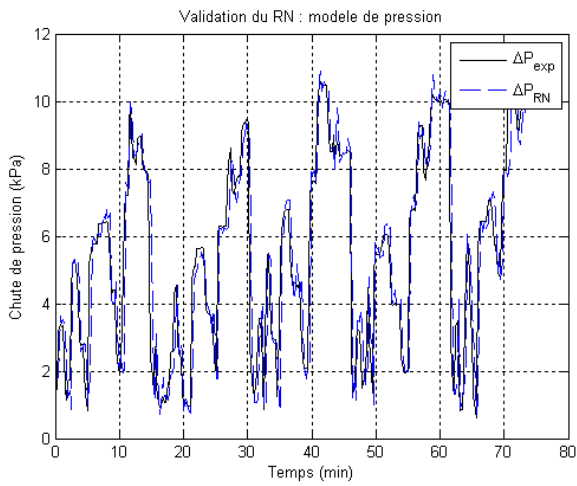


Figure V-XIV : Validation RN : signal ΔP

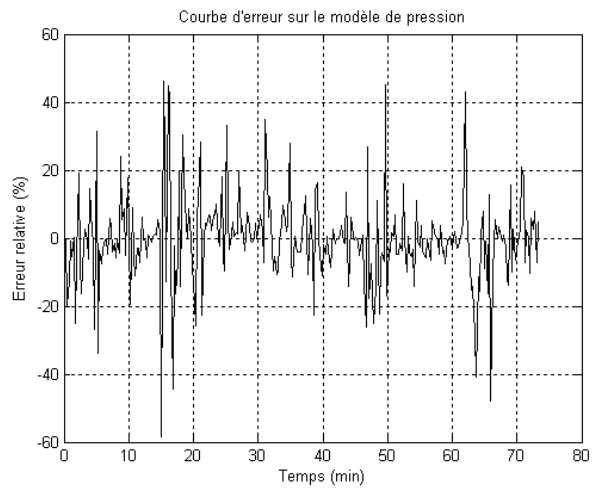


Figure V-XV : Validation RN : erreur relative pour ΔP

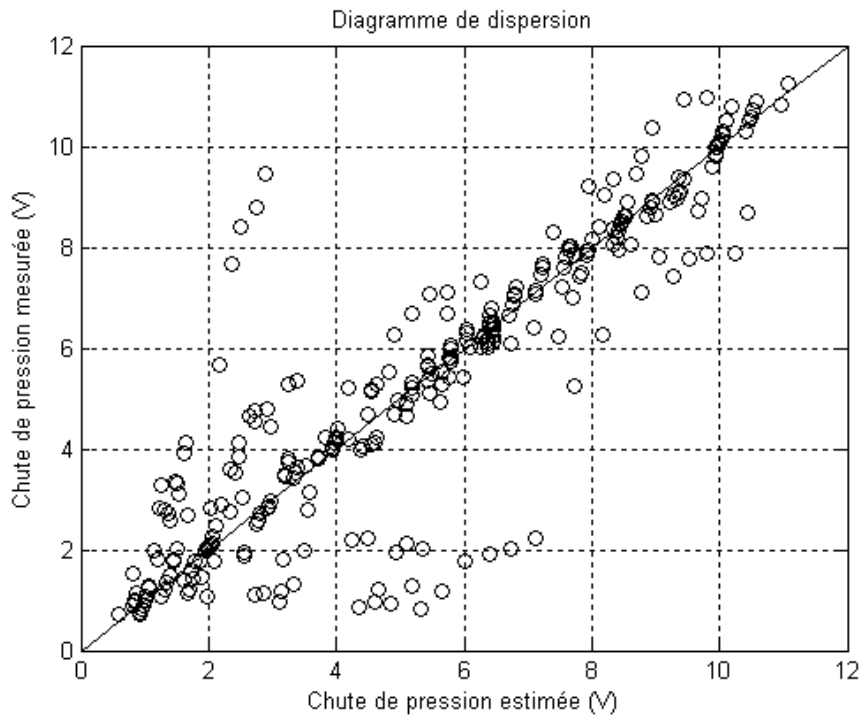


Figure V-XVI : Diagramme de dispersion pour le modèle de pression

Tableau V-2 : Validation des RN : erreurs de modélisation

	RMSE
Erreur de modélisation sur V	$1,1528 e^{-5}$
Erreur de modélisation sur ΔP	$2,7e^{-3}$

Le calcul d'erreur relative sur le signal de tension n'excède pas 1 % comme le montre la Figure V-XI et présente une très faible dispersion. La Figure V-XVII présente l'erreur relative sur le signal de chute de pression cathodique (précision du capteur de pression $> \pm 1 \%$) et indique des écarts allant jusqu'à 50 %. Ceci s'explique par un mauvais suivi des dynamiques par le modèle RN. Dans les phases où un régime permanent est installé, l'erreur relative est inférieure à 10 %. Le diagramme de dispersion de la Figure V-XVI montre en effet les écarts pouvant être assez élevés entre les valeurs estimées et mesurées. Les méthodes de calcul d'erreurs globales (RMSE et MRE) indiquent tout de même des valeurs proches de 0 ce qui indique que la majorité des valeurs estimées sont proches de celles mesurées. Ces résultats sont considérés comme étant satisfaisants pour l'utilisation des RN identifiés dans le module de diagnostic.

Les erreurs de modélisation ou de mesures peuvent entraîner un mauvais diagnostic de défaut. Pour éviter ces anomalies, le système de diagnostic inclut une stratégie de gestion des fausses alarmes. En effet, le résultat de diagnostic est basé sur la mesure d'une séquence de 5 points consécutifs correspondant à une fenêtre glissante de 20 secondes. Si plus de la moitié des valeurs mesurées indiquent un franchissement de seuil de détection (+ de 10 %) de défaut (seuil déterminé hors ligne par l'utilisateur), alors un défaut est considéré comme diagnostiqué. La valeur de ce seuil est justifiée par le fait que l'erreur est inférieure à 10 % en régime permanent. La fenêtre glissante de 20 secondes est choisie, car considérée comme étant assez petite au regard des dynamiques en jeu lors de l'apparition des défauts de noyage et d'assèchement. En effet ces défauts possèdent des temps d'établissement suffisamment long (plusieurs minutes) par rapport à la taille de la fenêtre glissante, pour permettre leurs diagnostics précoce évitant ainsi des dégradations éventuelles.

La validation des modèle RN de tension et de pression feront l'objet d'une validation expérimentale par son intégration dans la stratégie d'atténuation AFTC.

La section suivante fait l'objet du test temps-réel et de la validation expérimentale de la stratégie d'atténuation AFTC sur le défaut de noyage cathodique.

B. Test temps-réel et validation de la stratégie AFTC sur le défaut de noyage cathodique

Le *cycle 1* est utilisé pour les essais d'atténuation de défauts de noyage cathodique et d'assèchement de membrane. Les évolutions de plusieurs grandeurs (Cf. Tableau V-3) peuvent être extraites de ces essais permettant ainsi l'analyse et l'interprétation des résultats.

Tableau V-3 : Comparaison des grandeurs pour l'interprétation des expérimentations

Grandeur Comparée à	ΔP_{cath}	Q_{O_2}	T_{fc}	HR%
ΔP_{cath}		Pour constater l'influence de Q_{O_2} sur ΔP_{cath}		
V_{fc}	Pour vérifier l'apparition du défaut	Pour constater l'influence de Q_{O_2} sur V_{fc}	Pour constater l'influence de T_{fc} sur V_{fc}	Pour constater l'influence de HR% sur V_{fc}

La mise en condition de défaut de noyage ou d'assèchement engendre une apparition progressive du défaut. L'apparition progressive du noyage est due au phénomène lent de l'accumulation d'eau liquide. Pour l'assèchement de membrane, l'évacuation de son contenu en eau est aussi considérée comme un phénomène lent et progressif. Ces occurrences de défauts peuvent être visibles par la surveillance de l'évolution de la tension de PEMFC V_{fc} et de la chute de pression cathodique ΔP_{cath} . La Figure V-XVIII : Processus d'atténuation d'un défaut montre le processus d'atténuation des défauts depuis la mise en condition de défauts jusqu'au retour en condition de fonctionnement sans défaut.

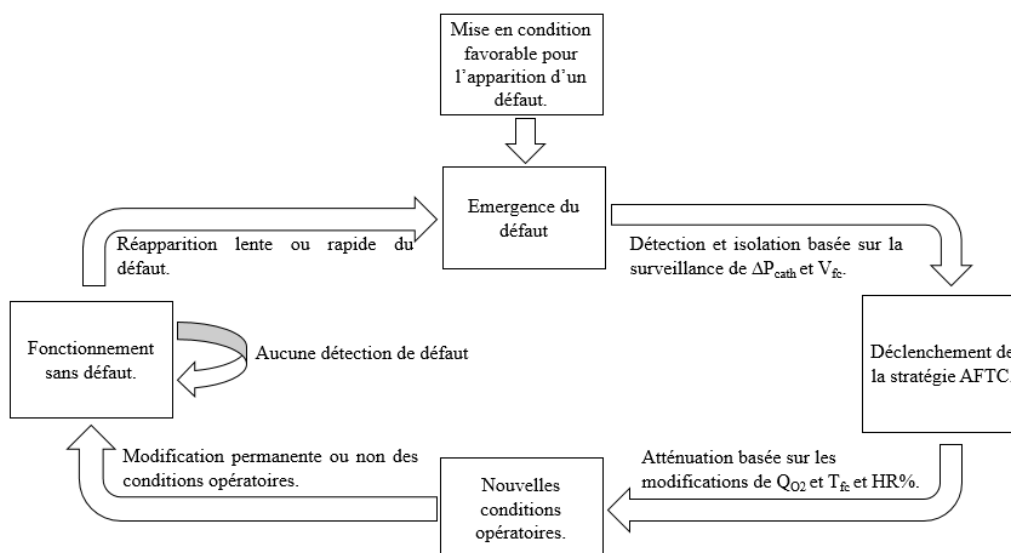


Figure V-XVIII : Processus d'atténuation d'un défaut

Du fait de leur capacité à être influencés par l'occurrence d'un défaut de noyage ou d'assèchement, ΔP_{cath} et V_{fc} seront utilisés pour la surveillance des conditions opératoires de la

PEMFC (reference article Barbir). Q_{O_2} , T_{fc} et $HR\%$ seront les variables utilisées par la stratégie AFTC pour l'atténuation du défaut.

a. Génération d'un défaut de noyage à faible sévérité à courant constant

Pour tous les essais de noyage, le processus de génération du défaut est toujours le même. Ceci permet de faire l'hypothèse d'un niveau de sévérité équivalent entre chaque essai.

Deux niveaux de prise de décisions sont effectués (faible et moyen) pour un défaut de noyage dont le niveau de sévérité est inconnu. Une des entrées du module de décision étant le niveau de sévérité du défaut, cette entrée lui est artificiellement transmise pour évaluer les effets de prises de décisions à faible et moyennes amplitudes. Le but de la démarche est de tester la performance de la stratégie d'atténuation AFTC sur un même défaut et pour différentes intensités de décisions.

Cette démarche est justifiée par une non disponibilité d'un outil de diagnostic permettant la détection de la sévérité d'un défaut. Le choix a donc été fait de réaliser les essais uniquement sur un même point de fonctionnement et d'émettre l'hypothèse d'une sévérité constante sur le point de fonctionnement.

La méthode devrait aussi être couplée à l'état de santé (SoH) de l'AME. En effet les essais étant effectués sur la même AME, il est nécessaire d'émettre l'hypothèse que celle-ci subit suffisamment peu de dégradation entre chaque essai pour que la comparaison entre chaque test soit pertinent. De plus, par souci économique, le maximum d'essais a été réalisé sur les AME n'ayant pas atteint leur fin de vie.

b. Génération d'un défaut de noyage atténué par des décisions de faibles amplitudes

Période de diagnostic pour le cycle 1 : 30s

Pour le premier essai (AFTC1), la mesure de tension de la mono-cellule est effectuée sur une durée d'environ *90 min* telle que représentée sur la Figure V-XIX. Les 40 premières minutes montrent que V_{fc} est stable et correspond à un fonctionnement sans défaut. Au-delà de *40 min*, le point de fonctionnement est modifié (Cf. section «*mise en conditions de défaut de noyage*») pour permettre l'apparition du défaut de noyage. Cette manipulation engendre une baisse de V_{fc} (tension de la PàC) car T_{fc} (température de la PàC) est diminuée.

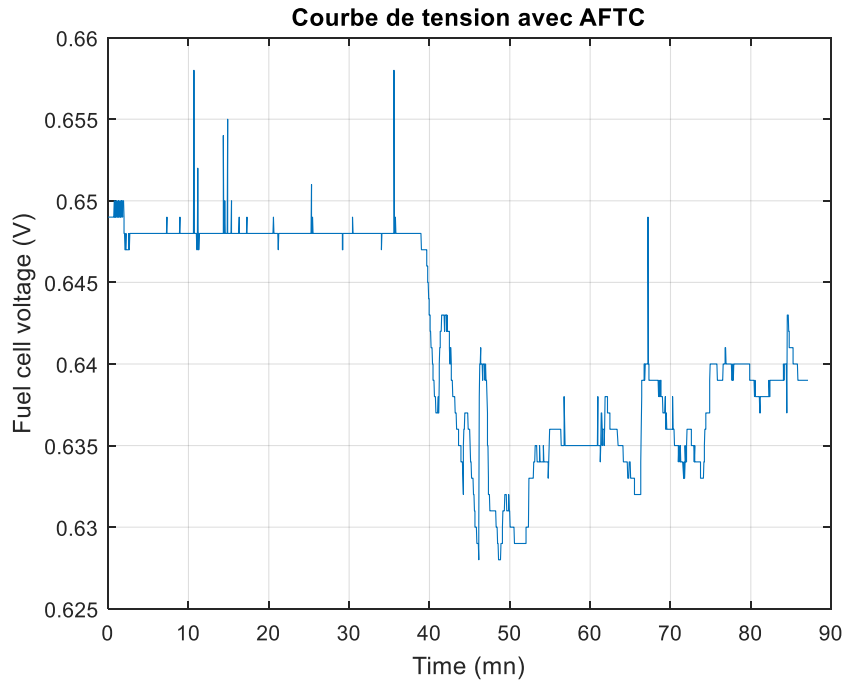


Figure V-XIX : Mesure de V_{fc} pour AFTC1

L'accumulation d'eau dans les serpentins d'alimentation fait obstacle au passage de l'oxygène, ce qui a pour effet d'augmenter la pression à l'entrée de la cathode et de freiner les phénomènes de transfert de masse. L'augmentation de la différence de pression (ΔP_{cath}) et de V_{fc} sont donc des indicateurs de l'accumulation d'eau dans les serpentins d'alimentation de la PàC.

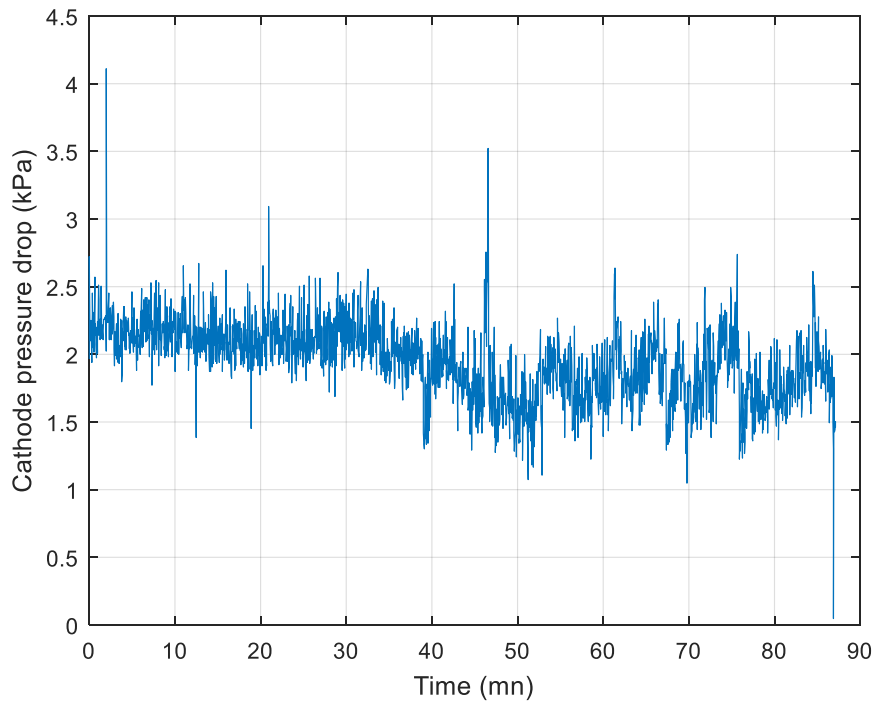


Figure V-XX : Mesure de ΔP_{cath} pour AFTC1

En superposant le graphe de la mesure de V_{fc} à celui de ΔP_{cath} (Cf. Figure V-XXI), il est possible d'interpréter le moment où a lieu le premier noyage.

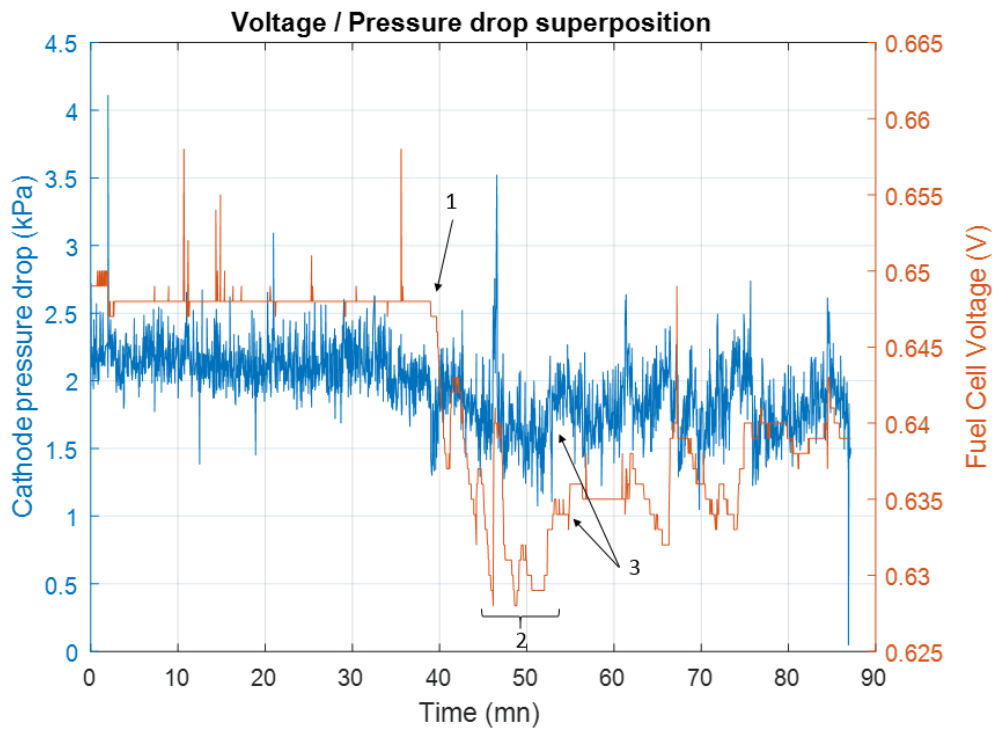


Figure V-XXI : Superposition de V_{fc} à ΔP_{cath} pour AFTC1.

Pour plus de clarté, la numérotation placée sur le graphe est explicitée ci-après :

Le point 1 correspond au moment de la génération du défaut.

L'accolade du point 2 correspond à une zone d'instabilité de V_{fc} et de ΔP_{cath} . En effet, il est possible de voir la mesure de ΔP_{cath} augmenter puis diminuer brutalement. Ce phénomène reflète un régime d'écoulement diphasique où des phases d'accumulation et d'évacuation d'eau liquide dans la chambre cathodique se succèdent.

Le point 3 correspond à la première détection d'un défaut de noyage par l'outil de diagnostic qui déclenche immédiatement la stratégie AFTC.

La stratégie AFTC débute un peu après $T = 50 \text{ min}$, environ 15 min après le changement de point de fonctionnement pour la génération du défaut. Ce délai de 15 min correspond au temps d'établissement du défaut de noyage qui est en général de l'ordre de plusieurs minutes. La Figure V-XXII zoom sur la zone où débute le processus d'atténuation.

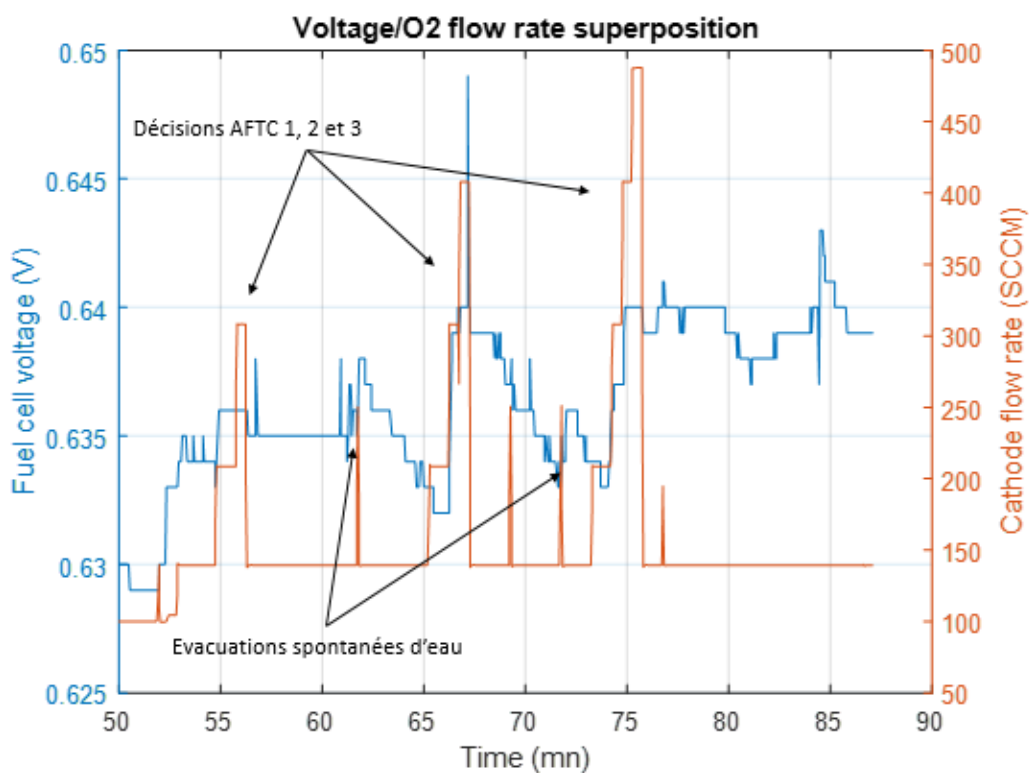


Figure V-XXII : Superposition de V_{fc} à Q_{O_2} pour AFTC1.

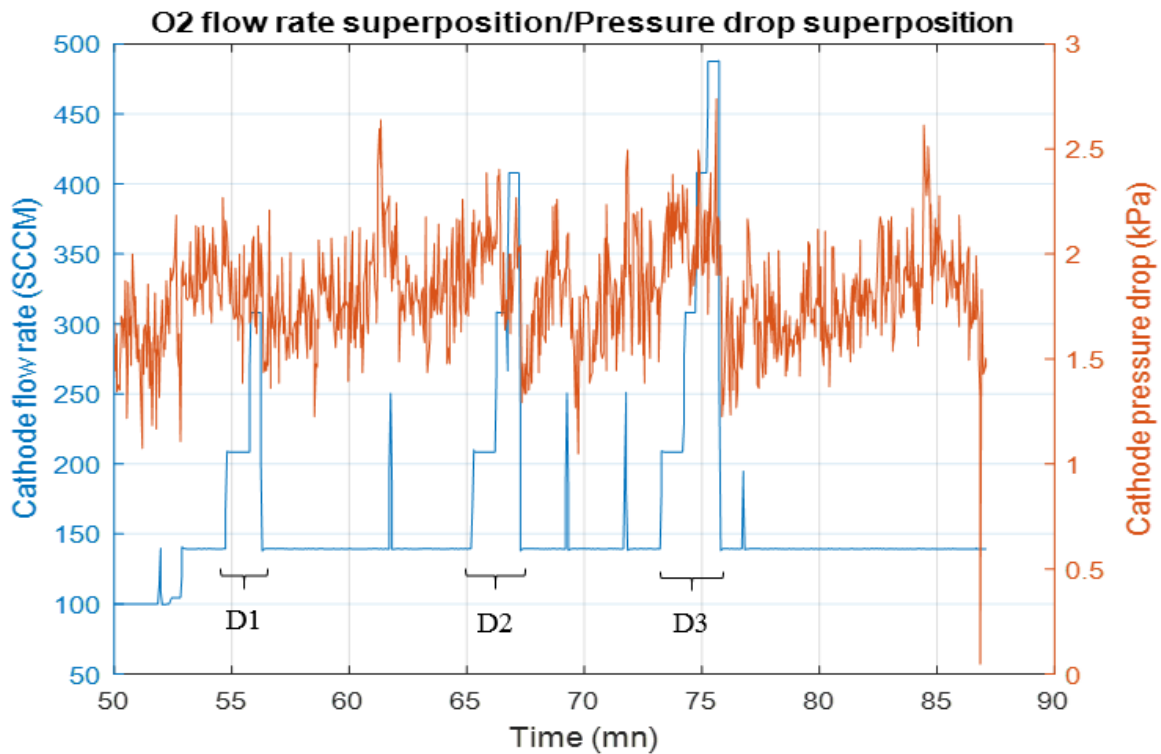


Figure V-XXIII : Superposition Q_{O_2} à ΔP_{cath} pour AFTC1

La Figure V-XXIII est un focus sur le processus d'atténuation du défaut.

Observations

- Trois phases de décisions notées : D1, D2, D3.
- Les trois décisions observées sont des actions à effet rapide sur Q_{O_2} (pour l'évacuation de l'eau accumulée dans la PEMFC).
- La Figure V-XXIII montre que ΔP_{cath} augmente immédiatement après chaque incrémentation de Q_{O_2} .
- Lorsque le défaut de noyage n'est plus diagnostiqué (retour aux conditions normales/effacement de défaut), Q_{O_2} est réinitialisé.
- Les regains de tension sont associés aux évacuations d'eaux liquides de la PEMFC.

Analyse

En comparant les valeurs de ΔP_{cath} avant la phase d'atténuation D1 et après l'atténuation D3 il apparaît que ΔP_{cath} décroît de $0,4 \text{ kPa}$ passant de 2 kPa en moyenne à environ $1,6 \text{ kPa}$. Ceci est dû à l'évacuation de l'eau accumulée dans la PEMFC. V_{fc} a augmenté, signe de l'atténuation du défaut.

Lorsque Q_{O_2} est réinitialisé à la valeur antérieure aux phases d'atténuation Di, le système retrouve le point de fonctionnement favorisant l'apparition du défaut. Ainsi, le défaut de noyage réapparaît. Une procédure d'atténuation D2 est relancée aux alentours de $T = 65 \text{ min}$ soit 10 min après la procédure D1 (durée : $1,5 \text{ min}$). Q_{O_2} est alors immédiatement incrémenté. Pour la phase D2, l'incrémenté de Q_{O_2} est plus importante, ce qui permet un regain de V_{fc} et une forte baisse de ΔP_{cath} au terme de la phase d'atténuation (durée de D2 : 2 min).

Lorsque l'outil de diagnostic ne détecte plus le défaut de noyage, Q_{O_2} est réinitialisé et le système retrouve le point de fonctionnement favorisant l'apparition du défaut de noyage ($T = 67 \text{ min}$).

D3 est effectuée à $T = 73 \text{ min}$, soit 8 min après D2. La phase D3 déclenche deux décisions. La première, comme pour D1 et D2, consiste à augmenter Q_{O_2} . La deuxième, est une décision à effet différé, qui permet de changer de manière permanente le point fonctionnement. Au regard du cycle 1 dans la section « *Mise en place d'un protocole expérimental* », c'est T_{fc} qui est modifiée comme le montre la Figure V-XXIV. Elle passe ainsi de 55°C à 60°C .

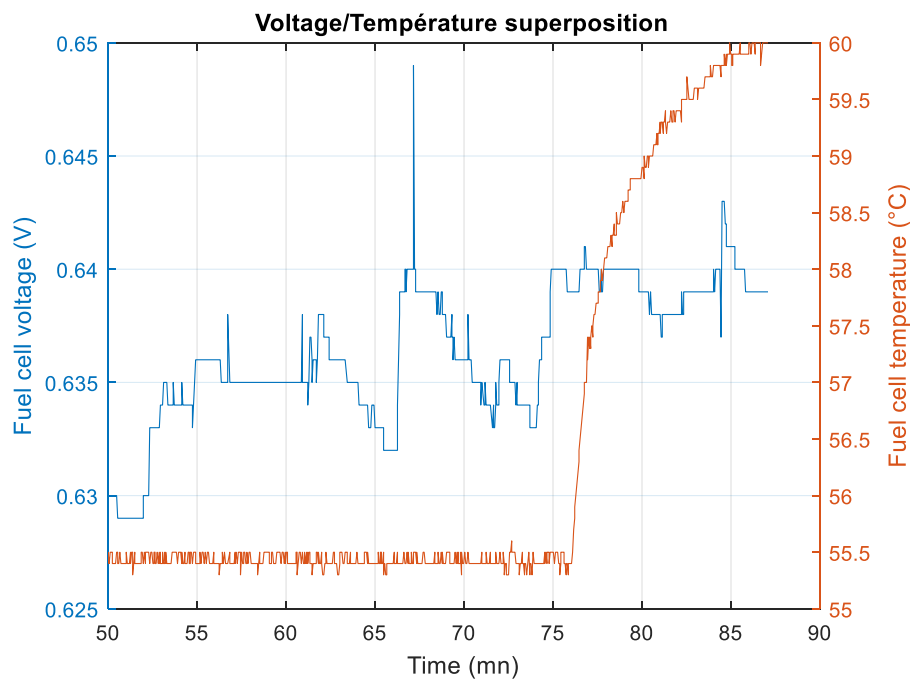


Figure V-XXIV : Superposition de V_{fc} à T_{fc} pour AFTC1

L'augmentation de T_{fc} permet une meilleure évaporation de l'eau liquide présente dans la PEMFC (couche de diffusion (GdL) + serpentins). Ces deux actions combinées (Q_{O_2} et T_{fc}) permettent une évacuation et une évaporation suffisante de l'eau présente dans les serpentins et la GdL ainsi qu'une augmentation de V_{fc} . A fin de la phase AFTC3, Q_{O_2} est réinitialisé. La valeur de ΔP_{cath} augmente de nouveau, mais pas suffisamment pour permettre au défaut de noyage de réapparaître. La tension est quant à elle maintenue à un niveau plus élevé que lors de la première détection du défaut. Après cette troisième phase de correction, l'outil de diagnostic ne détecte plus d'occurrence de défaut de noyage (essais arrêté plus de 10 min après la fin d'AFTC3). Ainsi, le changement de point de fonctionnement a eu un effet durablement antagoniste à l'apparition du défaut de noyage.

Remarque : le protocole expérimental permet la génération d'un défaut permanent. La stratégie à effet rapide étant efficace sur les défauts fugaces, cette stratégie est mise en échec de manière systématique sur un défaut permanent.

Période de diagnostic pour le cycle 1 : 15s

De la même façon que précédemment, la PEMFC est placée sur un point de fonctionnement sans défaut. A $T = 5 \text{ min}$, la génération d'un noyage de type 2 qui est effectuée et la PEMFC placée sur un point de fonctionnement non favorable à une bonne évacuation de l'eau liquide. Cet essai correspond à l'essai AFTC2. La Figure V-XXV représente la superposition des courbes de ΔP_{cath} à V_{fc} .

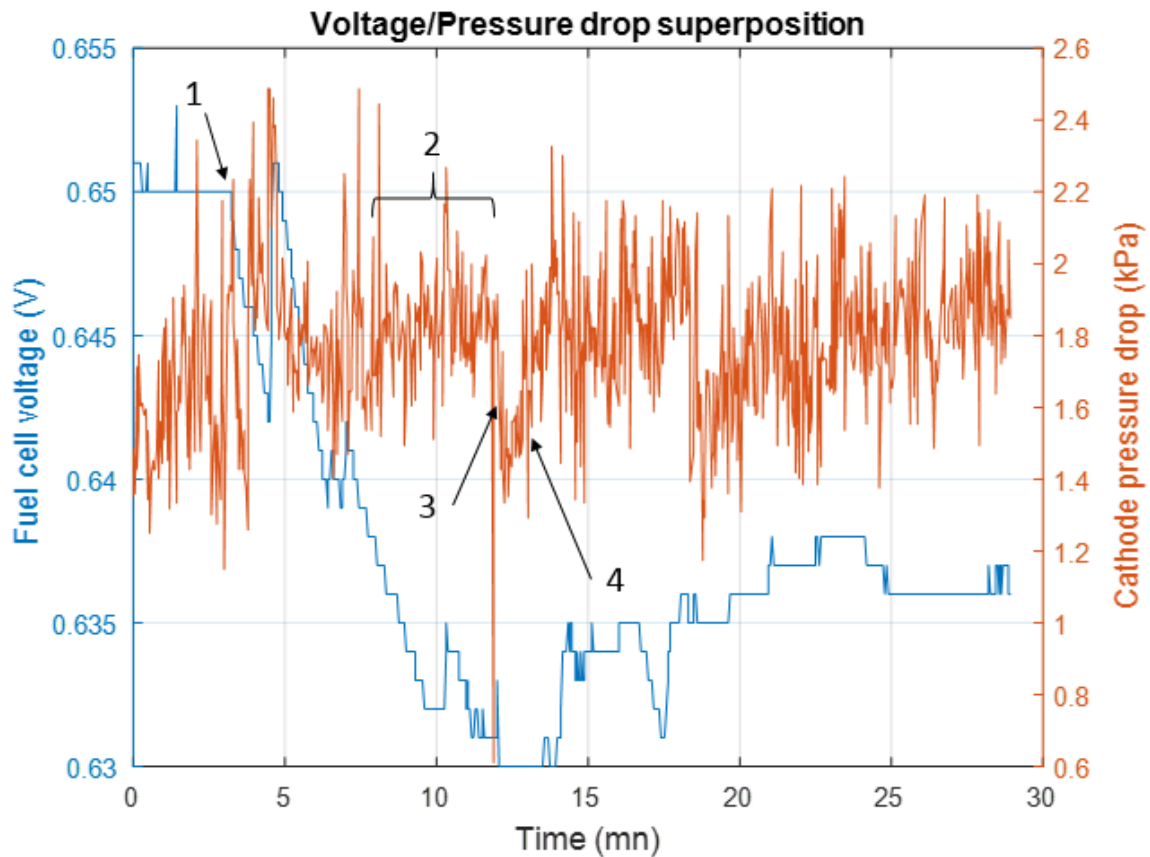


Figure V-XXV : Superposition de V_{fc} à ΔP_{cath} pour AFTC2

Le point 1 correspond au moment où le point de fonctionnement est modifié pour être favorable à l'occurrence du défaut de noyage.

Le point 2 signale la première zone où il est possible de voir la tendance haussière de ΔP_{cath} . Cette augmentation est significative d'une accumulation d'eau dans les serpentins.

Le point 3 montre une diminution brutale de ΔP_{cath} . Ce phénomène fait suite à une phase d'atténuation de défaut qui a permis de retrouver des valeurs de ΔP_{cath} correspondant à une absence du défaut de noyage.

Le point 4 correspond à une zone où il y a une accumulation rapide d'eau liquide dans les serpentins.

La Figure V-XXVI présente l'évolution de Q_{O_2} superposée à l'évolution de V_{fc} permettant de constater à quels moments les décisions à effet rapide sont effectuées. Un focus est fait sur l'essai à partir de $T = 5 \text{ min}$.

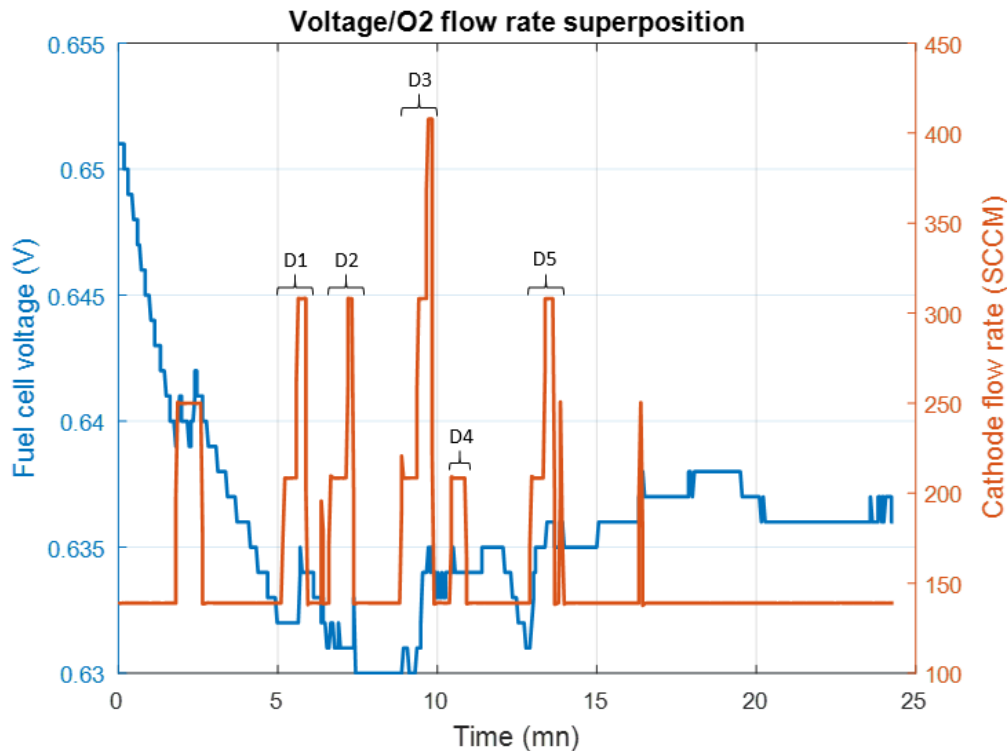


Figure V-XXVI : Superposition de V_{fc} à Q_{O_2} pour AFTC2

Observations

- L'augmentation du débit à $T = 2 \text{ min}$ est un évènement qui n'entre pas dans la stratégie d'atténuation AFTC2.
- La première décision à effet rapide (D1) sur Q_{O_2} est effectuée à environ $T = 5 \text{ min}$.
- L'action d'incrémenter de Q_{O_2} à plus de 300 SCCM a eu pour effet de ralentir la chute de V_{fc} . En revanche, la correction n'a pas d'effets sur ΔP_{cath} .
- A l'issue du premier processus d'atténuation ($T = 6 \text{ min}$), V_{fc} diminue de nouveau et le noyage réapparaît rapidement.
- Un processus d'atténuation D2 équivalent reprend à $T = 7 \text{ min}$. Même action, même effet, V_{fc} ralentit sa chute mais lorsque Q_{O_2} est réinitialisé V_{fc} reprend sa chute.
- A la fin de la troisième phase d'atténuation D3 ($T = 10 \text{ min}$) V_{fc} fait apparaître une augmentation.
- A $T = 10,5 \text{ min}$, une quatrième augmentation de Q_{O_2} D4 (à environ 400 SCCM) est réalisée. A cette action s'ajoute l'augmentation de T_{fc} .
- Une dernière incrémenter du débit (D5) à $T = 13,5 \text{ min}$. Suite à cette dernière action, le défaut n'est plus détecté.

Analyse

Les deux premières atténuations (D1 et D2) par des actions sur Q_{O_2} ne sont pas efficaces car la durée de l'action est trop courte (1 min) pour une évacuation suffisante pour retrouver des conditions sans défaut. La troisième décision sur le débit (D3) est plus efficace car sa durée est plus longue (1,5 min) et de plus forte intensité. Cette action permet une meilleure évacuation de l'eau liquide présente dans les serpentins et la GdL.

A l'issue des deux premières incréments de Q_{O_2} , une diminution de ΔP_{cath} de l'ordre de $0,4 \text{ kPa}$ est observée mais V_{fc} n'est pas récupérée. Ceci est dû au fait qu'un défaut de noyage agit dans deux milieux. En effet, lors de ces essais la donnée de chute de pression est utilisée comme une image de l'accumulation de l'eau dans les serpentins. Or, cette accumulation peut aussi avoir lieu dans la couche de diffusion ce qui limite l'apport de réactifs à la couche catalytique. L'outil de diagnostic étant limité à la détection de ce qui se passe dans les serpentins, la stratégie AFTC tente donc d'atténuer l'accumulation d'eau dans ce milieu.

La troisième phase d'atténuation ($T = 8 \text{ min}$) montre que le débit est incrémenté au-delà de 400 SCCM . Ceci est la réponse du module de décision au défaut qui ne s'atténue pas, et qui a tendance à s'intensifier. L'augmentation de l'intensité du défaut peut être expliquée par la façon dont celui-ci est généré. En effet, en augmentant faiblement Q_{O_2} à $T = 5 \text{ min}$ et $T = 6 \text{ min}$ peu d'eau liquide peut être évacuée des serpentins. Le rapport *arrivée/évacuation* d'eau des serpentins se dégrade par ces prises de décisions car les augmentations de Q_{O_2} entraînent une augmentation de la quantité d'eau liquide dans la PEMFC mais leur faible amplitude n'a pas d'effet d'entraînement suffisant pour aboutir à une meilleure évacuation de l'eau liquide dans les serpentins.

L'incrément de Q_{O_2} à 400 SCCM permet une inversion du rapport *arrivée/évacuation* d'eau des serpentins en faveur de l'évacuation. Ce phénomène s'exprime par la diminution de ΔP_{cath} et d'un regain de V_{fc} .

La phase de correction D4 à $T = 10,5 \text{ min}$ consiste à augmenter le Q_{O_2} à un peu plus de 200 SCCM . Cette incrémentation est faible car l'intensité du défaut a été réduite suite à la précédente phase d'atténuation. Dans le même temps, une incrémentation de T_{fc} est effectuée passant de 55°C à 60°C telle que présentée sur la Figure V-XXVII. Cette action permet une meilleure évaporation de l'eau présente dans la PEMFC et compense ainsi l'apport d'eau liquide *via* les canalisations d'alimentation.

L'augmentation de la température n'étant pas immédiate, l'eau s'accumule de nouveau dans les serpentins. Une dernière augmentation D5 de Q_{O_2} permet l'évacuation de l'eau restante des serpentins. Cette action couplée à l'effet de la température permet le maintien de la PEMFC en conditions de fonctionnement sans défaut sur un nouveau point de fonctionnement.

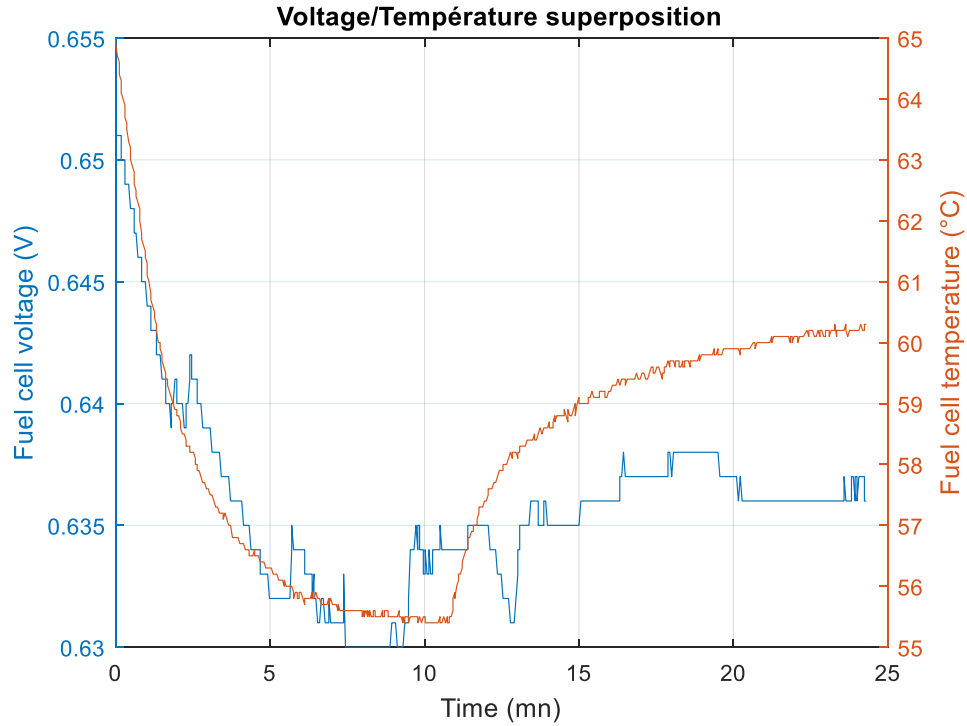


Figure V-XXVII : Superposition de V_{fc} à T_{fc} pour AFTC2

Période de diagnostic pour le cycle 1 : 60s

Cet essai, AFTC3, impose une nouvelle fois des conditions de fonctionnement favorables à l'apparition du défaut de noyage dans la PEMFC. T_{diag} est de 60 s. Le cycle testé est toujours le premier et la sévérité considérée comme équivalente aux essais précédents. La Figure V-XXVIII représente la superposition de ΔP_{cath} à V_{fc} .

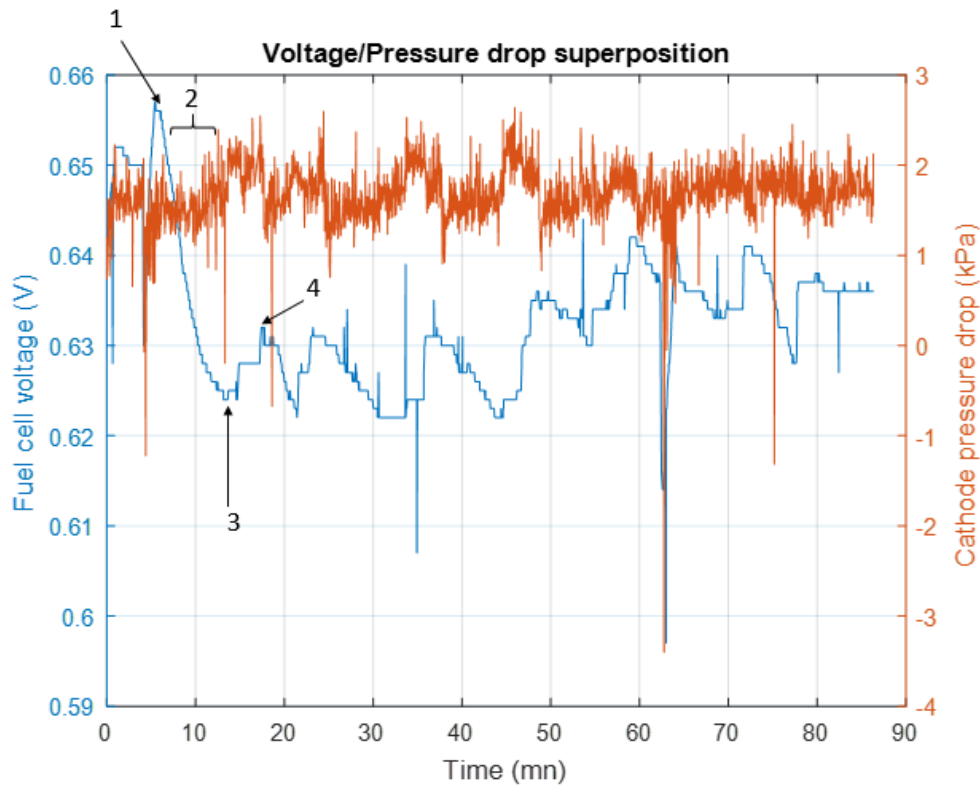


Figure V-XXVIII : Superposition de V_{fc} à ΔP_{cath} pour AFTC3

Le point 1 correspond au moment où le point de fonctionnement est changé pour favoriser l'occurrence du défaut de noyage. Le paramétrage est le même que celui des deux essais précédents.

Le point 2 représente la première phase d'accumulation d'eau dans les serpentins.

Le point 3 correspond au moment où la première détection d'un défaut de noyage déclenche le processus AFTC.

Le point 4 signale la fin de la première phase d'atténuation du défaut de noyage.

La stratégie AFTC opère une nouvelle fois des changements sur les consignes de correcteurs du système. La Figure V-XXIX représente la superposition des décisions à effet rapide (qui consistent à changer ponctuellement le débit d'oxygène) et de la tension de la PEMFC.

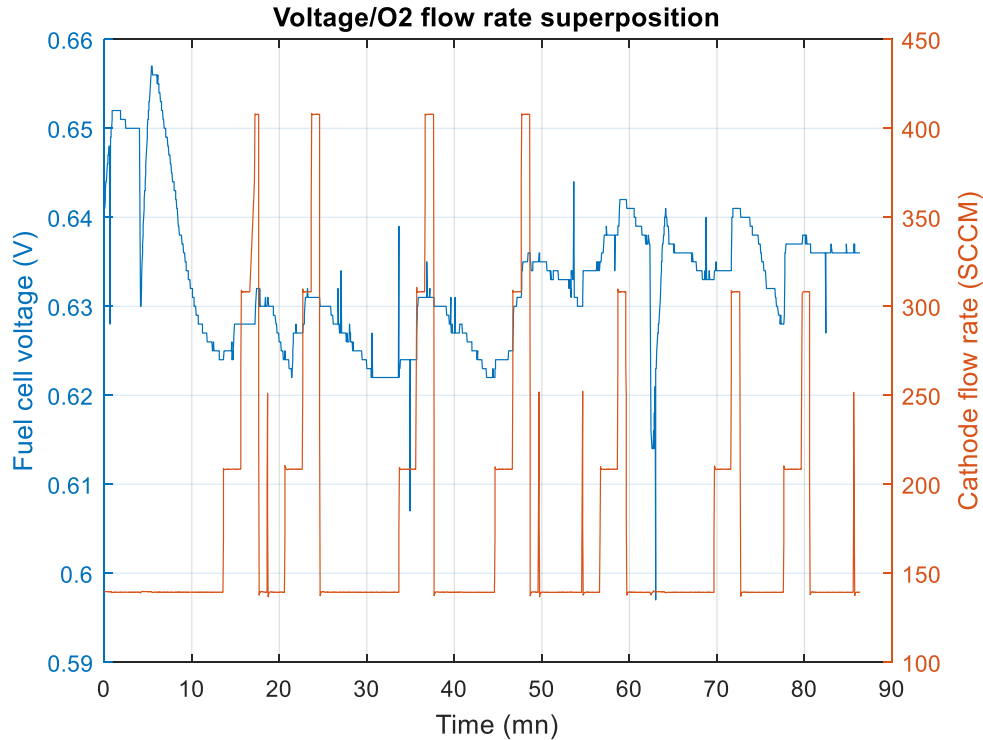


Figure V-XXIX : Evolution de V_{fc} et de Q_{O_2} pour AFTC3

Les Figures 6.28 et 6.29 correspondent aux évolutions de T_{fc} et de $HR\%$ des gaz en entrée des canaux. Conformément au cycle expérimenté, T_{fc} est la première variable à être modifiée, l' $HR\%$ est la seconde.

Observations

- La première action d'atténuation (sur Q_{O_2}) est déclenchée environ à la 13^{ième} min soit 7 min après la mise en condition favorable à l'apparition du noyage.
- Les quatre premières décisions sur Q_{O_2} dépassent 400 SCCM.
- Les trois dernières actions sur Q_{O_2} sont plus faibles et dépassent 300 SCCM.
- La Figure V-XXX montre que la modification de T_{fc} est effectuée au bout d'environ 45 min à la 4^{ième} action sur Q_{O_2} .
- V_{fc} connaît des cycles de « montées » et de « descentes » sur la durée du test (80 min).
- La Figure V-XXXI montre une modification de l' $HR\%$ des gaz entrée de PEMFC au bout de 80 min et sur la dernière incrémentation de Q_{O_2} .

Analyse

Dans cet essai, la durée d'application des changements de consignes permet un rapport arrivée/évacuation d'eau liquide des serpentins en faveur de l'évacuation.

Les fortes intensités des modifications de débit dès la première phase d'atténuation ($T = 13$ min) rend la stratégie efficace pour une bonne évacuation d'eau.

A la $T = 45$ min, la quatrième phase d'atténuation du défaut est enclenchée et la T_{fc} est incrémenté de $5^\circ C$ dans le même temps. L'effet du changement de T_{fc} est remarquable à partir de la cinquième phase d'atténuation ($T = 58$ min). En effet, la modification de Q_{O_2} est plus faible et de plus courte durée.

La modification de $HR\%$ à $T = 78 \text{ min}$ est le signe que le défaut ne disparaît pas malgré le changement de point de fonctionnement opéré sur T_{fc} . Or, dans les essais AFTC1 et AFTC2 ce changement de point de fonctionnement était suffisant pour une atténuation durablement antagoniste du noyage. La différence de l'essai AFTC3 est sur la durée des actions sur Q_{O_2} . En effet, la diminution de l'intensité des actions sur Q_{O_2} à partir du 5^{ième} essai à $T = 58 \text{ min}$ engendre une inversion du rapport *arrivée/évacuation* d'eau liquide des serpentins en défaveur de l'évacuation. Pour cette raison une nouvelle action sur $HR\%$ est nécessaire pour compenser cet effet.

La modification de $HR\%$ couplée aux autres actions permet la stabilisation durable de la PEMFC en dehors de la zone de défaut de noyage.

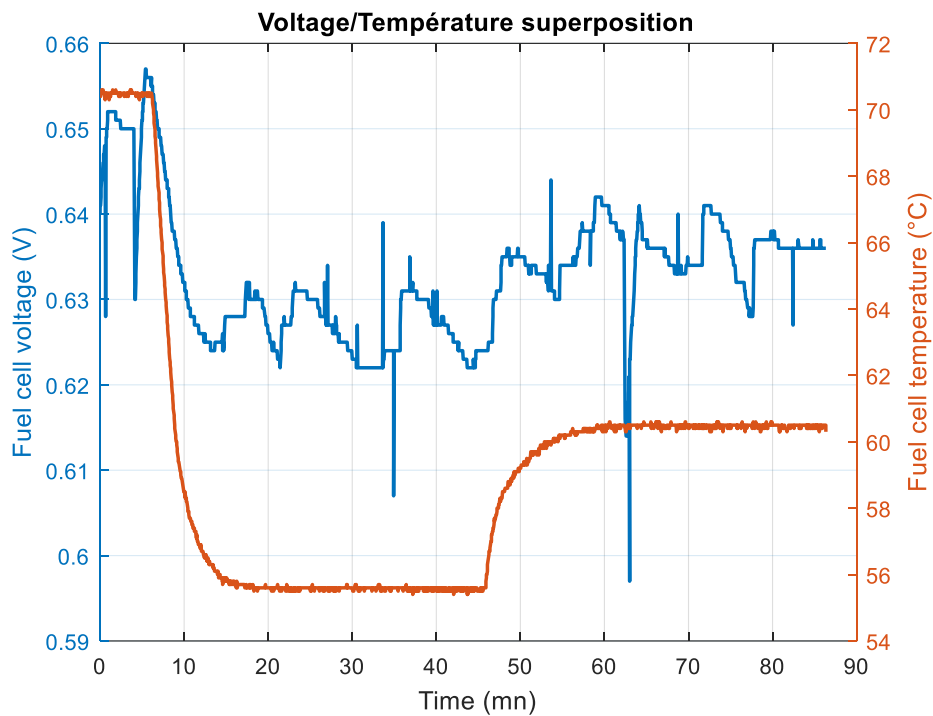


Figure V-XXX : Superposition de V_{fc} à T_{fc} pour AFTC3

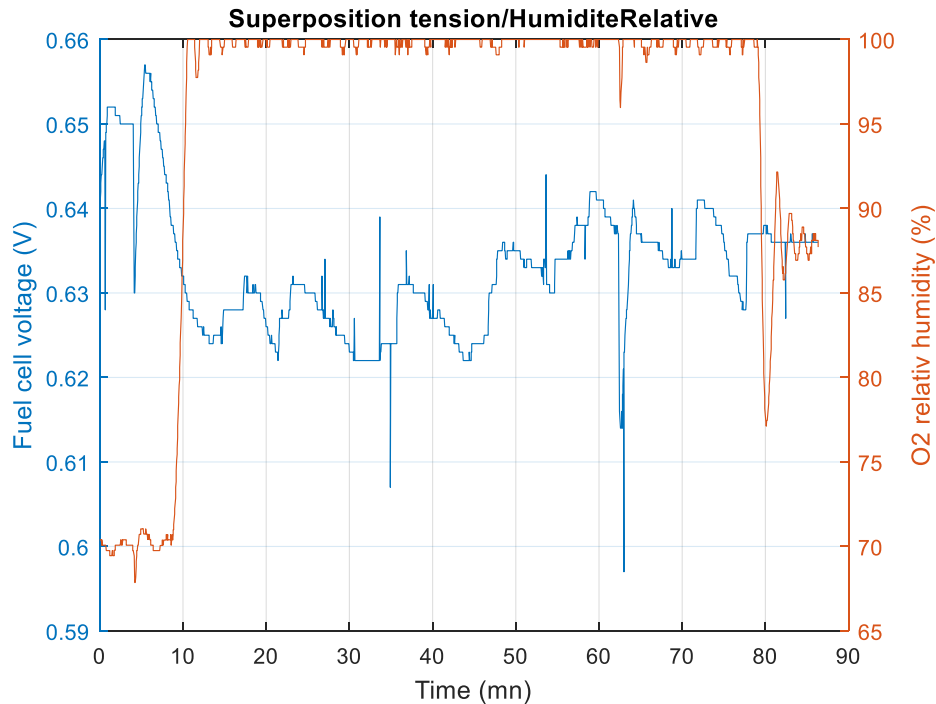


Figure V-XXXI : Superposition de V_{fc} à l'HR% pour AFTC3

c. Récapitulatif des essais de noyage atténué par des décisions de faibles amplitudes

L'analyse des résultats précédents réalisés sur le défaut de noyage à faible niveaux de sévérité est faite *via* les métriques définies dans la section « *Protocoles d'essais* ».

Métrique 1 : Nombre d'actions correctrices

La première métrique permet de comparer le nombre d'actions correctrices en fonction de T_{diag} . Du point de vue du nombre d'actions déclenchées et à la lumière du Tableau V-4 : Actions correctrices, $T_{diag} = 30 s$ est la plus pertinente.

Tableau V-4 : Actions correctrices de la métrique 1

$T_{diag} (s)$	À effet rapide	À effet différé
15	5	1
30	3	1
60	7	2

Métrique 2 : Amplitudes des actions correctrices

La seconde métrique concerne les amplitudes des actions correctrices. Du point de vue de cette métrique, $T_{diag} = 15 s$ est la valeur plus pertinente car elle est moins coûteuse en débit et nécessite une seule action à effet différé.

Tableau V-5 : Actions correctrices de la métrique 2

$T_{diag} (s)$	À effet rapide	À effet différé
15	400 sccm	5°C
30	500 sccm	5°C
60	400 sccm	5°C -10% HR

Métrique 3 : Durée totale sous l'influence des actions correctrices

La troisième métrique consiste à comparer la durée des actions correctrices des décisions à effet rapide. Le Tableau V-6 : Durée des actions correctrices à effet rapide montre que $T_{diag} = 15 s$ permet la plus rapidement atténuation du défaut de noyage.

Tableau V-6 : Durée des actions correctrices à effet rapide (métrique 3)

$T_{diag} (s)$	À effet rapide
15	4.5 min
30	6 min
60	25 min

Métrique 4 : Durée avant retour en condition de fonctionnement sans défaut

La métrique suivante a pour objectif de comparer le temps nécessaire à chaque phase d'essai pour un retour en conditions sans défaut. Dans ce cas, $T_{diag} = 15 s$ est clairement la plus efficace.

Tableau V-7 : Durée avant retour en condition sans défaut (métrique 4)

$T_{diag} (s)$	Durées (min)
15	9
30	20
60	65

Métrique 5 : Nombre de capteurs utilisés dans chaque essai

La cinquième métrique détermine le nombre de capteurs utilisés pour chaque essai. Les deux premiers (AFTC1 et AFTC2) agissant sur les mêmes grandeurs (Q_{O_2} et T_{fc}), ils utilisent 2 capteurs. Le troisième (AFTC3) essai agit sur Q_{O_2} , T_{fc} et $HR\%$. La détermination de $HR\%$ nécessite la connaissance de la température du ballon d'humidification et de la canalisation d'entrée de la PEMFC. Il faut donc considérer au total 4 capteurs pour AFTC3. AFTC1 et AFTC2 permettent donc l'atténuation du défaut de noyage en utilisant moins de capteurs.

Tableau V-8 : Nombre de capteurs utilisés (métrique 5)

$T_{diag} (s)$	À effet rapide	À effet différé
15	1	1
30	1	1
60	1	4

La dernière métrique analyse l'impact du processus d'atténuation de défaut sur la dégradation de la PEMFC. L'étude proposée est basée sur l'analyse de courbes de polarisation, ceci rendant difficile la validation des interprétations étant donné le peu d'éléments à disposition.

La Figure V-XXXII est la superposition de 4 courbes de polarisation. Ces caractérisations sont faites avant chaque phase (mise en condition de défaut, effacement du défaut).

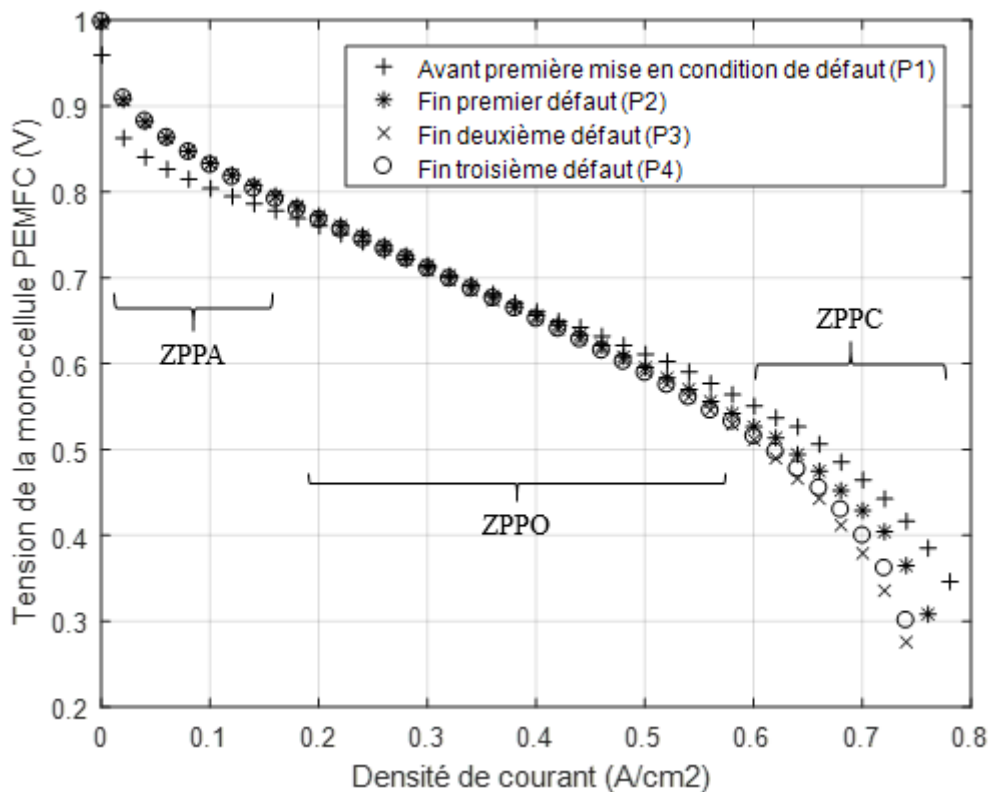


Figure V-XXXII : Superposition des courbes de polarisation pour la première phase d'essais.

La courbe de polarisation (P1) avant la mise en condition de défaut et correction AFTC1 montre une plus faible valeur de tension dans la zone de pertes par activation en comparaison aux trois courbes faisant suite aux essais de noyage. Ceci est dû à une plus faible condition d'hydratation de la PEMFC. En effet, la zone de pertes par activation correspond à la mise en mouvement des charges électroniques. Si la membrane PEMFC n'est pas correctement hydratée, la mise en mouvement est plus difficile et occasionne plus de pertes par activation (Cf. Pukrushpan [53]).

A la fin de P1, la PEMFC a suffisamment produit d'eau liquide pour une bonne hydratation de la membrane. Les essais d'atténuation (AFTC1, 2 et 3) débutent donc après P1. La PEMFC est

replacée sur un point de fonctionnement nominal conformément à la section *Protocole expérimental*.

A la fin de l'essai AFTC1, une polarisation (P2) de la membrane est effectuée et est représentée sur la Figure V-XXXII. P2 montre un niveau de tension plus élevé dans la zone de prédominance des pertes par activation (ZPPA) par rapport à P1. Ceci est le signe d'une meilleure hydratation de la membrane PEMFC. En revanche, il est à noter une légère perte de tension dans la zone à prédominance de perte par concentration (ZPPC). Cette baisse peut être expliquée par deux principaux phénomènes. Le premier est une évacuation incomplète de la GdL de son contenu en eau, ce qui limite l'arrivée de réactifs. Cette hypothèse est par ailleurs corroborée par les résultats d'essais. En effet, ceux-ci montrent que les stratégies AFTC1, 2 et 3 permettent de quitter la zone d'influence du défaut, mais à aucun moment les performances sont totalement retrouvées. Ceci est probablement le signe d'une évacuation incomplète de la GdL de son excédent d'eau ou que le défaut a engendré une dégradation irréversible.

A la fin du second essai (AFTC2) une nouvelle polarisation est effectuée (P3) et montre une nouvelle perte de tension dans la ZPPC. Cette perte est amorcée dès la zone à prédominance de pertes ohmique (ZPPO). Ces chutes peuvent aussi être expliquées par les hypothèses faites dans le paragraphe précédent.

La polarisation (P4) de la fin du troisième essai (AFTC3) montre un regain de tension dans la ZPPC. Ce phénomène est permis par le caractère réversible des effets du défaut de noyage que subit la PEMFC. L'évolution de cette nouvelle courbe ne montre presque aucun changement dans la ZPPO (ce qui montre que la conductivité de la membrane n'a pas été affectée).

Les évolutions des distances entre les courbes de polarisation de la Figure V-XXXII sont représentées sur la Figure V-XXXIII. L'évènement marquant se trouve sur l'évolution de la distance séparant P3 et P4. Un gain de l'ordre de 10% est visible et se localise dans la ZPPC. En effet un défaut de noyage perturbe l'arrivée des réactifs au site réactionnel et son impact est majoritairement situé dans la ZPPC. Le regain visible dans cette zone est donc bien un regain de fraîcheur de la membrane PEMFC. Le graphe représentant l'évolution entre P1 et P4 montre tout de même une dégradation plus accentuée de l'AME dans la ZPPC à l'issue des essais de noyage.

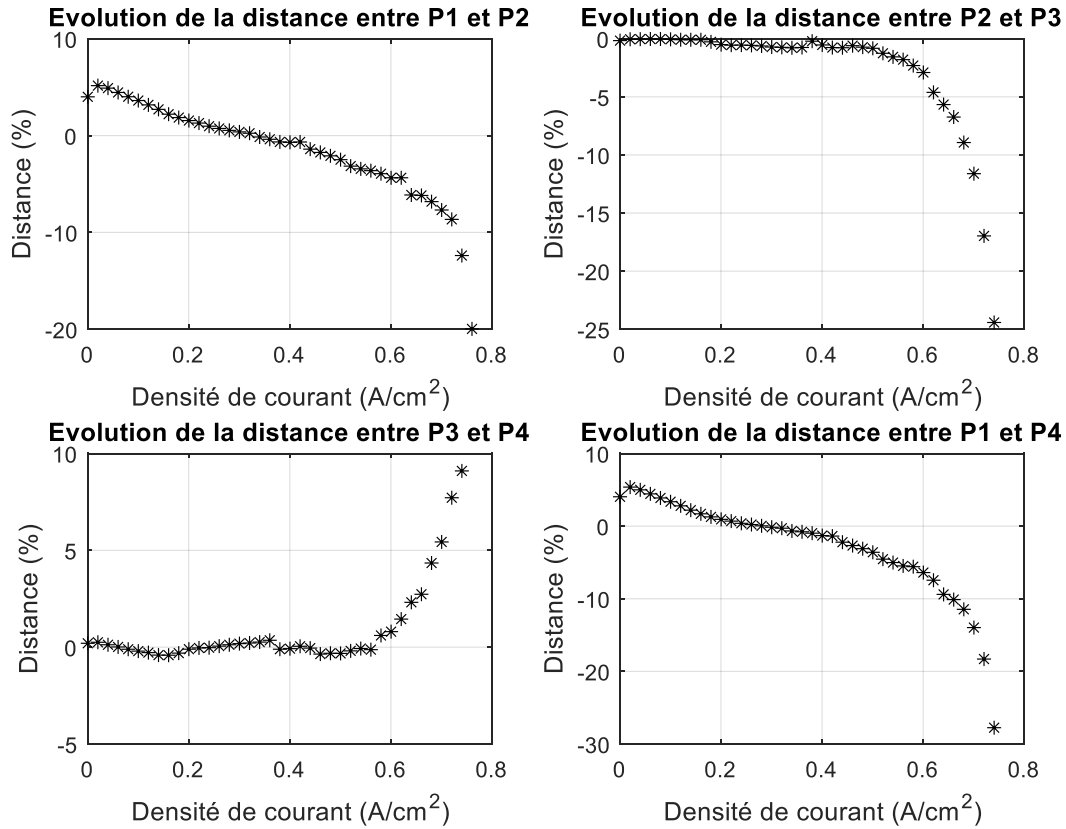


Figure V-XXXIII : Evolution des distances entre chaque courbe de polarisation pour les essais de noyage à faible niveau de sévérité.

La détermination des pentes dans la ZPPO est aussi un indicateur pertinent pour quantifier la perte de conductivité de la membrane. L'évolution de ces pentes est basée sur la formule suivante :

$$p = \frac{V_2 - V_1}{j_2 - j_1} \quad \text{Eq. V-2}$$

Où j_1 et j_2 sont les densités de courant sélectionnées sur les courbes de polarisation. V_1 et V_2 désignent les tensions images des densités de courant.

Le Tableau V-9 : Calcul des pentes dans les ZPPO pour chaque courbe de polarisation donne les valeurs des pentes dans les zones de pertes ohmiques pour chaque courbe de polarisation.

Tableau V-9 : Calcul des pentes dans les ZPPO pour chaque courbe de polarisation

	P1	P2	P3	P4
Pentes dans la ZPPO	-0,5030	-0,5925	-0,5915	-0,6075

Le Tableau V-9 : Calcul des pentes dans les ZPPO pour chaque courbe de polarisation montre la diminution de la pente dans la ZPPO. Cette diminution est aussi significative des pertes de performances et a lieu dès le premier essai de noyage. Cette diminution dans la ZPPO peut sembler contre intuitive car le défaut de noyage aurait tendance à réhydrater la membrane. Cette réhydratation est cependant assez faible devant l'encombrement de la GdL et le bouchonnement des canalisations d'alimentation. Le manque de réactif qui en résulte, diminue la production d'eau à la couche catalytique réduisant ainsi la teneur en eau de la membrane.

Pour P3, la valeur de la pente se stabilise voire augmente légèrement. L'augmentation de la pente montre que les dégradations subies sont réversibles. L'indicateur de dégradation est basé sur la diminution de la pente des courbes de polarisation dans chaque zone.

La valeur de la pente pour P4 montre une baisse de performance. L'atténuation du défaut ayant une durée beaucoup plus longue que pour P3, la membrane subit de nouveau des dégradations. Ainsi, en croisant ces données, il est possible d'observer que la stratégie d'atténuation AFTC telle qu'utilisée ne permet pas d'éviter des dégradations dues à l'apparition du défaut. En revanche la stratégie permet de ralentir son effet dégradant en ramenant la PEMFC dans des conditions de fonctionnement sans défaut en changeant toutefois le point de fonctionnement.

Le Tableau V-10 est un récapitulatif des données liées aux essais.

Tableau V-10 : Récapitulatif des actions menées lors des essais AFTC sur un noyage faible et à courant constant

	Nombre d'actions à effet rapide	Nombre d'actions à effet différé	Consignes maximales des actions à effet rapide (SCCM)			Actions à effet différé		Délais du retour définitif en conditions sans défaut (min)
			1 x 300	1 x 400	1 x 500	1 x +5°C		
AFTC1	3	1	1 x 300	1 x 400	1 x 500	1 x +5°C		20
AFTC2	5	1	1 x 200	3 x 300	1 x 400	1 x +5°C		9
AFTC3	5	2		3 x 300	4 x 400	+5°C	-10%	65

Pour $T_{diag} = 15 s$, augmenter Q_{O_2} revient à « pousser » l'eau de la canalisation d'entrée de la PEMFC dans les serpentins (génération de type 2). Q_{O_2} n'est ensuite pas maintenu suffisamment longtemps pour évacuer cette eau des serpentins. Le défaut n'est alors pas atténué lors de la réinitialisation de Q_{O_2} , ce qui engendre un temps d'exposition au défaut plus long (et représente un risque de dégradation de la PEMFC) et une série de déclenchements plus importants d'actions à effet rapide.

A l'opposé, $T_{diag} = 60 s$ permet d'évacuer l'eau des serpentins car les actions sur Q_{O_2} sont maintenues quatre fois plus longtemps. Lors de la réinitialisation de Q_{O_2} , le processus d'accumulation d'eau reprend jusqu'à la phase suivante de détection et d'atténuation. Le cycle diagnostic/atténuation/retour en condition sans défaut s'installe jusqu'à ce qu'une décision long terme intervienne et modifie le point de fonctionnement. Cette valeur de T_{diag} permet donc une atténuation suffisante du défaut *via* les décisions à effet rapide et à effet différé pour empêcher une dégradation importante de la PEMFC.

$T_{diag} = 60 s$ semble donc être la période de diagnostic la plus adaptée à l'atténuation du défaut de noyage, car elle permet l'évacuation de l'eau de la canalisation et en partie celle des serpents. Pour $T_{diag} = 30 s$, le défaut est diagnostiqué plus rapidement que pour $T_{diag} = 60 s$, mais est peu atténué. En revanche, il est rapidement de nouveau diagnostiqué, ce qui permet le déclenchement de nouvelles phases d'atténuation et un déclenchement d'une action à effet différé plus rapide. L'inconvénient est que la PEMFC est exposée au défaut de noyage qui réapparaît rapidement, ce qui engendre un cyclage thermique et fluide intensifiant les dégradations subies par la PEMFC (cf. courbe P2 de la Figure V-XXXII).

Les faibles valeurs de T_{diag} , permettent le déclenchement rapide des actions à effet différé. Cette rapidité tend à rendre efficace le changement de point de fonctionnement car ceux-ci sont déclenchés plus rapidement. La période de 60 secondes tarde à activer l'action à effet différé et l'incrément de la température n'est plus assez efficace et nécessite une seconde action à effet différé sur l'humidité relative des gaz d'entrée pour atténuer définitivement le défaut.

La meilleure stratégie d'atténuation dépend donc de plusieurs facteurs. T_{diag} agit sur la vitesse d'atténuation et sur le déclenchement de l'action à effet différé. Mais attention, un T_{diag} trop petit fait subir à la PEMFC des cycles rapides et violents de changement de débit ce qui peut dégrader ses composants. Ce facteur agit aussi sur la durée des actions correctrices et donc sur la consommation de réactifs. T_{diag} doit donc être choisi en fonction de la vitesse d'atténuation désirée, du nombre maximal de cycles pouvant être subis par la PEMFC et du coût de la consommation de réactifs.

Les changements de point de fonctionnement (actions à effet différé) ont eux aussi un impact sur le fonctionnement de la PEMFC. En effet, un incrément de température peut être financièrement coûteux de par l'aspect énergivore du processus. Outre l'aspect économique, la durée de vie de la PEMFC peut être aussi impactée par une augmentation de sa température à cause d'un effet d'assèchement potentiellement trop important de la membrane. Les actions à effet différé nécessitent, par ailleurs, l'utilisation de capteurs supplémentaires. Or, sur quelques applications liées aux PEMFC, certains capteurs peuvent être indisponibles. Enfin, certaines actions à effet différé possèdent un temps de réponse pouvant être trop grand au regard de la dynamique du défaut. Ceci peut engendrer des dégradations par un temps d'exposition trop long de la PEMFC au défaut. En effet, lorsqu'un défaut de noyage apparaît et qu'une augmentation de la température de la PEMFC est effectuée à $n T_{diag}$ plus tard, le temps réponse lié à cette grandeur peut être long dans le cas où le défaut possède un fort niveau de sévérité.

En somme, s'il aurait eu un choix à faire sur une des trois valeurs de T_{diag} pour l'application de la stratégie AFTC sur la mono cellule de PàC testés, il semble plus judicieux de choisir $T_{diag} = 15 s$. Cependant, pour des raisons d'échelle (mono cellule) ce choix est viable que sur cette application. A l'échelle d'un stack de PàC, l'apparition d'un cyclage sur le débit peut potentiellement avoir des effets plus dégradants car le débit d'entrée est directement proportionnel au nombre de cellule. Un autre élément potentiellement dégradant pour un $T_{diag} = 15 s$, est le choix du réactif (O_2 ou Air). Pour rappel ces essais ont été effectués avec de l' O_2 et l'utilisation d'air ajoute un facteur 5 sur le débit cathodique.

La validation de la stratégie AFTC a été effectuée en considérant que le défaut de noyage est généré sur une même sévérité. En effet l'outil de diagnostic ne pouvant donner l'information de sévérité, cette considération était nécessaire. A présent, les mêmes essais ont été effectués

sur le même cycle et pour les mêmes valeurs de T_{diag} . Le défaut de noyage généré est le même tout comme sa sévérité, mais les décisions sont choisies en considérant l'occurrence d'un défaut de noyage avec un niveau de sévérité moyen. Par souci de clarté et afin de ne pas être redondant les essais d'atténuation du défaut de noyage à sévérité moyenne sont placés en annexe.

d. Génération d'un défaut de noyage atténué par des décisions de moyennes amplitudes

Les conditions expérimentales, le cycle et les valeurs de T_{diag} sont les mêmes que pour les essais précédents. Le module de décision ayant comme entrée la sévérité du défaut, le choix a été fait de lui transmettre artificiellement cette entrée en considérant un défaut à niveau de sévérité moyen.

La lecture et l'interprétation des graphes liés au défaut de noyage ont déjà fait l'objet de présentations dans la partie précédente. Pour ces nouveaux essais, les graphes extraits sont de même nature que pour les essais précédents et ne nécessitent pas d'explications complémentaires. Cette partie fait donc uniquement l'objet de l'analyse et de l'interprétation des essais noyage à niveau de sévérité moyen. Les graphes sont disponibles en Annexe A.

L'analyse des résultats des essais avec des niveaux de sévérité moyens pour un défaut de noyage est une nouvelle fois réalisée *via* les métriques définies dans la section « Protocole expérimental ».

Métrique 1 : Nombre d'actions correctrices

Du point de vue du nombre d'actions déclenchées lors de ces nouveaux essais, $T_{diag} = 60 s$ est la valeur la plus pertinente.

Tableau V-11 : Actions correctrices (métrique 1)

$T_{diag} (s)$	À effet rapide	À effet différé
15	6	1
30	5	1
60	4	1

Métrique 2 : Amplitudes des actions correctrices

L'amplitude maximale atteinte lors des trois essais est de 730 SCCM et la température de la PEMFC a été augmentée de 5°C. Il est aussi intéressant de noter que lors de deux premiers essais, l'amplitude de 730 SCCM a été atteinte à deux reprises contre une seule fois pour le troisième essai. Ainsi, $T_{diag} = 60 s$ est la valeur la plus pertinente.

Tableau V-12 : Amplitudes des actions correctrices (métrique 2)

$T_{diag} (s)$	À effet rapide	À effet différé
15	730 sccm	5°C
30	730 sccm	5°C
60	730 sccm	5°C

Métrique 3 : Durée totale sous l'influence des actions correctrices

Le Tableau V-13 montre que la période $T_{diag} = 15 s$ est la meilleure du point de vue de la durée totale des actions à effet rapide car elle permet l'atténuation plus rapide du défaut de noyage.

Tableau V-13 : Durée des actions correctrices à effet rapides (métrique 3)

$T_{diag} (s)$	À effet rapide
15	5 min
30	7 min
60	12 min

Métrique 4 : Durée avant retour en condition de fonctionnement sans défaut

La métrique suivante est utilisée pour comparer le temps nécessaire entre chaque phase d'essai pour un retour en conditions sans défaut. La détermination du délai nécessaire pour le retour en conditions sans défaut a pour point de départ le déclenchement de la première action à effet rapide et comme point d'arrivée le début de la dernière action à effet rapide. Pour ce test, $T_{diag} = 15 s$ est la valeur la plus efficace.

Tableau V-14 : Durée avant retour en conditions sans défaut (métrique 4)

$T_{diag} (s)$	Durées (min)
15	10
30	22
60	25

Métrique 5 : Nombre de capteurs utilisés dans chaque essai

Les trois essais font intervenir des changements sur Q_{O_2} et T_{fc} . Chacune des phases de test utilise donc 2 capteurs.

Tableau V-15 : Nombre de capteurs utilisés

$T_{diag} (s)$	À effet rapide	À effet différé
15	1	1
30	1	1
60	1	1

Tout comme pour les essais de noyage atténués par des décisions de faibles amplitudes, la dernière métrique consiste en l'analyse de l'impact du processus d'atténuation de défaut sur la dégradation de la PEMFC. Une nouvelle fois, l'étude proposée est basée sur l'analyse de courbes de polarisation (Cf. Figure V-XXXIV), ceci rendant difficile la validation des interprétations étant donné le peu d'éléments à disposition.

Chacune des courbes est mesurée la fin d'une phase d'essai. La première courbe a été faite avant la première mise en condition de défaut. La seconde courbe avant la seconde phase et ainsi de suite jusqu'à la troisième phase.

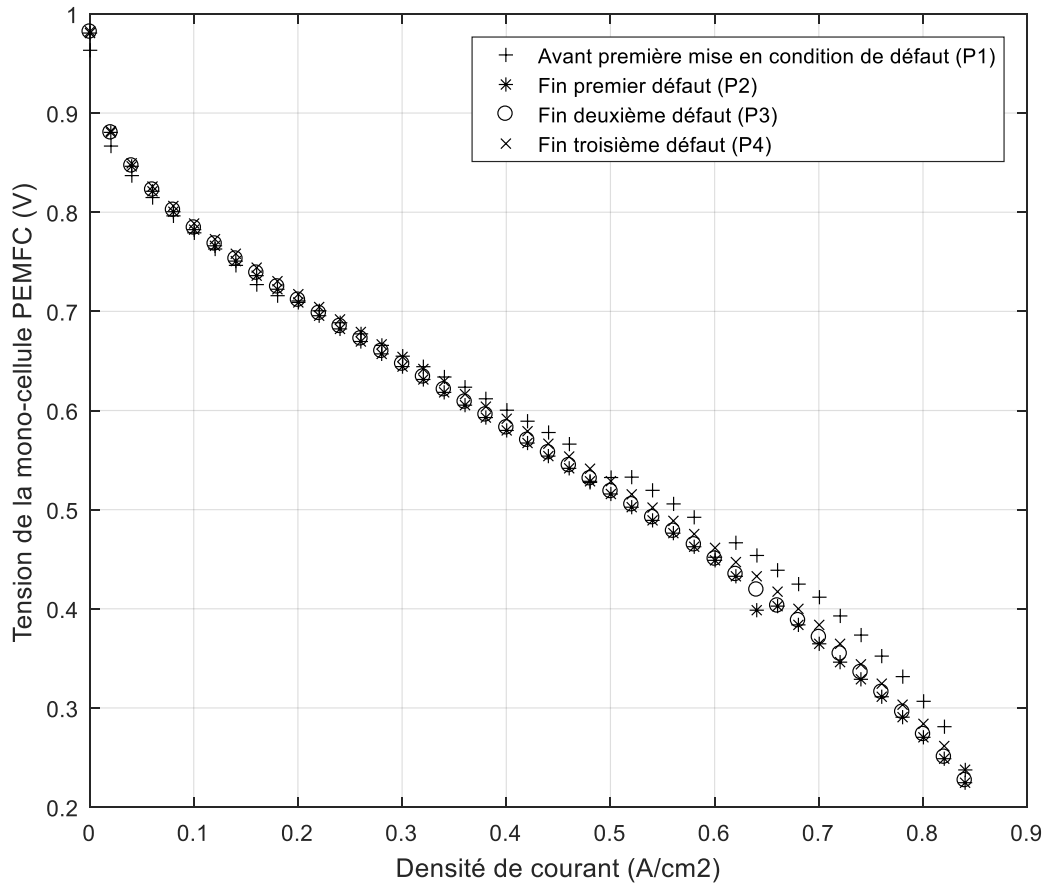


Figure V-XXXIV : Superposition des courbes de polarisation pour la deuxième phase d'essais de noyage

La courbe de polarisation P1 montre une nouvelle fois une plus faible valeur de tension dans la ZPPA en comparaison aux courbes P2, P3 et P4. Cela est dû à une plus faible condition d'hydratation de la PEMFC. A la fin de la polarisation P1, la PEMFC est suffisamment hydratée pour la suite des tests. La PEMFC est alors remise sur un point de fonctionnement nominal. A la fin du premier essai de noyage, la polarisation P2 montre une valeur V_{fc} plus élevée dans la ZPPA que pour P1. Ceci est le signe d'une meilleure hydratation de la membrane PEMFC. En revanche, une diminution de V_{fc} s'est produite dans la ZPPC. La fin du second essai et la polarisation P3 effectuée montre peu d'évolution par rapport à l'essai précédent. Le troisième et dernier ainsi que la polarisation P4 montre un regain de V_{fc} dans la ZPPO et la ZPPC. Ce phénomène est permis par le caractère réversible des effets du défaut de noyage que subi la PEMFC.

De la même manière que pour les essais précédents, les évolutions des distances entre les courbes de polarisation sont représentées sur la Figure V-XXXV. Lors du premier essai pour

$T_{diag} = 30 s$, une dégradation de plus de 10% est à noter en comparant de P1 avec P2. Les essais suivants ont permis une récupération de la cellule PEMFC et notamment pour l'essai avec $T_{diag} = 60 s$ qui permet un regain de fraîcheur de près de 5% (évolution entre P3 et P4). La tendance globale, représentée par l'évolution de la distance entre P1 et P4, indique une dégradation de l'ordre de 8% de la membrane PEMFC à l'issue de ces essais de noyage dans la ZPPC.

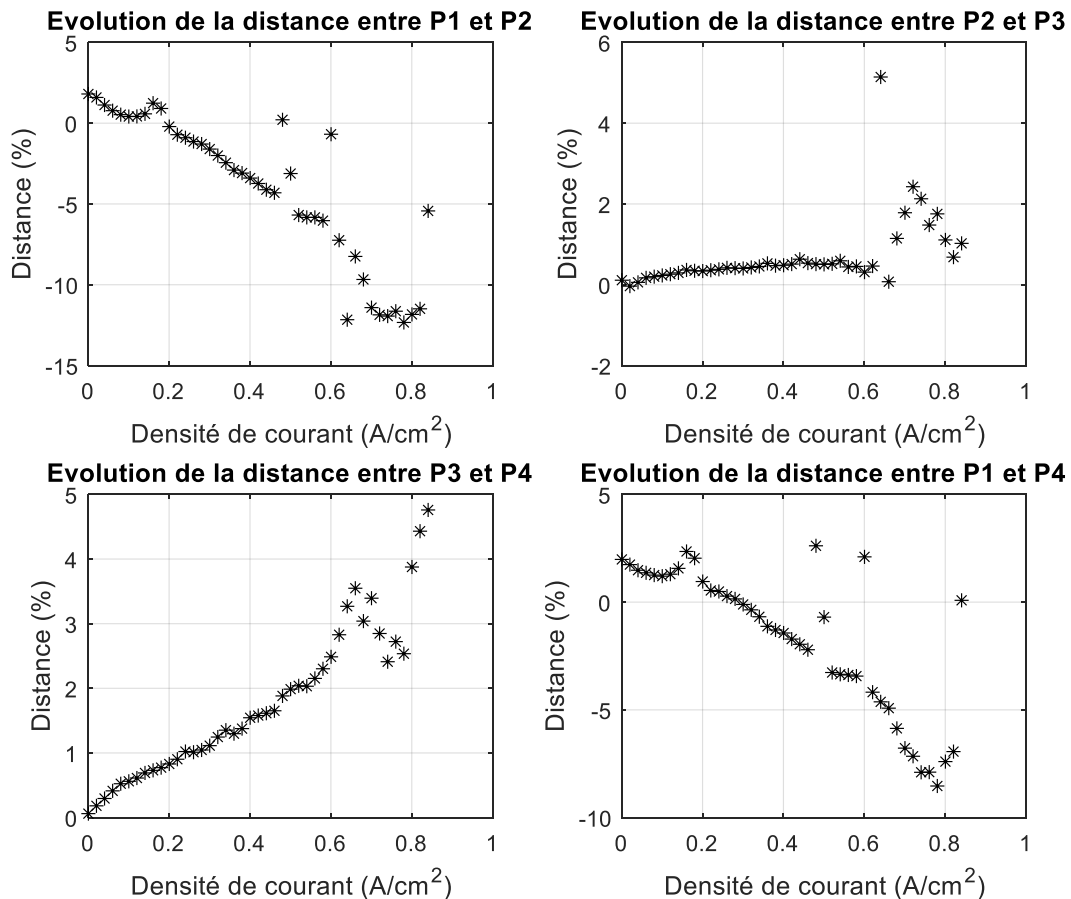


Figure V-XXXV : Evolution des distances entre chaque courbe de polarisation pour les essais de noyage à niveau de sévérité moyen.

Le Tableau V-16 permet de constater l'évolution des écarts entre chaque courbe de polarisation par le calcul des pentes dans les ZPPO. Les trois premières colonnes confirment ce qui est observé, une diminution de performance dans la ZPPC suite au premier essai et son maintien à la fin du second. Un regain de performance est confirmé lors du troisième essai. La quatrième colonne, montre l'écart entre la courbe de polarisation avant mise en conditions de défaut de noyage et celle faisant suite à la dernière mise en condition de noyage. Le constat est une baisse de performance amorcée dès la zone de pertes ohmiques. Le Tableau V-16 donne les valeurs des pentes dans les zones de pertes ohmiques pour chaque courbe de polarisation.

Tableau V-16 : Calcul des pentes dans les zones de pertes ohmiques pour chaque courbe de polarisation

	P1	P2	P3	P4
Pente dans la ZPPO	-0.612	-0.6425	-0.6425	-0.627

Le Tableau V-16 montre la diminution de la pente dans la ZPPO. Cette diminution est significative de pertes de performances et a lieu dès la fin du premier essai de noyage (P2). Lors du second essai (P3), la valeur de la pente se stabilise. Le troisième de noyage (P4) a quant à lui permis un regain de pente. Ainsi, en croisant les données d'écart et de pentes, il est possible de s'apercevoir que la stratégie AFTC telle qu'utilisée ne permet pas d'éviter des dégradations dues à l'apparition du défaut. Par contre, la stratégie permet de ralentir son effet dégradant en ramenant la PEMFC dans des conditions de fonctionnement sans défaut. Il est tout de même intéressant de noter que certaines stratégies d'atténuation permettent un regain de fraîcheur de la membrane. Le troisième essai de noyage (P4) montre, lors des tests avec atténuations *via* des décisions de faibles et moyennes amplitudes, un regain de performance. Ainsi, $T_{diag} = 60 s$ permet d'éviter la dégradation de la PEMFC.

Le Tableau V-17 est un récapitulatif des actions entreprises lors des essais de noyage à niveau de sévérité moyen.

Il a donc fallu 5 décisions à effet rapide sur le débit et une décision à effet différé sur T_{fc} pour une atténuation définitive du défaut de noyage lors de l'essai pour $T_{diag} = 30 s$. Pour AFTC1, Q_{O_2} est incrémenté une première fois à une valeur proche de 200 SCCM. Cependant, l'action est partiellement efficace car le défaut de noyage réapparaît et nécessite une seconde phase d'incrémentation de Q_{O_2} . Cette fois, celui-ci est incrémenté à une valeur proche de 730 SCCM. Le défaut est une nouvelle fois partiellement atténué et nécessite une nouvelle phase de correction autour de 730 SCCM. En parallèle, T_{fc} est incrémentée de 5°C passant de 55°C à 60°C. Deux dernières augmentations de Q_{O_2} à 300 puis 200 SCCM combinées à l'augmentation de T_{fc} permettent une atténuation définitive du défaut de noyage en l'espace de 22 min.

Tableau V-17 : Récapitulatif des actions menées lors du quatrième essai AFTC sur un noyage a sévérité moyenne

	Nombre d'action à effet rapide	Nombre d'action à effet différé	Consignes maximales des actions à effet rapide (SCCM)			Actions à effet différé	Délais du retour définitif en conditions sans défaut
AFTC1	5	1	2 x 200	1 x 300	2 x 730	1 x +5°C	22 min
AFTC2	6	1	4 x 200		2 x 730	1 x +5°C	10 min
AFTC3	4	1	3 x 200		1 x 730	1 x +5°C	25 min

Le deuxième essai (AFTC2) a été effectué pour $T_{diag} = 15 s$. La première incrémentation de Q_{O_2} atteint une valeur proche de 730 SCCM. La correction est efficace mais le défaut de noyage

réapparaît. Le débit est alors incrémenté à deux reprises à environ 200 SCCM. L'amplitude des incréments est faible du fait des atténuations précédentes *via* Q_{O_2} . Le défaut ne s'atténuant pas suffisamment *via* ces actions, Q_{O_2} est de nouveau incrémenté autour de 730 SCCM et une action à effet différé est parallèlement déclenchée. T_{fc} est incrémentée de 5°C la menant à 60°C. Le défaut s'atténue un peu mais est de nouveau diagnostiqué car l'effet de la température n'est pas immédiat. Deux nouvelles incrémentsations à un peu plus de 200 SCCM couplées à l'effet de l'augmentation de la température permettent une atténuation définitive du défaut en 10 min. Le Tableau V-17 récapitule les actions déclenchées lors de ce deuxième essai.

Le troisième essai (AFTC3) a été réalisé pour $T_{diag} = 60$ s. La première décision à effet rapide génère une incrémentation de Q_{O_2} jusqu'à 730 SCCM. L'action est maintenue quelques minutes ce qui permet l'évacuation de l'eau encombrant les serpentins d'alimentation. La seconde augmentation de débit dépasse légèrement 200 SCCM. L'action ne permettant une atténuation durable du défaut, Q_{O_2} est de nouveau incrémenté autour de 200 SCCM. Le module de décision incrémente dans le même temps T_{fc} la faisant passer à 60°C. Le changement de température de la pile ne permet pas une atténuation immédiate du défaut de noyage. Une dernière action à effet rapide est donc déclenchée et incrémente Q_{O_2} à environ 200 SCCM. L'augmentation de la température couplée à la dernière incrémentation permet l'évaporation de l'eau des serpentins. Le défaut de noyage est ainsi définitivement atténué au bout de 25 min. Le Tableau V-17 récapitule des données liées au troisième essai.

Les essais menés lors d'occurrence de noyages à faible et moyennes sévérités permettent une comparaison entre ces deux niveaux de correction. En effet, les comparaisons ont pour l'instant été effectuées uniquement par rapport à T_{diag} . A présent, l'objectif est d'effectuer une nouvelle comparaison et une interprétation entre les essais en fonction du niveau de sévérité. Les défauts ayant été atténués sur la même période de déclenchement sont donc comparables.

Pour l'atténuation d'un défaut basée sur $T_{diag} = 30$ s, il est nécessaire d'effectuer un plus grand nombre de décisions à effet rapide que lors d'un noyage à sévérité moyenne. L'action à effet différé est quant à elle déclenchée avec cinq minutes d'avance dans le cas de la sévérité moyenne. Le délai de retour définitif en conditions sans défaut se fait en une vingtaine de minutes dans les deux essais. Le temps d'atténuation définitif étant presque le même, l'intensité des décisions a peu d'influence sur l'atténuation du défaut.

Concernant la période $T_{diag} = 15$ s, le nombre d'actions à effet rapide est supérieur dans le cas des décisions à moyennes amplitudes. Le nombre d'action à effet différé est identique et sont déclenchées cinq minutes après la première détection du défaut. Dans les deux cas, l'atténuation définitive du défaut se fait au bout d'environ 10 min. Une fois de plus, l'intensité de la décision n'a pas d'influence sur l'atténuation du défaut.

Lors des essais d'atténuation avec $T_{diag} = 60$ s, le nombre d'actions à effet rapide est inférieur pour la sévérité moyenne. De plus, trois actions sur quatre se font autour de 200 SCCM ce qui représente une plus faible variation de pression autour de la membrane. L'essai à sévérité moyenne permet l'utilisation d'une seule décision à effet différé qu'est l'augmentation de la température de la PEMFC. L'atténuation définitive du défaut de noyage se fait au bout de 25 min pour l'essai à sévérité moyenne contre 65 min pour l'autre.

Dans certains cas, l'intensité des décisions pour l'atténuation n'a pas d'influence sur le délai de l'atténuation définitif. En effet, les essais montrent qu'une forte incrémentation du débit sur une

petite période ne peut pas agir efficacement et n'évacue pas suffisamment d'eau. Donc, à chaque décision à effet rapide, il existe un temps minimal de son application pour une efficacité optimale. Ceci est corroboré par les essais pour $T_{diag} = 60 s$. En effet le choix de cette période associé à une décision de moyenne amplitude, laisse le temps à l'action sur le débit d'agir efficacement. Ainsi plus le débit est élevé sur une durée suffisamment longue, meilleure est l'évacuation de l'eau accumulée dans les serpentins d'alimentation cathodiques. Le problème du T_{diag} ne se pose pas pour les décisions à effet différé car elles sont définitives et ont donc le temps d'agir.

C. Validation de la stratégie AFTC sur le défaut d'assèchement de membrane

a. Génération d'un défaut d'assèchement à courant constant atténué par des décisions de faibles amplitudes

L'AdD Figure I-VII montre qu'il existe quatre combinaisons pouvant mener au défaut d'assèchement de membrane. Pour les essais, la combinaison faisant intervenir quatre événements de base est choisie : l'augmentation du débit d'entrée de la PEMFC permet une bonne évacuation de l'eau des serpentins limitant ainsi l'hydratation de la membrane. La température de la PEMFC est elle aussi augmentée pour permettre une meilleure évaporation de l'eau générée dans la pile. Enfin, l'humidité relative des gaz en entrée de la PEMFC est diminuée ce qui permet de limiter l'apport exogène d'eau vers la membrane.

Seul le premier cycle énoncé plus haut est testé : trois périodes de déclenchement du diagnostic et deux niveaux sévérités de défaut sont considérés. Par souci de synthèse et pour faciliter la lecture du document, uniquement les essais pour $T_{diag} = 30 s$ sont présentés dans cette section.

Période de diagnostic pour le cycle 1 : 30s à faible sévérité

La Figure V-XXXVI représente la mesure de V_{fc} de la mono-cellule PEMFC superposée à la mesure de ΔP_{cath} (AFTC4). Durant les cinq premières minutes, V_{fc} est stable et correspond à un fonctionnement en mode sans défaut. Le changement du point de fonctionnement engendre une baisse de performance car T_{fc} est incrémenté. Cette incrémentation de T_{fc} vise à faire évaporer l'eau contenue dans la membrane PEMFC. A cet instant le défaut d'assèchement n'est pas encore apparu car la membrane est encore hydratée. Il faut donc attendre que celle-ci se décharge de son eau.

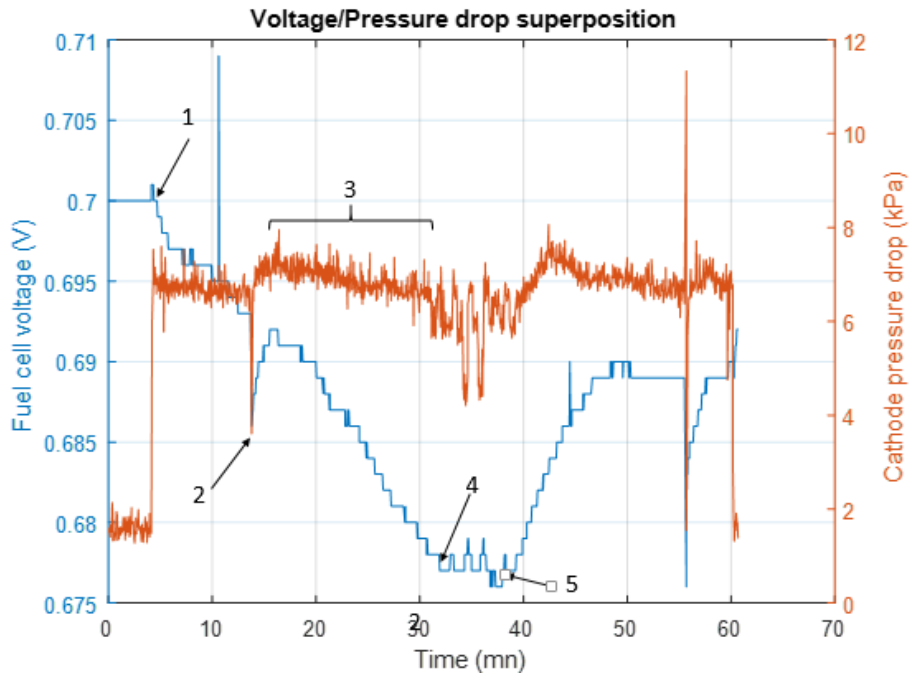


Figure V-XXXVI : Superposition de V_{fc} à ΔP_{cath} (AFTC4)

Cinq marques apparaissent sur le graphe précédent. Chacune d'entre elles est détaillée ci-après.

Point 1 :

Correspondant au moment où les conditions normales de fonctionnement sont modifiées pour permettre l'apparition du défaut d'assèchement.

Point 2 :

Le régulateur de contre-pression s'ouvre de manière inopinée et engendre la dépressurisation de la chambre cathodique. Cet évènement inattendu accélère l'évacuation de l'eau contenue dans les serpentins.

Point 3 :

Ce point montre une zone où la tendance de ΔP_{cath} est décroissante. Ceci est le signe d'une évacuation des serpentins d'alimentation des gouttelettes d'eau liquide.

Point 4 :

La première décision à effet rapide consistant à la diminution de Q_{O_2} est enclenchée.

Point 5 :

La première décision à effet différé sur T_{fc} est effectuée.

L'algorithme de décision effectue toujours une décision à effet rapide avant une décision à effet différé. Celles-ci sont uniquement effectuées sur les débits (Cf. cycle 1). La Figure V-XXXVII expose la série de décisions à effet rapide appliquée après l'apparition d'un défaut d'assèchement.

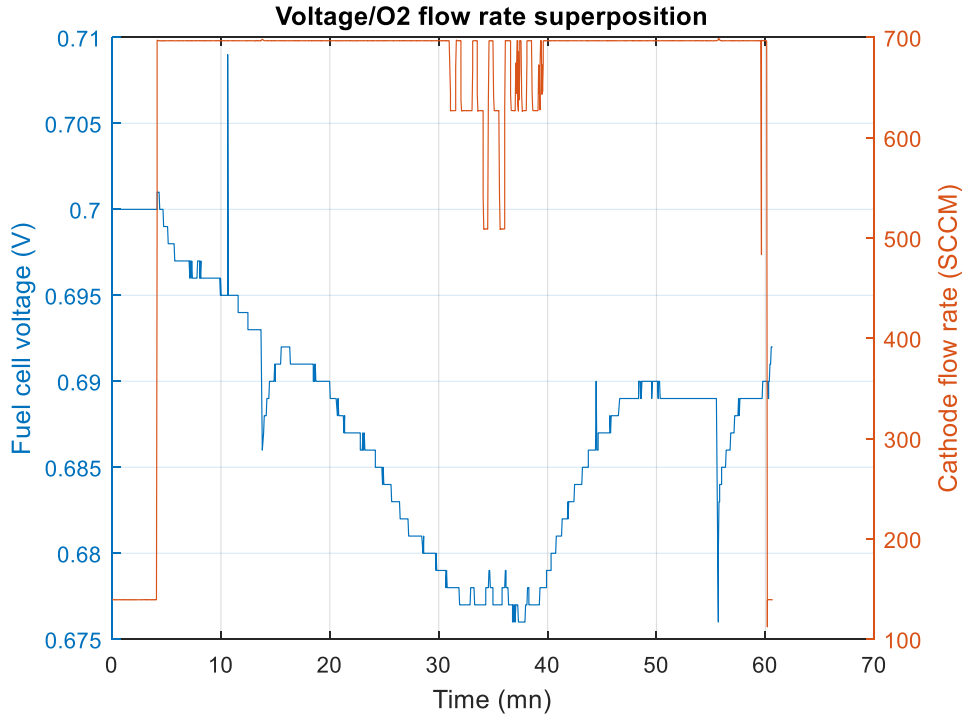


Figure V-XXXVII : Superposition de V_{fc} à Q_{O_2} (AFTC4)

Sur la Figure V-XXXVII, lors d'une détection d'un défaut d'assèchement, une décrémentation de Q_{O_2} est toujours effectuée. Il est par ailleurs possible de constater que le défaut d'assèchement est diagnostiqué à un peu plus de 30 min du changement du point de fonctionnement. Cette détection engendre une diminution de Q_{O_2} d'un peu moins de 100 SCCM . V_{fc} se stabilise car la diminution du débit permet une moindre évacuation d'eau liquide générée par les réactions chimiques. Le contenu en eau de la membrane arrête donc de décroître. Q_{O_2} est ensuite réinitialisé à sa valeur précédente ce qui correspond au retour sur le point de fonctionnement qui a permis l'apparition du défaut d'assèchement de membrane.

Une nouvelle action à effet rapide diminuant le débit est déclenchée. L'effet est le même que l'action précédente : arrêt de la chute de V_{fc} . Le défaut n'est donc plus détecté et les conditions opératoires permettant la génération du défaut sont retrouvées lors de la réinitialisation de Q_{O_2} . V_{fc} chute une nouvelle fois et deux décrémentations de Q_{O_2} autour de 500 SCCM sont réalisées. L'effet de cette action permet l'arrêt de la chute de V_{fc} . Cette phase d'atténuation n'est cependant pas plus satisfaisante que les précédentes.

La quatrième action à effet rapide est accompagnée d'une décision à effet différé consistant à diminuer T_{fc} . La Figure V-XXXVIII est une superposition de l'évolution de V_{fc} à T_{fc} . L'action à effet rapide est aussi peu efficace que pour les précédentes actions. T_{fc} est abaissée de 5°C et passe de 70°C à 65°C . L'objectif de cette action consiste à diminuer l'évaporation de l'eau et donc d'augmenter le contenu en eau de la membrane. L'effet de cette décision permet un regain de définitif sur V_{fc} . Le défaut d'assèchement n'est ensuite diagnostiqué. La combinaison de ces actions permet une atténuation du défaut en environ 10 min .

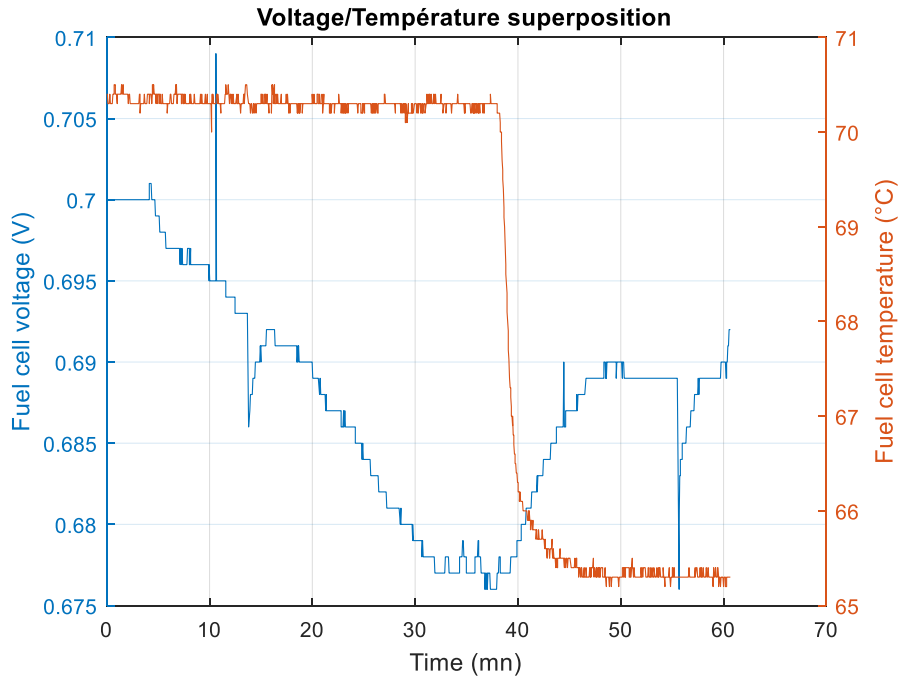


Figure V-XXXVIII : Superposition de V_{fc} à T_{fc} (AFTC4)

Ainsi, sept décisions à effet rapide et une décision à effet différé permettent l'atténuation du défaut d'assèchement. Les autres essais d'atténuation de l'assèchement sur un faible niveau de sévérité et à courant constant sont en annexe.

b. Analyse des essais d'assèchement à faibles sévérités

Note : $T_{diag} = 15 s$ correspond à AFTC5, $T_{diag} = 30 s$ correspond à AFTC4, $T_{diag} = 60 s$ correspond à AFTC6.

Métrique 1 : Nombre d'actions correctrices

Du point de vue du nombre d'actions déclenchées lors de ces nouveaux essais, $T_{diag} = 60 s$ est la valeur la plus pertinente.

Tableau V-18 : Nombre d'actions correctrices (métrique 1)

$T_{diag} (s)$	À effet rapide	À effet différé
15	14	3
30	7	1
60	4	1

Métrique 2 : Amplitudes des actions correctrices

L'amplitude la moins éloigné du point de fonctionnement initial est 520 SCCM et T_{fc} a été augmentée de $5^{\circ} C$. RH% est incrémenté de 10% pour $T_{diag} = 15 s$. Ainsi, $T_{diag} = 30 s$ et $T_{diag} = 60 s$ sont les valeurs les plus pertinentes du point de vue de cette métrique.

Tableau V-19 : Nombre d'actions correctrices (métrique 2)

$T_{diag} (s)$	À effet rapide	À effet différé	
15	420 sccm	-5°C	+10% (RH%)
30	520 sccm	-5°C	
60	520 sccm	-5°C	

Métrique 3 : Durée totale sous l'influence des actions correctrices

Le Tableau V-20 montre que la période $T_{diag} = 30 s$ est la meilleure du point de vue de la durée totale des actions à effet rapide car elle permet l'atténuation plus rapide du défaut de noyage.

Tableau V-20 : Durée des actions correctrices à effet rapide (métrique 3)

$T_{diag} (s)$	À effet rapide
15	8 min
30	5 min
60	8 min

Métrique 4 : Durée avant retour en condition de fonctionnement sans défaut

La métrique suivante est utilisée pour comparer le temps nécessaire entre chaque phase d'essai pour un retour en conditions sans défaut. La détermination du délai nécessaire pour le retour en conditions sans défaut a pour point de départ le déclenchement de la première action à effet rapide et comme point d'arrivée la dernière. Pour ce test, $T_{diag} = 15 s$ est la valeur la plus efficace.

Tableau V-21 : Durée avant retour en conditions sans défaut (métrique 4)

$T_{diag} (s)$	Durées (min)
15	7
30	10
60	9

Métrique 5 : Nombre de capteurs utilisés dans chaque essai

Les essais à $T_{diag} = 30 s$ et $T_{diag} = 60 s$ font intervenir des changements sur Q_{O_2} et T_{fc} . Ces deux valeurs de T_{diag} sont donc les plus pertinentes.

Tableau V-22 : Nombre de capteurs utilisés

$T_{diag} (s)$	À effet rapide	À effet différé
15	1	4
30	1	1
60	1	1

La dernière métrique est l'analyse l'impact du processus d'atténuation du défaut sur la dégradation de la PEMFC. Les courbes de polarisation ne sont pas disponibles car elles n'ont pas été incluses dans le protocole de test. De plus, la membrane PEMFC subissant des contraintes mécaniques lors des phases d'atténuations à effet rapide, imposer un fort courant et donc un fort débit pourrait participer à endommager la membrane.

En revanche, la notion de contraintes mécaniques fait aussi allusion aux cyclages dont fait l'objet la membrane PEMFC *via* les décisions. La première métrique, sur le nombre d'action d'atténuation, montre un fort cyclage par un nombre de variations plus élevée sur l'essai à $T_{diag} = 15 s$. Ce cyclage peut, à terme, endommager de manière irréversible la membrane PEMFC.

Le Tableau V-23 récapitule les données liées aux essais d'assèchement pour des décisions de faibles intensités.

Tableau V-23 : Récapitulatif des actions menées lors du premier essai AFTC sur un assèchement à faible sévérité

	Nombre d'action à effet rapide	Nombre d'action à effet différé	Consignes maximales des actions à effet rapide (SCCM)			Actions à effet différé			Délais du retour définitif en conditions sans défaut
AFTC7	7	1	5 x 620	1 x 520		-5°C			10 min
AFTC8	14	3	5 x 620	4 x 520	5 < 420	-5°C	+10%	-50 SCCM	7 min
AFTC9	4	1	3 x 620	1 x 520		-5°C			9 min

Le critère du nombre d'actions d'atténuation déclenchées par la stratégie AFTC sur la série de test avec $T_{diag} = 60 s$ semble être le meilleur. Le choix de cette période pour l'application de la stratégie est dû au faible nombre d'actions nécessaires pour l'atténuation définitive du défaut. Cependant ce résultat est à prendre avec précaution. En effet, une grande valeur de T_{diag} signifie qu'il existe de longues phases de fonctionnement de la PEMFC sans vérification de son état de santé. Il y a donc un compromis à faire entre la vitesse d'atténuation du défaut (*i.e.* délais d'atténuation définitif) et le nombre d'actions déclenchées et T_{diag} .

En revanche, l'action de modification de T_{fc} a un effet non négligeable sur les performances de la PEMFC. En effet à chaque décrémentation de température, la PEMFC quitte en quelques minutes la zone de défaut.

Le déclenchement de l'outil de diagnostic à $T_{diag} = 15 s$ est trop court pour les changements opérés sur la température et l'humidité relative soient effectifs. Le défaut se retrouve tout de même atténué, mais a nécessité une trop forte modification du point de fonctionnement.

Le choix de T_{diag} dépend donc de plusieurs facteurs. La nature du défaut, si les contraintes temps-réels pour son atténuation sont *souples* (ex : défaut pouvant être atténué dans un intervalle temporel de *10 min*, ce qui ne nécessite pas un processus diagnostic déclenché toutes les secondes. On parle alors de contraintes temps-réel *souples*). La fraîcheur de la membrane PEMFC est aussi un facteur clef pour le choix de T_{diag} , car plus celle-ci est dégradée plus elle

déviara facilement vers un fonctionnement en défaut. La nature et les dynamiques des actions d'atténuation entreprises sont aussi des indicateurs pour le choix d'un T_{diag} . En effet, comme l'ont montré les essais, les dynamiques imposées par un changement de débit sont nettement plus rapides que celle imposées par des changements de température. Ainsi avoir un T_{diag} très petit au regard des dynamiques imposées par une action, engendre des prises de décisions supplémentaires et non utiles et potentiellement dégradantes par effets de cyclage.

D. Analyse et discussion

Tous les essais effectués lors de cette section de validation de l'outil d'atténuation des défauts de noyage et d'assèchement de membrane sont résumés dans le Tableau V-24. Les essais réalisés sont symbolisés par des 'x'. Les essais du cycle 1 apparaissent en *Annexe C*. Le cycle 2 n'apparaît pas en *Annexe C* car il ne permet pas une atténuation du défaut, au contraire une sévère dégradation de la membrane PEMFC apparaît. En effet l'action à effet différé étant redondante par rapport à l'action à effet rapide en les cycles 2 et 3 (*Cf. chapitre 5/Protocole expérimental*) ne sont effectués. Ces cycles ont donc fait l'objet d'un unique test, non concluant pour l'atténuation de défaut. La première action à effet différé des cycles 1 et 5 est sur T_{fc} . L'efficacité de cette grandeur sur l'atténuation des défauts est suffisamment efficace pour qu'il ne soit pas nécessaire de tester le cycle 5.

Tableau V-24 : Essais d'atténuation effectués

	Noyage			Assèchement de membrane		
	Faible	Moyen	Elevé	Faible	Moyen	Elevé
Cycle 1	x	x		x	x	
Cycle 2	x	x				
Cycle 3						
Cycle 4	x	x				
Cycle 5						

Les essais d'atténuation du défaut d'assèchement se sont limités au cycle 1. L'assèchement de membrane ne pouvant être estimé qu'au-travers la combinaison d'une baisse de tension et de chute de pression, le choix a été fait de limiter ces essais car ils sont dégradants pour la membrane. Il est aussi à noter que plusieurs essais d'assèchement ont été réalisés et chacun d'eux a rapidement et sévèrement dégradé la PEMFC. Le test du premier cycle permet donc de limiter les dégradations de la cellule, permettant ainsi l'interprétation des résultats des essais d'atténuation.

Les essais ont montré l'efficacité de la température pour l'atténuation des deux défauts. L'intensité des prises de décision à effet rapide est aussi un facteur important pour l'atténuation du défaut et sur le moment du déclenchement de l'action à effet différé. En effet, plus l'amplitude de la décision à effet rapide est élevée, plus la quantité d'eau liquide évacuée est importante et plus l'atténuation est efficace. Les temps de déclenchement de l'outil de

diagnostic a aussi une importance non négligeable. Les tests montrent que si T_{diag} est trop petit, l'efficacité de l'action à effet rapide est très réduite ce qui engendre le déclenchement rapide d'une action à effet différé. Ensuite, un petit T_{diag} engendre aussi une séquence rapide de changements de débits faisant subir un stress mécanique important à la membrane. Le choix d'une valeur optimale de T_{diag} dépend donc de plusieurs critères. Le premier est associé à la nature du défaut. En effet, une application trop courte d'une action d'atténuation peut ne pas avoir d'effet sur le défaut (ex : diminution du débit d' O_2 pour réduire l'évacuation de l'eau liquide présente dans la PEMFC de l'ordre de quelques secondes, est trop court pour permettre la réhydratation de la membrane PEMFC). Le second critère fait référence aux cyclages. Ce phénomène apparaît lorsqu'une petite valeur de T_{diag} (au regard de la dynamique du défaut) est choisie. Le choix du T_{diag} peut aussi dépendre de la nature de la variable manipulée. En effet si uniquement des variables au temps de réponse supérieures à la minute sont manipulées, il est inutile d'avoir un T_{diag} inférieur à la minute.

Cependant bien que l'action sur T_{fc} est efficace, elle engendre une perte de performance non négligeable dans le cas d'une baisse de température. Il existe donc un compromis à trouver entre la perte de performance due au changement de point de fonctionnement et la capacité d'atténuation de la variable de commande. Ensuite, les actions déclenchées sont faites de manière séquentielle car elles sont traitées sous forme de SED (Système à Evénements Discrets). Donc, il existe potentiellement une combinaison optimale de modification de variables permettant une moindre perte de performance et une bonne atténuation du défaut.

VI. Conclusion générale

La première partie de ce manuscrit a permis la mise en contexte et la définition des événements defectueux pouvant apparaître durant le fonctionnement de la PEMFC. Il apparaît qu'il existe plusieurs types de défauts pouvant dégrader les performances de la PEMFC ; chacun d'entre eux possède un temps d'établissement différent, générant des modes de fonctionnement pouvant mener à une baisse de performance. Par exemple, le défaut de sous-alimentation qui correspond à une sous-alimentation locale ou globale en gaz de la PEMFC résulte du manque de réactif au site réactionnel. Dans ce cas, de nouvelles réactions se produisent et dégradent de manière irréversible la PEMFC. Il est donc nécessaire d'utiliser des outils de diagnostic adaptés à la criticité de ce type de défaut. D'autres défauts, à temps d'établissement plus long, peuvent aussi apparaître comme le noyage cathodique ou l'assèchement de membrane avec des temps d'établissement allant de quelques minutes à quelques dizaines de minutes. Les arbres de défaillance issus de la littérature et appliquée aux défauts de noyage et d'assèchement de membrane permettent d'en comprendre les mécanismes et les variables influentes.

Pour la génération d'un défaut de noyage cathodique l'arbre de défaillance montre une possibilité d'une génération d'un noyage cathodique par condensation d'eau dans la PEMFC ou dans les auxiliaires. Provoquer une condensation d'eau liquide à l'intérieur de la PEMFC nécessite un changement de point de fonctionnement, ce qui modifie les performances du système. Une condensation d'eau en amont de la PEMFC, dans la canalisation d'alimentation en dioxygène, permet de ne pas changer le point de fonctionnement et de réellement constater l'effet d'un noyage. Suite à la mise en condition de défaut, la prochaine étape a consisté en la mise en œuvre d'un outil d'atténuation.

Pour la mise en place de l'outil d'atténuation de défaut, il est nécessaire de mettre en évidence les variables à manipuler et leurs interactions avec le système (*i.e.* réaction du système lors une modification d'une des variable manipulée). Pour l'atténuation d'un noyage cathodique et d'un assèchement de membrane, le débit de dioxygène, l'humidité relative et la température de la pile sont modifiés. Les interactions qu'ont ces variables dans leur environnement est mis en évidence *via* une analyse structurelle de défaut (ASD). Cette information est importante car elle donne des informations qualitatives sur la manière dont l'atténuation d'un défaut peut déstabiliser le fonctionnement d'autre composants et plus généralement la globalité du système. Ainsi les arbres de défaillance et les graphes de structure (issus de l'ASD) donnent à la fois les informations sur les variables à manipuler lors de l'apparition d'un défaut et quels sont les composants du système qui seront impactés par ces changements.

L'atténuation des défauts de PEMFC nécessite la mise en place d'une stratégie de commande tolérante aux défauts (FTC). La littérature fait apparaître des stratégies de FTC passives et actives. Les stratégies passives sont limitées par le nombre de défauts pouvant être considérés lors de leurs synthèses. Les stratégies actives sont utilisées dans ces travaux car elles permettent l'atténuation d'un plus grand nombre de défauts. Ce type de stratégie fait intervenir des outils de diagnostic, de décision et de contrôle.

La bibliographie propose plusieurs outils de diagnostic adaptés aux natures différentes des défauts. Les stratégies de contrôle sont elles aussi nombreuses en littérature mais comme pour les outils de diagnostic ont peu été utilisées dans des FTC. C'est donc une stratégie active (AFTC) et la création d'un algorithme de décision, permettant de faire le lien entre le diagnostic et le contrôle, qui a été utilisé pour l'atténuation des défauts de noyage cathodique et d'assèchement de membrane de PEMFC.

L'algorithme de décision a été construit en deux parties. La première, niveau des décisions à effet rapide, permet une action rapide sur le défaut. La deuxième, niveau des décisions à effet différé, permet aussi d'atténuer le défaut, ainsi que le nombre de fois qu'il réapparaît. La

combinaison de ces deux niveaux de décisions permet le fonctionnement de la PEMFC en préservant le plus longtemps possible ses performances en condition sans défauts.

Pour la validation expérimentale, les essais réalisés ont consisté à mettre une mono-cellule PEMFC en situation de défaut de noyage cathodique puis d'assèchement de membrane. Suite à ces conditions de fonctionnement, la stratégie AFTC fut appliquée suivant trois périodes de déclenchement du processus de diagnostic. Les essais expérimentaux montrent que la période de déclenchement du diagnostic est un facteur clef pour l'atténuation du défaut mais aussi sur les dégradations de la PEMFC : plus la période de déclenchement du diagnostic est petite, plus rapidement le défaut est détecté et isolé. Cela permet le déclenchement rapide d'une action d'atténuation. Cependant, cette action est rafraîchie toutes les périodes de déclenchement, ce qui influence la durée pendant laquelle la PEMFC est soumise au processus d'atténuation de défaut. Il y a donc un compromis à trouver entre l'intensité de l'action entreprise et le temps de déclenchement du diagnostic pour une atténuation durable et une dégradation minimale. En ce qui concerne l'atténuation du défaut de noyage cathodique, le choix a porté sur une génération d'eau liquide à partir des auxiliaires, en amont de la pile à combustible. Ce processus est facilement réalisable et assure que la perte de performance du système est réellement due à un défaut de noyage. Une prochaine étape pour le test de ce défaut consiste donc à le générer d'une manière différente, pour le test de la généralité de la stratégie.

Les travaux menés dans cette thèse ont montré qu'il existe des compromis à faire entre la vitesse d'atténuation des défauts, la dégradation subie par la PEMFC, la consommation de réactif et le maintien des performances. Pour cela, plusieurs modes d'utilisation de l'outil de décision ont été testés, mais aucun changement d'outils de diagnostic et de contrôleurs n'a été effectué. Pour compléter la démarche de commande tolérante aux défauts active, la mise en place d'outils de diagnostic donnant l'information de la sévérité d'un défaut est pertinent. L'ajout de nouveaux contrôleurs peut aussi participer à l'amélioration de la stratégie par une diminution de leurs sensibilités à certaines perturbations. Il y a donc une réflexion à mener sur la meilleure combinaison d'outils dans chaque module. Le choix de ces outils dépend de la nature des défauts. En effet, le temps d'établissement des défauts et leur potentiel dégradant sont à prendre en considération pour le choix des outils à utiliser.

Outre les changements d'outils qui sont à effectuer dans chacun des trois modules, des métriques ont été mises en place et ont permis de quantifier l'efficacité de la stratégie d'atténuation par la comparaison de plusieurs modes d'utilisation du module de décisions. De nouvelles métriques peuvent être mises en place pour une quantification complète de la stratégie (ex : métriques sur les dégradations, mais cela nécessite d'autres types de caractérisation de la cellule (spectroscopie par impédance électrochimique par exemple), ou encore des métriques permettant de quantifier la résilience de la stratégie suite aux faux diagnostics).

Le banc d'essai utilisé ne permet pas une utilisation autre qu'une mono-cellule de pile à combustible. Il est par ailleurs limité en temps d'échantillonnage, ce qui ne permet pas le diagnostic de défauts à temps d'établissement très court (inférieur à 1s). L'évolution du banc d'essai vers un système permettant l'accueil d'un stack et ayant un temps d'échantillonnage plus petit pourrait montrer la généralité et la robustesse de la stratégie. En effet, l'application de l'outil d'atténuation sur le changement d'échelle mono-cellule - stack est à explorer pour une validation plus large de la démarche.

Les essais d'atténuation de défaut ont montré qu'un changement de point de fonctionnement (transitoire (à effet rapide) ou permanent (à effet différé)), modifie les performances de la pile à combustible. Chacune des variables manipulées modifie différemment ces performances. Pourtant ces dégradations doivent, à terme, être considérées pour le maintien des performances de la pile à combustible. De plus, un changement de point de fonctionnement trop important (*i.e.* une diminution trop forte du débit d'oxygène pour l'atténuation d'un assèchement de

membrane menant à une sous-alimentation du système) peut mener le système dans une situation proche d'un nouveau défaut (autre que celui qui est en cours d'atténuation).

La section suivante présente quelques perspectives pour l'amélioration des travaux menés dans cette thèse.

VII. Perspectives

Cette section a pour objectif de revenir sur les hypothèses effectuées durant ces travaux et à proposer des outils permettant de les lever. En effet, la phase de validation de l'architecture AFTC a révélé un manque de considération de certains modes de fonctionnement. Ainsi, les modules de diagnostic, de décision et de contrôle font l'objet d'analyse critiques dans cette partie.

A. Hypothèses sur les outils de diagnostic

a. Etat de fraîcheur des AME

Les 5 AME utilisées ont fait l'objet de plusieurs essais FTC. Le point de fonctionnement nominal de celles-ci étant inconnu, plusieurs points de fonctionnement furent testés. Le pallier de $20 A$ sur lequel les essais ont été effectués fut un bon compromis entre une génération suffisante d'eau liquide permettant l'apparition du défaut de noyage cathodique et un débit suffisant pour l'évacuation de l'eau de réaction lors de la condition de défaut d'assèchement.

Limitations

Il existe des débits limites au-delà desquels des dégradations irréversibles de la PEMFC surviennent. Par exemple, le processus de reconstitution d'une cellule (AME + plaques mono polaires) induit l'absence de spécifications pour un fonctionnement nominal de la mono-cellule. Ce manque de connaissance est préjudiciable pour les premières cellules testées. La Figure VII-I qui est une photographie d'une AME déchirée par l'application d'un débit trop élevé.

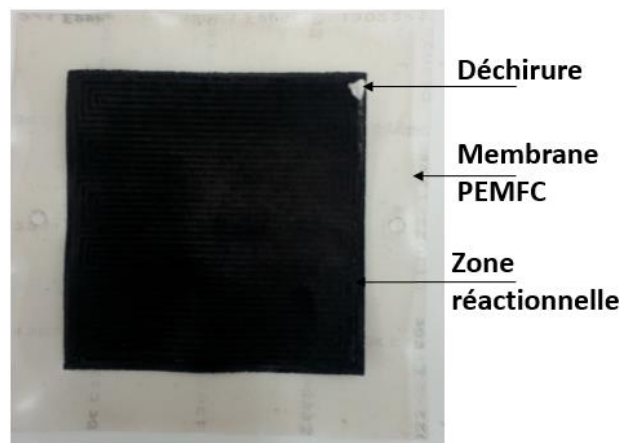


Figure VII-I : AME déchirée suite à un trop fort débit

L'application de consignes inadaptées pour des atténuations de défauts font émerger la problématique de « l'état de santé » (*SoH*) des AME. La notion de *SoH*, telle qu'elle est considérée dans le cadre de ces travaux, concerne la perte de performance irréversible d'une PEMFC due à une ou plusieurs dégradations de l'AME. En effet, la membrane PEMFC, les couches de diffusion ou les surfaces catalytiques sont sujettes aux dégradations provoquant une perte de performance globale et observable par une diminution de la tension aux bornes de la PEMFC. Ainsi, la perte irréversible de performances visible sur le signal de tension et due aux dégradations est interprétée comme étant une diminution de la *SoH* de l'AME.

Hypothèse

Par souci économique et pour celles n'ayant pas atteint leur fin de vie, les AME ont été ré-utilisées autant que possible pour un même défaut. La *SoH* de ces AME varie suffisamment peu pour leurs utilisations répétées.

Solutions

Le processus de diagnostic utilisé lors de ces travaux ne prend pas en considération l'évolution de la *SoH* de l'AME. Son interprétation des phénomènes defectueux est basée sur une AME considérée comme saine, mais s'éloigne de la réalité par les dégradations subies par cette AME. En effet, le changement des conditions opératoires dues aux dégradations modifie le comportement de la PEMFC. Pour cette raison, la mise en place d'un outil permettant d'estimer l'évolution la *SoH* est nécessaire à l'amélioration de l'efficacité de l'architecture. La Figure VII-II représente l'architecture AFTC incluant l'outil d'estimation de la *SoH* de la PEMFC.

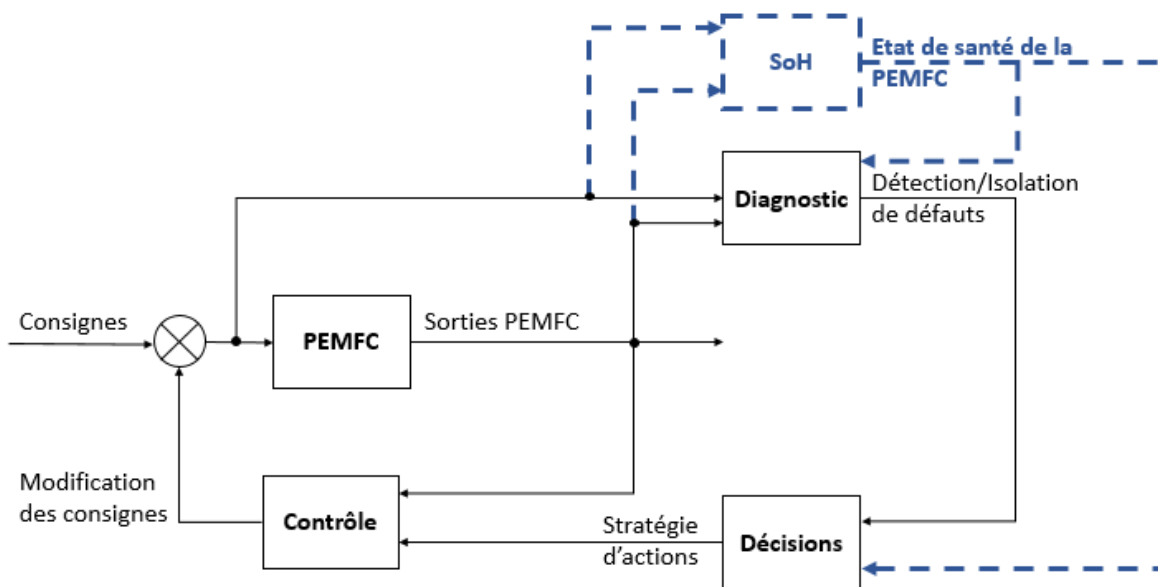


Figure VII-II : Architecture AFTC incluant un outil d'estimation de la *SoH* d'une PEMFC

b. Détection des défauts

Lors de ces travaux, le choix a été fait de considérer uniquement les défauts de noyage cathodique et d'assèchement de la membrane polymère. Il existe quatre raisons pour ce choix :

- La simplification des essais par une diminution du nombre de défauts à traiter.
- La disponibilité d'outil de diagnostic de ces deux défauts.
- Les défauts choisis sont les plus faciles à générer.
- Les défauts générés sont réversibles et le protocole de génération de ces défauts utilisé facilite leur génération.

Limitations du diagnostic des défauts

L'utilisation d'un outil de diagnostic non générique, implique une utilisation d'une AFTC non générique. Ensuite, le protocole de génération du défaut peut provoquer l'apparition d'incertitudes sur les résultats de diagnostic. Dans le cas des essais réalisés, la modification de la pression partielle de la vapeur d'eau et de la vapeur saturante en amont de la PEMFC, a

permis une meilleure maîtrise de la génération de défauts. Ceci a été possible car le banc d'essais est équipé d'un ballon d'humidification et d'une ligne régulée en température.

Solution

Les incertitudes liées aux résultats de diagnostic ont été réduites par la mise en place d'un protocole de génération de défaut. À terme, l'introduction dans l'architecture AFTC d'outils de diagnostic à plus forte généralité permettra une applicabilité à un plus grand nombre de PEMFC.

c. Niveau de sévérité des défauts

La notion du niveau de sévérité des défauts est introduite pour rendre compte des degrés de noyage ou d'assèchement.

Limitation

Les outils de diagnostic utilisés et intégrés dans l'architecture n'estiment pas cette grandeur. Or, lors d'une phase d'atténuation, cette donnée est un facteur clef pour l'efficacité de la stratégie. Il a donc été décidé de générer les défauts expérimentalement en suivant le même protocole afin de pouvoir émettre l'hypothèse d'un niveau de sévérité constant. Celle-ci est discutable néanmoins par l'apparition d'une hystérésis entre deux changements de point de fonctionnement et à l'aspect peu répétable d'une mise en défaut. L'hystérésis apparaît car l'état de la PEMFC dépend de son historique, il n'y a donc pas le même point de départ entre deux mises en défaut. La répétabilité est dépendante du contrôle du banc qui ne permet pas une génération de consigne garantissant le même état des variables. Cependant l'hypothèse du niveau de sévérité constant est nécessaire pour la comparaison et l'analyse des essais entre eux. De plus, la *SoH* d'une PEMFC évoluant potentiellement entre deux essais, celle-ci change de comportement. Ce changement, modifie la façon dont un défaut apparaît.

Solution

Pour résoudre ce problème, il est nécessaire d'associer au processus de diagnostic un outil permettant la détermination des niveaux de sévérité de défauts. Ceci permettrait des prises de décision pour l'obtention d'actions d'atténuation plus efficaces.

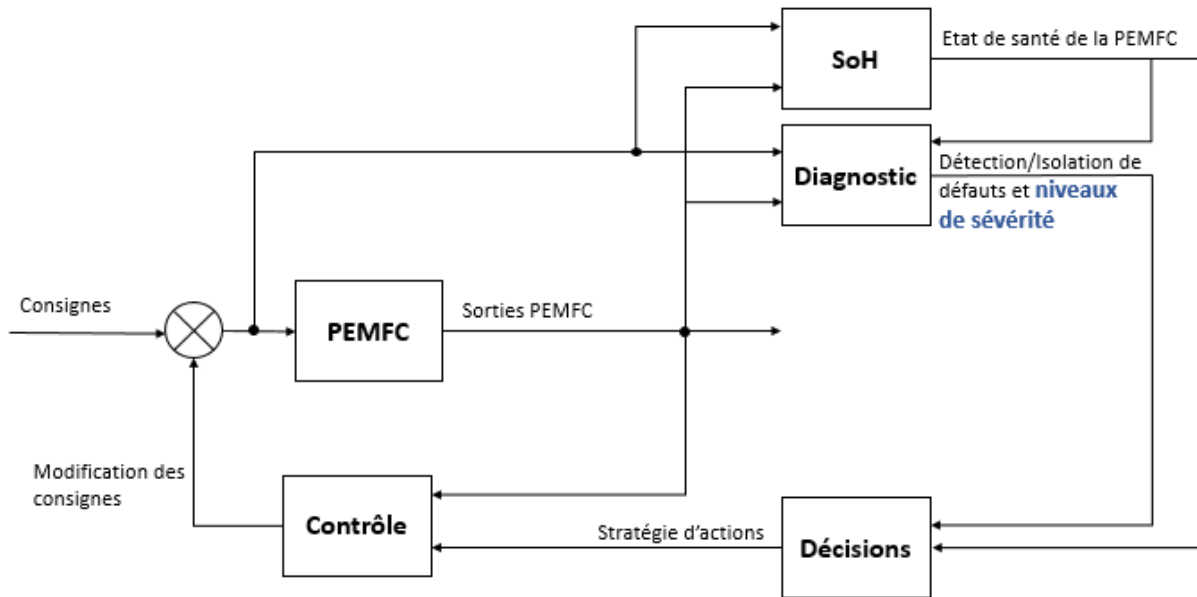


Figure VII-III : Architecture AFTC incluant un outil de diagnostic permettant la détermination des niveaux de sévérité

B. Conception du module de décision

Il existe des points de fonctionnement *limites* pouvant mener à l'occurrence d'un défaut dans une PEMFC. Par exemple, une stœchiométrie ne menant pas au défaut de sous-alimentation et suffisamment faible une économie de réactifs, expose le système à une sous-alimentation globale en cas de variation brutale de la charge. Dans ces configurations, la prise de décision doit s'adapter aux conditions opératoires *limites* et aux changements de *SoH* du système. Ceci constitue un nouvel élément à prendre en considération lors de la prise de décisions.

Ensuite l'efficacité de l'architecture AFTC dépend de la précision du diagnostic. Dans le cas d'utilisation d'outils de diagnostic à faible précision et potentiellement sujets aux faux diagnostics, le module de décision doit délivrer de bonnes décisions. Des travaux supplémentaires sont à effectuer dans ce sens afin d'améliorer l'efficacité de l'architecture.

Enfin une évolution du *MdD* en un outil de surveillance irait dans le sens de la quête de résilience (tolérance d'un système à l'occurrence de défauts et à la dégradation) des PEMFC aux défauts ainsi qu'à l'amélioration de leurs durées de vie. En effet, pour l'heure, le processus de décision est déclenché lorsqu'un défaut est détecté. La surveillance globale du système en prenant en considération la *SoH* et les entrées/sortie de la PàC permettra d'éviter les zones à risques d'occurrence de défauts. L'intérêt de cet outil et la surveillance de conditions opératoires particulières pouvant potentiellement mener à un défaut. La surveillance ne consiste pas à mettre un place un outil de pronostic, mais consiste plutôt à gérer les risques de basculement en conditions de défauts en fonction du point de fonctionnement et de l'état de santé de la PEMFC. Il s'agit en réalité d'une stratégie d'évitement de défauts.

La Figure VII-IV représente une évolution possible de l'architecture AFTC vers un fonctionnement plus global permettant l'évitement des défauts.

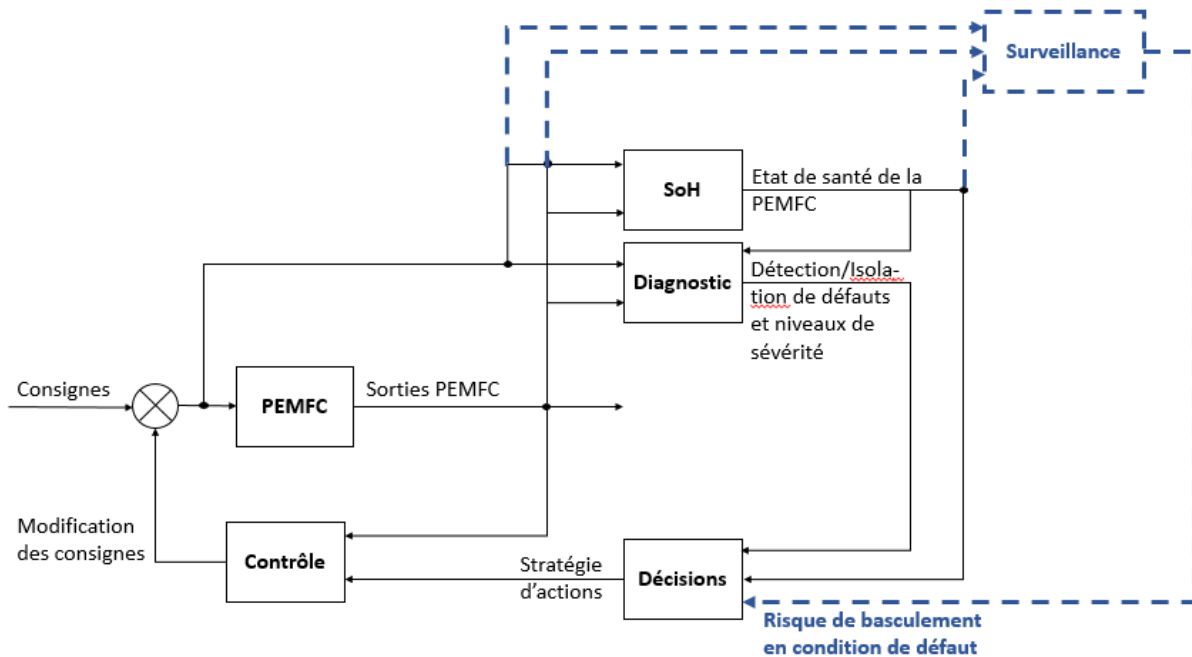


Figure VII-IV : Architecture AFTC incluant un outil de surveillance

C. Module de contrôle

Le module de contrôle est constitué de régulateurs déjà présents sur le banc d'essais. La structure de communication externe du banc de tests étant basée sur une liaison série, il existe une période d'échantillonnage minimale de 3 s. Pour des grandeurs à temps de réponse inférieurs à la période d'échantillonnage, le transitoire dû aux changements de consignes est invisible. Il est donc impossible de corriger les dépassements dus aux transitoires pour ces grandeurs. Le choix a donc été fait d'utiliser les régulateurs déjà présents sur le banc d'essais pour une première validation de l'architecture car ceux-ci sont nativement paramétrés pour un fonctionnement normale d'une PEMFC.

Ce choix permet l'utilisation d'une stratégie d'accommodation par l'adaptation des débits aux défauts. Les changements de débits sont les seules actions d'accommodation implantée dans la stratégie AFTC utilisée dans ces travaux. L'ajout d'une seconde action de ce type donnerait un plus large champ d'action à la stratégie. Cependant, les actions d'accommodations doivent respecter les contraintes temps-réel propres aux défauts à atténuer. Un exemple d'une nouvelle variable de commande pour l'action d'accommodation est la régulation des pressions de réactifs dans les compartiments anodiques et cathodiques. Dans ce cas, les contraintes temps-réel seraient respectées (pour les défauts de noyage et d'assèchement) car le temps de réponse lié à la régulation de cette variable correspond aux dynamiques fluidiques.

La problématique du *SoH* de l'AME se dégradant, provoque une obsolescence du paramétrage optimal des régulateurs aux conditions nouvelles opératoires. Les régulateurs mal paramétrés peuvent, dans leurs transitoires, atteindre des régimes de fonctionnement potentiellement dégradants pour les PEMFC. Par exemple un dépassement trop brutal du débit ou de la température peut provoquer des pertes de performances irréversibles. De plus, ce mauvais paramétrage peut engendrer un fonctionnement anormal de la PEMFC provoquant l'apparition de défauts. Ne disposant pas d'outil pour évaluer en ligne l'évolution du *SoH*, une stratégie de reconfiguration « quasi-aveugle » est mise en place. Ce type de reconfiguration modifie le point de fonctionnement du système en déplaçant celui-ci vers un

nouveau point moins favorable à l'occurrence de défauts. Ne sachant pas dans quelle mesure le point de fonctionnement doit être modifié, cette action est effectuée de manière itérative jusqu'à trouver une condition favorable à la condition normale (d'où le terme « quasi-aveugle »). Ainsi la nécessité d'un outil déterminant le *SoH* réapparaît. De plus, l'utilisation de régulateurs auto-adaptatifs (dont le paramétrage se fait en ligne), constitue une prochaine étape dans l'amélioration des performances de l'architecture. En effet ce type de régulateur gère, dans une certaine mesure, les changements de *SoH* d'une PEMFC. L'implantation de régulateurs auto-adaptatifs dans la stratégie AFTC constitue aussi une nouvelle étape dans l'amélioration des performances de l'architecture AFTC.

ANNEXE A

A1.

La REM permet la description graphique des couplages multi physiques d'un système. Elle permet aussi la mise en place rapide d'une loi de commande. Cette représentation prend en considération les principes de causalité physique (une sortie ne peut qu'être une fonction intégrale de l'entrée). En effet, la modélisation causale des différentes parties d'un système (les sous-systèmes) PEMFC permet la simplification des lois de contrôle locales. Les interactions entre chaque sous-système du modèle sont représentées par des flèches. Chacun des éléments sont connectés suivant le principe de l'action/réaction. Le produit des variables d'actions et de réaction est égal à la puissance instantanée échangée entre les deux sous-systèmes.

La mise en place d'une structure de commande se fait suivant la règle des inversions menant à une structure maximale de commande. Chaque bloc de la REM est inversé pas à pas. Un bloc n'accumulant aucune énergie peut directement être inversé. Ceux accumulant de l'énergie sont inversés par l'utilisation de contrôleurs pour le respect de la causalité physique. En effet, un bloc d'accumulation contient une fonction intégrale qui ne peut être directement inversée sans l'utilisation d'une fonction dérivée.

Le modèle PEMFC utilisé dans cette thèse est réalisée *via* une REM. Ce modèle est divisé en trois sous-systèmes. Le premier fait intervenir les phénomènes électrochimiques avec le courant I_{fc} en tant que variable d'action pour la partie électrique et le flux d'entropie ΔS_{q0} comme variable de réaction dans la partie thermique. Dans cette partie les pertes d'activation ΔV_{act} , ohmique Δ_{ohm} et de concentration ΔV_{conc} sont modélisées et soustraites au potentiel réversible de Nernst.

Une partie fluïdique représentant le circuit de gaz entre les réservoirs (bouteilles d'O2 et d'H2) et les sites catalytiques. Cette partie permet la détermination des pressions partielles utilisées dans la partie électrochimique. Les lignes O2 et H2 sont modélisées par une analogie électrique et sont composées d'une résistance R_{dx1} d'alimentation des gaz, d'une résistance R_{dx2} à leur évacuation et d'une capacité hydraulique C_h . Le circuit hydraulique correspond à une structure en T dont voici la représentation :

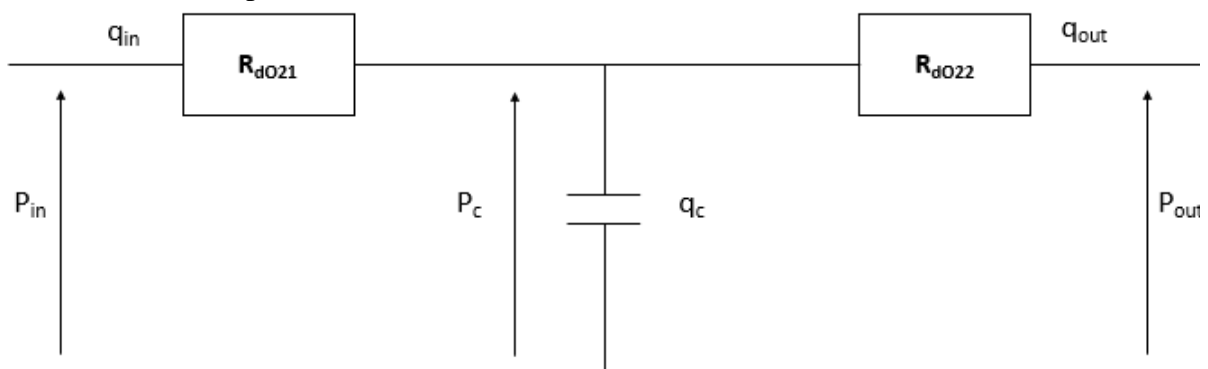


Figure A.1 : Structure en T de l'analogie hydraulique.

La partie électrique modélise le phénomène de la charge double couche.

Toutes les variables utilisées dans le schéma de la REM sont synthétisées dans le tableau A.D :

Variables	Descriptions	Unités
q_{O2}	Débit d'O2 en entrée de pile	m^3/s
q_{H2}	Débit d'H2 en entrée de pile	m^3/s
T_{fc}	Température de pile	K
I_{fc}	Courant de la pile	A
V_{fc}	Tension cellulaire	V
P_{O2}	Pression partielle d'O2 en entrée de pile	Barg
P_{H2}	Pression partielle d'H2 en entrée de pile	Barg
P_{scO2}	Pression partielle d'O2 sur le site catalytique	Barg
P_{scH2}	Pression partielle d'H2 sur le site catalytique	Barg
q_{cO2}	Débit d'O2 consommé	m^3/s
q_{cH2}	Débit d'H2 consommé	m^3/s
q_{O2out}	Débit d'O2 en sortie de pile	m^3/s
q_{H2out}	Débit d'H2 en sortie de pile	m^3/s
P_{sO2}	Pression d'O2 en sortie de pile	Barg
P_{sH2}	Pression d'H2 en sortie de pile	Barg
ΔE	Evolution des pressions partielles aux électrodes	Barg
ΔS_q	Flux d'entropie créé par ΔE	J/K
E_0	Potentiel thermodynamique	V
E_n	Potentiel réversible de Nernst	V
ΔV	Chute de tension due aux pertes d'activation, ohmique et de concentration	V
R_{dO21}	Résistance de la canalisation d'alimentation au passage de l'O2	Ω/cm^2
R_{dO22}	Résistance de la canalisation à l'évacuation des réactifs et produits des réactions cathodiques	Ω/cm^2
V_c	Tension dans la charge double couche	V

Tableau A.1 : Synthèse des grandeurs représentée sur la REM.

A2.

La notion de causalité intégrale signifie que la détermination de la valeur d'une variable dépend de toutes les variables précédemment calculées. De cette manière c'est l'historique des évènements passés qui sont pris en considération pour la détermination des évènements présents. C'est une application physique de la formulation mathématique suivante :

$$F(t) = \int_0^t X(t) dt$$

Où F représente une variable dont on veut déterminer la valeur à l'instant t , X une fonction quelconque dont on a la connaissance de l'historique (entre 0 et t). La détermination de F à l'instant t dépend donc de l'historique de X , d'où la notion de causalité intégrale.

Or dans le cas d'une équation différentielle du premier ordre avec second membre s'exprimant ainsi :

$$a(t) y' + b(t) y = c(t)$$

Cette équation possède une solution générale s'exprimant à l'aide d'une intégrale telle que :

$$y(t) = e^{-A(t)} \left(K + \int_{t_0}^t \frac{c(t)}{a(t)} e^{A(t)} dt \right)$$

Où A est une primitive de du quotient de a par b sur un intervalle I . K est une constante déterminée les conditions initiales.

Il apparaît alors sur cette équation une intégrale de t_0 à t , ce qui correspond à la notion de causalité intégrale définie au-dessus. Une équation différentielle (faisant donc intervenir des expressions dérivées) respecte, d'un point de vue mathématique, la causalité intégrale.

En revanche, l'estimation d'une dérivée dans le domaine du calcul numérique s'effectue *via* la détermination d'un taux d'accroissement. Voici une expression d'un taux d'accroissement :

$$f'(t) = \lim_{h \rightarrow 0} \frac{f(t+h) - f(t)}{h}$$

Où t est une variable représentant l'instant présent. h est un réel et f une fonction quelconque. Dans cette expression la variation de f dépend de l'instant présent et de l'instant $t+h$. Ceci revient à émettre l'hypothèse d'une connaissance des instants futurs. On ne peut donc pas parler de causalité intégrale pour une estimation d'une dérivée.

ANNEXE B0

La méthode de défuzzification choisie est celle utilisant les *centres de gravités* ou *barycentre* ou encore des *hauteurs pondérées*. La méthode de calcul des *hauteurs pondérées* est effectuée sur la base des triangles.

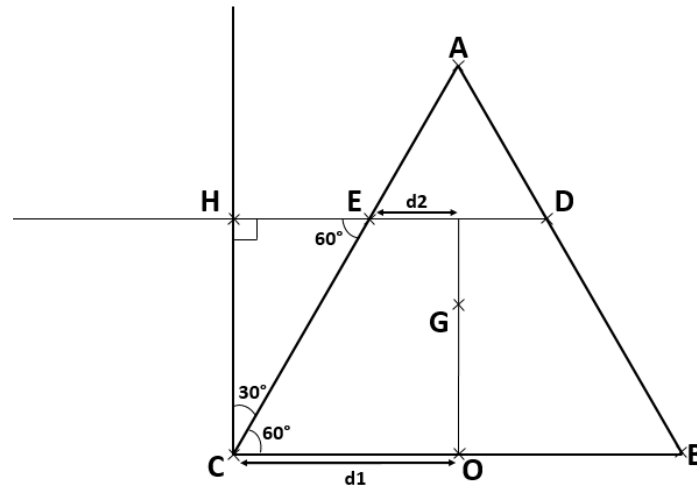


Figure B0.1 : Projection de la valeur triangle équilatéral permettant le calcul des barycentres.

Le point H correspond à la projection d'un point d'une fonction d'appartenance sur un triangle équilatéral.

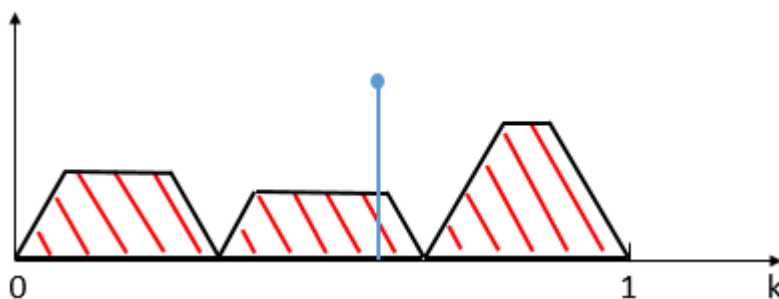


Figure B0.2: Calcul du coefficient permettant la pondération de la stratégie d'atténuation à partir des triangles équilatéraux

La longueur CH est connue étant donné qu'elle provient de la fonction d'appartenance. Les côtés AB, BC et CA sont égaux étant donné le caractère équilatéral du triangle. Le calcul des autres côtés est réalisé *via* les règles trigonométriques :

- $EC = CH \cos(30)$, correspond à l'hypoténuse du triangle HEC.
- CH , est le côté adjacent du triangle HEC
- $HE = CE \sin(30)$, correspond au calcul du côté opposé du triangle HEC

L'expression du barycentre pour ce triangle est donc :

$$OG = \frac{CH}{3} \frac{d_1 + 2d_2}{d_1 + d_2}$$

Or:

$$\begin{aligned} H &= CH \\ d_1 &= \frac{1}{2} CB \\ d_2 &= d_1 - HE \end{aligned}$$

La dernière étape consiste à effectuer la moyenne pondérée des barycentres pour se placer dans l'intervalle de sortie souhaité. En effet, un barycentre est calculé pour chaque règle et la moyenne des barycentres est donnée par :

$$k_f = \frac{OG1.r_{faible} + OG2.r_{moyen} + OG3.r_{elevee}}{OG1 + OG2 + OG3} \in [0 \ 1]$$

La sortie du MLF k_f pondère la prise de décision.

B1.

Un bref rappel sur les RdP est effectué ci-après et est issue des cours de M. COMBACAU de l'université Paul Sabatier Toulouse III (references). Cette partie est une justification de l'utilisation de RdP dans le cadre de la décision long terme.

Définition formelle du réseau de Petri

Un RdP est un modèle possédant à la fois un aspect graphique (lisibilité et extension du graphe d'état) et un aspect mathématique (formalisme et preuve de propriétés). C'est un n-uplet $R = \langle P, T, I, O \rangle$ dans lequel :

- P est un ensemble fini de symboles appelés « places »,
- T est un ensemble fini de symboles appelés « transitions » avec $P \cap T = \emptyset$,
- I est la fonction incidence arrière : $P \times T \rightarrow \mathbb{N}$
- O est la fonction incidence avant : $P \times T \rightarrow \mathbb{N}$

La fonction d'incidence C est ensuite définie par $P \times T \rightarrow \mathbb{Z}$ telle que

$$\forall (p_i, t_j) \in P \times T : C(p_i, t_j) = O(p_i, t_j) - I(p_i, t_j)$$

Réseau de Petri marqué

Un RdP marqué est défini par le doublet $N = \langle R, M_0 \rangle$ dans lequel R est un RdP et M_0 est la valeur initiale de la fonction marquage M définie par $P \rightarrow \mathbb{N}$.

Quand $M(p_i) = k$, on dit que « la place p_i contient k marques (ou jetons) ».

A un instant donné, la valeur prise par la fonction marquage donne l'état du RdP. C'est par la fonction marquage que la dynamique du modèle apparaît.

Représentation graphique

Il s'agit d'un graphe à deux types de sommets (places et transitions). Les arcs sont pondérés et représentent les fonctions I et O. La correspondance entre la définition mathématique et le graphe est résumée sur la figure 4.8 :

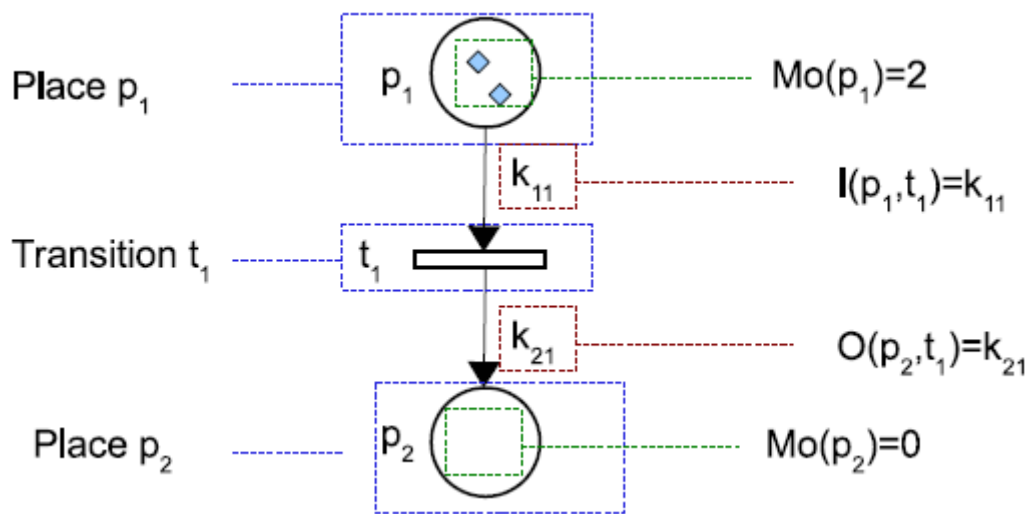


Figure 4.8 : Graphe d'un réseau de Petri

Remarque : un arc relie toujours deux sommets de type différent. Les arcs de poids nul ($I(p_i, t_j) = 0$ et $O(p_i, t_j) = 0$) ne sont pas représentés sur le graphe et le poids est omis (implicite donc) lorsqu'il vaut 1.

Représentation matricielle (mathématique)

Les fonctions I et O sont représentées par des matrices d'entiers naturels. La convention utilisée consiste à placer les transitions en entrée de colonnes et les places en entrée de lignes. Chaque élément de la matrice est associé à une paire (p_j, t_i) et a pour valeur le poids de l'arc correspondant. Le réseau est souvent représenté par les deux matrices I et O car le nombre de lignes et de colonnes donne le nombre de places et de transitions et constituent les seules données réellement nécessaires, les noms des places et des transitions étant tout à fait symboliques.

On définit ensuite la fonction C par : $C = O - I$ matrice à valeur dans \mathbb{Z} .

Le marquage est représenté par un vecteur d'entiers naturels comportant autant de composantes que le réseau comporte de places.

$$M_o = \begin{pmatrix} M_o(p_1) \\ M_o(p_2) \\ \dots \\ M_o(p_k) \end{pmatrix} \quad (4-9)$$

Le passage entre la représentation mathématique et la représentation graphique est sans ambiguïté, les règles sont déduites de la correspondance à la figure 4.7 (Graphe d'un réseau de Petri). Le passage de la représentation matricielle à la représentation graphique pose le

problème classique de la représentation optimale d'un graphe. A la première tentative de construction, on obtient généralement un graphe « plat de spaghetti »...

Exemple de passage matriciel vers graphique.

Soit le RdP défini par :

$$I = \begin{vmatrix} 3 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}$$

$$I = \begin{vmatrix} 0 & 3 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \end{vmatrix}$$

$$I = \begin{vmatrix} 3 \\ 0 \end{vmatrix}$$

Le RdP correspondant est représenté sur la figure 4.8 (Modèle 3 lecteur 1 écrivain)

Il faut par ailleurs faire attention à la tentative de représenter un RdP par sa matrice d'incidence C. Sur l'exemple de la figure 4.9 (Modèle 3 lecteur 1 écrivain), cette matrice vaut :

$$C = \begin{vmatrix} -3 & +3 & 0 \\ +1 & -1 & 0 \end{vmatrix} \quad (4-10)$$

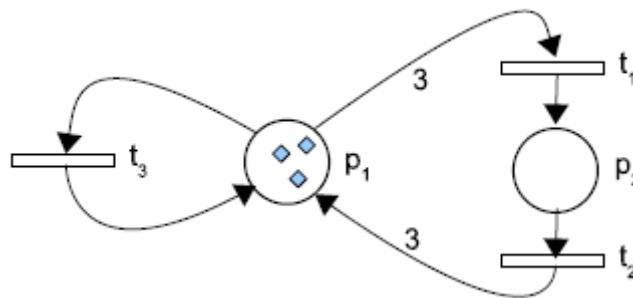


Figure 4.9 : Modèle 3 lecteurs 1 écrivain

L'élément $C(p_1, t_3) = 0$ semble indiquer que la transition t_3 est totalement isolée des autres éléments. Chaque fois qu'il existe une boucle entre une place et une transition, cette situation est rencontrée. Par exemple, le calcul de la matrice C du réseau de la figure 4.10 (Modèle 3 lecteur 1 écrivain modifié) donne la même matrice que pour le réseau de la figure 4.9 (Modèle 3 lecteur 1 écrivain).

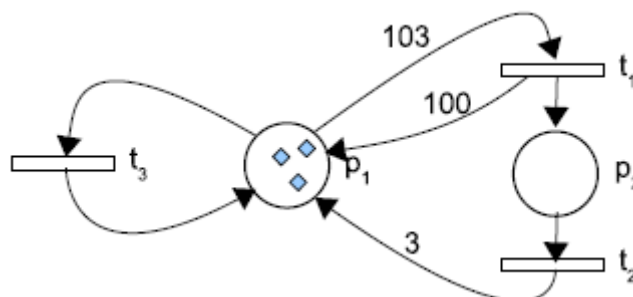


Figure 4.10 : Modèle 3 lecteurs 1 écrivain modifié

En réalité il existe une infinité de RdP correspondant à cette matrice C.

Règles d'évolution

Transition sensibilisée

Une transition t_i est sensibilisée (les termes « tirable » ou « franchissable » sont parfois utilisés) par le marquage M si et seulement si

$$\forall p_j \in P, M(p_j) \geq I(p_j, t_i) \quad (4-11)$$

Que l'on peut traduire par « Chaque place d'entrée contient un nombre de jetons au moins égale au poids de l'arc qui la relie à la transition t_i ».

Franchissement d'une transition

Une transition sensibilisée peut être franchie. Le franchissement (tir) d'une transition t_i est une opération indivisible comportant deux facettes :

1. Démarquage des places d'entrées de t_i

$$\forall p_j \in P, M(p_j) \text{ varie de } -I(p_j, t_i) \quad (4-12)$$

2. Marquage des places de sorties de t_i

$$\forall p_j \in P, M(p_j) \text{ varie de } +O(p_j, t_i) \quad (4-13)$$

Pendant le franchissement de la transition t_i , le marquage d'une place p_j évolue donc d'une quantité :

$$-I(p_j, t_i) + O(p_j, t_i) \quad (4-14)$$

Et le marquage $M'(p_j)$ résultant du tir de t_i peut être calculé par :

$$\forall p_j \in P, M'(p_j) = M(p_j) - I(p_j, t_i) + O(p_j, t_i) \quad (4-15)$$

Relation appelée équation d'évolution des réseaux de Petri.

Les réseaux de Petri et la commande

Approche informelle

Pour la commande, les réseaux de Petri peuvent être considérés comme une extension des automates de Mealy et de Moore en associant des conditions de franchissement aux transitions et actions à la fois aux places et aux transitions. La figure 4.11 représente un automate et un RdP utilisé pour la commande.

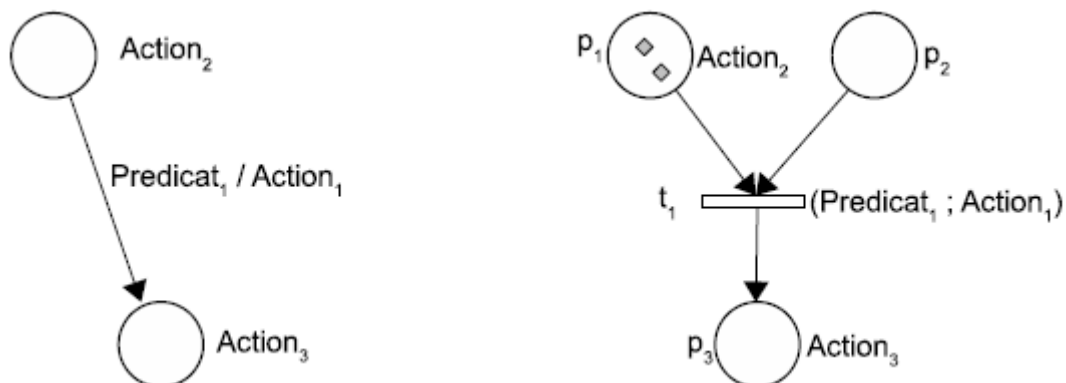


Figure 4.11 : Commande et réseaux de Petri

Dans cette représentation des étiquettes apparaissent sur certaines places et certaines transitions :

- $Action_2$ et $Action_3$ sont des variables booléennes prenant la valeur *vraie* en fonction du marquage.
- $Action_1$ est un évènement qui est produit par le RdP au moment du franchissement de t_1 .
- $Predicat_1$ est une expression logique qui doit prendre la valeur *vraie* pour que la transition t_1 soit franchie

Dans un RdP utilisé comme modèle de commande, ces éléments permettent une communication avec l'environnement. En général :

- Les prédicats sont des expressions logiques formées sur des valeurs booléennes représentant les valeurs des entrées du système de commande,
- Les actions sont des images des valeurs que doivent prendre les actionneurs,
- Les évènements sont des données permettant le comptage, la synchronisation, etc. Il faut noter que ces évènements ne sont jamais nécessaires en commande, il est toujours possible de représenter les mécanismes qu'ils mettent en œuvre par des éléments structurels du RdP.

Les bonnes propriétés des réseaux de Petri

Réseau vivant

Quel que soit l'état atteint par le réseau à partir de son état initial, il existe une séquence de tir franchissable contenant la transition t . Un réseau de Petri est dit vivant si et seulement si toutes ces transitions sont vivantes.

Un réseau de Petri vivant peut être le modèle d'un système dans lequel, quelle que soit la phase fonctionnement normal, toutes les évolutions modélisées restent possibles. Autrement dit au cours de son fonctionnement le système modélisé ne perd pas de fonctionnalités. Le fonctionnement est alors souvent cyclique.

Une transition t est quasi-vivante si et seulement si elle peut être franchie au moins une fois à partir du marquage initial. Toute transition vivante est quasi-vivante. Un réseau est dit quasi-vivant si toutes ces transitions sont quasi-vivantes. Ce concept est intéressant lorsque le modèle contient une séquence de fonctionnement exécutée un nombre limité de fois.

Réseau borné

Un réseau de Petri est k -borné si et seulement si toutes ces places p_i sont k_i bornées. La borne k du réseau de Petri est le max des bornes de ses places [$k = \text{Max}(k_i)$].

Cas particulier : $k = 1$ le réseau est alors dit « sauf » ou « binaire ».

Un réseau de Petri borné peut être le modèle d'un système réel dont le nombre d'état est fini. En effet, pour un ensemble de places P fini et une borne k finie, le nombre de marquage accessible est fini.

Réseau réinitialisable

Un réseau de Petri est réinitialisable si et seulement si quel que soit le marquage atteint à partir de M_0 il est possible de revenir au marquage initiale par le franchissement d'une séquence de

transitions. Un réseau de Petri réinitialisable peut modéliser un système dont tout le fonctionnement est cyclique.

Réseau de Petri interprété : définition formelle

Un réseau de Petri interprété est un quadruplet $\langle N, E, \Pi(E), I \rangle$ dans lequel

- N est un réseau de Petri marqué
- $E = Ac \cup Pr$ est un ensemble d'étiquettes désignant des actions (ensemble Ac) et des prédicats (ensemble Pr).
- $\Pi(E)$ est une fonction associant des étiquettes aux places ou aux transitions

$$P \cup T \xrightarrow{\Pi(E)} P(Ac) \cup (Pr \cup \{vrai\}) \times P(Ac) \quad (4-16)$$

$$\forall p_i \in P, \Pi(p_i) = l \in P(Ac) \quad (4-17)$$

$$\forall p_j \in T, \Pi(p_j) = (l_1; l_2) \text{ avec } [l_1 \in Pr \cup \{vrai\}] \wedge [l_2 \in P(Ac)] \quad (4-18)$$

- I est une interprétation comportant tous les algorithmes associés aux étiquettes (données et contrôle). L'interprétation est souvent décrite sous la forme :
 - D'un graphe de données comportant trois types de sommets (les mémoires, les opérations et les prédicats) accompagné d'une description du type des mémoires,
 - Des traitements associés aux sommets opération ou prédicats.

La décision à effet différé est proche du fonctionnement d'un système à événements discrets (changement d'état déclenché par un ou des événement(s)). Pour cette raison, la modélisation de trois RdP combinés en un unique permettent la gestion des changements de consignes.

B2.

L'humidité relative ($HR\%$) des gaz en entrée de pile se fait par la modification de la température de la canalisation d'alimentation de la PEMFC. Pour rappel, l' O_2 sec et issue d'une bouteille commerciale entre dans un ballon d'humidification à la température T_{ballon} (qui est aussi la température du point de rosée $T_{rosée}$) duquel il ressort humidifié à 100% . L' O_2 humidifié circule ensuite dans une canalisation régulée à la température T_{canal} . Le réglage de cette température permet la modification de l' $HR\%$ de l' O_2 qui entrera dans le circuit d'alimentation (les serpentins) de la PEMFC à la température T_{fc} .

La température de rosée est la température à laquelle l' O_2 humide est saturée, c'est-à-dire un taux d'humidité de 100% . La pression partielle d'eau est donc égale à la pression de vapeur saturante. On peut donc écrire :

$$\ln \frac{P_{sat}}{P_0} = \ln \frac{P_{H2O}}{P_0} = \frac{ML_v}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{rosée}} \right)$$

$$T_{rosée} = \frac{1}{\frac{1}{T_0} - \frac{R}{ML_v} \ln \left(\frac{P_{H2O}}{P_0} \right)}$$

En considérant une température fixe du ballon d'humidification ($T_{rosée}$), l'équation de Clapeyron prend la forme suivante pour le calcul de T_{canal} et pour une $RH\%$ donnée :

$$P_{sat} = \frac{\exp\left(\frac{ML_v}{R} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T_{canalisation}}\right)\right) \cdot P_0}{HR\%}$$

Le calcul de T_{canal} se fait donc de la manière suivante :

$$T_{canalisation} = \frac{1}{\frac{1}{T_0} - \frac{R}{ML_v} \ln\left(HR\% \frac{P_{sat}}{P_0}\right)}$$

Avec M la masse molaire de l'eau en kg/mol, l_v la chaleur latente de vaporisation de l'eau soit $2.26 \cdot 10^6$ J/kg, T_0 la température d'ébullition exprimée en K à la pression P , R la constante des gaz parfaits soit 8.314. On donne M_H la masse molaire de l'hydrogène 1 g, M_O la masse molaire atomique de l'oxygène 16 g, M_N la masse atomique molaire de l'azote 14 g.

ANNEXE C0

Période de diagnostic pour le cycle 1 : $T_{diag} = 30s$, niveau de sévérité moyen et à courant constant (noyage cathodique).

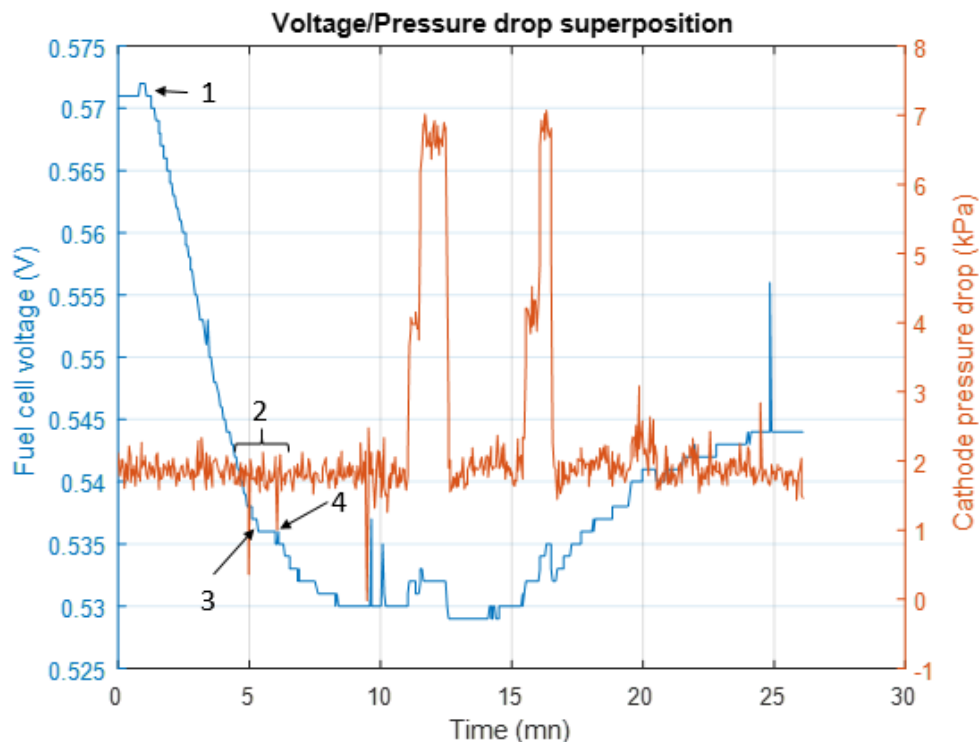


Figure C0.1 : Superposition de la tension et de la chute de pression.

Point 1 :

Cette zone correspond au moment où le point de fonctionnement est changé pour favoriser l'occurrence du défaut de noyage. Le paramétrage est le même que celui des précédents essais.

Point 2 :

Représente la première phase d'accumulation d'eau dans les serpentins.

Point 3 :

Correspond au moment où la première détection d'un défaut de noyage déclenche le processus AFTC.

Point 4 :

Le point 4 est la fin de la première phase d'atténuation du défaut de noyage.

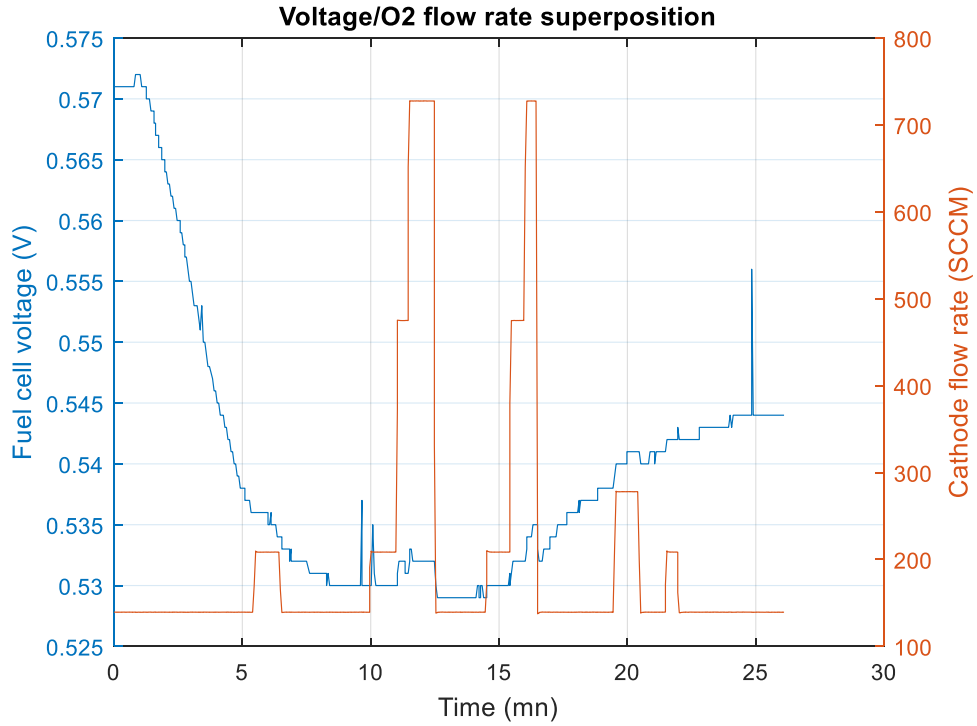


Figure C0.2 : Superposition de la tension et du débit d'oxygène.

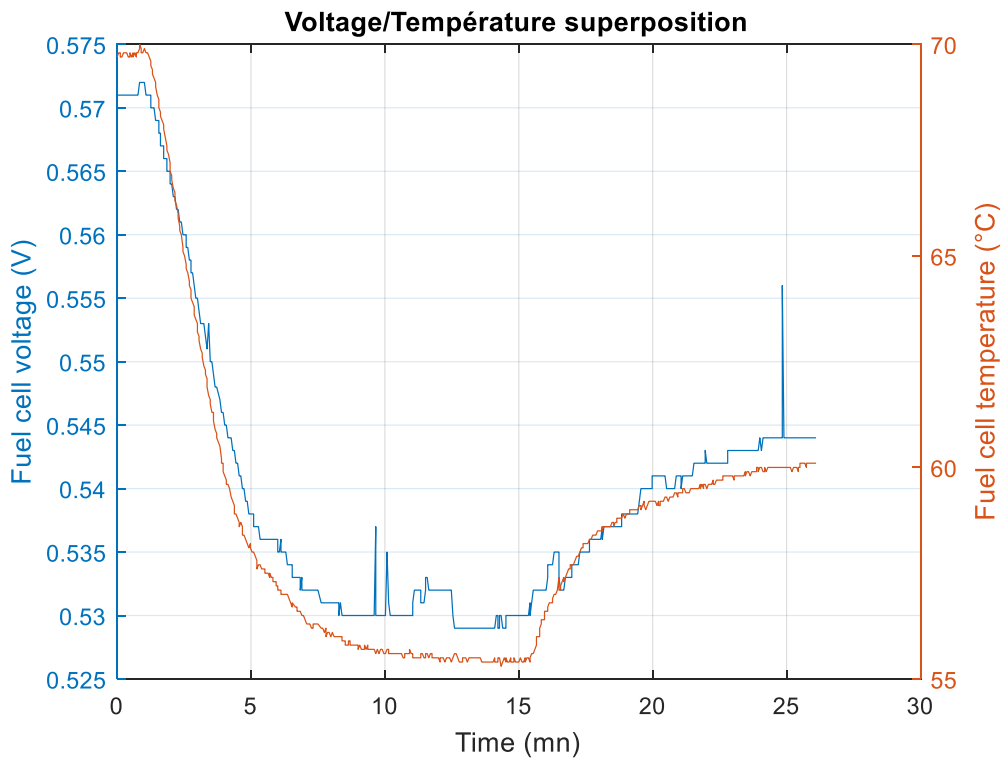


Figure C0.3 : Superposition de la tension et de la température de la PEMFC.

Période de diagnostic pour le cycle 1 : $T_{diag} = 15 s$, niveau de sévérité moyen et à courant constant (noyau cathodique).

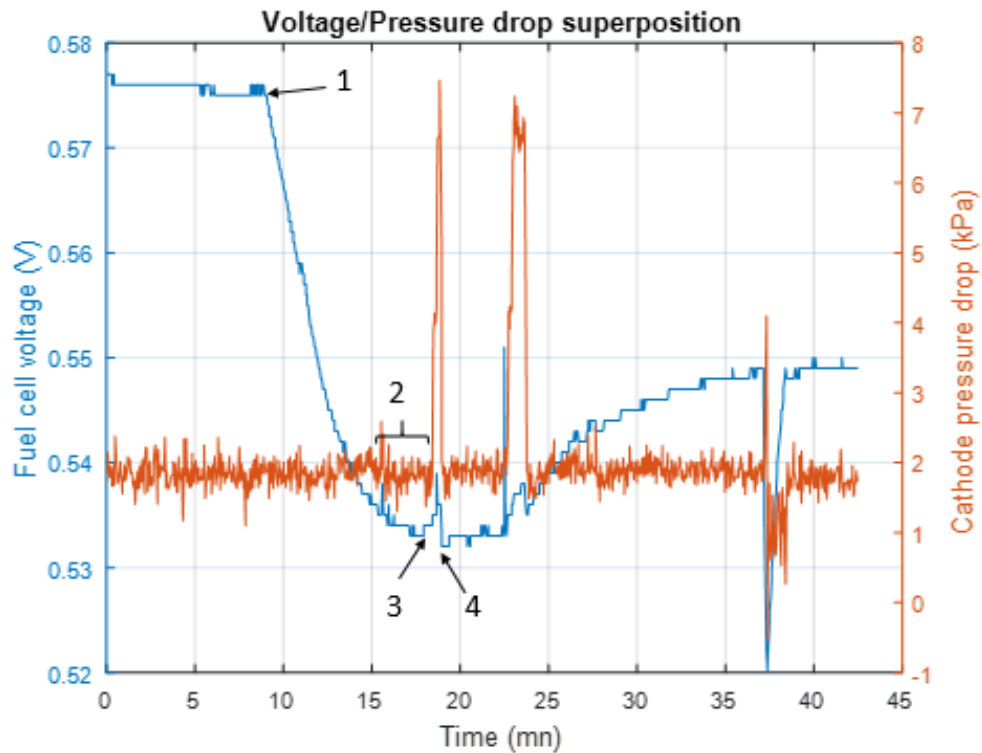


Figure C0.4 : Superposition de la tension et de la chute de pression.

Point 1 :

Cette zone correspond au moment où le point de fonctionnement est changé pour favoriser l'occurrence du défaut de noyage. Le paramétrage est le même que celui des précédents essais.

Point 2 :

Représente la première phase d'accumulation d'eau dans les serpentins.

Point 3 :

Correspond au moment où la première détection d'un défaut de noyage déclenche le processus AFTC.

Point 4 :

Le point 4 est la fin de la première phase d'atténuation du défaut de noyage.

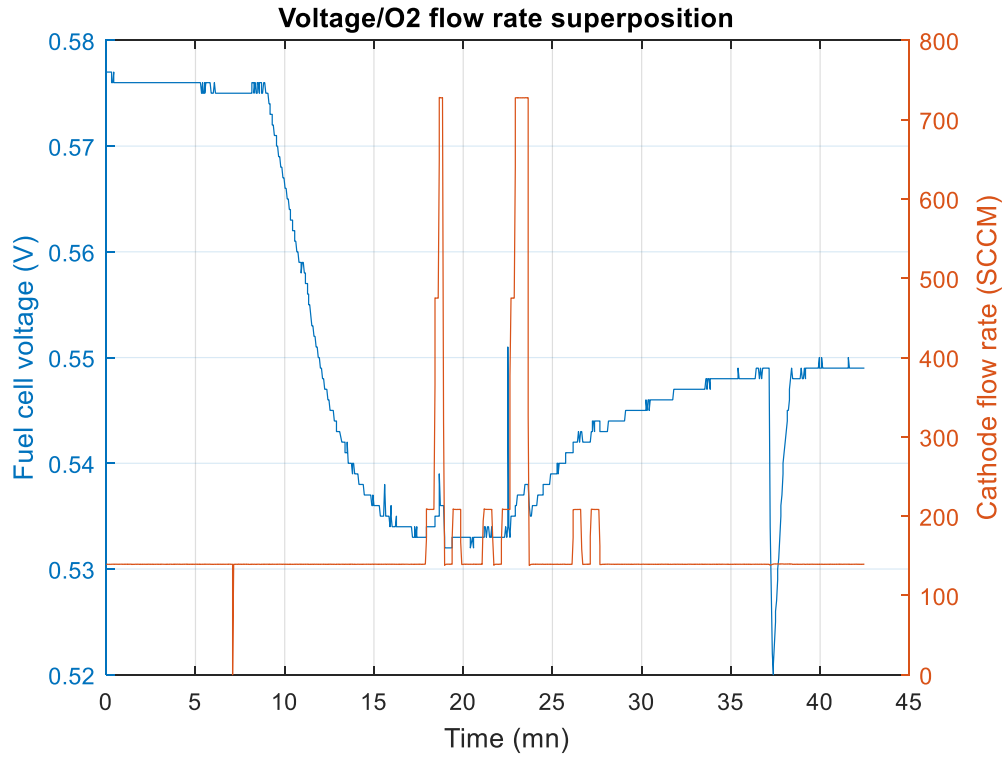


Figure C0.5 : Superposition de la tension et du débit d'oxygène.

La *Figure C0.6* représente l'évolution de la tension de la pile et de sa température.

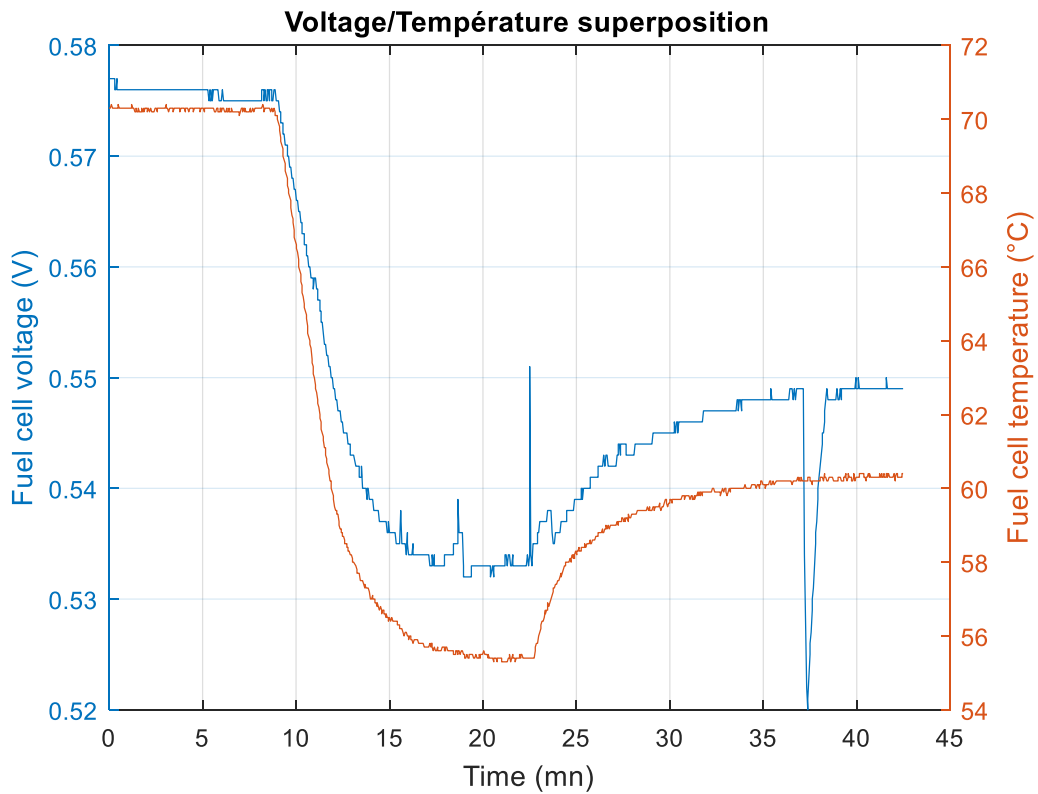


Figure C0.6 : Superposition de la tension et de la température de la PEMFC.

Période de diagnostic pour le cycle 1 : $T_{diag} = 60$ s, niveau de sévérité moyen et à courant constant (noyage cathodique).

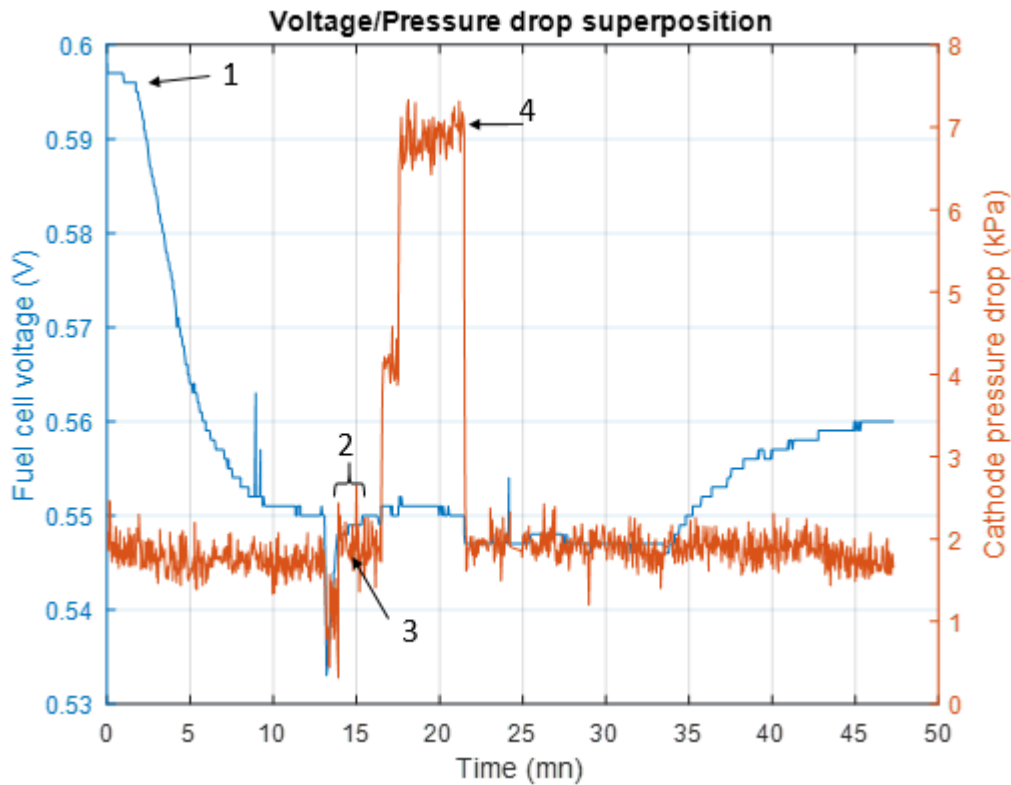


Figure C0.7 : Superposition de la tension et de la chute de pression.

Point 1 :

Zone correspond au moment où le point de fonctionnement est changé pour favoriser l'occurrence du défaut de noyage. Le paramétrage est le même que celui des précédents essais.

Point 2 :

Représente la première phase d'accumulation d'eau dans les serpentins.

Point 3 :

Correspond au moment où la première détection d'un défaut de noyage déclenche le processus AFTC.

Point 4 :

Le point 4 est la fin de la première phase d'atténuation du défaut de noyage.

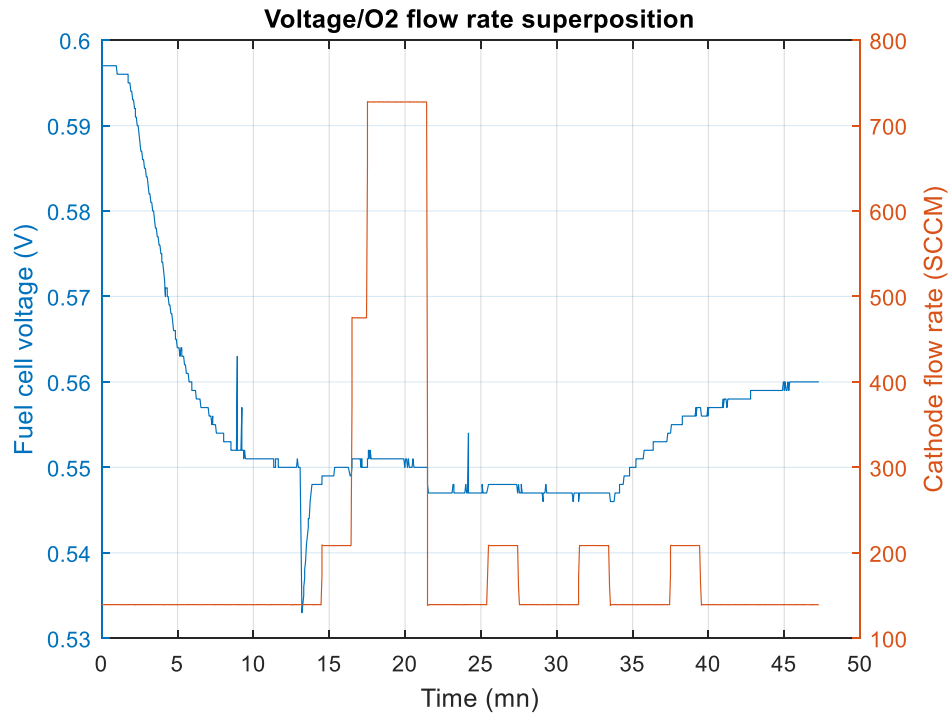


Figure C0.8 : Superposition de la tension et du débit d'oxygène.

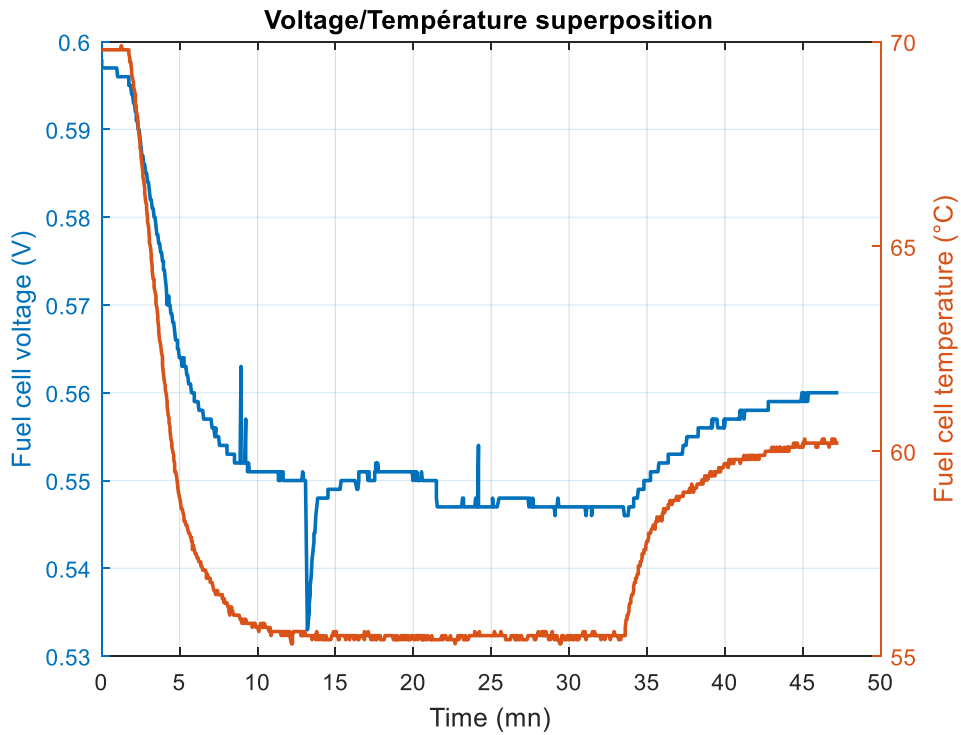


Figure C0.9 : Superposition de la tension et de la température de la PEMFC.

C1.

Période de diagnostic pour le cycle 1 : $T_{diag} = 15s$ à faible niveau de sévérité et à courant constant (assèchement de la membrane).

La *Figure C1.1* montre la superposition de la tension de la PEMFC à la chute de pression cathodique. Les conditions opératoires génèrent effectivement un défaut d'assèchement de membrane.

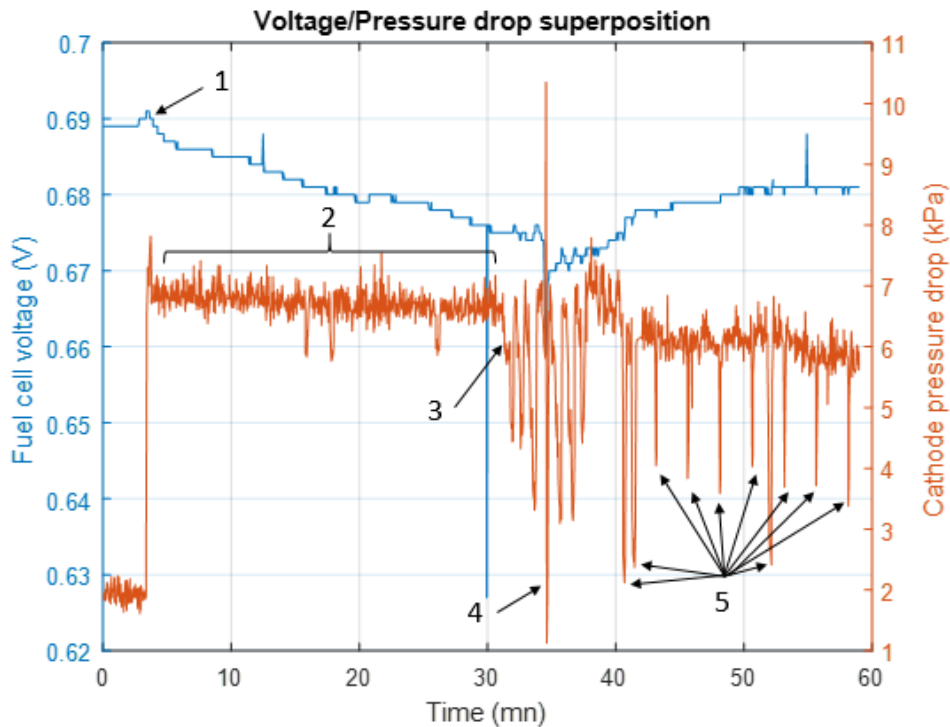


Figure C1.1 : Superposition de la tension de la PEMFC à la chute de pression cathodique.

Chacun des points de la *Figure C1.1* est explicité ci-après.

Point 1 :

Changement des conditions opératoires pour permettre l'apparition du défaut d'assèchement de membrane.

Point 2 :

Zone avant la première détection du défaut d'assèchement montrant que la chute de pression cathodique a une tendance baissière.

Point 3 :

Correspond à la première décision à effet rapide.

Point 4 :

Anomalie du système où la vanne de contre-pression s'ouvre. Cela a peu effet sur l'essai car le phénomène contribue à l'assèchement de membrane.

Point 5 :

L'algorithme de décision a été arrêté après la phase d'atténuation puis redémarré par un second script qui devait être à l'arrêt. Les deux codes fonctionnant de manière synchrone, cela n'a pas été remarqué pendant la phase de test. Mais lorsque l'un des deux fut mis à l'arrêt l'autre était encore en opérations. L'arrêt du premier ayant provoqué une série de réinitialisation de fichiers, cela qui a provoqué des interférences dans les décisions. Ainsi à certain moment le débit est

décroché (à cause des fichiers non réinitialisés) et retrouve des bonnes valeurs par la suite. Cela n'a pas d'effets notoires sur le processus d'atténuation car le défaut d'assèchement est déjà atténué lors de cette anomalie. Cependant, cela a créé un cyclage sur le débit et donc un effet de stress mécanique sur la membrane PEMFC. Aucune caractérisation n'ayant été faite, il n'existe pas de donnée sur les éventuelles dégradations liées à cette erreur.

La *Figure C1.2* est la superposition de la tension de la PEMFC au débit d'oxygène.

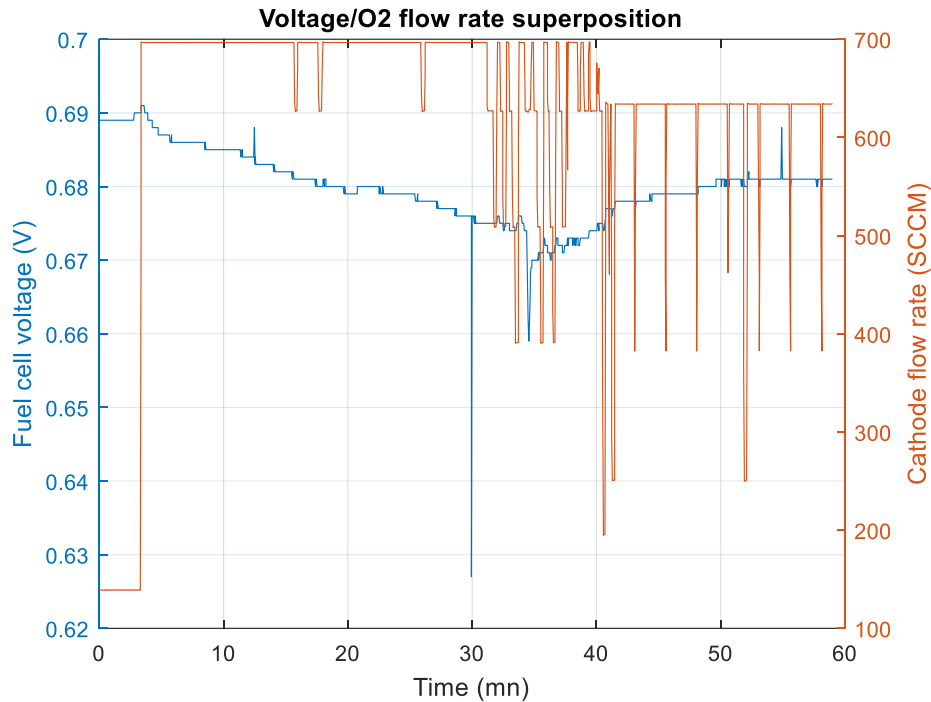


Figure C1.2 : Superposition de la tension de la PEMFC au débit d'oxygène.

Les *Figures C1.3* et *C1.4* représentent les évolutions de la température et de l'humidité relative de l'oxygène superposées à la tension de la PEMFC.

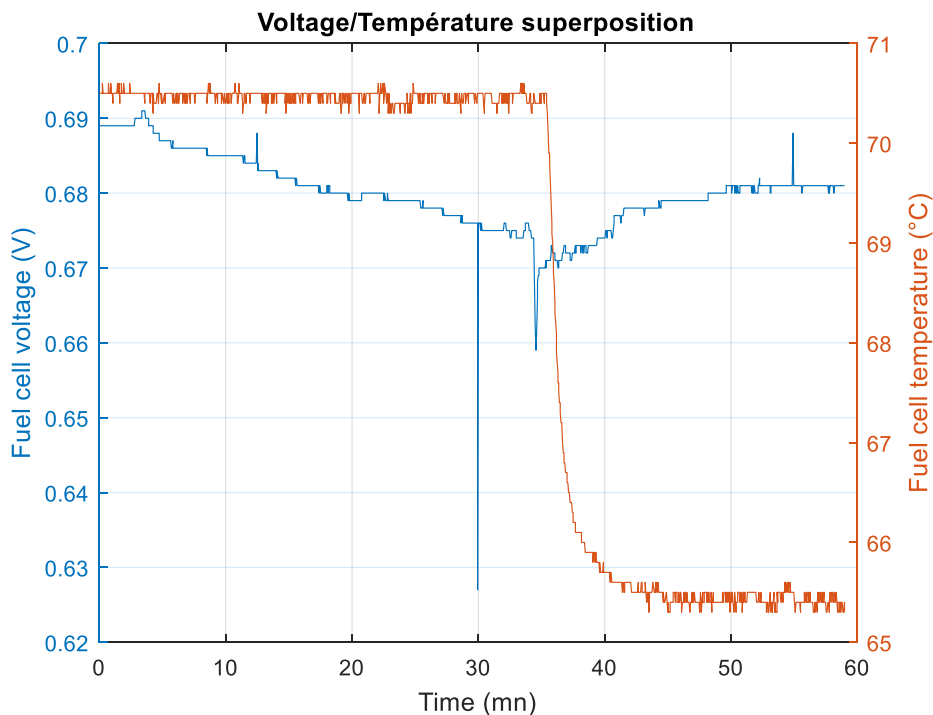


Figure C1.3 : Superposition de la tension de la PEMFC et de sa température.

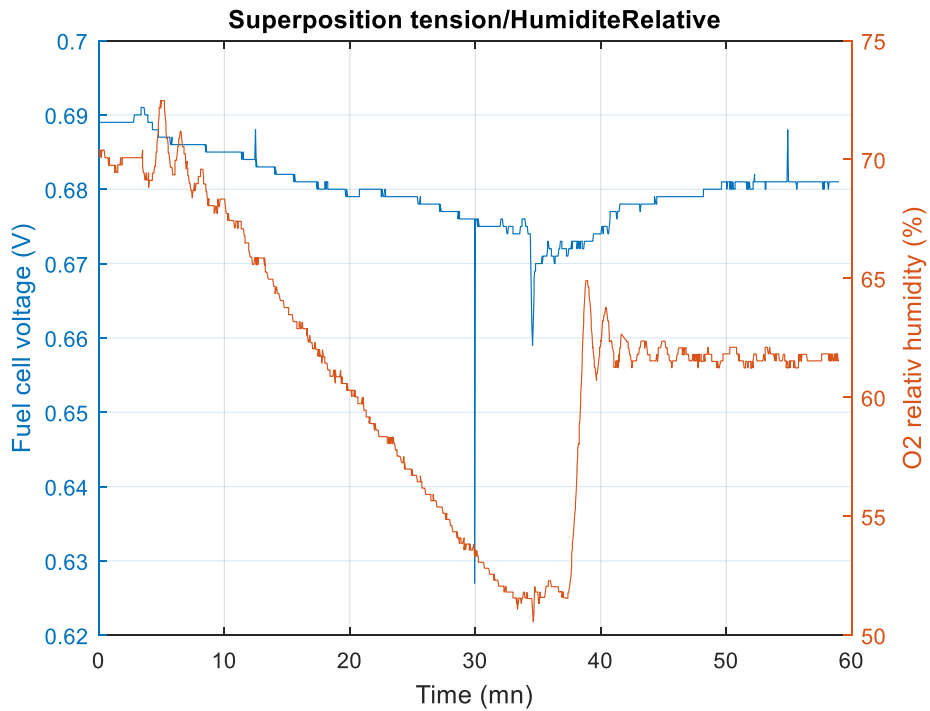


Figure C1.4 : Superposition de la tension de la PEMFC et de l’humidité relative de l’oxygène.

Période de diagnostic pour le cycle 1 : $T_{diag} = 60s$ à faible niveau de sévérité et à courant constant (assèchement de la membrane).

Ainsi, la *Figure C1.5* représente l’évolution de tension de la PEMFC sur laquelle est superposé le débit d’oxygène.

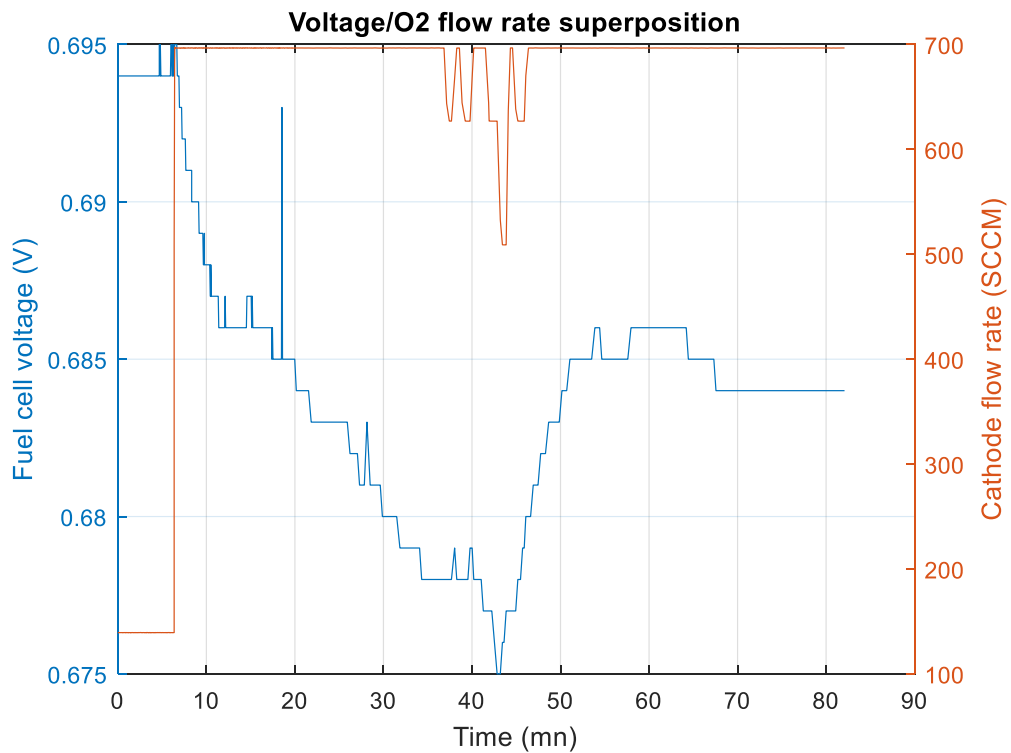


Figure C1.5 : Superposition de la tension de la PEMFC au débit d'oxygène. L'évolution de la température de la PEMFC est représentée sur la *Figure C1.6*.

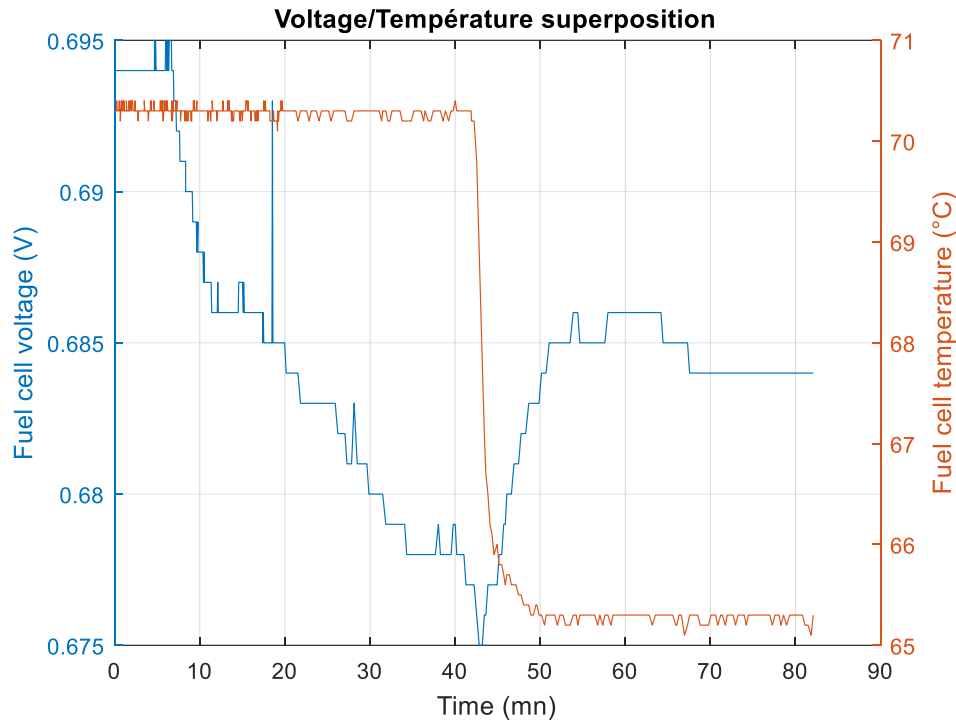


Figure C1.6 : Superposition de la tension de la PEMFC et de sa température.

C2.

Analyse des essais d'assèchement

Les conditions expérimentales, le cycle et les valeurs de T_{diag} sont les mêmes que les essais d'assèchements précédents. Le module de décision considère cette fois sévérité moyenne du défaut. Le prochain défaut testé est un assèchement de membrane à sévérité générée de la même manière que pour les essais précédents. Le processus de diagnostic est effectué avec sur les trois mêmes valeur de T_{diag} .

Le processus de lecture des graphes liés au défaut d'assèchement a déjà fait l'objet d'une présentation dans l'essai précédent. Pour ces nouveaux essais, les graphes extraits sont de mêmes natures et ne nécessitent pas d'explication complémentaire. Cette partie fait donc uniquement l'objet de l'analyse et de l'interprétation des essais d'assèchement avec une atténuation par la considération d'une sévérité moyenne. Les graphes sont disponibles en *Annexe C1*.

L'analyse des résultats est une nouvelle fois réalisée *via* les métriques définies dans la section « *Protocoles d'essais* ».

Lors de ces nouveaux essais, 4 décisions à effet rapide ont été nécessaires pour la première et la troisième phase d'atténuation du défaut contre 6 pour la seconde. Les trois essais ont décrémentés la température de la PEMFC. Le second essai a aussi provoqué une augmentation de l'humidité relative de l'oxygène. Du point de vue du nombre d'actions déclenchées, les valeurs de $T_{diag} = 30 s$ et $T_{diag} = 60 s$ sont donc les plus pertinentes.

L'amplitude minimale atteinte lors des trois essais est de 300 SCCM et la température de la PEMFC n'a été diminuée de plus de 5°C. Il est aussi à noter que lors du premier essai, l'amplitude de 300 SCCM a été atteinte à 4 reprises contre 3 et 2 fois pour le second et dernier essai respectivement. Ainsi du point de vue de cette métrique, $T_{diag} = 60 s$ est le plus pertinent.

La décrémentation du débit par une action à effet rapide est rafraîchie à chaque T_{diag} . Pour la première phase d'atténuation, la durée totale pendant laquelle la PEMFC est soumise à une action à effet rapide est d'environ 5 min contre 4 min pour le second essai et 11 minutes pour le troisième. La période $T_{diag} = 15 s$ est la meilleure du point de la durée totale des actions à effet rapides car elle permet l'atténuation du défaut de noyage plus rapidement.

La métrique suivante est utilisée pour comparer le temps nécessaire entre chaque phase d'essai pour un retour en conditions sans défaut. La détermination du délai nécessaire pour le retour en conditions sans défaut a pour point de départ le déclenchement de la première action à effet rapide et comme point d'arrivée la dernière. Il en résulte que le premier essai permet une atténuation définitive en environ 10 min contre 7 min pour le second et 17 min pour le dernier. Dans ce cas, $T_{diag} = 15 s$ est le plus efficace.

Les essais un et trois font intervenir des changements de débit et de température de PEMFC. Chacune de ces phases de test utilise donc 2 capteurs. Le second essai faisant aussi intervenir l'humidité relative de l'oxygène, induit l'utilisation de deux capteurs supplémentaires.

Tout comme pour les essais d'assèchement à faible sévérité, la dernière métrique consiste à l'analyse l'impact du processus d'atténuation de défaut sur la dégradation de la PEMFC. L'utilisation des courbes de polarisation pour cette étude ne sont pas disponibles.

Les Tableaux C2.1, C2.2 et C2.3 récapitulent les données liées aux essais d'assèchement à faible niveau de sévérité.

Nombre d'action à effet rapide	Nombre d'action à effet différé	Consignes maximales des actions à effet rapide (SCCM)	Actions à effet différé	Délais du retour définitif en conditions sans défaut
4	1	4 x 300	1 x -5°C	10 min

Tableau C2.1 : Récapitulatif des actions menées lors du premier essai AFTC.

Nombre d'action	Nombre d'action à effet différé	Consignes maximales des actions à effet rapide (SCCM)			Actions à effet différé		Délais du retour définitif en conditions sans défaut
6	2	2 x 550	1 x 420	3 x 300	-5°C	+10%	7 min

Tableau C2.2 : Récapitulatif des actions menées lors du deuxième essai AFTC.

Nombre d'action à effet rapide	Nombre d'action à effet différé	Consignes maximales des actions à effet rapide (SCCM)		Actions à effet différé	Délais du retour définitif en conditions sans défaut
4	1	2 x 550	2 x 300	1 x -5°C	17 min

Tableau C2.3 : Récapitulatif des actions menées lors du troisième essai AFTC.

Outre les durées d'atténuations et le nombre d'actions nécessaires, il est possible de voir que les décisions qui consistent à diminuer le débit d'oxygène sont en grande partie inefficaces. Certes, celle-ci permettent l'arrêt de la chute de la tension de PEMFC. Cependant lors du retour au point de fonctionnement original, la chute de la tension reprend immédiatement. Ce type de décision ne permet donc pas une atténuation durable mais permet le ralentissement de la chute de tension sans pour autant l'arrêter.

L'action de modification de la température de PEMFC a un effet très fort sur ces performances. En effet à chaque décrémentation de température, la PEMFC quitte peu de temps après la zone de défaut.

Le déclenchement de l'outil de diagnostic pour $T_{diag} = 15 s$ est trop courte pour les changements opérés sur la température et l'humidité relative soient effectifs. En effet, ces deux grandeurs répondent à des dynamiques thermiques et sont par conséquent assez lentes. Le défaut se retrouve tout de même atténué sans l'utilisation d'une tierce décision à effet différé. Cela a été possible car les décisions à effet rapide sont plus efficaces que lors d'une faible sévérité car elles décrémentent plus fortement le débit d'oxygène.

Références :

- [1] R. Warren, & J. Price, J. Vanderwal, & S. Cornelius, H. Sohl, and * R Warren, “The implications of the United Nations Paris Agreement on climate change for globally significant biodiversity areas.”
- [2] R. Maamri, “UNIVERSITÉ DU QUÉBEC DOCTORA T PRÉSENTÉ À,” Québec, 2014.
- [3] M.-C. Péra, D. Hissel, H. Gualous, and C. Turpin, *Composants électrochimiques / électrolyseur, pile à combustible, supercondensateur, accumulateur*. 2014.
- [4] S.-Y. Ahn *et al.*, “Performance and lifetime analysis of the kW-class PEMFC stack,” *J. Power Sources*, vol. 106, no. 1–2, pp. 295–303, Apr. 2002.
- [5] P. STEVENS, F. NOVEL-CATTIN, A. HAMMOU, C. LAMY, and M. CASSIR, “Piles à combustible,” *Ref TIP301WEB - “Conversion l’énergie électrique,”* Aug. 2000.
- [6] A. Hermann, T. Chaudhuri, and P. Spagnol, “Bipolar plates for PEM fuel cells: A review,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 30, no. 12, pp. 1297–1302, Sep. 2005.
- [7] S. Piechowiak, “Intelligence artificielle et diagnostic,” *Électronique - Autom. / Autom. ingénierie système*, 2003.
- [8] H. Li *et al.*, “A review of water flooding issues in the proton exchange membrane fuel cell,” *J. Power Sources*, vol. 178, no. 1, pp. 103–117, 2008.
- [9] N. Yousfi-Steiner, P. Moçotéguy, D. Candusso, and D. Hissel, “A review on polymer electrolyte membrane fuel cell catalyst degradation and starvation issues: Causes, consequences and diagnostic for mitigation,” *J. Power Sources*, vol. 194, no. 1, pp. 130–145, 2009.
- [10] D. Lee and J. Bae, “Visualization of flooding in a single cell and stacks by using a newly-designed transparent PEMFC,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 422–435, 2012.
- [11] F. Barbir, H. Gorgun, and X. Wang, “Relationship between pressure drop and cell resistance as a diagnostic tool for PEM fuel cells,” *J. Power Sources*, vol. 141, no. 1, pp. 96–101, 2005.
- [12] R. E. Silva *et al.*, “Proton Exchange Membrane Fuel Cell Operation and Degradation in Short-Circuit,” *Fuel Cells*, vol. 14, no. 6, pp. 894–905, Dec. 2014.
- [13] N. Yousfi-Steiner, P. Moçotéguy, D. Candusso, D. Hissel, A. Hernandez, and A. Aslanides, “A review on PEM voltage degradation associated with water management: Impacts, influent factors and characterization,” *J. Power Sources*, vol. 183, no. 1, pp. 260–274, 2008.
- [14] J. Wu, X. Zi Yuan, H. Wang, M. Blanco, J. J. Martin, and J. Zhang, “Diagnostic tools in PEM fuel cell research: Part II: Physical/chemical methods,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 6, pp. 1747–1757, 2008.
- [15] J. Wu, X. Z. Yuan, H. Wang, M. Blanco, J. J. Martin, and J. Zhang, “Diagnostic tools in PEM fuel cell research: Part I Electrochemical techniques,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 6, pp. 1735–1746, 2008.
- [16] D. Lee and J. Bae, “Visualization of flooding in a single cell and stacks by using a newly-designed transparent PEMFC,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 37, no. 1, pp. 422–435, Jan. 2012.
- [17] W. Schmittinger and A. Vahidi, “A review of the main parameters influencing long-term performance and durability of PEM fuel cells,” *J. Power Sources*, vol. 180, no. 1, pp. 1–14, 2008.

- [18] A. Taniguchi, T. Akita, K. Yasuda, and Y. Miyazaki, "Analysis of degradation in PEMFC caused by cell reversal during air starvation," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 9, pp. 2323–2329, 2008.
- [19] N. Yousfi Steiner *et al.*, "Application of Fault Tree Analysis to Fuel Cell diagnosis," *Fuel Cells*, vol. 12, no. 2, pp. 302–309, Apr. 2012.
- [20] A. Hernandez and D. Hissel, "Méthodes de diagnostic de systèmes multiphysiques."
- [21] M. Shao, X.-J. Zhu, H.-F. Cao, and H.-F. Shen, "An artificial neural network ensemble method for fault diagnosis of proton exchange membrane fuel cell system," *Energy*, vol. 67, pp. 268–275, 2014.
- [22] N. Yousfi Steiner, D. Hissel, P. Moçotéguy, and D. Candusso, "Diagnosis of polymer electrolyte fuel cells failure modes (flooding & drying out) by neural networks modeling," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 36, no. 4, pp. 3067–3075, 2011.
- [23] L. A. M. Riascos, M. G. Simoes, and P. E. Miyagi, "A Bayesian network fault diagnostic system for proton exchange membrane fuel cells," *J. Power Sources*, vol. 165, no. 1, pp. 267–278, 2007.
- [24] C. Francia, V. S. Ijeri, S. Specchia, and P. Spinelli, "Estimation of hydrogen crossover through Nafion® membranes in PEMFCs," *J. Power Sources*, vol. 196, no. 4, pp. 1833–1839, Feb. 2011.
- [25] H. P. Ma, H. M. Zhang, J. Hu, Y. H. Cai, and B. L. Yi, "Diagnostic tool to detect liquid water removal in the cathode channels of proton exchange membrane fuel cells," 2006.
- [26] E. Pahon, N. Yousfi Steiner, S. Jemei, D. Hissel, and P. Moçoteguy, "A signal-based method for fast PEMFC diagnosis," *Appl. Energy*, vol. 165, pp. 748–758, 2016.
- [27] C. Damour, M. Benne, B. Grondin-Perez, M. Bessafi, D. Hissel, and J.-P. Chabriat, "Polymer electrolyte membrane fuel cell fault diagnosis based on empirical mode decomposition," *J. Power Sources*, vol. 299, pp. 596–603, 2015.
- [28] B. Legros, P.-X. Thivel, Y. Bultel, and R. P. Nogueira, "First results on PEMFC diagnosis by electrochemical noise," 2011.
- [29] M. Le Ny *et al.*, "Diagnostic de piles à combustible par mesure du champ magnétique proche," Jul. 2012.
- [30] Z. Zheng, R. Petrone, M. C. Pera, D. Hissel, M. Becherif, and C. Pianese, "Diagnosis of a commercial PEM fuel cell stack via incomplete spectra and fuzzy clustering," in *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2013, pp. 1595–1600.
- [31] Z. Li, S. Giurgea, R. Outbib, and D. Hissel, "Online Diagnosis of PEMFC by Combining Support Vector Machine and Fluidic Model," *Fuel Cells*, vol. 14, no. 3, pp. 448–456, Jun. 2014.
- [32] J. Hua, L. Lu, M. Ouyang, J. Li, and L. Xu, "Proton exchange membrane fuel cell system diagnosis based on the signed directed graph method," *J. Power Sources*, vol. 196, no. 14, pp. 5881–5888, 2011.
- [33] S. Giurgea, R. Tirnovan, D. Hissel, and R. Outbib, "An analysis of fluidic voltage statistical correlation for a diagnosis of PEM fuel cell flooding," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 11, pp. 4689–4696, 2013.
- [34] U. Departement *et al.*, "Electrochemical Impedance Spectroscopy for the on-board diagnosis of PEMFC via on-line identification of Equivalent Circuit Model parameters," 2013.
- [35] R. Petrone *et al.*, "A review on model-based diagnosis methodologies for PEMFCs," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 17, pp. 7077–7091, 2013.
- [36] M. Gholami, H. Esen, H. Schioler, and J. Stoustrup, "A Fault-Tolerant Control Architecture for Different Battery Topologies in Electrified Vehicles."
- [37] F.-C. Wang, P.-C. Kuo, and H.-J. Chen, "Control design and power management of a

- stationary PEMFC hybrid power system,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 38, no. 14, pp. 5845–5856, 2013.
- [38] W. Garcia-Gabin, F. Dorado, and C. Bordons, “Real-time implementation of a sliding mode controller for air supply on a PEM fuel cell,” *J. Process Control*, vol. 20, no. 3, pp. 325–336, 2010.
- [39] C. Kunusch, P. F. Puleston, M. A. Mayosky, and J. Riera, “Sliding Mode Strategy for PEM Fuel Cells Stacks Breathing Control Using a Super-Twisting Algorithm,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 17, no. 1, pp. 167–174, Jan. 2009.
- [40] P. Li, J. Chen, T. Cai, and B. Zhang, “Adaptive control of air delivery system for PEM fuel cell using backstepping,” *Control Conf. (ASCC), 2011 8th Asian*, pp. 1282–1287, 2011.
- [41] Z. Liu, L. Li, Y. Ding, H. Deng, and W. Chen, “Modeling and control of an air supply system for a heavy duty PEMFC engine,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 36, pp. 16230–16239, 2016.
- [42] V. M. Sanchez, R. Barbosa, L. G. Arriaga, and J. M. Ramirez, “Real time control of air feed system in a PEM fuel cell by means of an adaptive neural-network,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 29, pp. 16750–16762, 2014.
- [43] M. N. SID, M. BECHERIF, K. MAROUANI, and H. ALLOUI, “Gestion de l’énergie d’un système hybride pile combustible/batterie basée sur la commande optimale,” *Mediterr. J. Model. and Simulation*, pp. 010–024, 2015.
- [44] M. M. Barzegari, E. Alizadeh, and A. H. Pahnabi, “Grey-box modeling and model predictive control for cascade-type PEMFC,” *Energy*, vol. 127, pp. 611–622, 2017.
- [45] L. Zhang, M. Pan, and S. Quan, “Model predictive control of water management in PEMFC,” *J. Power Sources*, vol. 180, no. 1, pp. 322–329, 2008.
- [46] M. Blanke, M. Kinnaert, J. Lunze, and M. Staroswiecki, *Diagnosis and Fault-Tolerant Control With contributions by Jochen Schröder*. 2006.
- [47] L. Beauguitte, “L’analyse des graphes bipartis,” 2013.
- [48] “Structural analysis of fault isolability in the DAMADICS benchmark,” *Control Eng. Pract.*, vol. 14, no. 6, pp. 597–608, Jun. 2006.
- [49] D. Hissel, M.-C. Péra, A. Bouscayrol, and D. Chrenko, “Représentation énergétique macroscopique d’une pile à combustible,” *Rev. Int. génie électrique*, vol. 10, no. 4–5, pp. 603–623, Sep. 2008.
- [50] L. Boulon, K. Agbossou, D. Hissel, P. Sicard, A. Bouscayrol, and M.-C. Péra, “A macroscopic PEM fuel cell model including water phenomena for vehicle simulation,” *Renew. Energy*, vol. 46, pp. 81–91, 2012.
- [51] L. Boulon, D. Hissel, A. Bouscayrol, and M. C. Péra, “From modeling to control of a PEM fuel cell using energetic macroscopic representation,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, no. 6, pp. 1882–1891, 2010.
- [52] H. (1803-1858) Darcy, “Les fontaines publiques de la ville de Dijon : exposition et application des principes à suivre et des formules à employer dans les questions de distribution d’eau... / par Henry Darcy,...,” 1856.
- [53] Jay Tawee Pukrushpan, “Modeling And Control Of Fuel Cell Systems And Fuel Processors,” *Mech. Eng.*, 2003.
- [54] J. T. Hinatsu, “Water Uptake of Perfluorosulfonic Acid Membranes from Liquid Water and Water Vapor,” *J. Electrochem. Soc.*, vol. 141, no. 6, p. 1493, 1994.
- [55] C. Lebreton, “Contrôle tolérant aux fautes en ligne d’une pile à combustible de type PEM. Contribution à la gestion de l’eau.” 2015.
- [56] Y. Zhang and J. Jiang, “Bibliographical review on reconfigurable fault-tolerant control systems,” *Annu. Rev. Control*, vol. 32, no. 2, pp. 229–252, 2008.
- [57] Mohammed Oudghiri and Mohammed, “Commande multi - mo eles tolérante aux

- défauts : Application au contrôle de la dynamique d' un véhicule automobile.”
- [58] L. Maharjan, T. Yamagishi, H. Akagi, and J. Asakura, “Fault-tolerant control for a battery energy storage system based on a cascade PWM converter,” in *2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2009, pp. 945–950.
 - [59] J. Kim and Y. Tak, “Implementation of discrete wavelet transform-based discrimination and state-of-health diagnosis for a polymer electrolyte membrane fuel cell,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 39, no. 20, pp. 10664–10682, Jul. 2014.
 - [60] J. Chen, D. Zhou, C. Lyu, and C. Lu, “A novel health indicator for PEMFC state of health estimation and remaining useful life prediction,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 42, no. 31, pp. 20230–20238, Aug. 2017.
 - [61] P. BORNE and F. ROTELLA, “Commande optimale,” *Ref TIP660WEB - “Automatique ingénierie système,”* Jul. 1996.
 - [62] T. Hicham and S. Youcef, “Contrôle par mode glissant: Observation et estimation paramétrique d’une machine à induction avec défauts,” 2016.
 - [63] M. Hilairet, M. Ghanes, O. Béthoux, V. Tanasa, J.-P. Barbot, and D. Normand-Cyrot, “A passivity-based controller for coordination of converters in a fuel cell system,” *Control Eng. Pract.*, vol. 21, no. 8, pp. 1097–1109, Aug. 2013.
 - [64] Y. Zhang and J. Jiang, “Integrated Design of Reconfigurable Fault-Tolerant Control Systems,” *J. Guid. Control. Dyn.*, vol. 24, no. 1, pp. 133–136, Jan. 2001.
 - [65] C. Lebreton *et al.*, “Fault Tolerant Control Strategy applied to PEMFC water management,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 33, pp. 10636–10646, 2015.
 - [66] L. Xu, J. Li, M. Ouyang, J. Hua, and X. Li, “Active fault tolerance control system of fuel cell hybrid city bus,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 35, no. 22, pp. 12510–12520, 2010.
 - [67] F. Zidani, M. E. H. Benbouzid, D. Diallo, and A. Benchaib, “Active fault-tolerant control of induction motor drives in EV and HEV against sensor failures using a fuzzy decision system,” in *IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC’03.*, vol. 2, pp. 677–683.
 - [68] X. Zhang, T. Parisini, and M. M. Polycarpou, “Adaptive Fault-Tolerant Control of Nonlinear Uncertain Systems: An Information-Based Diagnostic Approach,” *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 49, no. 8, 2004.
 - [69] T. Miksch, A. Gambier, and E. Badreddin, “Real-time Implementation of Fault-tolerant Control Using Model Predictive Control,” 2008.
 - [70] G. Li and Q. Zhao, “Adaptive Fault-Tolerant Shape Control for Nonlinear Lipschitz Stochastic Distribution Systems,” *J. Franklin Inst.*, 2017.
 - [71] H. Badihi, Y. Zhang, and H. Hong, “Model-based Active Fault-tolerant Cooperative Control in an Offshore Wind Farm,” *Energy Procedia*, vol. 103, pp. 46–51, Dec. 2016.
 - [72] M. Shahbazi, S. Saadate, P. Poure, and M. Zolghadri, “Open-circuit switch fault tolerant wind energy conversion system based on six/five-leg reconfigurable converter,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 137, pp. 104–112, 2016.
 - [73] Fei Su and K. Chakrabarty, “Design of Fault-Tolerant and Dynamically-Reconfigurable Microfluidic Biochips,” in *Design, Automation and Test in Europe*, pp. 1202–1207.
 - [74] D. Guilbert, A. Gaillard, A. N’Diaye, and A. Djerdir, “Fault-tolerant control for PEMFC and its DC/DC converter,” in *2015 5th International Youth Conference on Energy (IYCE)*, 2015, pp. 1–6.
 - [75] D. Guilbert, M. Guarisco, A. Gaillard, A. N’Diaye, and A. Djerdir, “FPGA based fault-tolerant control on an interleaved DC/DC boost converter for fuel cell electric vehicle applications,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 45, pp. 15815–15822, 2015.
 - [76] C. Lebreton, C. Damour, M. Benne, B. Grondin-Perez, and J.-P. Chabriat, “Passive Fault Tolerant Control of PEMFC air feeding system,” 2016.
 - [77] X. Wu and B. Zhou, “Fault tolerance control for proton exchange membrane fuel cell

- systems,” *J. Power Sources*, vol. 324, pp. 804–829, 2016.
- [78] S. Fukuhara, N. Marx, K. Ettahir, L. Boulon, Y. Ait-Amirat, and M. Becherif, “A lumped fluidic model of an anode chamber for fault tolerant strategy design,” *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 9, pp. 5037–5047, 2016.
- [79] M. Tekin, “Contribution à l’optimisation énergétique d’un système pile à combustible embarqué,” <http://www.theses.fr>, Jan. 2004.
- [80] E. Dijoux, N. Y. Steiner, M. Benne, M.-C. Péra, and B. G. Pérez, “A review of fault tolerant control strategies applied to proton exchange membrane fuel cell systems,” *J. Power Sources*, vol. 359, pp. 119–133, 2017.
- [81] M. Norgaard, N. K. Poulsen, and O. Ravn, “NNSYSID and NNCTRL - MATLAB Tools for System Identification and Control with Neural Networks,” 1997.
- [81] M. Norgaard, N. K. Poulsen, and O. Ravn, “NNSYSID and NNCTRL - MATLAB Tools for System Identification and Control with Neural Networks,” 1997.